

# Влияние дождя и формы импульсного напряжения на электрическую прочность линейной полимерной изоляции высокого и сверхвысокого напряжения

КОРЯВИН А.Р., ВОЛКОВА О.В., МИЛКИН Е.А.

*Представлены результаты экспериментальных исследований разрядных характеристик линейных полимерных изоляторов с силиконовым покрытием для линий электропередачи напряжением 110–500 кВ при воздействии грозового и коммутационных импульсов напряжения обеих полярностей в сухом состоянии и при искусственном дожде. Показано, что степень влияния дождя на электрическую прочность изоляции зависит от формы и полярности напряжения. Для линейной полимерной изоляции разрядные характеристики при испытаниях под дождем импульсами отрицательной полярности оказываются ниже, чем при положительной. Для повышения надежности работы линий электропередачи 110–500 кВ предложены новые более высокие значения испытательных напряжений линейной полимерной изоляции.*

**Ключевые слова:** полимерные изоляторы, напряжение, электрическая прочность, сухое состояние, дождь, исследования

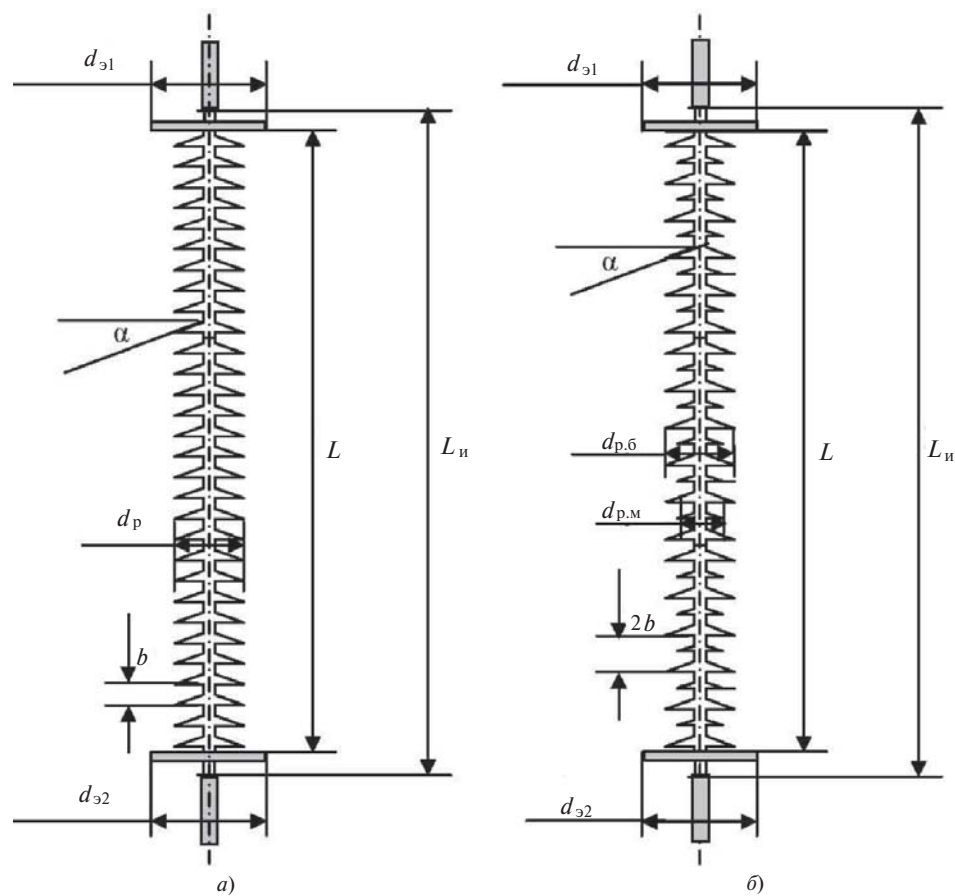
Во всем мире подавляющее число изоляционных конструкций на воздушных линиях электропередачи (ВЛ) высокого (ВН), сверхвысокого (СВН) и ультравысокого (УВН) напряжения выполнено на основе гирлянд стеклянных или фарфоровых изоляторов. Прогресс, достигнутый в области создания полимерных изоляторов, открыл реальные возможности для широкого внедрения таких изоляционных конструкций в сетях различного класса напряжения. Неслучайно поэтому как у нас в стране, так и за рубежом полимерные изоляторы, которые по своим механическим и электроизоляционным свойствам являются наиболее перспективными в настоящее время и в обозримом будущем, все больше вытесняют такие традиционные диэлектрики, как фарфор и стекло. К сожалению, внедрению линейных полимерных изоляторов (ЛПИ) и разработке для них норм испытательных напряжений предшествовали лишь немногочисленные исследования их электрической прочности при импульсных воздействиях, имеющих место в эксплуатации. Наиболее полные сведения о разрядных характеристиках линейных полимерных изоляторов на напряжение 110–500 кВ в сухом состоянии и под дождем при воздействии стандартных грозовых и коммутационных импульсов обеих полярностей со-

*Results from experimental studies of the discharge characteristics of polymeric line insulators with siloxane coating for 110–500 kV power lines under the effect of lightning and switching voltage impulses of both polarities in dry state and under artificially created rain conditions are presented. It is shown that the degree to which rain affects the electrical strength of insulation depends on the voltage waveform and polarity. The discharge characteristics the polymeric line insulation has under rain conditions with respect to impulse voltage are lower for negative-polarity voltage than they are for positive-polarity voltage. New (higher) values of voltages for testing polymeric line insulation are suggested for achieving more reliable operation of 110–500 kV power transmission lines.*

**Key words:** polymeric insulators, voltages, electric strength, dry state, rain, investigations

держатся в [1], где, в частности, показано, что при импульсных напряжениях отрицательной полярности электрическая прочность ЛПИ с силиконовым покрытием подвержена сильному негативному влиянию дождя, причем это влияние усиливается при угле наклона ребра более 20°. Отмеченные особенности поведения разрядных характеристик ЛПИ не были учтены при разработке для них нормативного документа [2] с явно заниженными значениями испытательных напряжений. В результате при внедрении в эксплуатацию ЛПИ, успешно прошедших испытания по нормам [2], создаются предпосылки для снижения надежности работы линий электропередачи.

