Е.Д. КИМ, К.Л. ЧЕРЗАН (НП «Электросетьизоляция»)

Эффективность использования линейных полимерных изоляторов в комбинации со стеклянными изоляторами

Аннотация. Рассматривается изолирующая подвеска для высоковольтных линий электропередачи, состоящая из полимерного изолятора, дополненного изоляторами тарельчатого типа. Последовательно присоединенные тарельчатые изоляторы не только выравнивают потенциалы вдоль всей подвески и, соответственно, уменьшают максимальную напряженность поля полимерного изолятора, но и могут служить индикатором скрытых электрических процессов в полимерном изоляторе.

Ключевые слова: полимерный изолятор, изолятор тарельчатого типа, напряженность электрического поля, электрическое старение, диагностика.

Введение

Накопленные за более чем 30-летний период применения полимерных изоляторов (ПИ) с кремнийорганической защитной оболочкой данные свидетельствуют о высоких эксплуатационных характеристиках этих изоляторов в районах, подверженных сильным загрязнениям, что объясняется гидрофобными свойствами материалов защитной оболочки и эффектом переноса гидрофобности на загрязненный слой [1-4]. В настоящее время композитные изоляторы воспринимаются как альтернативные традиционным изоляторам практических для всех классов напряжения воздушной линии электропередачи переменного и постоянного тока по всему миру [5]. Изоляторы могут быть выполнены в виде одной детали длиной до 10 м, обеспечивающей номинальную механическую прочность до 1000 кН и более. Отмечается экспоненциально нарастающая тенденция применения некерамических изоляторов, и поданным [5, 6], на конец 2010 г. их количество на ВЛ 66 кВ и выше превышало 20 млн. шт. Наиболее впечатляющее применение композитных изоляторов имеет место в Китае. Число композитных изоляторов на вновь строящихся линиях ультравысокого напряжения переменного и постоянного тока (1000 кВ, 750 кВ, ±800 кВ и ±500 кВ) составляет более чем 55% всех изоляторов, находящихся в обслуживании. Более высокая устойчивость к загрязнениям позволяет заметно уменьшить высоту порталов, таким образом удается существенно снизить капитальные затраты на строительство таких линий.

Как отмечается в работе [5], надежность сегодняшнего поколения композитных изоляторов, изготовленных в соответствии с новейшими технологиями, включая жесткий контроль качества, сравнима, как иллюстрируют данные обследования (табл.1), с надежностью керамических изоляторов [7]. При этом подчеркивается, что для достижения желаемого уровня надежности большое значение имеет обоснованность выбора конструкции изоляторов. Выбранные изоляторы по своим электрическим и механическим параметрам должны координироваться с реальными эксплуатационными нагрузками, сопровождаемыми в течение всего прогнозируемого срока службы. Большое внимание уделяется техническим решениям по выравниванию потенциала вдоль длины изолятора и снижению максимальной напряженности электрического поля применением защитной арматуры.

Табл. 1. Данные эксплуатации линейных изоляторов в сетях 66 кВ и выше в Китае

Изолятор	Суммарно по 2012 г.		От 2007 по 2012 г.г.	
	Установлено	Повреждено	Установлено	Повреждено
Фарфоровый	37,7 %	0,059 %	26,4 %	0,04 %
Полимерный	37,0 %	0,068 %	43,7 %	0,04 %
Стеклянный	25,0 %	0,020 %	29,5 %	0,01 %
Фарфоровый длинно-стержневой	0,30 %	0,044 %	0,40 %	0,02 %

Однако на сегодня еще остается нерешенной проблема оценки остаточного срока службы изоляторов в режиме реального времени, что позволило бы своевременно выполнять ремонтные работы или провести замену критически поврежденных изоляторов. Несмотря на то, что в настоящее время апробированы различные способы и инструментарий по диагностике композитных изоляторов, все еще методы оценки остаточного срока безопасной работы изоляции не формализованы в виде рекомендации международного комитета по стандартизации.

