

УДК 621.315

Е. Д. КИМ (УИПА)

Кафедра электромеханических систем, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков (Бахмут), тел.: (050) 3711941, эл. почта: [ykim@meta.ua](mailto:ykim@meta.ua)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТАРЕЛЬЧАТЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

### Введение

Несмотря широкое внедрение современной космической телекоммуникации и волоконно-оптической технологии связи, все же около 50% передачи информации, необходимой для управления работой электроэнергетики осуществляется через каналы высокочастотной связи по воздушным линиям (ВЛ) электропередачи 35 кВ и выше. Это связано высокой эксплуатационной надежностью (большой механической прочностью) линий, что обеспечивают устойчивую работу связи, близкую к надежности каналов по кабельным линиям [1]. Вместе с тем при использовании ВЛ для передачи информации приходится учитывать особенности линий, в частности, с электромагнитными излучениями, обусловленными короной на проводах, частичными разрядами на изоляторах и деталях арматуры, создающими помехи на радиосвязи даже при нормальном режиме работы линии электропередачи.

Наибольшие радиопомехи наблюдаются при частотах сотен килогерц, поэтому уровни помех от различных объектов принято измерять при 0,5 и 1 МГц. В международных и национальных стандартах приведены соответствующие критерии оценки допустимых уровней помех для различных элементов ВЛ, находящихся под высоким напряжением. Например, для изоляторов тарельчатого типа в стандартах [2-4] описаны методики испытания и даны предельные нормированные величины помех, ниже которых радиоприем и передача высокочастотных сигналов считаются удовлетворительными.

Из ранних исследований радиопомех от высоковольтных изоляторов тарельчатого типа известно, что:

- источником радиопомех является высокочастотные электромагнитные излучения, обусловленные электрическими разрядами в воздухе – коронными разрядами у торца шапки и на стороне стержня в зоне контактов с армирующей цементно-песчаной связкой;
- при относительно невысоких напряжениях измеряемые помехи определяются процессами коронирования на стороне шапки изолятора,

однако по мере увеличения напряжения уровни радиопомех практически коррелируются с интенсивностью коронирования со стороны заделки стержня по границе связка – диэлектрик – воздух (рис. 1);

- существует непосредственная причинно – следственная связь между максимальной напряженностью электрического поля в открытых областях изолятора и уровнем радиопомех;
- уровни радиопомех от изоляторов носят статистический характер, в зависимости от внешних условий уровни помех могли как соответствовать, так и превышать нормированные значения.



Рис. 1. Корона на изоляторе в зоне армирования стержня

### Постановка задачи

Суть задачи заключается в обосновании практических путей оптимизации электрического поля изолятора с тем, чтобы увеличить «запаса прочности» изоляторов по уровню радиопомех. При этом предполагается, что конструкция составных деталей изоляторов (шапки, изоляционного элемента и стержня) сохраняется без изменения, поэтому конечная цель должна реализовываться посредством корректировки технологического регламента сборки изделия.

Как показывает существующая практика исследования резконеоднородных полей, каким является электрическое поле изолятора, на распределение напряженности поля в области

© Ким Е. Д., 2016

наибольших значений существенное влияние оказывает особенности конструктивного исполнения, а также электрофизические характеристики составных элементов в рассматриваемой области. В случае высоковольтных изоляторов тарельчатого типа наиболее нас интересующими областями являются открытые участки у края шапки и вдоль границы связка-диэлектрик в зоне заделки стержня. В качестве объекта исследований были взяты две конструкции ныне производимых изоляторов типа

ПС70Е и ПС210Б (70 кВ и 210 кВ по механической нагрузке), значительно отличающихся своими габаритными параметрами. В качестве инструмента выполнения численного анализа электрического поля, для решения уравнения Лапласа общего случая с комплексной проводимостью, была использована программа FEMM – 4.2, основанная на методе конечных элементов. В табл. 1 даны характеристики материалов составных деталей изоляторов и окружающей среды, принятые при расчетах.

