

## Применение дугозащитных и полевыравнивающих устройств для высоковольтных линейных изоляторов

КИМ Е. Д., д.т.н, член экспертного совета НП «ЭЛЕКТРОСЕТЬИЗОЛЯЦИЯ»

*Предлагается ввести в широкую практику применение дугозащитной арматуры, начиная с ВЛ 35, 110 кВ, заменить алюминиевые экраны полимерных изоляторов на стальные с дугоотводящим элементом*

### Статистика повреждаемости линейной изоляции в сетях России

«Фирма ОРГРЭС» с 50-х годов ведет анализ причин технологических нарушений в работе энергосистем России, приведших к отключению воздушной линии (ВЛ) электропередачи [1]. В табл.1 приведены обобщенные данные нарушений работоспособности отдельных элементов ВЛ, откуда можно видеть, что значительная доля отказов ВЛ обусловлена повреждением изоляторов. В свою очередь, повреждение изоляторов связывают с грозovým перенапряжением.

Таблица 1. Обобщенные данные причин отказов ВЛ «Фирмы ОРГРЭС»

Наименование элемента ВЛ	Поток отказов в % от общего количества	
	С учетом грозových перенапряжений	Без учета грозových перенапряжений
Опоры	9	13
Провода и тросы	37	52
Изоляторы	23	31
Арматура	3	4
Грозových перенапряжения	28	0

Характерные следы теплового воздействия силовой дуги на линейные изоляторы показаны на рис. 1.

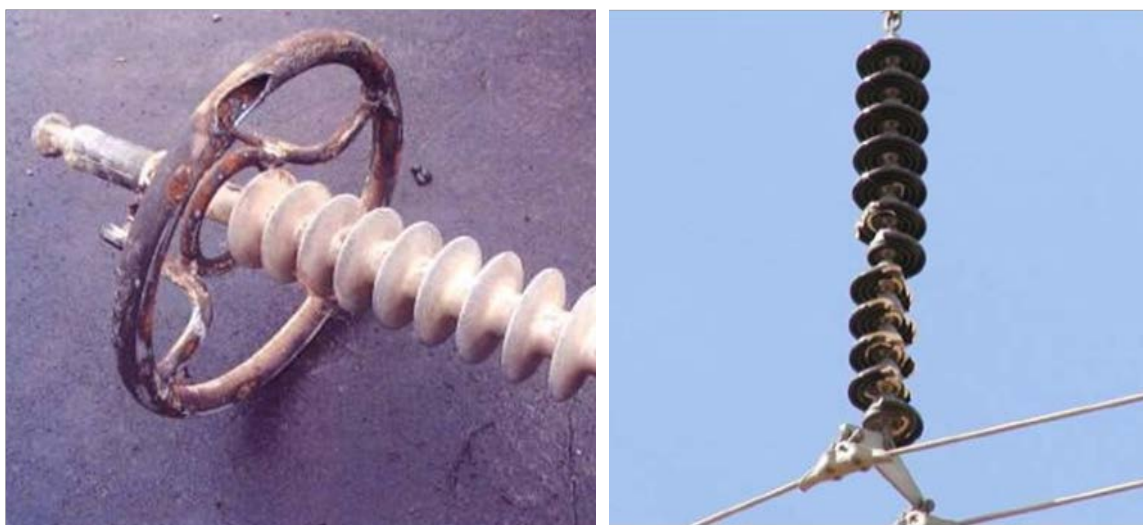


Рис. 1. Результаты воздействия силовой дуги на линейные изоляторы

Более детальные результаты обследования отказов изоляторов приводит институт «Энергосетьпроект». Согласно [2] в 1997-2007 годы на ВЛ 110-500 кВ было зарегистрировано 2808 случаев повреждения гирлянд изоляторов, что составило 29,7% от общего количества повреждений элементов ВЛ, причем 80% повреждений гирлянд изоляторов произошло на ВЛ 110 кВ.

