

ЧИСЛО ДВОЙНЫХ ПЕРЕГИБОВ КАК ИНДИКАТОР СТЕПЕНИ СТАРЕНИЯ КАБЕЛЬНЫХ БУМАГ

В процесі експлуатації силових кабелів спостерігається зміна механічних характеристик паперової ізоляції. Крива статистичної щільності розподілу числа подвійних вигинів не зістарених кабелів не є симетричною та одно модальною. Це обумовлено дискретністю структури об'єму ізоляції і відповідає рівню механічній довговічності (ресурсу). Для зістарених кабелів рівень механічній довговічності вироджується. На варіаційних діаграмах числа подвійних вигинів для поясної ізоляції з'являється злом, що відповідає критичному рівню за механічної міцністю. Встановлено критичні рівні числа подвійних вигинів паперової ізоляції силових кабелів напругою 1-10 кВ.

В процессе эксплуатации силовых кабелей наблюдается изменение механических характеристик бумажной изоляции. Кривая статистической плотности распределения числа двойных перегибов несостаренных кабелей – не симметрична и бимодальна. Это обусловлено дискретностью структуры объема изоляции и отвечает уровням механической долговечности (ресурсу). Для состаренных кабелей уровни долговечности вырождаются. На вариационных диаграммах числа двойных перегибов поясной изоляции появляется излом, который отвечает критическому уровню по механической прочности. Установлены критические уровни числа двойных перегибов бумажной изоляции силовых кабелей напряжением 1-10 кВ.

Введение

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 (воды, фуранов) 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 [1, 2].

Механические характеристики – традиционный показатель технических свойств изоляции. Обычно используют относительное удлинение при разрыве $\Delta l/l$ и разрывное напряжение σ_r . Первый параметр удобен для тех материалов, для которых в исходном состоянии $\Delta l/l$ составляет сотни процентов – полиэтилен (ПЭ), поливинилхлоридные (ПВХ) пластикаты. Для композиций кабельного ПЭ исходное значение относительного удлинения достигает $\Delta l/l = 400-450\%$. По мере старения изоляции величина $\Delta l/l$ монотонно снижается. Критерием предельного состояния таких материалов является снижение $\Delta l/l$ до величины 50% [3].

Для кабельных бумаг величина $\Delta l/l$ даже в исходном состоянии составляет всего 2%. Поэтому использовать данный параметр для оценки технического состояния кабельных бумаг неудобно: диапазон возможного изменения $\Delta l/l$ узок.

Вместе с тем одним из показателей качества кабельных бумаг является число двойных перегибов (N), выдерживаемых до излома. Нормированное значение этого параметра в исходном состоянии (для новых бумаг) – не менее 2000. Измерение числа двойных перегибов выполняется на специальных устройствах – изгибочных (или фальцеровочных) машинах [2]. Полоска бумаги, растягиваемая с усилием 9,8 Н, подвергается изгибам с помощью рамки с прорезью –

фальцера. Число двойных перегибов подсчитывается с помощью механического счетчика. Частота изгибов – 200 изгибов за минуту.

Привлекательность данного метода контроля заключается в том, что он отражает длительную механическую прочность бумаг (испытания одной полоски продолжаются обычно 20-25 минут). Испытания же относительного удлинения при разрыве и разрывного напряжения отражают кратковременные механические свойства бумаг. Кроме того, излом бумаги происходит именно в месте изгиба. Поэтому влияние узла крепления полосок бумаги сводится к минимуму.

При измерениях же $\Delta l/l$ и σ_r образцы часто рвутся в зажимах. Соответствующие результаты приходится исключать из рассмотрения, что приводит к непроизводительной потере образцов, весьма дефицитных в условиях диагностики кабелей, находящихся в эксплуатации.

Из одного отрезка кабеля 1 кВ получается образцов: по 6-8 для каждой из фаз, и по 5 – для поясной изоляции. Для кабеля 6 кВ – аналогично: по 17-18 штук для каждой из фаз, и по 7-8 – для поясной изоляции.