Таблица 1

Деталь изолятора	Изоляционная деталь	Связующий элемент - связка	Среда - воздух	Шапка, стержень
$\rho$ – удельное сопротивление, Ом.м	$10^{12}$	$10^4 \div 10^9$	$10^{16}$	0
$\epsilon$ – диэлектрическая проницаемость	$5 \div 7$	$4 \div 10$	1	-

**Результаты расчета электрического поля изоляторов**

Как ожидалось, в ходе численных исследований электрических полей выбранных изоляторов было установлено (рис. 2), что максимумы поля имелись место в зоне заделки стержня, в районе контакта шапки с изоляционной деталью посредством связки ( $E_{ш}$ ) и в самой связке у края головки стержня ( $E_2$ ). Кроме того максимальные напряженности отмечались в изоляционной детали напротив головки стержня, однако по величине они были значительно меньшими, чем требовались для инициирования электрических процессов в самом диэлектрике. По этой причине основное внимание мы уделяли на величины напряженностей в выше названных областях:

Результаты расчетов поля представлены в виде графических зависимостей на рисунках 3 – 5, причем величины максимальных напряженностей поля соответствуют, испытательному напряжению промышленной частоты принятому в технических требованиях этих изоляторов и равному 20 кВ действующего значения.

И так, из рис. 3 хорошо видно насколько значимо влияние проводимости материала связки, с помощью которой создается целостная конструкция изолятора, на распределение электрического поля в интересующих областях. Для принятых в табл. параметрах связки максимальные значения напряженностей на стороне воздуха на границе заделки стержня и шапки  $E_{ш}$  могут разниться до 1,5 – 1,9 крат. Очевидно, что с увеличением

проводимости связки, т. е. с уменьшением параметра  $\rho$ , происходит вытеснение поля из объема связки в соприкасающиеся с ней области, что наглядно иллюстрируется крутым спадом напряженности поля в самой связке. Следует отметить, что при значениях удельного сопротивления, выходящих за пределы  $10^6 \geq \rho \geq 10^8 \text{ Ом.м}$  фактор электрической проводимости связки практически нивелируется. Кроме того, сравнивая между собой кривые 1-ПС70Е и 2-ПС210Е на рис. 3, приходим к выводу, что чем больше геометрия изолятора, тем влияние связки проявляется слабее.



Рис. 2. Основные элементы изолятора и линий равных потенциалов электрического поля

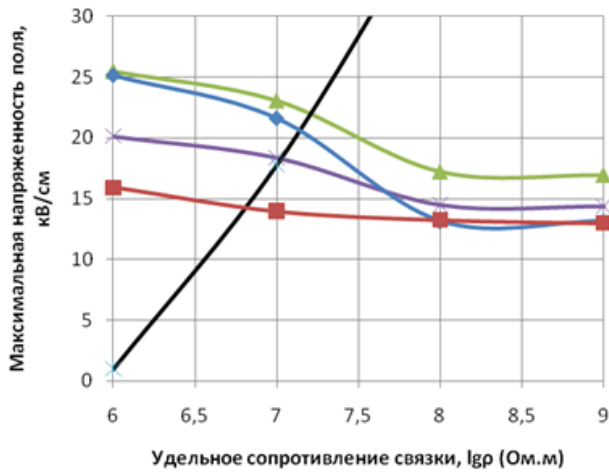


Рис. 3. Влияние удельного сопротивления связки на максимальные напряженности поля: 1-ПС70Е; 2-ПС210Б

В конструкторской документации изоляторов глубина  $\Delta h$  незаполненного связкой армируемого объема в зоне заделки стержня (см. рис. 2) устанавливаются исходя из стремления максимально использовать длину пути утечки диэлектрика с одной стороны, а с другой – из удобства выполнения операции заполнения связкой с последующей зачистки поверхности стекла или форфора. Очевидно, с точки зрения обеспечения механической прочности верхний предел параметра  $\Delta h$  следует ограничивать линией края шапки.

Расчеты показали, что глубина заделки стержня  $\Delta h$  также оказывает существенное влияние на максимальную напряженность поля в области стержня, (см рис. 4). При этом, чем глубже располагается поверхность связки, тем сильнее искривляется поля, соответственно, возрастает максимальная напряженность. В тоже время можно констатировать, что столь заметная деформация поля в зоне заделки стержня не влечет за собой изменение напряженности на стороне шапки,  $E_{ш}$ .