Методы диагностики

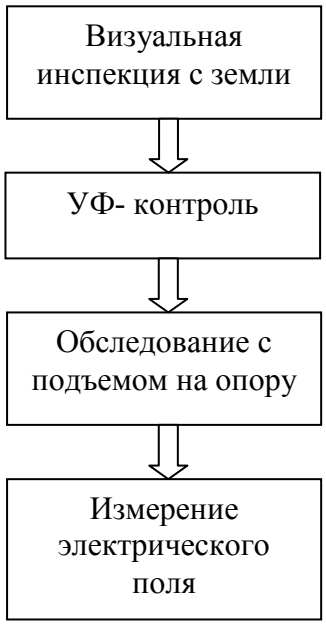

Рис.1. Схема контроля ПИ, используемая в Италии

Исходя из практики обслуживания высоковольтной линий электропередачи [8], определены следующие способы диагностики состояния кремнийорганических изоляторов:

- визуальный осмотр и оценка гидрофобности;
- инфракрасная (ИК) термография;
- ультрафиолетовое (УФ) детектирование;
- измерение электрического поля.

Первый способ контроля проводится с подъемом на опору и определяет наличие грубых повреждений на поверхности конструкции, однако не выявляет так называемые скрытые дефекты под защитной оболочкой, например, науглероженные дорожки на стеклопластиковом стержне. Отмечается [5] высокая эффективность ИК/УФ контролей, но вместе с тем интерпретация данных наблюдений не является однозначной, поскольку причины, вызывающие регистрируемые излучения, могут быть не связаны с отыскиваемым видом повреждения. Так фиксируемые сигналы могут быть обусловлены электрическими разрядами на поверхности загрязненного изолятора, поэтому ИК и УФ диагностики условно следует отнести к косвенным методам.

К прямому методу можно отнести измерение электрического поля вдоль изолятора - методика, которая заимствована из технологии диагностики керамических изоляторов и приспособлена для исследования

композитных изоляторов [9,10]. Путем сравнения картины распределения электрического поля контролируемого изолятора с эталонной характеристикой устанавливается место расположения и оценивается величина поврежденного участка изоляции, скрытого под резиновой оболочкой. Вследствие значительной трудоемкости, измерения такого вида выполняются выборочно на тех изоляторах, которые по данным визуальных и ИК/УФ наблюдений идентифицированы как проблемные.

Следует сказать о постоянном совершенствовании как инструментариев диагностики, так и методов интерпретации регистрируемых параметров в части повышения чувствительности приборов и расширения программных средств по идентификации характера и уровня повреждения. Обследование изоляции в различных энергокомпаниях осуществляется по собственной программе, но на основе выше перечисленных способов. На рис.1 представлена схема инспекции композитных изоляторов, принятая в Италии и рекомендованная для воздушной линий (ВЛ) класса 420 кВ и выше.

Эффект последовательного присоединения тарельчатых изоляторов

Снижение напряженности электрического поля. Задача минимизации максимальной напряженности электрического поля некерамических изоляторов осуществлялась путем оптимизации конфигурации металлических наконечников и применения экранной (защитной) арматуры уже на этапе разработки первых поколений полимерных изоляторов. В те ранние годы создания некерамических изоляторов было предложено [11] в качестве последующих способов разгрузки электрической напряженности использование изоляторов тарельчатого типа, присоединяемых последовательно к полимерному изолятору с потенциальной и заземленной стороны. Впоследствии выполненные численные исследования электрического поля изолирующих подвесок [12, 13] показали состоятельность комбинирования изоляторов длинностержневых и тарельчатых конструкций.

Пример расчета [12], выполненного для моделей изоляции для линий 110 кВ с одинаковой общей строительной высоты, равной стандартному полимерному изолятору FXBW3-110/70, приведено в табл.2. В качестве оригинала модели тарельчатого изолятора был взят стандартный стеклянный изолятор FC-100/70, n – количество этих изоляторов.