В этой работе даны следующие соотношения между причинами и объемом повреждения гирлянд изоляторов:

- атмосферные перенапряжения – 29,3%;
- расстрел изоляторов – 17,5%;
- дефекты изготовления и монтажа изоляторов – 17,3%;
- старение изоляторов – 7,9%;
- загрязнение изоляции, в том числе птицами - 8,3%;
- посторонние воздействия и недостатки эксплуатации – 7,3%.

Таким образом, чаще всего отказы (около 38 %) высоковольтной линейной изоляции происходят вследствие электрического перекрытия при грозовых перенапряжениях и по причине загрязнения.

В табл. 2 сведены данные разрушений изоляторов на ВЛ110кВ Восточных электрических сетей, входящих в состав ОАО «Иркутская ЭСК», за январь-декабрь 2015г.[3]. Нужно отметить, что за этот период на линиях более высокого класса напряжения дефектные изоляторы установлены не были, что в общем согласуется с выводом [2] о том, что разрушение изоляторов в большинстве случаев наблюдаются на ВЛ 110 кВ.

Табл. 2. Обобщенные данные повреждений изоляторов на ВЛ 110 кВ Восточных электрических сетей, входящих в ОАО «Иркутская ЭСК» за январь-декабрь 2015г.

Изоляция	Общее число перекрытий		Число перекрытий с эффектом повреждения		Общее кол-во поврежденных изоляторов
	Гроза	Увлажнение	Гроза	Увлажнение	
Стекло	16	13+8*	2	3+3*	15
Полимер			4	3	7

Примечание: \* - предположительно



Рис. 2. Разрушение гирлянды изоляторов с разрывом шапки

К приведенным в табл. 2 отказам изоляторов относятся только те, которые были выявлены непосредственно после перекрытия изоляции, что, по сути, является «сегодняшним» дополнительным подтверждением значимости взаимосвязи между повреждением изоляторов и электрическими воздействиями. В сводном документе [3] отмечено, что повреждение верхнего и нижнего экранов идентифицировалось как

отказ полимерных изоляторов (см. рис.1).

За наблюдаемый период 1997 – 2004 гг. на ВЛ 220-500 кВ было установлено 176 расцеплений гирлянд вследствие повреждения стеклянных, фарфоровых и полимерных линейных изоляторов [2]. Выполненные в «СибНИИЭ» лабораторные исследования [4] показывают, что в грозовые периоды при перекрытии гирлянды, в которой находится «остаток» изолятора, существует вероятность протекания сквозь внутреннюю изоляцию этого «остатка» тока молнии и последующего сопровождающего тока короткого замыкания сети. Впоследствии, в замкнутом объеме «остатка» создается экстремальное давление, что может привести к механическому разрушению шапки изолятора, расцеплению гирлянды (рис. 2).

### Дугозащитные и экранирующие устройства

Как известно, силовая дуга является следствием короткого замыкания сети, ток которого протекает по искровому каналу, образовавшемуся при перекрытии изоляции под действием грозовых перенапряжений или же при рабочем напряжении в условия критического загрязнения и увлажнения. Тепловой эффект дуги на изоляцию не только определяется током и длительностью горения, но и траекторией ее движения. Потoki плазмы могут иметь различное направление в зависимости от конструкции разрядного промежутка. Для наглядности на рис. 3 схематически показаны возможные движения потока заряженных частиц для случая короткой дуги [5,6] (полагается, что влияние ветра отсутствует). Когда поверхности электродов обращены одна к другой и расположены по одной линии (рис. 3а), то потоки плазмы, выходящие из электродов, направлены