Основываясь на результатах рис. 4 мы можем принять, что оптимальная допустимая глубина не должна превышать  $2 \div 4$  мм. Причем, чем изолятор ниже по классу механической силы, тем параметр  $\Delta h$  должен быть меньше, что гармонируется с технологическими требованиями.

Таким образом, на основании выполненных расчетов мы располагаем две возможности регулировать электрическое поле тарельчатого изолятора рамках тех комплектующих деталей, используемых в производстве. Это увеличение удельного сопротивления связки на уровне

до  $\rho = 10^8$  Ом.м и ограничение глубины заделки стержня,  $\Delta h \leq 2 \div 4$  мм.

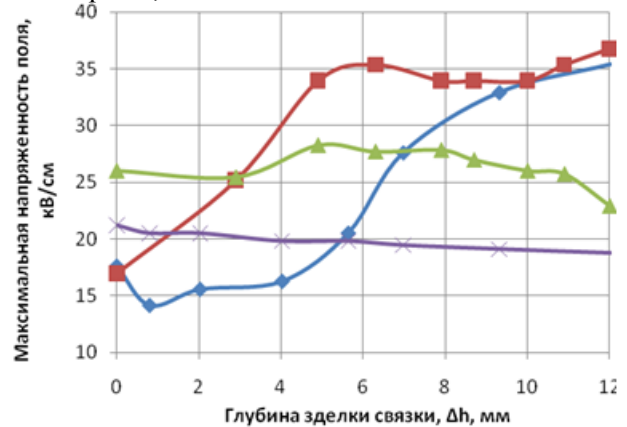


Рис. 4. Влияние глубины заделки связки на максимальные напряженности поля: 1- и 2 -  $E_{ш}$ . ( $\rho = 10^6$  Ом.м)

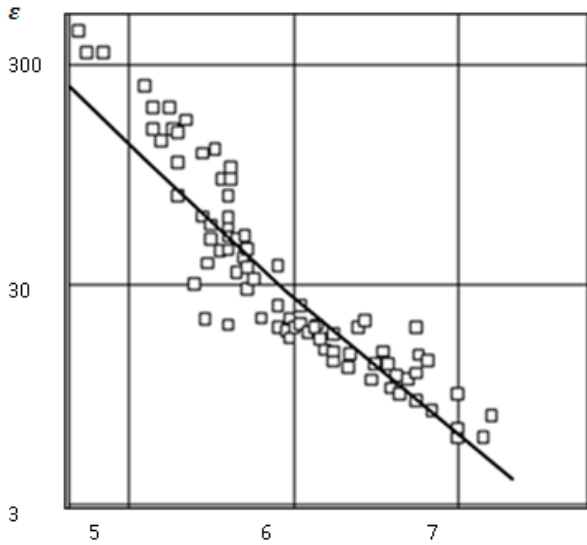
В настоящее время в качестве связующего материала используются цементно-песчаные растворы. Согласно данным измерений удельное сопротивление такой связки в конструкции изолятора в естественных условиях колеблется

в широких пределах, от  $10^3$  до  $10^6$  Ом.м, и существенно зависит от содержания свободной влаги в связке. Вообще говоря, путем принудительного нагрева изолятора можно увеличить величину этого параметра еще на один порядок и более (рис. 5). Опыты с предварительно подсушенными изоляторами показывают, что на одних изоляторах наблюдался ожидаемый эффект снижения уровня радиопомех, а на других – заметное увеличение помех. Последнее обстоятельство, вероятнее всего, обусловлено тем, что с увеличением сопротивления связки имеет место резкое увеличение напряженности

поля  $E_r$  в самой связке в области головки стержня (см. рис. 3). В затвердевшем цементно-песчаном теле всегда присутствуют воздушные микропоры, в которых при известных условиях могут происходить процессы ионизации газа, что вносят свой вклад в высокочастотные излучения. Кроме того эти внутренние микропроцессы могут являться причиной ускоренного электрического старения связки, что может привести к нарушению целостности конструкции изолятора.