Табл.2. Результаты расчетов поля изоляции 110 кВ с равной строительной выстой

n- число FC-100/70	0	1	2	0+экран	1+экран
Разность потенциалов на полимерном изоляторе, %	100	71,3	56	100	71,3
Максимальная напряженность поля, кВ/мм	1,2	0,54	0,34	0,39	0,23
Разность потенциалов на 20% длине ПИ от высоковольтного электрода, %	58,2	40,0	43,7	45,8	0,38

Как можно видеть из табл. 1, при равенстве общей высоты изоляции, наличие одного стеклянного изолятора со стороны провода приводит к снижению максимальной напряженности поля в два раза. Также проведением сравнительных испытаний методом предварительных загрязнений было установлено, что дополнение тарельчатыми изоляторами практически не сказывается на удельные влагоразрядные напряжения

комбинированной изоляции. Сообщается в [12], что, основываясь на результатах исследований, в 2008 году изоляция линий 110 кВ Shabao протяженностью 14,115 км была дополнительно усилена стеклянными изоляторами и экранной арматурой (рис. 2). Таким образом удалось заметно повысить грозоупорность линии и стабилизировать процессы электрического старения полимерной изоляции.

Рис.2. ВЛ 110кВ, Shabao (Китай), полимерный изолятор с экраном и стеклянным изолятором

По данным исследований авторов [13] для сверхвысокой ВЛ 1000 кВ оптимальное количество тарельчатых изоляторов в изолирующей подвеске может составлять до 9 шт., при этом достигаются проектные требования по критическим напряженностям и для полимерной изоляции, и для выравнивающей арматуры по короне, которые остаются по конструктивным параметрам в приемлемых параметрах. При этом наибольшее напряжение на тарельчатом изоляторе не будет превышать допустимого значения.

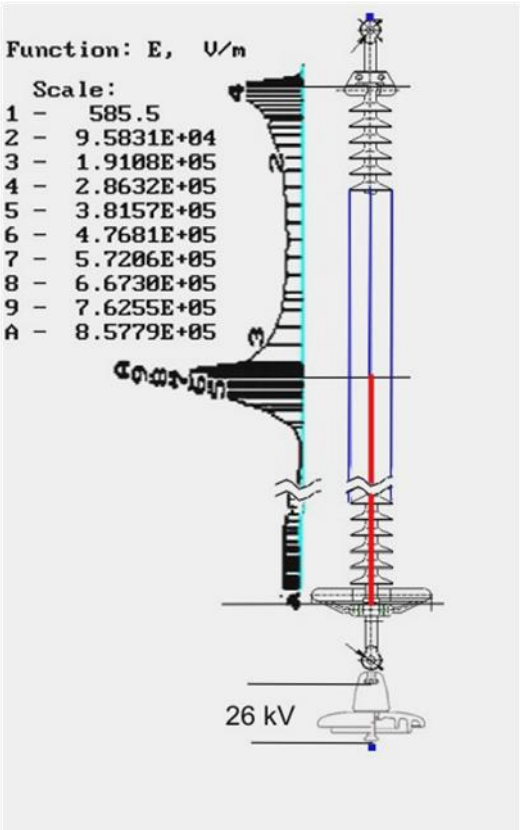

Рис. 3. Схема и пример расчета электрического поля комбинированной изоляционной подвески 330 кВ

Индикация электрического старения. Теперь более подробно рассмотрим роль последовательно присоединяемых тарельчатых изоляторов в качестве индикатора электрического старения основной изоляции полимерного изолятора. Такая возможность вытекает из следующих общих соображений: при образовании электрических разрядов в полимерном изоляторе, в том числе, под защитной оболочкой, согласно уравнению непрерывности тока:

$$div\mathbf{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \qquad (1)$$

где $\mathbf{j}$ – вектор плотности тока; ρ – удельная плотность заряда,

следует ожидать разряды на поверхности тарельчатых изоляторов с интенсивностью, пропорциональной интенсивности внутренних разрядов. То есть внутренние электрические процессы должны отобразиться в форме разрядов на тарельчатых изоляторах.

В рамках общего подхода численного интегрирования уравнения Лапласа методом конечных элементов путем замены тонкослойных протяженных подобластей (состояние поврежденной и увлажненной

поверхности стержня) бестолщинными поверхностями, были выполнены расчеты электрических полей линейных изоляционных конструкции на класс напряжения 35 кВ и выше [14,15].