Таким образом, общее число образцов полосок бумаги, получаемых из одного отрезка кабеля длиной 0,2 м, достаточно для получения не только стандартных статистических оценок параметра N (среднего, дисперсии, доверительного интервала), но даже интегральной функции распределения (ИФР). 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. Это необходимо для расчета показателей надежности выполненных оценок технического состояния БПИ.

Отрезки кабелей, необходимые для лабораторных исследований, отбирают во время ремонтных работ.

Цель статьи: динамика изменений кривых статистического распределения ресурса (долговечности) поясной и фазной изоляции силовых кабелей напряжением 1-10 кВ в процессе механического старения.

Механическое старение кабельных бумаг

Механическое старение характерно для твердой изоляции. Температурные коэффициенты линейного теплового расширения кабельной бумаги и токопроводящих жил, металлических оболочек кабеля – разные. В результате при изменениях температуры меняются термомеханические напряжения в диэлектрике. Длительное действие термомеханических напряжений, особенно в условиях одновременного действия тепловых и электрических полей, также ведет к образованию микродефектов в твердой изоляции. Дальнейшая эволюция их часто приводит к пробое диэлектрика. Старение диэлектрика под действием внутренних термомеханических напряжений или внешних механических воздействий описывается формулой Журкова [4]:

$$\tau = A \cdot e^{-\frac{W - \gamma \sigma}{kT}}, \quad (1)$$

где σ – механическое напряжение в диэлектрике, Н/м²; γ – так называемый структурно-чувствительный коэффициент; W – энергия активации процесса механической деструкции; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; A – эмпирический коэффициент.

Формула Журкова имеет такой же вид, как и формула Аррениуса для теплового старения изоляции. В силовых кабелях напряжением до 10 кВ преобладает тепловое, а не электрическое старение бумажно-пропитанной изоляции.

Действие механических напряжений сводится к уменьшению энергии активации процесса деструкции, из-за чего интенсивность старения увеличивается.

При измерениях числа двойных перегибов наблюдается разброс результатов, даже если условия испытаний остаются неизменными. Он обусловлен множеством случайных факторов, которые всегда присутствуют и оказывают воздействие на результаты измерений.

Прежде всего, для числа двойных перегибов характерен значительный размах экспериментальных данных для одного и того же образца кабеля, достигающий 2-4 порядков (рис. 1). На рис. 1 приведены интегральные функции распределения логарифма остаточной прочности на излом полосок фазной (1, 1') и поясной (2, 2') изоляции силовых кабелей ААШВ разной степени: 1, 2 – менее состаренные, 1', 2' – предельно состаренные. Масштаб – логарифмически нормальный.

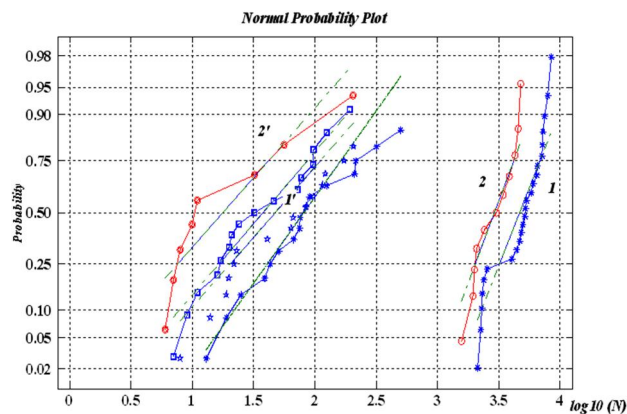


Рис. 1

Безусловно, что большой разброс экспериментальных значений не может быть связан только со статистическими факторами. Решающую роль играют особенности дефектной структуры изоляции кабельной бумаги силовых кабелей.