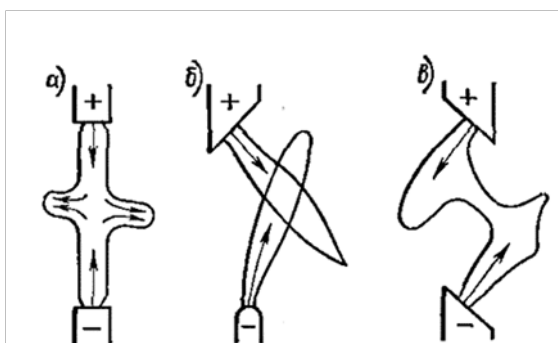


Рис. 3. Потoki плазмы

навстречу друг другу и при небольшом расстоянии между электродами могут сталкиваться, образуя расширение ствола дуги. Если поверхность одного из электродов повернута в сторону (рис. 3б), напряжение на дуге в этом случае заметно повышается, и условия ее гашения облегчаются. Можно так расположить поверхности электродов, чтобы потоки плазмы не сталкивались друг с другом (рис. 3в). Здесь потоки плазмы направлены в разные стороны и выбрасываются за пределы ствола дуги. Путь тока в стволе удлинится, а

сопротивление плазмы существенно повышается, что также способствует затуханию дуги.

Вектор скорости начального ствола дуги определяется кулоновской силой и совпадает с вектором электрического поля электрода, поэтому всегда направлен перпендикулярно к поверхности металла (см. рис. 3). Дальнейшая судьба ствола будет зависеть от соотношения термодинамических процессов расширения горячего газа и сил Лоренца, испытываемых заряженными собственным магнитным полем частицами. Очевидно, чем длиннее расстояние между электродами, тем сильнее скажется термодинамический фактор.

Из опыта проведения электрических испытаний переменным напряжением известно, что, в случае изолирующей подвески с кольцевым экраном, опорная точка дуги, как правило, хаотично перемещается по поверхности экрана, обвивая изоляцию. Для того чтобы зафиксировать геометрическое место расположения опорной точки – основания

разряда, окажется достаточным сделать разрез таким образом, чтобы создать на экране участок с явно выраженной повышенной напряженностью электрического поля.

Одним из простых и эффективных способов ограничения теплового воздействия силовой дуги на твердый диэлектрик является установление роговых разрядников в параллель с защищаемым объектом. Вместе с тем на ВЛ России и странах СНГ практически не встречаются участки высоковольтных линий, оснащенных повсеместно такого рода устройствами. На проблемных по грозоупорности линиях рекомендуется применять быстродействующие коммутирующие аппараты, а также линейные разрядники и ограничители напряжений, что не всегда осуществляется по различным техническим и экономическим причинам.

Как правило, согласно действующему основополагающему для энергетиков документу ПУЭ-7 (см. также стандарт [7]) преимущественно рога разрядные предусмотрены для отвода электрической дуги от изолятора в тросовых креплениях. Применяемые на ВЛ напряжением, начиная от 330 кВ, защитные кольца - экраны предназначены для выравнивания напряжения вдоль натяжных гирлянд изоляторов и подвесных гирлянд на ВЛ напряжением 500 кВ и выше. Такие экраны должны обеспечивать снижение уровней радиопомех и исключать появление видимой короны на элементах гирлянд в штатном режиме работы линии.

Вместе с тем во многих странах Европы, как и в других странах мира, использование защитных устройств, совмещающих в одном объекте две функции: защиту от воздействия силовой дуги и выравнивание электрического поля по длине гирлянд изоляторов, на сегодня является стандартной практикой [8]. Первым разработчиком современных дугозащитных устройств является всемирно известная международная кампания RIBE [9]. Первые образцы в виде вытянутых рогов были разработаны еще во времена начала строительства воздушных линий электропередач. Широкое применение дугозащитных рогов началось еще в 1920 г. Задача первых устройств заключалась, прежде всего, в предотвращении разрушающих эффектов от импульсных грозовых перенапряжений. По мере развития электроэнергетики, повышения класса ВЛ по напряжению и передаваемой