Для получения более полных данных о разрядных характеристиках ЛПИ, работающих в различных режимах и условиях эксплуатации, и совершенствования нормативного документа [2] были проведены экспериментальные исследования ЛПИ на напряжение 110–500 кВ. Для оценки влияния длины пути утечки исследовались два типа образцов с силиконовым покрытием: с постоянным и переменным вылетом ребра (рис. 1, 2). С учетом данных [1] образцы имели цельковое исполнение (без составных изоляционных частей), а угол наклона ребер составлял 10–15°.



**Рис. 1.** Эскизы испытываемых линейных полимерных изоляторов на напряжение 110–330 кВ с постоянным (а) и переменным (б) вылетом ребра: для 110 кВ  $d_{э1}=d_{э2}=100$  мм;  $L=1020$  мм (а),  $L=1140$  мм (б); 220 кВ –  $d_{э1}=d_{э2}=160$  мм,  $L=1840$  мм (а),  $L=2043$  мм (б); 330 кВ –  $d_{э1}=160$  мм,  $d_{э2}=480$  мм,  $L=2860$  мм (а),  $L=2760$  мм (б);  $L_y/L=2,3\pm 2,5$  (а),  $L_y/L=2,7\pm 2,8$  (б);  $a \approx b \approx d_{ст}$

Для выравнивания электрического поля вдоль ЛПИ образцы оснащались тороидальными экранами. Для обеспечения условий, максимально приближенных к реальным, изоляторы подвешивались на пространственной металлической заземленной конструкции (шириной 0,6 и длиной 4,0 м), имитирующей траверсу опоры. К нижнему концу изолятора крепился макет провода в виде горизонтальной алюминиевой трубы диаметром 20 мм и длиной 4,5 м (для конструкций ВН 110–220 кВ). Для изоляции СВН класса 330 кВ макет провода выполнялся в виде двух, а класса 500 кВ – трех алюминиевых труб диаметром 20 мм и длиной 4,5 м. Расстояние от нижнего конца изолятора до пола высоковольтного зала составляло 8 м.

Исследования проводились в сухом состоянии изоляторов и под дождем при имеющих место в эксплуатации воздействиях импульсного напряжения обеих полярностей различной формы и длительности:

- стандартного грозового импульса (1,2/50 мкс);
- стандартного коммутационного импульса (250/2500 мкс);
- униполярного колебательного коммутационного импульса (2000/3300 мкс).

В ходе испытаний конструкций определялись их 50%-е разрядные напряжения  $U_{50}$  и стандартные отклонения  $\sigma$ .

**Разрядные характеристики линейных полимерных изоляторов в сухом состоянии при различных формах импульсного напряжения.** В поведении разрядных характеристик ЛПИ при их испытании в сухом состоянии проявляются следующие наиболее общие закономерности. В первую очередь к ним относится характер траекторий перекрытий изоляторов: независимо от формы и полярности воздействующего напряжения формирование разряда происходит между экранами по чисто воздушному пути, что свидетельствует о практическом отсутствии влияния изоляторов и их конструктивных параметров на разрядные характеристики исследуемых объектов. Поэтому последние можно рассматривать как чисто воздушные промежутки с присущими им особенностями разрядных характеристик. Полученные кривые эффекта конструкций при всех формах воздействующего напряжения обеих полярностей подчинялись нормальному закону распределения. При этом значения стандартных отклонений  $\sigma$  изменялись от 0,9 до 7,1%.