Неизменность условий при повторении испытаний связана с поддержанием стабильности изгибных напряжений и температуры, а структурная неоднородность материала изоляции – кабельной бумаги проявляется в изменчивости структурно-чувствительного коэффициента γ .

Таким образом, статистический разброс измененных значений числа двойных перегибов связан, по крайней мере, с двумя причинами. Первая обусловлена неизбежными случайными погрешностями измерений и невозможностью абсолютно точного воспроизведения условий обследований, в частности, в поддержании постоянной температуры. Вторая причина – более глубокая и состоит в том, что разрушение бумаги обусловлено развитием в ней имеющихся структурных и технологических дефектов различной степени опасности. Появление того или иного дефекта в образце – случайное событие. Отсюда – неоднозначность результатов испытаний, даже в случае отсутствия случайных погрешностей. Первый фактор можно назвать инструментальным, второй – структурным.

Тогда неточность в определении логарифма ресурса (долговечности) $\Delta \lg t$ может быть оценена неравенством с учетом (1):

$$|\Delta \lg t| \leq 0.432 \left[\frac{\gamma}{kT} |\Delta \sigma| + \frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT^2} |\Delta T| + \frac{\sigma}{kT} |\Delta \gamma| \right]. \quad (2)$$

Первые два слагаемых в (2) связаны с нестабильностью условий эксперимента, т.е. действием инструментального фактора. Третье слагаемое связано с неоднородностью структуры, т.е. с действием структурного фактора.

Так как в процессе измерений частота изгибов составляет 200 оборотов/мин., то значения числа двойных перегибов N представляют собой, по сути, механический ресурс τ (долговечность) поясной и фазной бумажно-пропитанной изоляции.

Особенности статистических распределений массивных и тонких образцов

Для полимеров, в том числе и для целлюлозы – природного полимера – основы бумаги, характерна сложная гетерогенная структура на надмолекулярном уровне, которая зависит от технологических особенностей изготовления и воздействующих факторов в процессе эксплуатации. Разрушение полимеров представляется общепринятыми классическими представлениями как критическое событие, наступающее при достижении действующего в образце напряжения некоторой критической величины – предела прочности. В общем случае – функционала тензоров напряжения, деформации, температуры и времени в соответствии с теорией предельного состояния [4, 5].

Так, при одноосном растяжении предел прочности имеет смысл критерия разрушения, который определяет условия наступления разрыва. В случае более сложного, чем одноосное растяжение, напряжен-

ного состояния критерии разрушения усложняются.

Массивные низко- и высокопрочные полимерные образцы (толщиной свыше 100 мкм) содержат начальные микро- и субмикротрещины [4]. Трещины разрушения в таких материалах начинают расти после приложения нагрузки, превышающей безопасную. При этом начальные микротрещины характеризуются распределением их по степени опасности. Рост одной трещины приводит к разгрузке окружающего материала и приостанавливает рост соседних трещин. Поэтому прочность и долговечность полимерных материалов практически определяется ростом одной, реже нескольких самых опасных микро- и субмикротрещин до критической длины, при которой наступает атермическая стадия процесса разрушения.

В прочных и сверхпрочных (бездефектных) полимерах достигается максимально возможная предельная прочность. В исходных материалах дефекты в виде субмикротрещин и микротрещин отсутствуют. Материалы, близкие к такому идеальному сверхпрочному состоянию: бездефектные стеклянные волокна, сверхориентированные полимерные волокна из высокомолекулярного полиэтилена, синтетические высокомолекулярные волокна и нити (СВМ, Тварон, Кевлар) [5]. Они характеризуются прочностью 4-5 ГПа, которая не зависит от масштабного фактора и имеет минимальный (1-2 %) разброс значений при испытании серии образцов. На практике высокопрочные полимерные волокна и пленки имеют сильно выраженную микронеоднородную структуру. Они считаются бездефектными в том смысле, что до нагружения у них отсутствуют микродефекты в виде микро- и субмикротрещин. Их прочность ниже, чем у сверхпрочных материалов, и составляет 1-1,2 ГПа. Таким образом, чем ближе материал к высокопрочному состоянию, тем меньшую роль играют грубые дефекты. В результате для высокопрочных полимерных материалов наблюдается спектр дефектов и соответствующие им спектры прочности и долговечности. *Другими словами, дискретный спектр трещин, наблюдаемый в таких материалах, приводит к полимодальному характеру распределения прочности и долговечности в виде дискретного спектра их уровней на соответствующих кривых распределения прочности и долговечности.*