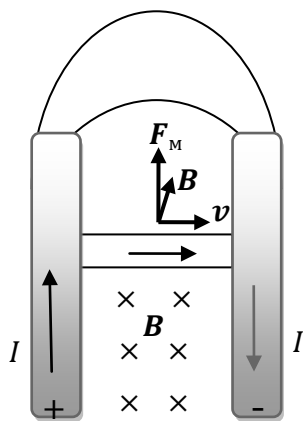


Рис. 4. К пояснению о перемещении ствола дуги магнитным полем

мощности, с внедрением новых изоляционных конструкций и пониманием физики возникновения силовых дуг, накоплением опыта работ последовательно проводились исследования по усовершенствованию защитных устройств, увеличению их номенклатуры. Требовалось предусмотреть возникновение дуги и при отсутствии перенапряжений в сетях, она может быть инициирована перекрытием по поверхности загрязненных изоляторов. Поскольку наибольшая концентрация тепловой энергии имеет место в опорной точке дуги (в месте контакта с электродом), то очень важно было эту область как можно быстрее и дальше отдалить от металлических элементов изолятора и от самой изоляционной конструкции.

Возможность управления дугой «естественным» путем можно проследить, наблюдая за поведением дуги, возникшей между параллельными стержневыми электродами. Предположим, дуга образовалась в среднем межэлектродном участке по причине короткого замыкания (рис. 4). При этом индуцируется магнитное

поле, обусловленное протекающим током  $I$ . Вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$  при принятой на рисунке полярности электродов направлен перпендикулярно к плоскости контура, образованного электродами и дугой. По стволу дуги движутся заряженные частицы под действием силы  $\mathbf{F}_{эл}$  электрического поля  $\mathbf{E}$  в дуге, при этом они испытывают поперечную силу  $\mathbf{F}_M$  магнитного поля  $\mathbf{B}$ , величины и направления которых определяются законом Лоренца:

$$\mathbf{F}_\Sigma = \mathbf{F}_{эл} + \mathbf{F}_M = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}],$$

где:  $q$  – заряд частицы;

$\mathbf{E}$  – вектор напряженности электрического поля;

$\mathbf{B}$  – вектор магнитной индукции;

$\mathbf{v}$  – вектор скорости движения заряженной частицы

Поскольку в рассматриваемом примере принято, что заряды движутся от левого положительного электрода к правому с отрицательной полярностью, то магнитная сила, согласно векторному произведению скорости и магнитной индукции, будет направлена вверх, таким образом, отдаляя дугу от источника тока. Можно показать, что при перемене полярности электродов дуга также сместится в том же направлении.

Выше рассмотренный положительный эффект был реализован при разработке так называемых «многосторонних устройств дуговой защиты» в связи с внедрением

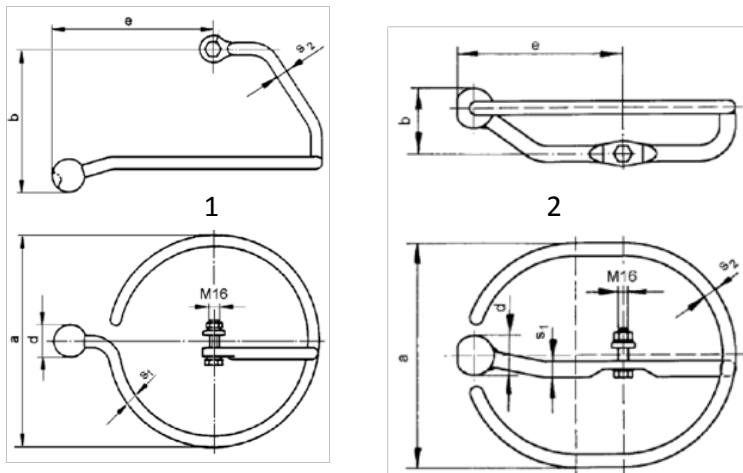


Рис. 5. Конфигурация защитных устройств для гирлянды изоляторов ВЛ 220кВ: 1-верхний элемент, 2-нижний элемент

длинностержневых фарфоровых изоляторов. Еще в 1940 году были созданы роговые разрядники, пересекающиеся роговые разрядники, спиральные роговые разрядники и дугозащитные кольца. Эти устройства по-прежнему находят применение в сетях с небольшими токами короткого замыкания.