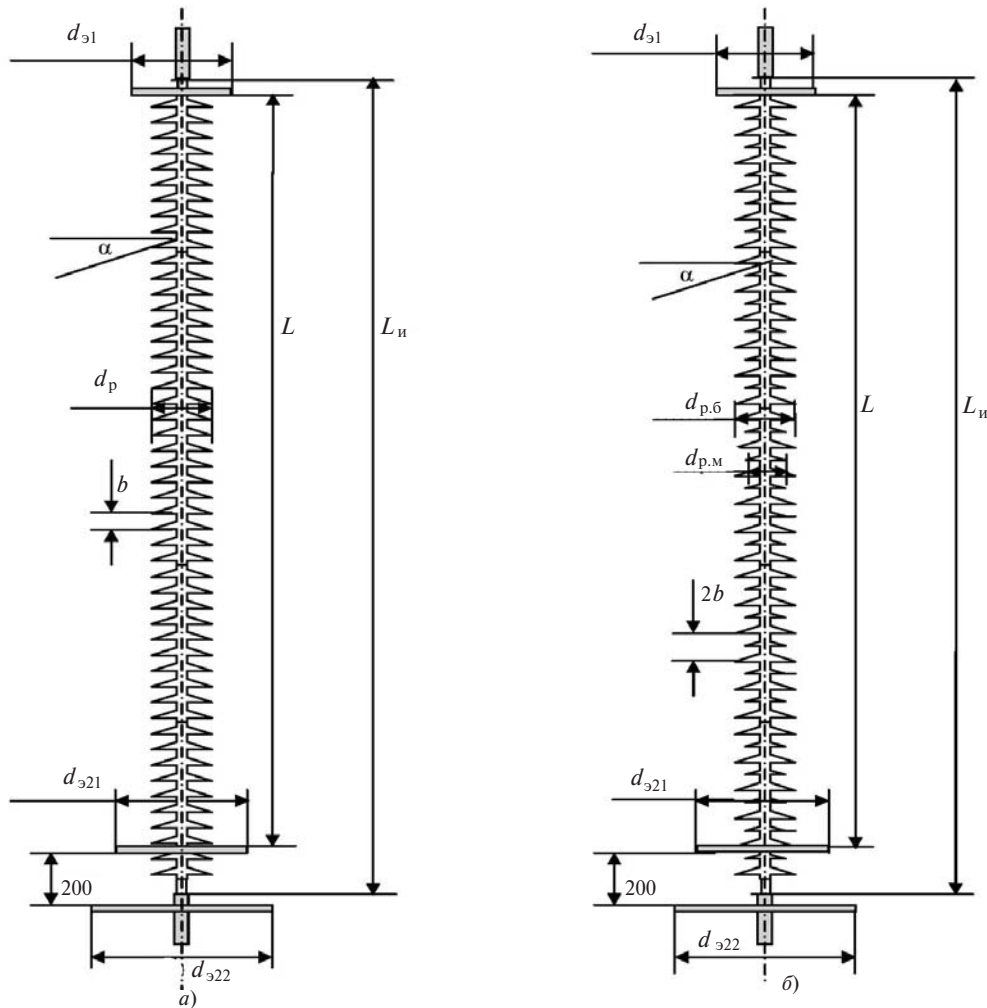


Рис. 2. Эскизы испытуемых линейных полимерных изоляторов на напряжение 500 кВ с постоянным (а) и переменным (б) вылетом ребра:  $d_{э1}=160$  мм,  $d_{э21}=540$  мм,  $d_{э22}=720$  мм,  $L=3500$  мм,  $L_y/L=2,3\div2,5$  (а),  $L_y/L=2,7\div2,8$  (б)

Как следует из приведенных на рис. 3 и 4 данных, в сухом состоянии для всех рассмотренных конструкций их электрическая прочность при импульсных напряжениях различной формы отрицательной полярности оказывается выше, чем при положительных воздействиях.

В обследованном диапазоне изменения габаритов ЛПИ зависимости 50%-х разрядных напряжений от длины изоляции  $U_{50}=F(L)$  при грозовом и коммутационных импульсах отрицательной полярности носят линейный характер (рис. 3).

Смена полярности воздействующего напряжения приводит к снижению электрической прочности испытуемых конструкций. При этом линейный характер зависимостей  $U_{50}=F(L)$  сохраняется для случаев грозового и колебательного коммутационного импульсов (рис. 3, а и в).

При стандартном же коммутационном импульсе +250/2500 мкс вследствие появления протяженных лидеров, относительная длина которых  $l_{л\Sigma}/L$  растет по мере увеличения  $L$  [3, 4], зависимость  $U_{50}=F(L)$  приобретает нелинейный вид (рис. 3, б).

В результате именно при импульсе +250/2500 мкс наблюдается минимальная электрическая прочность обследованных конструкций. Как видно из кривых рис. 4, в областях длительности фронта импульса по обе стороны от  $\tau_{\phi}=250$  мкс электрическая прочность конструкций возрастает, и зависимости 50%-й разрядной напряженности поля изоляции от длительности фронта импульсов положительной полярности ( $E_{50}=F(\tau_{\phi})$ ) приобретают хорошо известный U-образный вид. В наибольшей степени такой характер кривых проявляется для конструкций 330 и 500 кВ и по мере уменьшения класса напряжения становится менее выраженным.

При отрицательных воздействиях U-образный характер зависимостей  $E_{50}=F(\tau_{\phi})$  сохраняется лишь для изоляционных конструкций класса напряжения 220 кВ и выше (рис. 4). Однако влияние длительности фронта импульса в таких случаях существенно меньше, чем при импульсах положительной полярности. Для линейной полимерной изоляции на напряжение 110 кВ кривая  $E_{50}=F(\tau_{\phi})$  приобретает спадающий характер со все возрастаю-