Дискретные спектры прочности обнаруживаются статистическими методами. С помощью дискретного спектра прочности можно установить детальные различия между процессами разрушения массивных и тонких образцов, к которым относится и кабельная бумага.

Для образцов кабельной бумаги К-120 шириной 15мм разрушающее усилие при растяжении в продольном направлении равно 128 Н. Таким образом, разрывная прочность бумаги толщиной 120 мкм составляет 70МПа, т.е. более, чем на порядок меньше, чем у высокопрочных полимерных волокон и пленок. (Для сравнения: разрушающее усилие при растяжении бумаги электротехнического общего назначения для жгутов межфазного заполнения, для межслоевой изоляции катушек трансформаторов составляет всего 56 Н. Число двойных перегибов для такой бумаги – не менее 340.)

Дефекты в кабельной бумаге присутствуют до на-

чала измерений. Каждый образец (полоска кабельной бумаги фазной или поясной изоляции) характеризуется своим случайным набором дефектов, т.е. случайной функцией распределения дефектов по некоторому характеризующему их набору: характерные размеры, расположение в образце, форма. Вполне очевидно, что вид функции распределения зависит не только от истории образца, но и от его характерных размеров. Причем, чем меньше размеры образца, тем меньше вероятность присутствия в нем грубых дефектов. Другими словами, начиная с некоторых размеров образцов, грубые дефекты вообще не будут наблюдаться ни в одном образце меньших размеров данной серии. Это ведет к существенному различию статистического распределения образцов больших и малых размеров, т.е. при наличии или отсутствии грубых дефектов, по значениям их прочности или долговечности.

Таким образом, статистическое распределение прочности и долговечности, распределение дефектов в образцах зависит от толщины образца. Так, для толстых материалов (толщиной более 100 мкм) можно использовать приближение плоской деформации, для тонких (толщиной менее 100 мкм) – плоского напряжения.

Для толстых образцов кривые распределения имеют (независимо от вида воздействующего фактора: температуры, радиации) – один симметричный максимум [6]. Наличие одного максимума свидетельствует о том, что в массивных образцах субмикротрещины, размер которых меньше 1 мкм, маскируются присутствием более опасных микротрещин с размерами более 1 мкм. Распределения прочности и долговечности массивных образцов – унимодальные. Они описываются нормальным законом (логарифмически-нормальным) или моделью загрязненного нормально-го распределения.

При переходе к тонким образцам вследствие наличия в них субмикро- и микротрещин, размер которых соизмерим с толщиной образца, обнаруживается дискретность прочности или долговечности, проявляющиеся в виде максимумов на кривых распределения. Тонкие образцы (пленки) имеют полимодальные распределения прочности и долговечности.

Образцы кабельной бумаги (фазной и поясной) силовых кабелей напряжением до 10 кВ имеют номинальную толщину 120 мкм. Они занимают промежуточное положение между тонкими и толстыми материалами. Естественно предположить, что статистическое распределение прочности или долговечности таких образцов будет неким усреднением между распределением для толстых и тонких образцов, т.е. оно должно быть, по крайней мере, бимодальным.

Динамика изменений кривых распределения механического ресурса фазной и поясной изоляции в процессе механического старения

На вариационных диаграммах (рис. 2) числа двойных перегибов образцов полосок бумаги несостаренного кабеля наблюдается заметная группировка результатов на горизонтальной площадке (указано стрелкой) – уровне долговечности для фазной изоляции ($\log_{10}(N_f)$). Для поясной изоляции, объем выборки которой меньше, горизонтальные площадки вырожда-

ются. Появление уровней прочности (рис. 2) – максимумов значений числа двойных перегибов для образцов фазной и поясной изоляции силовых кабелей связано именно с действием структурного фактора.