Разработан целый ряд устройств для различных по материалам и конструкции изоляторов, а также

различных по напряжению ВЛ от 35 до 400 кВ [9,10]. При их разработке придерживались следующих основных положений:

- защитные устройства изготавливаются целиком из стали с цинковым покрытием толщиной не менее 100 мкм, выполненным горячим способом;
- электрические характеристики изолирующей подвески в комплекте с защитными устройствами соответствуют нормированным характеристикам, в том числе по короне и уровню радиопомех;

- при грозовых перенапряжениях выше критических величин перекрытие происходит между защитными устройствами;

- в случае перекрытия изоляции вдоль ее загрязненной и увлажненной поверхности основание дуги мгновенно перемещается от крайних электродов изоляции к открытому краю защитного устройства;

- опорная точка силовой дуги, возникающей вслед за перекрытием, фиксируется на предусмотренном для этого участке защитного устройства;

- дуга в своем развитии не пересекает тело изолятора.

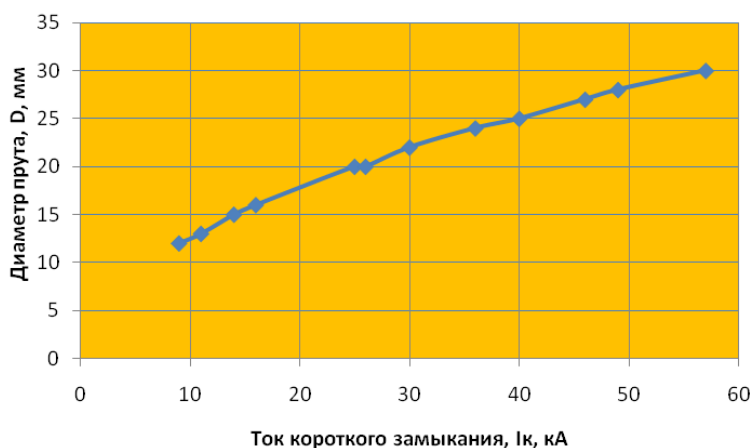


Рис. 6. Зависимость диаметра стального прутка от тока короткого замыкания линии

Особое внимание уделялось явлению эрозии металла с поверхности наконечника, на которой устанавливается основание дуги. В этой связи предусмотрена линейка изделий одной конструкции, но для разных по величине ожидаемых токов короткого замыкания ВЛ. Поэтому при выборе защитного устройства

рекомендуют руководствоваться приведенной на рис. 7 зависимостью между сечением рабочего элемента устройства и током. Для относительно больших токов короткого замыкания, 40

кА и более, с целью экономии материала была разработана специальная конструкция, отличающаяся тем, что к наконечнику приварен дополнительный стальной элемент шарообразной формы, но с большим сечением (см. рис.5).