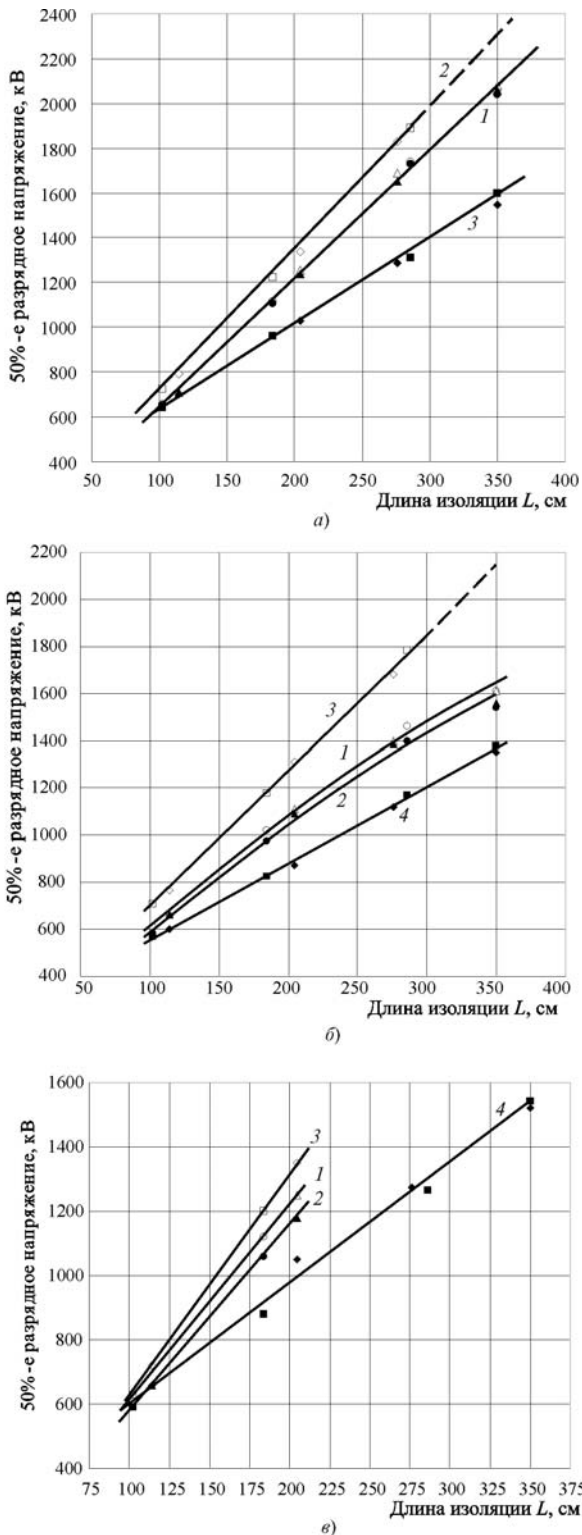


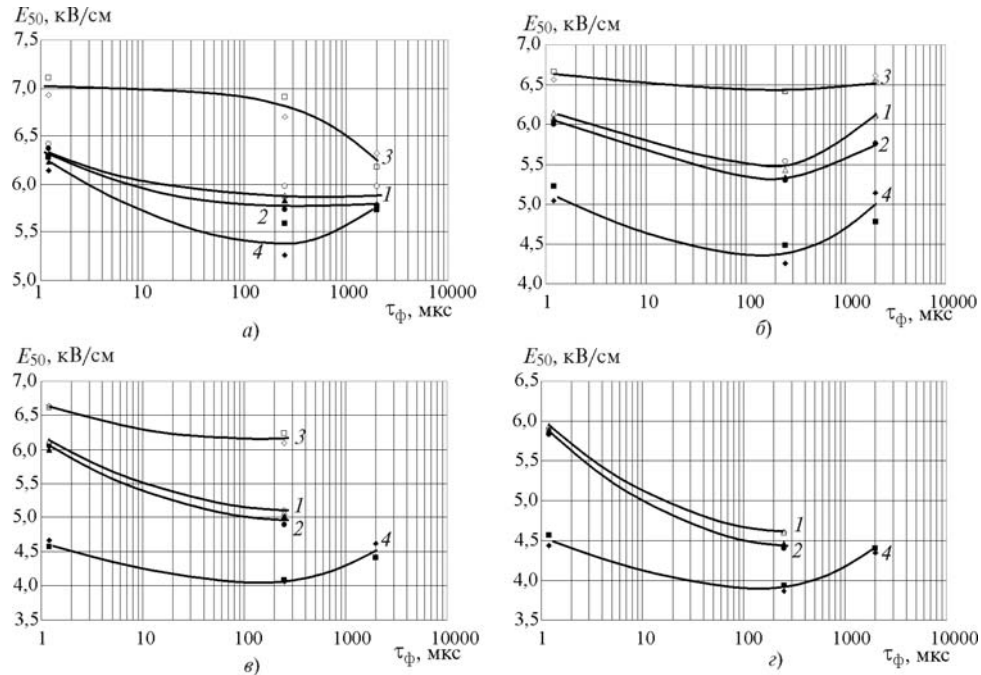
Рис. 3. Зависимости 50%-х разрядных напряжений линейных полимерных изоляторов от их длины: а – при грозовом импульсе 1,2/50 мкс: 1 – положительная полярность в сухом состоянии (○, △) и под дождем (●, ▲); 2 – отрицательная полярность в сухом состоянии (□, ◇); 3 – то же под дождем (■, ◆); б – при коммутационном импульсе 250/2500 мкс: 1 – положительная полярность в сухом состоянии (○, △); 2 – то же под дождем (●, ▲); 3 – отрицательная полярность в сухом состоянии (□, ◇); 4 – то же под дождем (■, ◆); в – при колебательном коммутационном импульсе 2000/3300 мкс: 1–4 – см. б; ○, ●, □, ■ – постоянный вылет ребра; △, ▲, ◇, ◆ – переменный

щей крутизной по мере увеличения длительности фронта импульса.

**Разрядные характеристики линейных полимерных изоляторов под дождем при различных формах воздействующего напряжения.** В сухом состоянии линейной полимерной изоляции обеспечивается емкостное распределение электрического поля воздушного промежутка между экранной арматурой конструкции. Это поле искажено присутствием полимерного изолятора с распределенной по его поверхности напряженностью с резкими ее всплесками на краю острых кромок ребер. Поскольку в сухом состоянии формирование разряда происходит по чисто воздушному пути между экранами, можно предположить, что влияние искажения поля, внесимого изолятором, невелико.

При испытаниях под дождем появляется активная составляющая, обусловленная проводимостью воды. В результате суммарное поле существенно перераспределяется. Это перераспределение зависит от многих факторов и, прежде всего, от степени смачиваемости поверхности изолятора. В случае гидрофильных изоляционных материалов (например полиолефина) на поверхности изолятора образуется сплошная водяная пленка, способствующая выравниванию распределения поля вдоль конструкции. На поверхности гидрофобной силиконовой резины сплошной водяной пленки не образуется, что приводит к неравномерному распределению активной составляющей поля. Кроме того, на кромках ребер появляются капли воды, которые с учетом процесса поляризации ее молекул являются источником резкого локального усиления напряженности поля. Из приведенного следует, что при испытании линейных полимерных изоляторов с гидрофобным силиконовым покрытием создаются потенциальные возможности для снижения электрической прочности конструкций.

Результаты исследований разрядных характеристик ЛПИ под дождем подтверждают в целом негативную роль дождя. Степень его влияния определяется формой, полярностью воздействующего напряжения и практически не зависит от конструктивных особенностей ребер изоляторов (постоянный или переменный вылет ребра). Так, из кривых рис. 3 и 4 видно, что при импульсах положительной полярности степень негативного влияния дождя на электрическую прочность линейных полимерных конструкций относительно невелика. В частности, при грозовом импульсе +1,2/50 мкс это влияние практически отсутствует (рис. 3,а). При коммутационных импульсах оно становится более заметным: при импульсе +250/2500 мкс снижение электрической прочности изоляции составляет примерно 3,2%, а при импульсе +2000/3300 мкс



**Рис. 4.** Зависимости 50%-х разрядных напряженностей линейных полимерных изоляторов от длительности фронта воздействующего напряжения: *а* – линейные изоляторы 110 кВ; *б* – 220 кВ; *в* – 330 кВ; *г* – 500 кВ; 1 – положительная полярность в сухом состоянии (○, △); 2 – то же под дождем (●, ▲); 3 – отрицательная полярность в сухом состоянии (□, ◇); 4 – то же под дождем (■, ◆); ○, ●, □, ■ – постоянный вылет ребра; △, ▲, ◇, ◆ – переменный

достигает 5,0% (рис. 3,б и в). Таким образом, при увеличении длительности фронта импульсного напряжения положительной полярности наблюдается тенденция к постепенному усилению (хотя и слабому) влияния дождя на разрядные характеристики ЛПИ. Как следует из данных рис. 4, неизменным также остается и *U*-образный характер кривых  $E_{50} = F(\tau_{\phi})$ .