В связи с неоднозначностью проявления связки с высоким электрическим сопротивлением на качество изолятора напрашивается вопрос – можно ли достичь желаемый результат изменением характеристики связки не по

всему армируемому объему? Последующие расчеты показали, что эффект выравнивания поля можно получить только лишь за счет замены верхнего слоя связки с большим удельным сопротивлением в зоне заделки стержня.



Удельное сопротивление связки,  $lg \rho$  (Ом.м)

Рис. 5. Диэлектрические характеристики цементно-песчаной связки

Достаточная толщина этого слоя  $\Delta\theta$ , как видим по рис. 6, не превышает  $3 \div 5$  мм. Такая толщина верхнего слоя никак не может повлиять на механическую прочность изолятора, поэтому этот слой может быть выполнен из менее прочного материала, чем основная связка. Таким образом можно предложить следующее: стержень армируется с помощью принятой для этой цели цементно-песчаной связкой, у которой  $\rho \leq 10^6$  Ом.м, а поверх нее ложится дополнительный слой  $\Delta\theta \leq (3 \div 5)$  мм с удельным сопротивлением  $\rho \approx 10^8$  Ом.м.

На поверхность используемой связки на основе цемента предусмотрено нанесение покрытия для защиты от внешнего атмосферного воздействия. Поэтому предполагаемый дополнительный верхний слой может быть реализован с учетом выполнения функции защиты основной связки.

#### Оценка ожидаемого снижения уровня радиопомех

Как известно, процессы коронирования относятся к явно нелинейным физическим явлениям с множеством трудно контролируемых и влияющих факторов, поэтому для принятия окончательного решения по повышению характеристики изоляторов по уровню радиопомех потребуются экспериментальное подтверждение в статистически надежном объеме. Но вместе с

тем имеет смысл выполнить приближенную оценку эффективности принимаемых решений, выраженных в единицах измерений помех, в дБ относительно микровольта. Для этой цели принимаем допущение о том, что ионизационные процессы на начальной стадии развития на одном и том объекте и в одинаковых внешних условиях определяются целиком от величины максимальной напряженности поля. Следовательно, при этих условиях можем предположить, что ток короны пропорционален напряженности:  $i_k \approx \gamma E_H$ , где  $\gamma$  - условная проводимость внешней среды, которая, как полагаем, слабо зависит от  $E_H$ .

В этом случае уровень радиопомех от изолятора,  $Y(E_H)$ , измеряемый по известной методике [2, 3] может быть представлен следующим соотношением [5]:

$$Y(E_M) \approx Y(E_{M.0}) + 40 \cdot \lg\left(\frac{E_M}{E_{M.0}}\right), \quad (1)$$

где  $Y(E_{M.0})$  уровень помех при некоторой максимальной напряженности поля.

Нас интересует предполагаемое приращение уровня, обусловленное изменением напряженности поля:

$$\Delta Y \approx 40 \cdot \lg\left(\frac{E_M}{E_{M.0}}\right). \quad (2)$$

Подставляя данные напряженностей рис. 3, 4, получаем ожидаемое снижение радиопомех на уровне  $10 \div 13$  дБ для рассмотренных в работе изоляторов ПС70Е и ПС210Б в случае реализации предлагаемых рекомендации.

#### Заключение

Основываясь на причинно – следственную связь между напряженностью поля изолятора и уровнем радиопомех можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1 Существенное снижение напряженности поля изолятора на стороне окружающей его воздушной среды можно достигнуть увеличением удельного сопротивления связующего материала до  $\rho \approx 10^8$  Ом.м в затвердевшем состоянии, а также ограничением глубины не заполняемого связкой участка в зоне армирования стержня, не более  $\Delta h = 2 \div 4$  мм;

2 Поскольку удельное сопротивление применяемой цементно-песчаной связки существенно зависит от содержания свободной влаги, то с целью некоторого увеличения этого параметра желательно предусмотреть технологические меры по удалению избыточной влаги,