В работе [15] были рассмотрены три модели подвески, основу которой составлял полимерный изолятор класса 330 кВ типа ЛК 70/330 со строительной длиной L=2880 мм:

- полимерный изолятор ЛК 70/330;
- полимерный изолятор ЛК 70/330 с последовательно присоединенным к нему со стороны траверсы стандартным изолятором из закаленного стекла ПС120Б (ПС120Б+ЛК 70/330);
- полимерный изолятор ЛК 70/330 с последовательно соединенным со стороны провода изолятором ПС120Б (ЛК 70/330+ПС120Б).

Для определенности принимались следующие гипотезы потери электрической прочности полимерного изолятора вдоль границы стержень - оболочка:

- разгерметизация со стороны оконцевателя, увлажнение, искажение электрического поля в сторону усиления, образование частичных разрядов и прорастание проводящих дорожек. Последующее увлажнение, увеличение напряженности поля $E_м$ на острие поврежденного участка, увеличение $E_м$ до критических величин, пробой или перекрытие неповрежденного участка, что в конечном итоге, приведет к полной потере изоляционных свойств изолятора;
- нарушение адгезионного слоя, как следствие теплового старения (например, в результате воздействия силовой дуги), конденсация влаги в пограничной области и снижение поверхностного сопротивления вдоль границы, в том числе, образование проводящих следов от частичных разрядов. Такой процесс может протекать более-менее равномерно по всей длине изолятора и со временем привести к электрическому отказу.

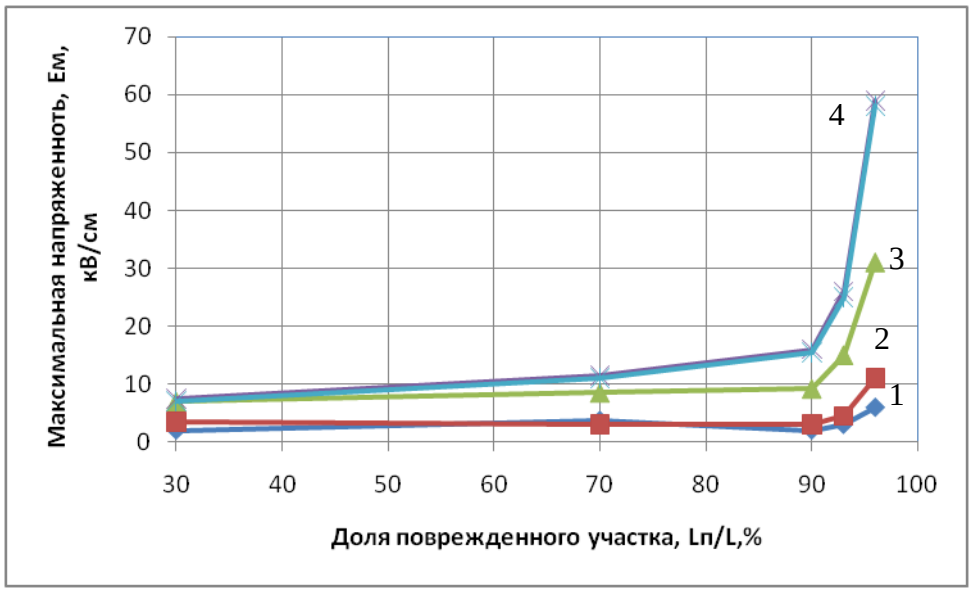

Рис. 4. Зависимость $E_м$ в полимерном изоляторе от длины поврежденного участка при поверхностной проводимости, $lg\chi$(См)

Первую гипотезу ухудшения изоляции условно можно отнести к динамически развивающемуся процессу, вторую - к квазистатическому старению, и для решаемой задачи второй случай можно рассматривать как возможный установившийся этап развития первого случая.

Были рассмотрены два направления прорастания поврежденной области: со стороны высоковольтного потенциала и со стороны низковольтного потенциала. Основные результаты расчетов приведены на рис. 4 и 5.