Слабое влияние дождя на электрическую прочность ЛПИ при импульсных воздействиях положительной полярности подтверждается и характером траекторий разряда: как и в сухом состоянии они пролегают по чисто воздушному пути между экранной арматурой.

Ситуация существенно меняется при переходе к импульсным воздействиям отрицательной полярности. Прежде всего следует отметить, что в этом случае происходит качественное изменение в характере разрядных траекторий, сопровождающееся существенным снижением электрической прочности конструкций. Чисто воздушный путь формирования перекрытия заменяется на смешанный: каскадный и чисто воздушный. Начиная от высоковольтного отрицательного тороидального экрана, канал разряда «притягивается» к изолятору и каскадно продвигается вверх вдоль кромок ребер, перекрывая таким образом половину и более длины конструкции *L*. Вдоль оставшейся части конструкции разряд развивается по чисто воздушному пути.

Появление каскадных перекрытий приводит к резкому снижению электрической прочности ЛПИ. Негативное влияние дождя наиболее заметно при коммутационных воздействиях и усиливается по мере роста длины изоляции. Так, при грозовом импульсе  $-1,2/50$  мкс снижение 50%-го разрядного напряжения ( $\Delta U_{50}$ ) для конструкций 110 кВ составляет 12%, а для конструкций 500 кВ достигает 29,5%. При импульсе  $-250/2500$  мкс для тех же изоляционных систем значения  $\Delta U_{50}$  возрастают соответственно до 19 и 35,9%, а при импульсе  $-2000/3300$  мкс они равны 6,3 и 34,8%. В результате при импульсах отрицательной полярности разрядные характеристики ЛПИ под дождем оказываются заметно ниже, чем при положительных воздействиях.

Причина столь разной степени влияния дождя в зависимости от полярности импульсного напряжения, по-видимому, кроется в особенностях формирования разряда в рассматриваемых случаях. Можно предложить следующее объяснение найденным закономерностям. В [4] показано, что при импульсных напряжениях положительной полярности разрядные процессы в длинных воздушных промежутках с сильно неоднородными полями и относительно небольшой их несимметрией протекают в основном за счет положительных разрядных явлений вплоть до момента образования сквозной фазы. Разряд формируется в лидерной форме в виде отшнурованного плазменного канала, с голов-

ки которого в глубь промежутка стартуют многочисленные хорошо разветвленные стримеры. Канал лидера питается током, поступающим в его головку от стримеров. Благодаря относительно небольшой средней напряженности поля в положительной стримерной зоне ( $E_{c+} \approx 4,5$  кВ/см) стримеры могут распространяться на значительное расстояние в глубь промежутка, образуя на границе стримерной зоны положительный объемный заряд. Можно предположить, что этот заряд, вынесенный относительно далеко в глубь промежутка развивающимися от высоковольтного анода (экрана) стримерами, оказывает экранирующее действие, снижая напряженность поля на кромках ребер в области сильного поля (вблизи высоковольтного электрода). Тем самым блокируется негативное влияние дождя и не возникают условия формирования каскадных межреберных перекрытий. В результате разряд развивается по чисто воздушному пути.

При импульсах отрицательной полярности формирование разряда в длинных воздушных промежутках с относительно небольшой несимметрией поля осуществляется за счет встречных лидерных процессов противоположной полярности задолго до момента образования сквозной фазы. По указанным причинам под дождем нисходящий от заземленного положительного электрода разряд развивается по чисто воздушному пути. Встречный восходящий разряд с отрицательного высоковольтного электрода начинается с появления отрицательных стримеров, средние градиенты напряжения в которых составляют 10 кВ/см. Соответственно и длина отрицательных стримеров оказывается меньше, чем положительных. Созданный короткими мало разветвленными стримерами отрицательный объемный заряд уже не в состоянии оказывать эффективного экранирующего действия в области сильного поля, соизмеримого с действием положительного объемного заряда. Между высоковольтным электродом (экраном) и ближайшими к нему ребрами изолятора (на кромках которых располагаются капли воды с локализованными на них всплесками напряженности поля от наведенного положительного заряда) формируется область сильного поля. В результате отрицательный разряд начинает продвигаться от высоковольтного электрода в направлении к изолятору, выносит высокий потенциал к кромке одного из нижних ребер, создавая напряженность поля между соседними ребрами, достаточную для перекрытия межреберного промежутка. При испытаниях конструкций под дождем импульсными напряжениями отрицательной полярности даже в случаях незавершенных разрядов наблюдались восходящие от высоковольтного элект-

рода скользящие по кромкам ребер лидерные каналы длиной до 0,5 м.

Резкое снижение электрической прочности линейных полимерных изоляторов под дождем при воздействии импульсного напряжения отрицательной полярности создает серьезные проблемы при решении задачи обеспечения надежной работы ВЛ ВН и СВН. Особенно это касается линий электропередачи высокого напряжения без тросовой молниезащиты, поскольку большинство грозовых разрядов несет на себе отрицательный заряд. Не в меньшей степени опасны для ВЛ разных классов напряжения коммутационные перенапряжения отрицательной полярности с длительностью фронта, близкой к 250 мкс, поскольку именно в этих случаях электрическая прочность конструкций приобретает минимальные значения.

В целом результаты проведенных исследований с учетом данных [1] являются практически единственным источником информации о закономерностях поведения разрядных характеристик линейных полимерных изоляторов при различных формах воздействующего импульсного напряжения обеих полярностей в сухом состоянии и под дождем. Этот экспериментальный материал позволяет обоснованно выбирать габаритные размеры линейной полимерной изоляции и совершенствовать нормы испытательных напряжений.