Под уровнем долговечности понимается более или менее четко выраженное значение $\log_{10}(N)$, возле которого группируются измеренные значения числа двойных перегибов.

На кривой статистической плотности распределения (рис. 3) этой площадке соответствует четко выраженный максимум (2). Он расположен в области больших значений логарифма числа двойных перегибов относительно моды статистического распределения числа двойных перегибов (рис. 3, 1), т.е. выборочного значения, имеющего наибольшую частоту. Кривая статистической плотности распределения не является симметричной унимодальной. Наблюдаемый максимум на кривой статистической плотности относится к структуре объема образца. Структура объема обладает большим разнообразием дефектов в смысле степени их опасности.

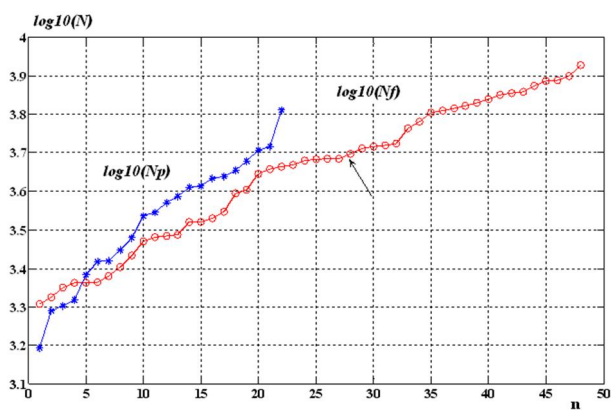


Рис. 2

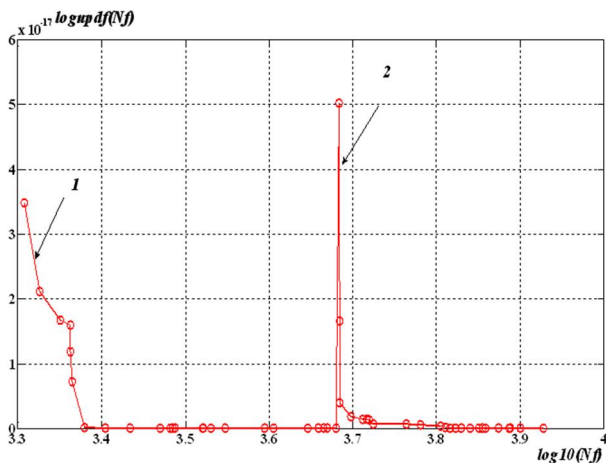


Рис. 3

Наиболее опасными являются дефекты, расположенные на краю или поверхности образцов. Такие дефекты должны проявляться в виде соответствующих двух максимумов на кривых распределения логарифма числа двойных перегибов. Отсутствие этих максимумов можно связать, с одной стороны, недостаточным объемом выборки, а с другой, значительно меньшим количеством этих дефектов для кабельной бумаги, тех-

нологией подготовки образцов и способом крепления их в изгибной машине при проведении испытаний.

Дефектностью края и поверхности образцов можно регулировать. Это достигается, например, технологическими условиями формования полимера, вырубкой образцов при подготовке к испытаниям, т.е. можно получать образцы с регулируемым разбросом ресурса. Дефектность объема контролировать труднее, т.к. она определяется внутренними структурными свойствами полимера (целлюлозы).

Уровни прочности обусловлены наличием структурной иерархии в виде набора микродефектов. Последние, в свою очередь, обусловлены надмолекулярным гетерогенным строением природного полимера – целлюлозы, которое проявляется в виде чередующихся слабых и прочных мест.