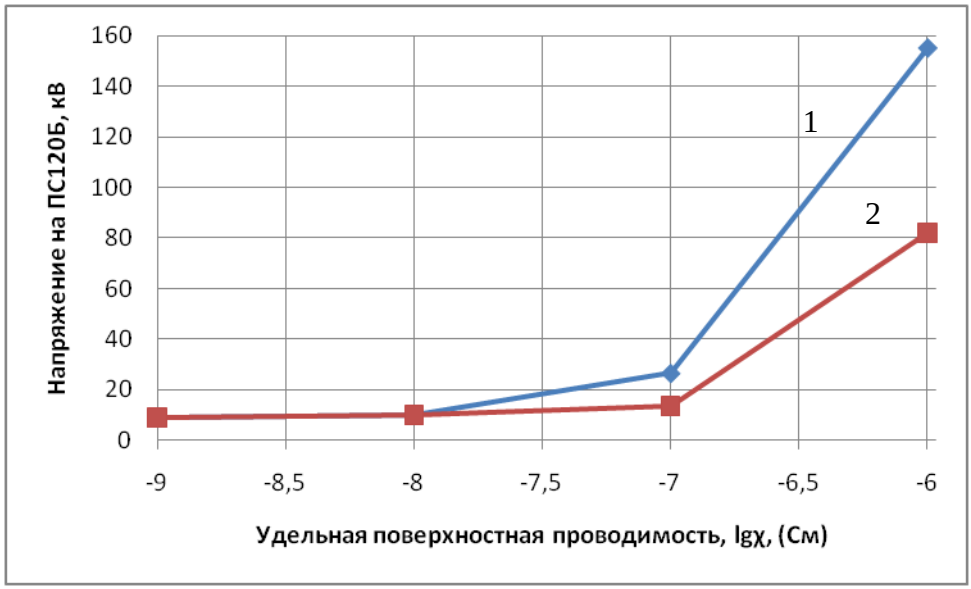

Рис. 5. Расчетное напряжение на тарельчатом изоляторе подвески:
1- ЛК 70/330+ПС120Б; 2 - ПС120Б+ЛК 70/330

Из рис. 4 хорошо видно, что эффект вытеснения электрического поля становится наглядным, если удельная поверхностная проводимость вдоль границы «стержень-оболочка» превысит $(10^{-8} \div 10^{-7})$См, особенно, когда длина поврежденного участка $L_п$ приближается к некоторой критической величине, примерно равной 80-90 % всей изоляционной длины изолятора L. Характерно, что максимальная напряженность $E_м$ при проводимости $\chi \geq 10^{-6}$ См изменяется очень слабо, при этом отмечается нарастание поля по всей длине изолятора.

Как показывают расчеты, напряженность поля на внешней стороне защитной оболочки в 1,5-1,6 крат больше, чем на ее внутренней стороне. Так как внутренняя прочность изоляции выше прочности воздуха, то при некоторой глубине повреждения стержня на внешней стороне защитной оболочки могут иметь место поверхностные разряды. Очевидно, интенсивность как внешних, так и внутренних частичных разрядов можно оценивать по величине максимально возможных низкочастотных активных составляющих токов утечки по поврежденной поверхности изолятора:

$$I_{ут.м} = \pi d \chi E_м \qquad (2)$$

где d - диаметр стеклопластикового стержня;

$\chi -$ удельная поверхностная проводимость.

Можно убедиться, что при величине $\chi \cong 10^{-7}$ См, при которой заметно увеличение максимальной напряженности поля $E_м$ (см. рис.4), токи утечки не превышают единиц миллиампер, поэтому частичное шунтирование поверхностными разрядами неповрежденного отрезка изолятора еще не может инициировать перекрытие всего

изолятора. Полная потеря электрической прочности полимерного изолятора, скорее всего, возможна при последующем увеличении проводимости на два порядка, при которой, согласно (2), токи в искровых каналах могут достигать сотни миллиампер.