Как отмечалось, нормируемые в [2] испытательные напряжения для ЛПИ, которые практически полностью совпадают с регламентируемыми в [5] испытательными напряжениями для подстанционной изоляции, явно занижены.

В табл. 1 приведены нормируемые [2] испытательные напряжения для ЛПИ, соответствующие 10%-й вероятности их перекрытия ( $U_{исп} = U_{10}$ ), а также фактические минимальные выдерживаемые напряжения обследованных полимерных изоляторов 110–500 кВ, также соответствующие 10%-й вероятности их перекрытия ( $U_{выд} = U_{10}$ ).

Таблица 1

Класс напряжения, кВ	Значение напряжения, кВ, при разной форме импульсного напряжения			
	$U_{исп} = U_{10}$ по [2]		$U_{выд} = U_{10}$	
	1,2/50 мкс	250/2500 мкс (в сухом состоянии и под дождем)	1,2/50 мкс	250/2500 мкс (в сухом состоянии/ под дождем)
110	450	330	630	595/535
220	950	620	1100	970/785
330	1175	950	1645	1300/1070
500	1550	1230	2020	1480/1285

Анализ данных табл. 1 показывает, что в рамках одного и того же класса напряжения нормируемые испытательные напряжения [2] оказываются заметно ниже фактических значений выдерживаемых напряжений линейных полимерных изоляторов 110–500 кВ. У разработчиков и изготовителей линейных полимерных изоляторов это может вызвать соблазн сократить длину изоляции, снизив тем самым значения выдерживаемых напряжений до испытательных значений, нормируемых [2], что неизбежно повлечет за собой снижение надежности работы ВЛ и может отрицательно повлиять на перспективы применения полимерных изоляторов. Уже по этим причинам целесообразно пересмотреть нормативную базу [2] в сторону увеличения испытательных напряжений. Ужесточение требований к электрической прочности полимерной изоляции ВЛ диктуется и объективным фактором – необходимостью соблюдения принципов координации линейной и подстанционной изоляции. В этом плане надо учитывать следующие основные моменты.

1. Изоляционные системы ВЛ состоят из существенно большего, чем на подстанциях, числа параллельно соединенных элементов, что обеспечивает большую степень снижения электрической прочности первой системы по сравнению со второй.

2. Возникающие на подстанциях коммутационные перенапряжения, ограниченные защитными аппаратами, могут оказаться ниже, чем на ВЛ, особенно при большой длине линий на разомкнутом конце.

С учетом сказанного, используя полученные в [1] и настоящей статье данные по разрядным характеристикам ЛПИ, была выполнена оценка испытательных напряжений полимерной изоляции ВЛ 110–500 кВ. При этом принималось во внимание, что возникающие на подстанциях грозовые и коммутационные перенапряжения ограничиваются двумя видами защитных аппаратов: ограничителями перенапряжений (ОПН) и вентильными разрядниками (ВР) до двух различных уровней (*a* и *b* соответственно).

При оценке испытательных напряжений за основу целесообразно принять коммутационные перенапряжения, при которых наблюдается наименьшая электрическая прочность изоляции, что определяет минимально допустимые ее габариты.

В табл. 2 приведены принятые в России расчетные уровни коммутационных перенапряжений (коэффициенты  $K_{\text{прн}}$ ) для изоляции электрооборудования ВН и СВН [5, 6]. Расчетный коэффициент перенапряжений определяется как

$$K_{\text{прн}} = \frac{U_{\text{прн}}}{\sqrt{2}U_{\text{н.р.ф}}}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{прн}}$  – расчетная амплитуда перенапряжений;  $U_{\text{н.р.ф}}$  – наибольшее рабочее фазное напряжение сети.

Для определения испытательных напряжений коммутационного импульса  $U_{\text{и(к.и)}}$  применительно к линейной изоляции использовались известные статистические принципы координации изоляции [7]. В предположении справедливости нормального закона для кривых эффекта изоляции испытательные напряжения находятся как

$$U_{\text{и(к.и)}} = U_{50(1)}(1 - 1,3\sigma_1), \quad (2)$$

где  $U_{50(1)}$  и  $\sigma_1 = 0,06$  – 50%-е разрядное напряжение и расчетное значение стандартного отклонения единичного изоляционного элемента соответственно.

В реальности изоляционные системы ВЛ и подстанций состоят из *n* параллельных элементов. Если принять, что все *n* элементов одинаковы, то для 50%-го разрядного напряжения системы из *n* элементов справедливо выражение:

$$U_{50(n)} = U_{50(1)}(1 - m\sigma_1). \quad (3)$$

Для подстанционных изоляционных систем обычно принимают  $n=500$ , при этом  $m=3,0$  [6, 7]. На ВЛ число параллельных элементов в среднем на порядок больше, поэтому принимаем  $n=5000$ . Тогда  $m=3,6$ , а (3) запишется в виде:

Таблица 2

Класс напряжения сети, кВ	Наибольшее фазное напряжение сети, кВ	Расчетный уровень ограничения коммутационных перенапряжений $K_{\text{прн}}$		Испытательное напряжение коммутационного импульса, кВ		Минимально допустимая длина ЛПИ <i>L</i> , м	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
110	73	3,5	3,5	470	470	0,8	0,8
220	146	3,0	3,0	800	800	1,88	1,88
330	210	2,5	2,8	960	1070	2,39	2,76
500	303	2,1	2,5	1170	1380	3,04	3,75

$$U_{50(n)} = U_{50(1)} (1 - 3,6\sigma_1) \quad (4)$$

и

$$U_{50(1)} = \frac{U_{50(n)}}{(1 - 3,6\sigma_1)} \quad (5)$$

Приравнивая расчетную амплитуду коммутационных перенапряжений  $U_{\text{прн}}$  50%-му разрядному напряжению системы из  $n$  элементов  $U_{50(n)}$  и подставляя (5) в (2), с учетом (1) получим

$$U_{\text{и(к.и)}} = K_{\text{прн}} \frac{\sqrt{2} U_{\text{н.р.ф}} (1 - 1,3\sigma_1)}{(1 - 3,6\sigma_1)} K_{\text{в}}, \quad (6)$$

где  $K_{\text{в}} = 1,1$  – коэффициент, учитывающий снижение разрядного напряжения изоляции при увеличении высоты расположения трассы ВЛ над уровнем моря до 1000 м [7].