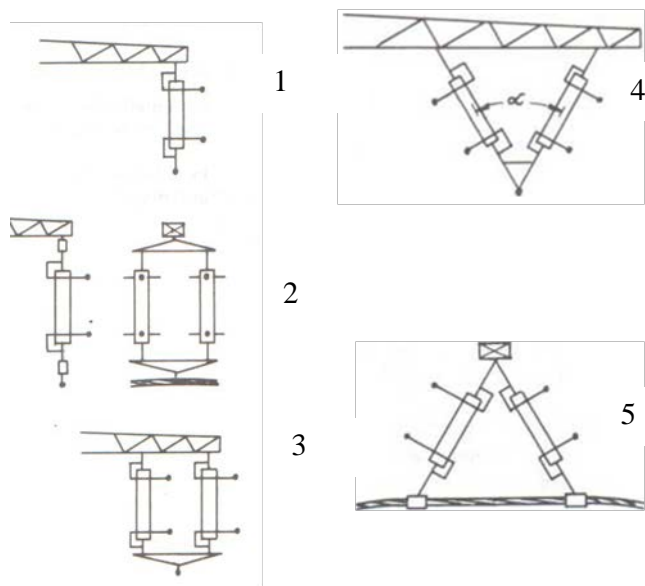


Рис. 7. Схема установки дугозащитных устройств: 1-одинарная; 2-двухцепная, параллельно проводу; 3-двухцепная, перпендикулярно проводу; 4-V-образные гирлянды; 5-полуанкерные

Для эффективности работы дугозащитных устройств немаловажное значение имеет пространственное их расположение в зависимости от конструкции опоры и от типа гирлянды изоляторов. Общая рекомендация сводится к тому, чтобы минимизировать термическое действие дуги на изолятор, при этом избежать возможности контакта дуги с соседними фазами и с элементами опоры. Наиболее

важные из рекомендованных схем приведены на рис. 7. Очевидно, что для натяжной гирлянды опорные точки должны быть направлены вверх в открытое пространство.

Следует отметить, что, в соответствии с утвержденным в феврале 2017 г. Положением ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе», на ВЛ 220 кВ и выше гирлянды изоляторов должны быть снабжены защитной арматурой.

### **Оптимизация защитных экранов для линейных полимерных изоляторов**

Актуальность применения защитных устройств возросла в связи с расширением применения композитных изоляторов на воздушных линиях высокого и сверхвысокого напряжений. Как отмечается в работе [11], надежность сегодняшнего поколения композитных изоляторов, изготовленных в соответствии с новейшими технологиями, включая жесткий контроль качества и отслеживаемость, сравнима с керамическими изоляторами. При этом подчеркивается, что для достижения надлежащего уровня надежности большое значение имеет обоснованность выбора конструкции изоляторов. Выбранные изоляторы по своим электрическим и механическим параметрам должны соответствовать реальным эксплуатационным нагрузкам, возникающим в течение всего прогнозируемого срока службы. При этом большое внимание уделяется техническим решениям по выравниванию потенциала по длине изолятора и снижению максимальной напряженности электрического поля с помощью применения защитной арматуры. Наблюдаемое на практике электрическое старение полимерных изоляторов чаще всего берет начало под защитной оболочкой на тройной границе «оконцеватель – стеклопластиковый стержень – воздух» со стороны высокого потенциала [11]. На процессы ухудшения изоляции существенное влияние оказывает присутствие коронирующей области вблизи этого слабого участка конструкции.

В отличие от керамического или стеклянного изолятора нежесткий полимерный корпус композитного изолятора способен выдерживать механический удар, создаваемый тепловым воздействием дуги. Кроме того, любой ущерб, вызванный высокой температурой, является не столь значительным, если своевременно сработала коммутирующая система защиты. Поэтому основная проблема связана не столько с возможным термическим повреждением силового узла, сколько с возможным нарушением адгезионного слоя, что может положить начало разгерметизации конструкции. Кроме того, места оплавления металлических деталей изоляционной подвески, включая экранную арматуру (см. рис.1), могут служить источниками короны и радиопомех. Еще в 1992 году, CIGRE WG B2.03, основываясь на накопленных в то время опытах, рекомендовал, начиная с ВЛ 220 кВ, применение подходящего коронного кольца со стороны высокого напряжения, главным образом из-за потенциальной возможности нарушения требования по уровню высокочастотных электромагнитных помех [12]. Таким образом, к защитным устройствам для полимерных изоляторов должны быть предъявлены более жесткие требования, касающиеся выравнивания электрического поля по сравнению с теми, что приняты для изоляторов из стекла или фарфора.