например, наносить гидроизолирующее защитное покрытие на цементные швы после вылежки изоляторов в сухих складских помещениях;

3 Для достижения наибольшего эффекта снижения напряженности поля в области заделки стержня достаточно предусмотреть дополнительный слой с удельным сопротивлением  $\rho \approx 10^8$  Ом.м толщиной  $\Delta\theta \leq (3 + 5)$  мм,

наносимый поверх традиционной связки на основе цемента;

4 Целесообразно в будущем использовать альтернативные связующие материалы, не уступающие по своим техническим и ценовым характеристикам используемой цементно-песчаной связке, но с низкой электропроводностью и высокой устойчивостью к электростарению.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шкарин, Ю.П. Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи (часть 2) / Ю.П. Шкарин. — М.: НТФ "Энергопрогресс", 2001. — 72 с.
2. МЭК 437-73. Insulators. Method of measuring industrial radiointerferences.
3. ГОСТ 26196-84. Изоляторы. Метод измерения промышленных радиопомех.
4. СОУ МПЕ 51-103-2007. Ізолятори лінійні підвісні тарільчасті. Загальні технічні умови.
5. Ким, Е.Д. Влияние атмосферных условий на уровень радиопомех от изоляторов / Е.Д. Ким, Н.Ф. Тарасова //Электрические станции. - 1985. - №8.- С. 73-75.

Поступила в печать 10.03.2016.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Андрієнко П. Д.*

Одним из основных источников высокочастотных помех в системе коммуникации оперативного управления работой электроэнергетики с использованием силовых проводов воздушной линии являются электрические разряды на высоковольтных изоляторах, возникающие даже при нормальном режиме работы линии электропередачи. Основываясь на причинно – следственную связь между напряженностью поля изолятора и уровнем радиопомех ставится задача в обосновании практических путей выравнивания электрического поля изолятора с тем, чтобы увеличить «запаса прочности» изоляторов по уровню радиопомех. При этом предполагается, что конструкция составных деталей изолятора сохраняется без изменения, поэтому конечная цель должна реализовываться посредством корректировки технологического регламента сборки изделия.

Численный анализ электрического поля была выполнена с помощью известной программы FEMM – 4.2 с учетом комплексной проводимости. В качестве объекта исследования были взяты конструкции выпускаемых в настоящее время изоляторов класса 70 и 210 кВ по механической силе.

Общим результатом исследования является установление параметрической связи между максимальными напряженностями поля и электрическими характеристиками связующего материала, с помощью которого осуществляется сборка изолятора, а также уровнем заполнения связки.

Предложено: в области заделки стержня предусмотреть дополнительный слой с толщиной 3..5 мм из материала с удельным сопротивлением  $10^5$  Ом.м, наносимый поверх традиционной связки на основе цемента; в будущем использовать альтернативные связующие материалы, не уступающие по своим техническим и ценовым параметрам используемой цементно-песчаной композиции, с низкой электропроводностью, но с высокой устойчивостью к электростарению.

**Ключевые слова:** высоковольтный тарельчатый изолятор, корона, радиопомехи, численный анализ, напряженность электрического поля, цементно-песчаная связка, удельное сопротивление.

#### REFERENCES

1. Shkarin Y.P. *Vysokochastotnye trakty kanalov svyazi po liniyam elektropredachi (chast'2)* [High-frequency communication paths for transmission lines channel (part 2)]. – Moscow, NTF "Energoprogress" Publ., 2001. 72 p.
2. IEC 437-73. Insulators. Method of measuring industrial radiointerferences.
3. GOST 26196-84. *Izolyatory liniyni pidvisni tarilchasti. Zahal'ni tekhnichni umovy* [Insulators. Method of measuring industrial radiointerferences].
4. SOU MPE 51-103-2007. *Izolyatory liniyni pidvisni tarilchasti. Zahal'ni tekhnichni umovy* [Linear suspension insulators. General specifications].
5. Kim E.D., Tarasova N.F. *Vliyanie atmosferynykh usloviy na uroven' radiopomekh ot izolyatorov* [Influence of atmospheric conditions on the level of interference from the insulators]. *Elektricheskie stantsii* [Power Stations], 1985, no.8, pp. 73-75.