Найденные по (6) значения испытательных напряжений коммутационного импульса для изоляции ВЛ 110–500 кВ представлены в табл. 2.

Как отмечалось выше, минимальная электрическая прочность ЛПИ имеет место при коммутационных импульсах 250/2500 мкс отрицательной полярности при испытании изоляторов под дождем. При этом согласно кривой 2 рис. 3,б с учетом формулы (2) в этом случае выдерживаемые напряжения

$$U_{\text{выд(к.и)}} = U_{10(к.и)} = 215 + 312L, \text{ кВ.} \quad (7)$$

Подстановкой в левую часть (7) найденных по (6) значений испытательного напряжения находится минимально допустимая длина ЛПИ  $L$  (расстояние между экранной арматурой). Определенные таким образом значения  $L$  приведены в табл. 2.

Изоляция ВЛ должна надежно работать при всех формах воздействующего напряжения (рабочем напряжении промышленной частоты, грозových и коммутационных перенапряжениях) и условиях эксплуатации (в загрязненном и увлажненном состоянии при рабочем напряжении промышленной частоты). Минимальная длина гирлянд стеклянных и фарфоровых изоляторов на действующих ВЛ 110–500 кВ, выбранная по требованию надежной работы в условиях загрязнения и увлажнения (для районов со II степенью загрязнения), равна:

Класс напряжения сети, кВ	110	220	330	500
Минимально допустимая длина, м	1,02	1,82	2,66	3,64

Из сопоставления этих данных и табл. 2 следует, что для ВЛ классов напряжения 220 кВ и выше (уровень ограничения коммутационных перенапряжений (б)) длина линейной изоляции, выбранная по коммутационным перенапряжениям и по требованию надежной работы в условиях загрязнения и

увлажнения, оказывается близкой по значениям. В то же время для ВЛ 110 кВ последнее требование выполняется при минимальной длине изоляции 1,02 м. Эта длина изоляции совпадает с полученной в [9] длиной линейных полимерных изоляторов класса напряжения 110 кВ при испытании их в условиях загрязнения и увлажнения.

Из анализа приведенных данных также видно, что для ВЛ классов напряжения 330 кВ и выше при уровне ограничения коммутационных перенапряжений (а) длина линейной изоляции, выбранная по коммутационным перенапряжениям, оказывается заметно меньше длины изоляции, соответствующей требованию надежной ее работы в условиях загрязнения. Поэтому для полимерной изоляции ВЛ 110–500 кВ предлагается оставить испытательные напряжения коммутационного импульса, выбранные только по уровню ограничения перенапряжений (б).

Полученные таким образом значения испытательных напряжений коммутационного импульса для линейных полимерных изоляторов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Номинальное напряжение ВЛ, кВ	Предлагаемые испытательные напряжения для ЛПИ			
	Грозовой импульс, кВ	Коммутационный импульс под дождем, кВ	Напряжение 50 Гц (пятиминутное), кВ (дейст.)	
			в сухом состоянии	под дождем
110	510	–	–	230
220	1070	–	–	440
330	1330	1070	570	
500	1740	1380	760	

Как и для изоляции электрооборудования подстанций, испытания коммутационными импульсами предлагается проводить лишь для полимерных изоляторов ВЛ 330 кВ и выше и только под дождем, поскольку в этом случае их электрическая прочность ниже, чем в сухом состоянии. Такая практика давно используется во многих зарубежных странах, ибо вполне логична и способствует снижению объема и стоимости испытаний.

Введение в [2] испытаний коммутационным импульсом полимерной изоляции ВЛ 110–220 кВ с явно заниженными требованиями к ее электрической прочности ничем не оправдано, поскольку в этом случае при относительно небольших габаритах изоляции U-образные зависимости электрической прочности от длительности фронта слабо выражены и, следовательно, объем испытаний можно



ограничить (как это принято в [5]) грозowymi импульсами и кратковременным воздействием напряжения промышленной частоты.

Следует отметить, что вопрос о выборе испытательных напряжений полимерной изоляции ВЛ при грозowych импульсах и кратковременном воздействии напряжения промышленной частоты довольно сложный и неоднозначный. Для изоляции электрооборудования подстанций выбор испытательных напряжений (грозowych, коммутационных и при кратковременном воздействии напряжения промышленной частоты) основывался на уровнях ограничения перенапряжений, задаваемых защитными аппаратами (ВР и ОПН). На ранних стадиях развития нормативной базы изоляция подстанций испытывалась грозowymi импульсами и кратковременным напряжением промышленной частоты. Последнее воздействие имитировало коммутационные перенапряжения, а значение испытательного напряжения  $U_{и(50Гц)}$  выбиралось исходя из расчетных уровней коммутационных перенапряжений [10]. В 70-е гг. прошлого века в нормативные документы были введены испытания коммутационными импульсами в сухом состоянии и под дождем. При этом остались и испытания кратковременным воздействием напряжения промышленной частоты, по существу дублирующие в определенной степени испытания коммутационными импульсами.