Современные вычислительные технологии предоставляют возможность моделировать трехмерное электрическое поле высоковольтных изоляционных конструкций с учетом влияния металлических элементов опоры и влияния соседних фаз. Многими авторами были разработаны целевые программные средства, выполнены комплексные численные исследования различных высоковольтных объектов, что позволило откорректировать ранее принятые технические решения на более качественном уровне [13-15].

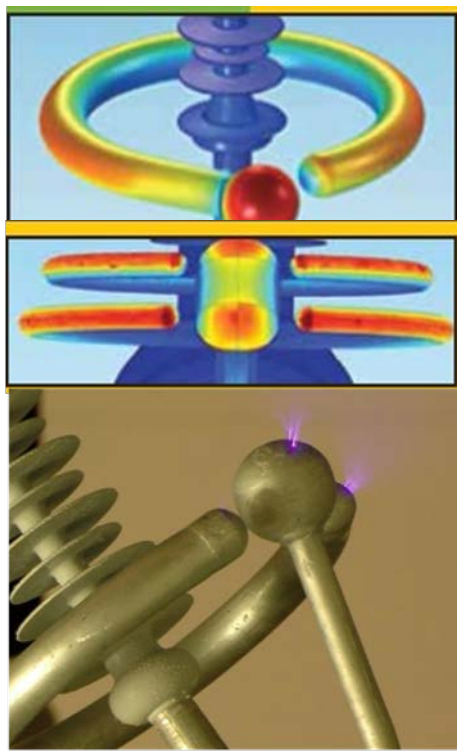


Рис. 8. Распределение напряженности поля и начальная корона на поверхности защитной арматуры

Результаты поиска оптимальных решений непосредственно зависят от обоснованности критериев оптимальности. В настоящее время на основе многолетних совместных работ, выполненных исследовательскими институтами STRI (Swedish Test Research Institute) и EPRI (Electric Power Research Institute, USA), приняты следующие предельно допустимые значения напряженности электрического поля [16]:

- 1,8 кВ/мм на поверхности защитной арматуры;
- 0,42 кВ/мм вдоль поверхности оболочки длиной 10 мм от края оконцевателя;
- 0,35 кВ/мм на границе оконцеватель – оболочка – воздух.

Следует отметить, что для обоснования критических параметров были использованы результаты анализа обширных данных опыта эксплуатации полимерных изоляторов. Был проведен комплекс экспериментальных исследований, выполненных на образцах и на полномасштабных моделях изоляторов различных по классу напряжения и по конструктивному исполнению. Устанавливались напряжения начала видимой короны с одновременным измерением уровней радиопомех согласно IEC 61284. Опыты проводились как в сухом

состоянии, так и после обрызгивания поверхности изолятора водой с заданной проводимостью по новой методике «Water Drop Corona Induced». Экспериментальные данные сопоставлялись с результатами численных исследований.

В работе [16] были выполнены расчеты поля изоляторов в комплекте с используемыми на сегодня стандартными защитными устройствами RIBE. Пример расчета поля изолятора класса 400 кВ в цветном отображении иллюстрирует рис. 8. По рисунку визуально можно провести качественный анализ распределения поля по поверхности исследуемого объекта, в данном случае, на поверхностях защитной арматуры. Там же приведена фотография начальной короны, по которой можно прогнозировать места опорной точки дуги и вектор ствола дуги в начальный момент развития, что согласуется с результатами расчета. По результатам исследований были сформулированы рекомендации по разработке новых и оптимизации существующих конструкций с учетом приведенных критериев. Отмечается необходимость во



взвешенном подходе при выборе защитных устройств для полимерных изоляторов и целесообразность проведения испытаний на корону в соответствии с ИЕС 61284.

### **Выводы, рекомендации**

Представляется оправданным введение в практику организации линейной изоляции обязательного применения дугозащитных устройств на участках линий ВЛ 35-110 кВ.