Следует сказать, что для массивных образцов изоляции не наблюдаются уровни прочности (долговечности). Для них характерна картина унимодального симметричного распределения, обусловленная чисто статистическими факторами [4].

Таким образом, уровни прочности обусловлены вполне определенными физическими причинами. Естественно, что они реагируют на внешние факторы: температуру, радиацию, т.е. в процессе старения кабельной бумаги (органического полимера) они сдвигаются в область меньших значений и в случае предельно состаренной изоляции – вырождаются (рис. 4, 5).

На вариационной диаграмме ($\log_{10}(NP)$) (рис. 4) для поясной изоляции состаренного кабеля ($\log_{10}(Np)$) наблюдается излом при $n = 5$ и $\log_{10}(Np) = 1$, т.е. при $N = 10$. Для фазной изоляции $\log_{10}(Nf)$ изломов не наблюдается.

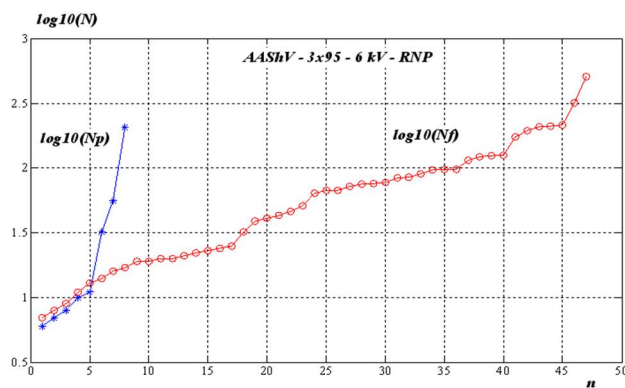


Рис. 4

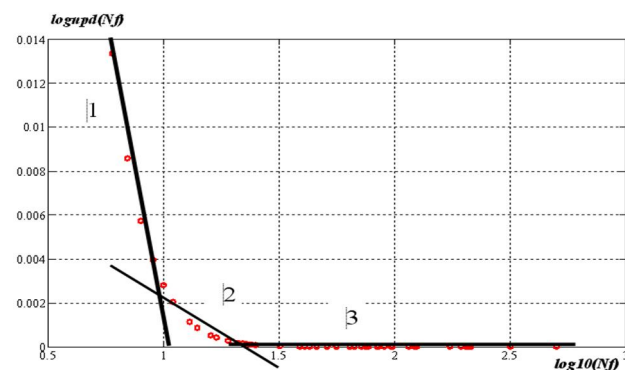


Рис. 5

Наблюдаемую обобщенную кривую распределения для фазной и поясной изоляции предельно-состаренного кабеля (рис. 2, 5) можно представить суммой двух экспонент (1, 2) и постоянной составляющей (3). Первые две составляющие (1, 2, рис. 5) связаны с поясной изоляцией, третья – с фазной (3, рис. 5).

На основании вариационной диаграммы и кривой статистической плотности распределения числа двойных перегибов можно получить критерий предельного состояния бумажно-пропитанной изоляции по механическим характеристикам. Он соответствует уменьшению числа двойных перегибов в 100-200 раз относительно исходного состояния:

$$N = N_0 / (100 - 200) = (2000 - 4000) / (200) = 10 - 20,$$

где N_0 – указанный показатель для новых кабельных бумаг.

Таким образом, в качестве критического значения числа двойных перегибов предельно состаренной кабельной бумаги принимается значение $N = 10$.

Заключение

Таким образом, в процессе эксплуатации и теплового старения наблюдается более интенсивное старение изоляции. Оно приводит к механическому старению фазной и поясной изоляции. Причем интенсивность механического старения больше для поясной изоляции. В результате появляется различие в числе двойных перегибов для поясной и фазной изоляции силовых кабелей.

Кривая статистической плотности распределения числа двойных перегибов кабельной изоляции несостаренных кабелей не является симметричной унимодальной. Наблюдаемый максимум связан с дискретностью структуры объема изоляции и соответствует уровню долговечности, т.е. четко выраженному значению числа двойных перегибов, возле которого группируются измеренные значения.

