

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТАРЕЛЬЧАТЫХ ФАРФОРОВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Дано обґрунтування ефективності відбраковування дефектних тарільчастих фарфорових ізоляторів за критерієм $\text{tg}\delta \geq 0,08$. Показана можливість оцінки стану ізоляції і залишкового ресурсу ізоляторів на діючій залізниці шляхом вибіркового виміру $\text{tg}\delta$.

Дано обоснование эффективности отбраковки дефектных тарельчатых изоляторов из фарфора по критерию $\text{tg}\delta \geq 0,08$. Показана возможность оценки состояния изоляции и остаточного ресурса изоляторов на линии путем выборочного измерения $\text{tg}\delta$.

The efficiency of sorting of defective dish-shaped porcelain insulators on the criterion of $\text{tg}\delta \geq 0,08$ is justified. It is demonstrated the possibility of estimation of the insulation condition and remaining resource of the insulators on a railway line under operation by means of selective measurement of $\text{tg}\delta$.

В контактных сетях железных дорог особую проблему представляют процессы накопления дефектов в фарфоровых изоляторах, когда уровень отказов изоляторов достигает границы, выше которой экономически целесообразнее произвести сплошную замену, чем вести профилактические и ремонтные работы по замене отказавших изоляторов.

Состояние изоляторов оценивается по их среднегодовому уровню отказов [1]:

$$z = \frac{n}{N \times T} \text{ (1/год),}$$

где n – количество поврежденных изоляторов;

N – общее количество осмотренных изоляторов;

T – промежуток времени осмотра.

Согласно обобщенным статистическим данным о работе фарфоровых тарельчатых изоляторов в контактных сетях железных дорог стран СНГ, среднегодовой уровень отказов существенно превышает нормированные значения: $z \leq 1 \times 10^{-3}$ 1/год. Вместе с тем реальная повреждаемость контактной сети по причине выхода из строя изоляторов на порядок меньше, чем прогнозируемые значения (табл. 1) [2–4].

Это, прежде всего, связано с тем, что изоляция в контактных сетях обеспечивается заведомо большим запасом по электрической прочности установкой дополнительных изоляторов в гирляндах, а также систематической заменой дефектных изоляторов.

Таблица 1

Показатели повреждаемости контактной сети

Показатели надежности изоляторов	Контактная сеть		Высоковольтная линия на 35кВ
	Постоянный ток, КС 3,3	Переменный ток, КС 27,5	
Количество изоляторов, соответствующих $z \leq 1 \times 10^{-3}$ 1/год, %	29,4	0,0	88,1
Уровень отказов сети, 1/год	$6,8 \times 10^{-3}$	$9,6 \times 10^{-3}$	$0,9 \times 10^{-3}$

Действительно, анализ демонтированных изоляторов и лабораторные исследования показывают, что основным фактором ухудшения фарфоровых изоляторов является механическое воздействие, которому они подвергаются в процессе эксплуатации. При этом конечным

исходом потери работоспособности этих изоляторов является потеря электрической прочности, а не механическое разрушение. В то же время «зануление» изоляторов практически не оказывает влияния на их механическую прочность, что подтверждается многолетней прак-

тикой проведения электромеханических испытаний. Таким образом, надежность работы сети определяется практически внутренней электрической прочностью изоляторов, а не их механической прочностью, и отказы сети обуславливаются электрическим отказом всех последовательно присоединенных изоляторов в гирлянде.

Следовательно, с учетом независимости событий-отказов отдельно взятых изоляторов вероятность безотказной работы сети можно оценивать на основе данных интенсивности отказов изоляторов как:

$$F_r = 1 - z^m,$$

или для удельной интенсивности отказа гирлянды-сети, Z_r :

$$1 - F_r = Z_r = z^m, \quad (1)$$

где m – число последовательно соединенных изоляторов в гирлянде.

Отбраковка изоляторов по величине $\text{tg}\delta$

В соответствии с «Правилами технического обслуживания и ремонта контактной сети электрифицированных железных дорог» ЦЭ-0023, в процессе эксплуатации изоляторы подвергаются сплошному контролю с периодичностью в сетях переменного тока не реже 1-го раза в 3 года, в сетях постоянного тока не реже 1-го

раза в 6 лет. Контроль заключается во внешнем осмотре изоляторов и выявлении нулевых изоляторов с помощью специальной штанги. Однако применением измерительной штанги не удастся обнаружить изоляторы с ослабленной электрической прочностью, для которых внутреннее сопротивление еще превышает десятки МОм, но которые могут пробиться при перенапряжениях.