С учетом сказанного применительно к полимерной изоляции ВЛ 110–220 кВ представляется целесообразным проводить испытания кратковременным (пятиминутным) напряжением промышленной частоты. При этом следует учитывать, что и в этом случае дождь также негативно влияет на электрическую прочность полимерных изоляторов. Поэтому для полимерной изоляции ВЛ 110–220 кВ можно ограничиться лишь испытаниями под дождем. Это подтверждается и практикой многих зарубежных фирм, приводящих данные по пятиминутным выдерживаемым напряжениям полимерных изоляторов только под дождем. Для изоляции ВЛ 330 кВ и выше можно по аналогии с [5] оставить пока испытания напряжением промышленной частоты, но только в сухом состоянии, поскольку остаются испытания коммутационными импульсами под дождем. В отсутствие каких-либо иных убедительных доводов при выборе испытательных напряжений промышленной частоты для изоляции ВЛ целесообразно руководствоваться теми же соотношениями между испытательными напряжениями коммутационного импульса  $U_{и(к.и)}$  и кратковременным напряжением промышленной частоты  $U_{и(50Гц)}$ , которые приняты для подстанционной изоляции. Определенные таким образом кратковременные испытательные напряжения промыш-

ленной частоты для полимерной изоляции ВЛ 110–500 кВ представлены в табл. 3.

Как уже отмечалось, выбор испытательных напряжений грозowego импульса для подстанционной изоляции определяется уровнями ограничения грозowych перенапряжений, задаваемых защитными аппаратами. В этом плане для изоляции ВЛ создается совершенно иная ситуация, поскольку на ВЛ нет защитных аппаратов (если не считать, что в последнее время на ряде линий на некоторых участках устанавливаются линейные ограничители перенапряжений). Молния может ударить в любой точке вдоль трассы ВЛ, вызывая грозowych перенапряжения.

В такой ситуации наиболее приемлемый вариант для определения испытательных напряжений грозowego импульса полимерной изоляции ВЛ – использовать принятые в [5] соотношения между испытательными напряжениями грозowego  $U_{и(г.и)}$  и коммутационного  $U_{и(к.и)}$  импульсов. Найденные таким образом испытательные напряжения грозowego импульса для полимерной изоляции ВЛ 110–500 кВ приведены в табл. 3.

Сформулированные в статье предложения по нормированию испытательных напряжений линейной полимерной изоляции позволяют ужесточить по сравнению с [2] требования к ее электрической прочности, повысить тем самым надежность работы ВЛ, на которых используются наиболее перспективные полимерные изоляторы.

**Выводы.** 1. Разрядные характеристики линейных полимерных изоляторов на напряжение 110–500 кВ определяются длительностью фронта импульсного напряжения, его полярностью, условиями проведения испытаний (в сухом состоянии или при дожде) и практически не зависят от конструктивных особенностей исполнения профиля ребра.

2. При испытании в сухом состоянии разрядные характеристики линейных полимерных изоляторов определяются формой и полярностью воздействующего напряжения. При этом наибольшая электрическая прочность образцов достигается при импульсах отрицательной полярности.

3. Независимо от полярности воздействующего напряжения и условий проведения испытаний (в сухом состоянии или под дождем) минимальная электрическая прочность конструкций имеет место при коммутационном импульсе 250/2500 мкс. Исключения составляют конструкции класса напряжения 110 кВ, для которых в сухом состоянии при отрицательных воздействиях минимум электрической прочности достигается при импульсе 2000/3300 мкс.

4. При испытании линейных полимерных изоляторов под дождем импульсами положительной полярности негативное влияние дождя проявляется лишь при коммутационных воздействиях. При этом максимальное снижение электрической прочности конструкций имеет место при коммутационном импульсе 2000/3300 мкс и не превышает 5%.

5. В наиболее сильной степени влияние дождя сказывается при испытании линейных изоляторов импульсами отрицательной полярности. При грозовых воздействиях снижение электрической прочности конструкций достигает 12–29,5%, при коммутационных импульсах 250/2500 мкс – 19–35,9%, а при коммутационных импульсах 2000/3300 мкс – 6,3–34,8%. Расхождение между электрической прочностью изоляторов в сухом состоянии и под дождем растет по мере увеличения длины образца. Для изоляционных конструкций с покрытием из силиконовой резины разрядные характеристики при испытаниях под дождем импульсами отрицательной полярности оказываются ниже, чем при положительной.

6. Для линейной полимерной изоляции на напряжение 110–500 кВ необходимы более жесткие нормы испытательных напряжений по сравнению с существующей нормативной базой, что позволяет повысить надежность линий электропередачи ВН и СВН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Корявин А.Р., Волкова О.В.** Импульсная электрическая прочность полимерных линейных изоляторов в сухом состоянии и при дожде. – Электротехника, 2000, № 3.

2. **ГОСТ 28856–90.** Изоляторы линейные подвесные стержневые полимерные.

3. **Горин Б.Н., Шкилев А.В.** Развитие электрического разряда в длинных воздушных промежутках при импульсном напряжении положительной полярности. – Электричество, 1974, № 2.

4. **Электрическая** прочность внешней изоляции/Под ред. О.В. Волковой и А.Р. Корявина. – М.: «Знак», 2006.

5. **ГОСТ 1516.3–96.** Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.

6. **Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кизеветтер В.Е.** Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. – Л.: Энергия, 1969.

7. **Александров Г.Н., Иванов В.Л.** Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения. – Л.: Энергоатомиздат, 1984.

8. **РД 153-34.3-35.125-99.** Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. 2-е изд. – СПб: Изд-во ПЭИПК, 1999.

9. **Годулян В.В., Корявин А.Р., Трифонов В.З. и др.** Электрическая прочность линейной полимерной изоляции высокого напряжения в условиях загрязнения. – Электричество, 2006, № 9.

10. **Сапожников А.В.** Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. – М.: Энергия, 1969.

*Авторы: Корявин Алексей Родионович окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1971 г. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию по исследованию электрического разряда в длинных воздушных промежутках. Начальник сектора ФГУП ВЭИ.*

*Волкова Ольга Владимировна окончила ЭЭФ МЭИ в 1958 г. В 1970 г. защитила кандидатскую диссертацию по исследованию разрядных характеристик защитных воздушных промежутков. Ведущий научный сотрудник ФГУП ВЭИ.*

*Милкин Евгений Александрович окончил МГВМИ в 2010 г. Инженер ФГУП ВЭИ.*

\* \* \*

### Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов России и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира.

Напоминаем наш адрес: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Тел./факс (7-495)362-7485