Было установлено, что для рассматриваемых изолирующих подвесок в исходном состоянии последовательно присоединенные тарельчатые изоляторы не вносят значительных изменений в картину напряженности электрического поля вдоль полимерного изолятора. Вместе с тем, по мере ухудшения изоляции и приближения поврежденного участка к противоположному электроду, увеличивается разность потенциалов между электродами тарельчатого изолятора. Величина перераспределяемого напряжения на тарельчатом изоляторе зависит от места расположения этого изолятора и от принятого направления прорастания поврежденной области. Очевидно, если принять, что процесс старения идет одновременно по всей длине стержня, $L_п \to L$, тогда разность потенциалов на тарельчатом изоляторе определится только от места его расположения и усредненной величины проводимости (рис.5).

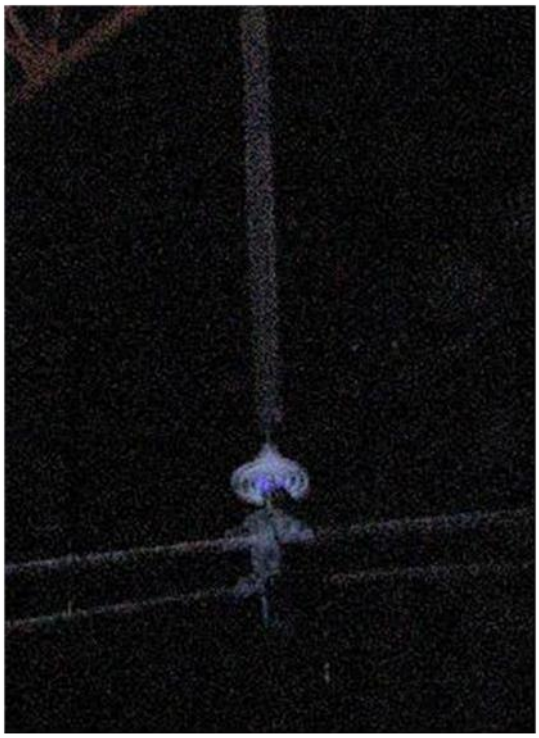

Рис. 6. Фотография коронирующего изолятора ПС120Б

При $L_п \to L$ (см. рис. 5), напряжение на стеклянном изоляторе, если он установлен со стороны провода, может возрасти до уровня интенсивного коронирования при $\chi > 10^{-7}$См. При последующем ухудшении изолирующих свойств полимерного изолятора напряжение на тарельчатом изоляторе может приблизиться практически до разрядных напряжений для тарельчатого изолятора, соответственно усилится интенсивность коронирования изолятора. Очевидно, частичные электрические разряды по поверхности тарелки изолятора продолжатся до тех пор, пока не наступит условие перехода от локального перекрытия к полному перекрытию или пробою изолирующей подвески.

Эффект свечения тарельчатого изолятора при рабочем напряжении иллюстрирует фотография макета подвески ЛК 70/330+ПС120Б (рис. 6). Фотография выполнена в затемненном зале, но без каких бы то ни было светоусиливающих устройств. В приведенном здесь опыте внутреннее повреждение полимерного изолятора имитировалось нанесением на поверхность стеклопластикового стержня по всей длине водного раствора соли KCl, измеренная удельная поверхностная проводимость колебалась в пределах $(10^{-7} \div 10^{-6})$См. В ходе опытов с моделями изоляторов с внутренними повреждениями, при которых относительно просто было заметить на расстоянии около 40 метров коронирование тарельчатого изолятора, выраженных признаков разрядов на поверхности полимерного изолятора заметить не удавалось ни в случае с тарельчатым изолятором, ни без него.

Представляется очевидным, что наличие в изолирующей подвеске тарельчатого изолятора также существенно упрощает диагностику полимерного изолятора посредством анализа электрического поля. В этом случае окажется достаточным измерить падение напряжения на тарельчатом изоляторе и сопоставлять с заранее нормированными критическими значениями.

Выводы и рекомендации

Последовательно присоединенные изоляторы тарельчатого типа служат не только в качестве дополнительного элемента для снижения напряженности поля полимерного изолятора, но и индикатором электрического старения изолирующей подвески.