Одним из параметров, часто используемых в высоковольтной технике при контроле состояния изоляции неразрушающим методом, является тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$. Установлено, что для фарфоровых изоляторов, удовлетворяющих техническим требованиям, значения $\text{tg}\delta$ (измерения проводились электронным мостом на частоте 1000 Гц) с достоверностью 0,90 лежат в диапазоне 0,015...0,030. Под действием долговременных внешних нагрузок исходное распределение $\text{tg}\delta$ смещается в сторону больших значений, что свидетельствует о появлении электрически ослабленных изоляторов [3].

На рис.1 (кривая 1) показан уровень дефектных изоляторов в зависимости от величины их $\text{tg}\delta$, полученный проведением измерений и испытаний около 200 шт. демонтированных изоляторов.

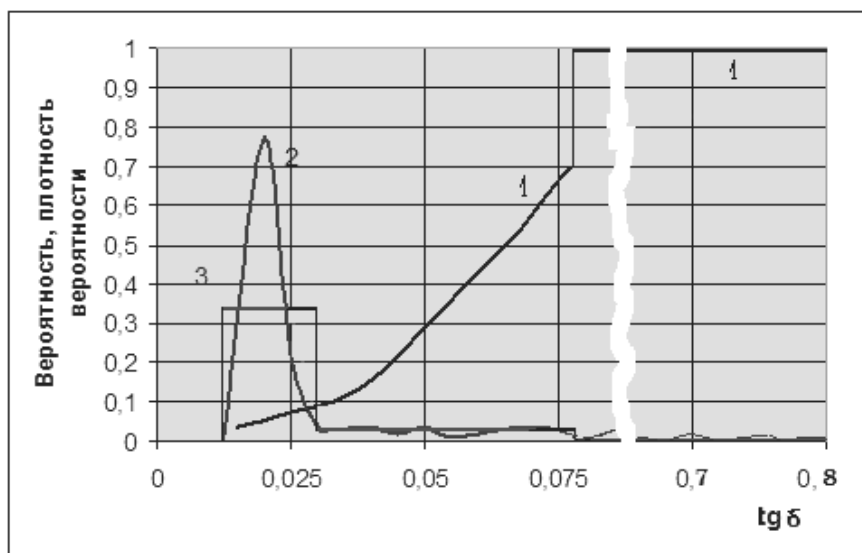


Рис. 1. Уровень дефектных изоляторов и распределение от $\text{tg}\delta$:

1 – уровень отбраковки, $F_{\text{отб}} \times 0,01$; 2 и 3 – распределение $f_{\text{из}}(\text{tg}\delta) \times 0,01$ фактическое и аппроксимированное, соответственно

Как следует из этого рисунка, не менее 80 % изоляторов со значениями $\text{tg}\delta \geq 0,08$ были дефектными, пробивались при контрольных испытаниях воздействием высокого напряжения в

условиях искропотока. Сопоставительные испытания изоляторов с различными методами их контроля показали, что эффективность дефектировки изоляторов по критерию $\text{tg}\delta \geq 0,08$ в

несколько раз выше, чем при методике отбраковки с помощью мегомметра (штангой), и на 15...20 % выше, чем при испытаниях повышенным напряжением переменной частоты 50 кВ.

При неразрушающем способе диагностики всегда существует риск отбраковки кондиционных изделий, α , и риск недоотбраковки дефектных изоляторов, β .

Предлагаемая критическая величина $\text{tg}\delta \geq 0,08$ сама по себе является заведомо высокой по сравнению с диэлектрическими потерями для кондиционных изоляторов, что дает основание оставшиеся непробитыми при контрольных испытаниях отнести в разряд потенциально дефектных изоляторов. Поэтому принимаем, что:

$$\alpha(\text{tg}\delta \geq 0,08) \approx 0. \quad (2)$$

Если известно распределение обследуемых изоляторов по $\text{tg}\delta$, то вероятность того, что на линиях останутся дефектные изоляторы при отбраковке по критерию, в общем случае, $\text{tg}\delta \geq w$ можно вычислить интегрированием произведения этого распределения на вероятность наличия дефектных изоляторов с заданной величиной $\text{tg}\delta$:

$$\beta(\text{tg}\delta) = \int_0^w f_{\text{из}}(\text{tg}\delta) F_{\text{отб}}(\text{tg}\delta) d\text{tg}\delta, \quad (3)$$