Для предельно состаренных кабелей уровень долговечности вырождается.

На вариационных диаграммах числа двойных перегибов для поясной изоляции предельно состаренных кабелей наблюдается излом. Кривая статистической плотности распределения числа двойных перегибов представляется суммой двух экспонент для поясной изоляции и постоянной составляющей для фазной.

По результатам механического старения установлены критерии предельного состояния бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей. Они определяются уменьшением числа двойных перегибов в 100-200 раз относительно исходного нового состояния. Критическое значение числа двойных перегибов предельно состаренной кабельной изоляции равно 10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Москвитин Е.С. Оценка технического состояния высоковольтных кабелей с бумажно-масляной изоляцией по числу двойных перегибов / Е.С.Москвитин // Вестник. НТУ "ХПИ". – № 34. – 2006. – С. 34-40.
3. Основы кабельной техники: [учебник для студ. высш. учебн. заведений] / В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный. – М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 432 с.
4. Бартнев Г.М. / Физика полимеров/ Г.М. Бартнев, С.Я. Френкель // Под ред. д-ра физ.-мат. наук А.М. Ельашевича. – Л.: Химия, 1990. – 432 с.
5. Практикум по физике и химии полимеров / [под ред. Д.х.н. Куренкова В.Ф.]. – М.: Химия, 1990. – 304 с.
6. Жовинский А.Н. Инженерный экспресс-анализ случайных процессов / А.Н. Жовинский, В.Н. Жовинский. – М.: Энергия, 1979. – 112 с.

Bibliography (transliterated): 1. 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. 2. Moskvitin E.S. Ocenka tehniceskogo sostoyaniya vysokovol'tnyh kabelej s bumazhno-maslyanoj izolyaciej po chislu dvojnnyh peregibov / E.S.Moskvitin // Vestnik. NTU "HPI". - № 34. - 2006. - S. 34-40. 3. Osnovy kabel'noj tehniki: [uchebnik dlya stud. vyssh. uchebn. zavedenij] / V.M. Leonov, I.B. Peshkov, I.B. Ryzanov, S.D. Holodnyj. - M.: Izdatel'skij centr "Akademija", 2006. - 432 s. 4. Bartnev G.M. / Fizika polimerov/ G.M. Bartnev, S.Ya. Frenkel' // Pod red. d-ra fiz.-mat. nauk A.M. El'yashevicha. - L.: Himiya, 1990. - 432 s. 5. Praktikum po fizike i himii polimerov / [pod red. D.h.n. Kurenkova V.F.]. - M.: Himiya, 1990. - 304 s. 6. Zhovinskij A.N. Inzhenernyj `ekspress-analiz sluchajnyh processov / A.N. Zhovinskij, V.N. Zhovinskij. - M.: `Energiya, 1979. - 112 s.

Поступила 17.01.2011

*Беспрозванных Анна Викторовна, д.т.н., проф.,
Москвитин Евгений Сергеевич*
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
e-mail: bezprozvannyh@kpi.kharkov.ua

Bezprozvannyh A.V., Moskvitin E.S.

Double-kink number as an indicator of degree of cable paper ageing.

During power cables operation, degradation of paper isolation mechanical characteristics is observed. The statistical distribution density curve for the double-kink number of non-aged cables is non-symmetric and bimodal. It results from the discrete structure of cable isolation volume and corresponds to levels of mechanical durability (resource). For ageing cables, durability levels are degenerated. Variation diagrams of the double-kink number of cable wrapping display a break which corresponds to the critical level of mechanical durability. Critical levels for the double-kink number of paper isolation of 1-10 kV power cables are specified.

Key words – power cables, mechanical ageing, paper insulation, double kinks, mechanical durability, resource levels, statistical density of distribution, variation diagrams, critical levels of double-kink number.