Ухудшение электрической изоляции полимерного изолятора отображается в виде:

- увеличения напряжения на изоляторе тарельчатого типа;
- коронного излучения,

что значительно облегчает диагностику существующими средствами.

Рекомендуется с целью упрощения индикации полимерных изоляторов с пониженной внутренней электрической прочностью применять последовательно присоединяемые к ним тарельчатые изоляторы из закаленного стекла. В районах с сильными загрязнениями желательно использовать тарельчатые изоляторы с гидрофобным покрытием из кремнийорганических эластомеров холодного отвердения, нашедших широкое применение.

Предпочтительнее тарельчатый изолятор устанавливать со стороны токопровода, при этом ожидается более высокая чувствительность контроля полимерных изоляторов, повышение импульсной прочности подвески [15].

Литература

1. EPRI Survey of Application of Overhead Transmission Line Polymer Insulators in North America & Summary of EPRI Polymer Insulator Failure Database. Wold Conference & Exhibition on Insulations, Arresters & Bushings. Marbellu, Spain. 2003. P. 147-157.

2. Jim H. Duxbury. A Conservative Approach Toward Composite Insulators at BC Hydro: Current Factors and Future Considerations. Wolds Insulator Congress & Exhibition. Shanghai, China. 2001. pp. 79-83

3. В. А. Кравченко, Е. А. Соломоник. Разработка, изготовление, опыт эксплуатации и производство полимерных изоляторов для ВЛ и подстанций напряжением 35-500 кВ в России. //Международная научно- техническая конференция. Санкт- Петербург. 2006

4. EPRI. Development of a Tool to Assess the Electrical Condition of Composite Insulators Prior to Live Work. www. epri. com, Product ID 1014572, 11/1/2006

5. F. Schmuck, J. Seifert, I. Gutman, A. Pigini: “Assessment of the condition of overhead line composite insulators“, Paris, CIGRE-2012, b2-214

6. A. Pigini: “HV Composite Insulators Today: Market Size & Reliability.” INMR Issue 91 Quarter One 2011 Volume 19 Number 1

7. www.inmr.com/coating-line-insulator-with-rtv-silicone/

8. CIGRE WG 22.03: “Review of “In service diagnostic testing” of composite insulators”, ELECTRA, No. 169, December 1996, p.p. 105-119

9. G. H. Vaillancourt, S. Carignan, and C. Jean, “Experience with the detection of faulty composite insulators on high voltage power lines by the electric field measurement method,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 661-666, Apr. 1998.
10 https://www.google.com.ua/search?q=Defects in Nonceramic Insulators: Can They be Detected in a Timely Manner? (S. Gorur and S. Sivasubramaniyam)
11. А.с., СССР. Гирлянда изоляторов для крепления и изоляции проводов / Е.Д. Ким, В.Н. Соломатов, Ю.Н. Яшин, Н.Ф. Тарасова, В.А. Аксенов. - SU1607628 A-1 H01 B17/04 от 05.12. 1988
12. Qing Yang, Rui Wang, Wenxia Sima, Tao Yuan and Lei Liao: “Improvement of the Electric Field Distribution around the Ends of Composite Insulator with Series Connection of Glass Insulator” Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, pp. 248-252
13. Jialong Wang*, Yannan Chen, Jintao Liao, Zongren Peng: “Voltage and E-field Distribution of UHV Composite Insulator with Connection of Porcelain Insulators” ISBN: 978-1-4799-8903-4 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM) pp. 628-631
14. Ким Ен Дар, Г. В. Сиченко, В. Л. Калмыков. Исследование электрического поля полимерных изоляторов с внутренним электрическим дефектом.//Залезнiчний транспорт Украiни – 2007 - №5 – С. 61 –63.
15. Ким Е.Д, Калмыков В.Л., Розов В.А., Демидов О.А. Стеклянный изолятор как индикатор внутреннего электрического состояния полимерного изолятора/Енергетика та електрифiкацiя. – 2009. - №4. - С. 29-33
16. http://www.bk-piter.ru/shop/vysokovoltnoe-oborudovanie/molniezaschita/irmk