где $f_{\text{из}}(\text{tg}\delta)$ – плотность распределения изоляторов по $\text{tg}\delta$, характерный пример приведен на рис. 1, кривая 2;

$F_{\text{отб}}(\text{tg}\delta)$ – вероятность дефектных изоляторов по $\text{tg}\delta$ (рис. 1, кривая 1).

Для приближенной оценки (3) аппроксимируем распределение $f_{\text{из}}$ ступенчатыми функциями в интервалах $\text{tg}\delta$: от 0,0125 до 0,030 – номинальных значений; от 0,30 до 0,08 – высоких значений; 0,08 и более – критических величин. Функцию вероятности отбраковки $F_{\text{отб}}$ заменим линейными функциями для каждого выбранного интервала $\text{tg}\delta$. При этом с учетом допущения (2) принимаем $F_{\text{отб}} = 1$ для $\text{tg}\delta \geq 0,08$. Упрощенный расчет (3) приводит, что в случае отбраковки изоляторов по критерию $\text{tg}\delta \geq 0,08$ риск недоотбраковки дефектных изоляторов для рассматриваемого примера составит:

$$\begin{aligned} \beta(0 \div 0,080) &= \beta(0,0125 \div 0,030) + \\ &+ \beta(0,030 \div 0,080) \approx 0,022 + 0,046 = 0,068. \end{aligned}$$

В то же время объем отбракованных изоляторов из данной выборки, равный β ($\text{tg}\delta \geq 0,080$), достигает 0,27, что значительно превышает долю риска недоотбраковки изоляторов.

Обоснованность диагностики фарфоровых изоляторов посредством измерения $\text{tg}\delta$ иллюстрирует корреляция между реальным уровнем дефектных изоляторов $V_{\text{отб}}$ по электрической прочности и количеством изоляторов с $\text{tg}\delta \geq 0,08$, $V_{\text{тг}}$. На рис. 2 приведены результаты обследований изоляторов, демонтированных на 10 различных дорогах с разными сроками эксплуатации. Объем рассмотренных изоляторов составил от 20 до 150 шт. для каждой зачетной точки на графике рис. 2.

Аппроксимирующая корреляцию рис. 2 функция имеет следующий вид:

$$V_{\text{отб}} = 0,01 \times [-0,502 + 23,6V_{\text{тг}} - 19V_{\text{тг}}^2], \quad (4)$$

где $V_{\text{отб}}$ и $V_{\text{тг}}$ в относительных единицах.

Для практики интерес представляет состояние изоляции гирлянд изоляторов в целом, поэтому с учетом (1) для оценки соотношения между отказом гирлянды изоляторов и уровнем отбраковки изоляторов выражение (4) преобразуем к удобному виду:

$$V_{\text{тг}} = 0,621 \left(1 - \sqrt{0,9315 - 1,365 \times 2m\sqrt{Z_{\Gamma}}} \right). \quad (5)$$

Например, если в качестве уровня отказа гирлянды изоляторов принимаем уровень отказа самой линии, то для приведенных в табл. 1 значений получаем следующие допустимые значения отбраковки по критерию $\text{tg}\delta \geq 0,08$:

$$V_{\text{тг}} \leq 0,18 \text{ для ВЛ35 при } m = 3;$$

$$V_{\text{тг}} \leq 0,28 \text{ для КС27,5 при } m = 3;$$

$$V_{\text{тг}} \leq 0,42 \text{ для КС3,3 при } m = 2.$$

Таким образом, в реальных сетях с надежностью, близкой к данным в табл. 1, уровни дефектных изоляторов оказались выше на порядок и более, чем регламентированные в нормативных документах величины, что, в общем, не противоречит имеющейся статистике отказов изоляторов.