УДК 621.315

Є. Д. КИМ (УПА)

Кафедра електромеханічних систем, Українська інженерно - педагогічна академія, Харків (Бахмут),  
тел.: (050) 3711941, ел. пошта: [ykim@meta.ua](mailto:ykim@meta.ua)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТАРИЛЧАСТИХ ІЗОЛЯТОРІВ

Одним з основних джерел високочастотних перешкод в системі комунікації оперативного управління роботою електроенергетики з використанням силових дротів повітряної лінії є електричні розряди на високовольтних ізоляторах, що виникають навіть при нормальному режимі роботи лінії електропередачі. Грунтуючись на причині - слідчий зв'язок між напруженістю поля ізолятора і рівнем радіоперешкод ставитися завдання в обґрунтуванні практичних шляхів вирівнювання електричного поля ізолятора з тим, щоб збільшити "запасу міцності" ізоляторів по рівню радіоперешкод. При цьому передбачається, що конструкція складених деталей ізолятора зберігається без зміни, тому кінцева мета повинна реалізовуватися за допомогою коригування технологічного регламенту зборки виробу.

Чисельний аналіз електричного поля була виконана за допомогою відомої програми FEMM - 4.2 з урахуванням комплексної провідності. Як об'єкт дослідження були узяті конструкції ізоляторів класу, що випускалися нині, 70 і 210 кН по механічній силі.

Загальним результатом дослідження є встановлення параметричного зв'язку між максимальних напружень поля та електричними характеристиками єднального матеріалу, за допомогою якого здійснюється зборка ізолятора, а також рівнем заповнення зв'язки.

Запропоновано: в області закладення стержня передбачити додатковий шар з товщиною 3..5 мм з матеріалу з питомим опором  $1 \text{ Ом.м}$ , що наноситься поверх традиційної зв'язки на основі цементу; в майбутньому використовувати альтернативні єднальні матеріали, не поступливі по своїх технічних і цінових параметрах використовуваної цементно-піщаної композиції, з низькою електропровідністю, але з високою стійкістю до електростаріння.

**Ключові слова:** високовольтний тарілчастий ізолятор, корона, радіоперешкоди, чисельний аналіз, напруженість електричного поля, цементно- піщана зв'язка, питомий опір.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

UDC 621.315

Y. D. KIM (UEPA)

Department of the electromechanics systems, Ukrainian engineer - pedagogical academy, Kharkiv (Bahmut),  
tel.: (050) 3711941, e-mail: [ykim@meta.ua](mailto:ykim@meta.ua)

## RESEARCH OF ELECTRIC FIELD HIGH-VOLTAGE PLAT INSULATORS

One of basic sources of high-frequency interference in the system of communication of operative management work of electroenergy with the use of power wires of air lines are electrical discharges in high-voltage insulators, resulting even in normal operation the power line. Based on the relationship between the strength of the insulator of the field and the level of interference the problem of justifying practical ways of leveling the electric field of the insulator in order to increase the "safety factor" of insulators on the level of interference is considered. It is assumed that the design of the isolator component parts remains unchanged, so the ultimate aim should be realized through the adjustment of production schedules of product assembly.

Numerical analysis of the electric field has been performed using a known program FEMM - 4.2 in view of the complex conductivity. As the object of study were taken design manufactured at present class of insulators 70 and 210 kN for mechanical strength.

The overall result of the study is to establish a parametric relationship between maximum field strength and electrical characteristics of the binder material, through which the assembly of the insulator, and the level of ligaments required.

It is proposed: in the field of sealing pin to provide an additional layer with a thickness 3..5 mm from a material with a resistivity  $1 \text{ Ohm.m}$ , applied over the traditional ligaments cement-based; the future use of alternative binderis not conceding in its technical and price parameters used by the cement-sand composition, low conductivity, but with a high resistance to electrical aging.

**Keywords:** high-voltage plat insulator, corona, radio interferences, numerical analysis, tension of electric-field, cement-sandy coupler, resistivity.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Andrienko P. D.*