Экранная арматура для полимерных изоляторов должна быть изготовлена из стали и обеспечивать дугоотводящую функцию.

Целесообразно разработать нормативные документы, регламентирующие технические условия по разработке, выбору и эксплуатации устройств защиты изоляторов от теплового воздействия силовой дуги, одновременно обеспечивающих выравнивание электрического поля.

### **Литература**

1. Л.В. Яковлев, Р.С. Каверина, Л.А. Дубинич. Комплекс работ и предложений по повышению надежности ВЛ на стадии проектирования и эксплуатации / Третья Российская с международным участием. Н-П конференция «ЛЭП 2008: Проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно – технический прогресс». Новосибирск. 2008., С.28-51

2. Е.Н. Ефимов, Л.В. Тимашова, Н.В. Ясинская, С.Ю. Батяев. Оценка повреждаемости компонентов воздушных линий электропередачи напряжением 110-750 кВ в 1997-2007 гг. в России / Четвертая Российская научно-практическая конференция с международным участием: ЛЭП-2100: Проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно – технический прогресс. Сборник докладов. 15-17 сентября 2010 г. С159-1662.

3. Сводные данные об аварийных отключениях ОАО «ИЭСК» за январь-декабрь 2015г.

<https://www.google.com.ua/search?q=Сводные+данные+об+аварийных+отключениях+ОАО+«ИЭСК»+за+январь-декабрь+2015г.>

4. Э.В. Яншин, А.Г. Тарасов, М.Ч. Игтисамов. Оценка опасности механического разрушения «остатков» / Четвертая Российская научно-практическая конференция с международным участием: ЛЭП-2100: Проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно – технический прогресс. Сборник докладов. 15-17 сентября 2010 г. С167-177

5. Д.А. Брега, С.И. Планковский, Е.В. Цегельник. Моделирование процесса перемещения опорного пятна дуги по стенке канала плазмотрона / Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии № 57, 2012. С.110-116

6. Электрическая дуга переменного тока и ее гашение

<http://leg.co.ua/knigi/oborudovanie/elektricheskaya-duga-peremennogo-toka-i-ee-gashenie-4.html>

7. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». СТО 56947007-29.120.20.066-2010. Защитная арматура для ВЛ. Технические требования

8. Arcing Horns & Corona Rings / INMR : Independent T&D Information. September 22, 2014

9. RIBE. Power arcs protection and corona control fittings. Online-Catalogue. Pfad: Arcing rings and grading rings/Introduction/General/Gedruckt am: 16. Januar 2012

10. PFISTERER (LAPP). OVERHEAD LINES. Innovative Solutions for Distribution and Transmission Lines

[http://www.pfisterer.com/fileadmin/pfisterer/downloads\\_en/Overhead\\_Lines\\_AI\\_en.pdf](http://www.pfisterer.com/fileadmin/pfisterer/downloads_en/Overhead_Lines_AI_en.pdf)

11. F. Schmuck, J. Seifert, I. Gutman, A. Pignini: "Assessment of the condition of overhead line composite insulators", Paris, CIGRE-2012, B2-214

12. Protecting Composite Insulators from Corona / INMR. November 4, 2013

13. Nihal Mohan. Optimum Corona Ring Design for High Voltage Compact Transmission Lines Using Gaussian Process Model / A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. ARIZONA STATE UNIVERSITY August 2012. P127

14. Doshi, T.; Gorur, R.S.; Hunt, J.; , " Electric Field Computation of Composite Line Insulators up to 1200 kV AC", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, no. 3, pp. 861-867, June 2011

15. S. Ilhan, A. Ozdemir. 380 kV Corona Ring Optimization for ac Voltages, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 18, No. 2; April 2011P408-417

16. A.J. Philips, A.J. Maxwell, C.S. Engelbrecht, I. Gutman: "Electric Field Limits for the Design of Grading Rings for Composite Line Insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 3, June 2015, p.p. 1110-1118