Оценка надежности изоляторов

Координация прочности изоляторов с нагрузкой на линии

Как отмечалось выше, в основной массе динамика отказов высоковольтных линейных фарфоровых изоляторов является функцией

длительности эксплуатации и подчиняется известным статистическим законам. При этом зависимости логарифма срока безопасной работы изоляторов от величины механической нагрузки в первом приближении можно аппрок-

симировать прямыми линиями (рис. 3) [2, 4]. Данное обстоятельство позволяет для оценки надежности изоляторов использовать методику, изложенную в МЭК 1109 применительно к стержневым полимерным изоляторам [5].

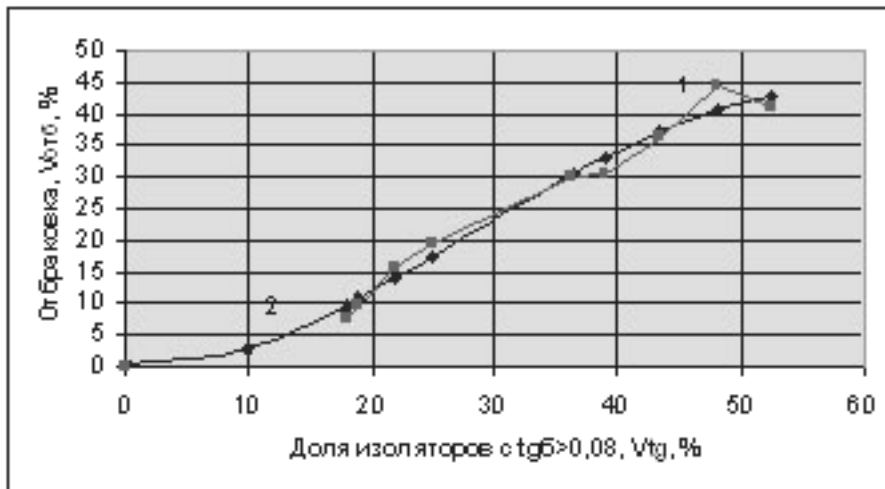


Рис. 2. Соотношение между уровнем отбраковки изоляторов ПФ70В и объема изоляторов с критической величиной $\text{tg}\delta$:
1 – данные опыта эксплуатации; 2 – аппроксимирующая функция

Для обеспечения надежной работы сети осуществляется координация между ожидаемой нагрузкой и прочностной характеристикой используемых изоляторов. Очевидно, что прямая зависимости прочности изолятора от времени их эксплуатации, $P_{\text{из}}/\lg T$ должна располагаться выше аналогичной зависимости для нагрузки, $P_{\text{наг}}/\lg T$, в координатном поле «механическая сила – время».

На рис. 4 приведены прямая 1 – характеристика линии, вытекающая из расчета 30-летнего гарантируемого срока безопасной эксплуатации при номинальной нагрузке, не превышающей 33 % кратковременной нагрузки на линии и прямая 2 – условная характеристика изоляторов.

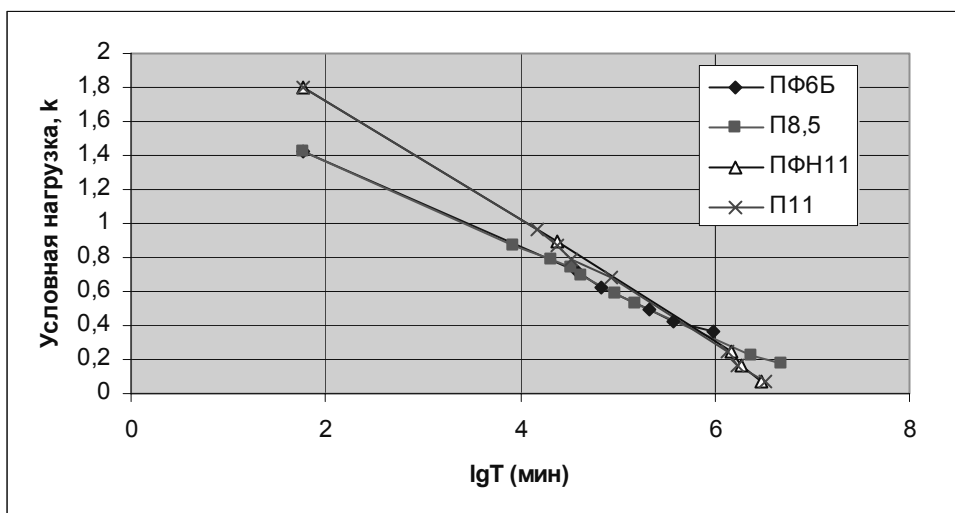


Рис. 3. Результаты стендовых испытаний и опыта эксплуатации изоляторов

Для вновь строящейся линии контроль соответствия условию координации используемых изоляторов выполняется проведением ус-

коренных электромеханических испытаний в течение рекомендуемой МЭК продолжительностью, 96 час ($\lg T = 3,76$) и при нагрузке:

$$P_{\text{наг}}\{3,76\} = P_{\text{наг}}\{0\}[1 - 3,76 \times 0,107] = 0,6P_{\text{наг}}\{0\}, \quad (6)$$

где 0,107 – наклон линии нагрузка/время (см. рис. 4, линия 1).

Испытательная нагрузка $P_{\text{исп}}\{3,76\}$ корректируется в зависимости от количества испы-

туемых изоляторов и предполагаемой достоверностью F_d получаемых результатов:

$$P_{\text{исп}}\{3,76\} = 0,6P_{\text{наг}}\{0\}[1 - \nu \times 0,107], \quad (7)$$

здесь ν – коэффициент, определяемый количеством испытуемых изоляторов и уровнем достоверности результатов.

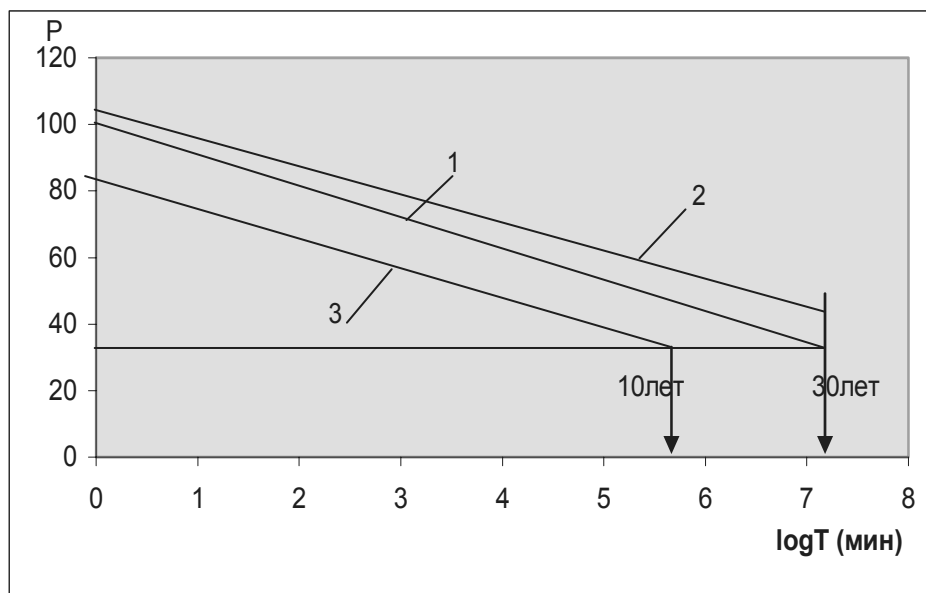


Рис.4. Диаграмма оценки остаточного срока безопасной эксплуатации изоляторов на линии

Предположим, что $F_d = 0,9$ и ускоренному испытанию подвергаются 10 шт. изоляторов, то $\nu = 1,24$. Соответственно, $P_{\text{исп}}\{3,76\} = 0,52P_{\text{наг}}\{0\}$. Тогда, если все изоляторы выдерживают испытания, то принимается, что средняя 96-часовая разрушающая сила с вероятностью 0,9 не меньше $0,52P_{\text{наг}}\{0\}$. При этом коэффициент вариации прочности изоляторов не превышает 0,107. Изоляторы принимаются как соответствующие требуемым характеристикам линии.

В случае отрицательных результатов испытаний принимается решение о невозможности применения данных изоляторов для указанных условий линии.

Оценка состояния изоляторов на действующих линиях и остаточного срока службы

Априори принимается условие однородности исследуемых изоляторов, неизменности механизма снижения прочности. Кроме того, полагаем, что прочностная характеристика исходных изоляторов $P_{\text{из}}/\lg T$ известна и электро-механическая прочность изоляторов, оставшихся после отбраковки, остается на уровне исходных изоляторов.

Производится демонтаж путем случайного отбора изоляторов в количестве не менее 20 шт.

Производится отбраковка изоляторов по критерию $\text{tg} \delta \geq 0,08$ и устанавливается по соотношению (4) уровень дефектных изоляторов $V_{\text{отб}}$ на линии.

Подставляя это значение в (5), можно определить уровень отказа гирлянды с различным числом последовательно соединенных изоляторов.

Для оценки остаточного ресурса изоляторов устанавливаем гарантированную прочность всей совокупности изоляторов в рассматриваемой линии. Для чего принимается, что средняя кратковременная прочность оставшихся после отбраковки изоляторов равна средней кратковременной прочности исходных изоляторов, $P_{\text{ср}}\{0\}$. Поскольку прочность дефектных изоляторов можно принять равной нулю, то средняя прочность всех обследуемых изоляторов, $P_{\text{ср}\cdot\Sigma}$, окажется меньше на величину $1 - V_{\text{отб}}$, то есть:

$$P_{\text{ср}\cdot\Sigma} = P_{\text{ср}}\{0\}[1 - V_{\text{отб}}]. \quad (7)$$

Гарантируемая с общепринятой вероятностью 0,9 кратковременная прочность обследуемых изоляторов вычисляется по следующему выражению:

$$P_{\text{ср.}\Sigma} \geq P_{\text{ср}}\{0\} [1 - V_{\text{отб}}] - v \times S, \quad (8)$$

где v – корректирующий коэффициент;

S – среднеквадратичное отклонение кратковременной прочности исходных изоляторов.

Полученное значение $P_{\text{ср.}\Sigma}$ для $F_d = 0,9$, отнесенное к кратковременной нагрузке на линии, $P_{\text{наг}}\{0\}$ в %, устанавливается на координатной оси P рис. 4, и от этой точки проводится наклонная прямая 3, параллельная линии зависимости $P_{\text{из}}/\lg T$ (см. рис. 4, прямая 2) до пересечения с горизонтальной линией номинальной (длительной) нагрузки. Тогда остающийся срок безопасной работы определяется путем проецирования этой точки на ось времени.

Пример. На рис. 2 приведен случай отбраковки по критерию $\text{tg}\delta \geq 0,08$, равной 24 % демонтированных изоляторов. Данному уровню дефектности изоляторов соответствует гарантированная прочность

$$P_{\text{ср.}\Sigma}\{0,9\} = 82 \% P_{\text{наг}}\{0\}.$$

В этом случае срок безопасной эксплуатации изоляторов составляет около 10 лет. Вероятность отказа гирлянды из изоляторов оценивается величиной 0,013.

Выводы, рекомендации

Тангенс угла диэлектрических потерь является одним из наиболее легко определяемых и, в то же время, информативных параметров диагностики состояния внутренней электрической прочности фарфоровых тарельчатых изоляторов.

Установлена корреляция между уровнем изоляторов с повышенными значениями

$\text{tg}\delta \geq 0,08$ и уровнем дефектных изоляторов на реальных линиях контактной сети различных железных дорог стран СНГ.

Рекомендуется применение предложенной методики при обследовании фарфоровых изоляторов в контактных сетях железных дорог, прогнозировании объема дефектных изоляторов в них и оценки остаточного срока безопасной работы изоляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ДСТУ 2203-93 (ГОСТ 6490-93) Ізолятори лінійні підвісні тарільчасті. Загальні технічні умови [Текст]. – К.: Держстандарт. – 24 с.
2. Ким, Е. Д. Методика прогнозирования показателей надежности подвесных линейных изоляторов [Текст] / Е. Д. Ким, В. Н. Таран // Вестник ХГПУ. – 1999. – Вып. 69. – X., 1999. – С. 75-81.
3. Ким, Е. Д. Состояние фарфоровых изоляторов и методы их контроля [Текст] / Е. Д. Ким // Вестник ХГПУ. – 1998. – Вып. 13. – X., 1998. – С. 101-106;
4. Ким, Е. Д. Эксплуатационная надежность тарельчатых фарфоровых изоляторов в контактной сети. Прогнозирование остаточного ресурса [Текст] / Е. Д. Ким, В. Н. Таран, В. Г. Сыченко / Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 13. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2006. – С. 33-35.
5. IEC 1109 (1992). Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V. Definitions, test methods and acceptance criteria [Текст].

Поступила в редколлегию 22.04.2008.