

Ю.Н. Шумилов, В.Г. Сантоцкий, Э.Д. Шумилова

О НЕОБХОДИМОСТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 10-20 КВ

Стаття присвячена вибору конструкцій і розробці вимог до нових лінійних ізоляторів для розподільчих мереж 6-10-20 кВ, що забезпечують високу стійкість повітряних мереж до грозових перенапруг при прямих і індуктованих впливах блискавки. Підвищення грозостійкості ізоляторів дозволить скоротити перерви в електропостачанні споживачів і зменшити травматизм персоналу електричних мереж при відновлювальних роботах. Бібл. 11, табл. 2, рис. 1.

Ключові слова: повітряна лінія електропередачі, штирові ізолятори, опорно-стрижневі ізолятори, грозові перенапруги, електричний пробій, перекриття ізоляторів, перерви електропостачання, електробезпека, надійність.

Статья посвящена выбору конструкций и разработке требований к новым линейным изоляторам для распределительных сетей 6-10-20 кВ, обеспечивающих высокую устойчивость воздушных сетей к грозовым перенапряжениям при прямых и индуцированных воздействиях молнии. Повышение грозостойкости изоляторов позволит сократить перерывы в электроснабжении потребителей и уменьшит электротравматизм персонала электрических сетей при восстановительных работах. Библ. 11, табл. 2, рис. 1.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, штыревые изоляторы, опорно-стержневые изоляторы, грозовые перенапряжения, электрический пробой, перекрытия изоляторов, перерывы электроснабжения, электробезопасность, надёжность.

Введение. В Украине воздушные линии электропередачи (ВЛ) класса напряжения 6 и 10 кВ являются наиболее протяженными. Их общая длина превышает 280000 км. Более 95 % ВЛ выполнено на опорах из железобетонных стоек. На всех опорах ВЛ установлены штыревые фарфоровые ШФ или стеклянные ШС изоляторы. Штыревые изоляторы соответствуют рекомендациям ИЕС и требованиям действующих стандартов, но во время эксплуатации на ВЛ повреждаются. По данным [1] до 60-70 % однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) по причине «изоляция» происходит на опорах ВЛ из-за повреждения линейных штыревых изоляторов, остальные 30-40 % – из-за разрушения разрядников, повреждения изоляции на трансформаторных подстанциях и др.

Подавляющая часть электрических сетей 6, 10 кВ выполнена на опорах из железобетонных стоек, изготовленных из вибрированного железобетона, с креплением проводов с помощью штыревых фарфоровых или стеклянных изоляторов. В этих решениях заложены и недостаточный ресурс и невысокая надежность ВЛ-6-10 кВ. В 35 % случаев аварии случались из-за разрушения и электрического пробоя штыревых изоляторов в силовом узле.

При прямом ударе молнии в провод (DLS) при крутизне волны перенапряжения более 1600 кВ/мкс в головке изолятора происходит капиллярный пробой [2, 3], а при индуктированных перенапряжениях от близких ударов молнии (ИО) происходят перекрытия изоляторов [4]. В обоих случаях при определенных условиях искровой разряд молнии может перейти в дуговой, поддерживаемый рабочим напряжением. От термического воздействия дуги обычно откалывается/рассыпается головка изолятора. Возникает режим однофазного короткого замыкания (SPSC) [5, 6].

Режим SPSC на ВЛ-6-10 кВ может существовать без отключения ВЛ от 2-х до 6-ти и более часов. При этом по железобетонной опоре протекает емкостный ток 5-10 А, и в бетоне выгорают каверны, арматурная сталь начинает плавиться, наибольшее разрушение

бетона и арматуры происходит в месте заглубления опоры в земле. Разрушение бетона и арматуры приводит к непредвиденному падению опор, а по причине протекания емкостного тока вблизи опоры появляются опасные для жизни напряжения прикосновения и шаговое напряжение при приближении к опоре человека [7].

В письмах «Держгірпромнагляда України» №4824/0/41-8/6/13 и №2071/0/4.1-9.1/-6/14 указано: «Згідно з аналізом виробничого травматизму в енергетичній галузі у 2013 р. травмовано 171 особу, у тому числі 20 – зі смертельним наслідком. Основними видами подій, під час яких сталися нещасні випадки зі смертельним наслідком були: ураження електричним струмом та падіння потерпілого з висоти разом з опорою».

Режим SPSC также влияет на изоляцию другого оборудования электрической сети. Такое положение в украинских сетях 6, 10 кВ должно быть исправлено.

Целью работы является выбор конструкции и разработка требований к новым линейным изоляторам ВЛ 10-20 кВ, обеспечивающих высокую устойчивость к грозовым перенапряжениям при прямых и индуктированных воздействиях молнии.

Основные материалы исследований. В странах, где переход на железобетонные опоры сопровождался применением вместо штыревых изоляторов опорно-стержневых изоляторов подобных проблем нет и не было. В России и Белоруссии для повышения надежности распределительных сетей 6, 10 кВ в 2004-2009 гг. приступили к освоению и установке опорно-стержневых изоляторов (фарфоровых и полимерных) на замену штыревых [8].

Кардинальным решением проблемы снижения аварийности ВЛ 10-20 кВ в Украине будет установка вместо штыревых изоляторов – опорно-стержневых изоляторов (фарфоровых и/или полимерных). Их конструкция показана на рис. 1. Учитывая ведущиеся разработки по применению в украинских распределительных

© Ю.Н. Шумилов, В.Г. Сантоцкий, Э.Д. Шумилова

тельных сетях напряжения 20 кВ, в программу работ также включены изоляторы напряжением 20 кВ.

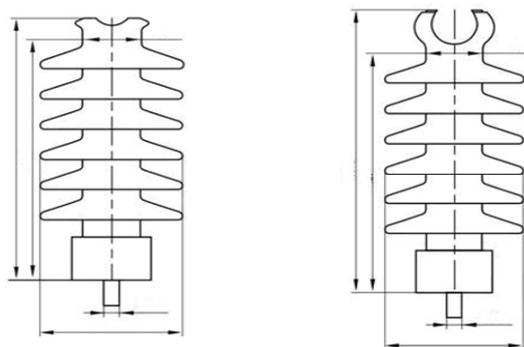


Рис. 1. Эскиз опорно-стержневого изолятора для ВЛ 10-20 кВ, варианты А и Б

Еще более эффективным решением будет применение изоляционных траверс. Применение траверс позволит намного повысить импульсную электрическую прочность, влагоразрядное напряжение изоляции и уменьшить вероятность перехода грозовых разрядов в дуговые.

За счет улучшения этих показателей возможно снизить удельное число отключений на ВЛ-6-10 кВ не менее чем в 7,6 раз (табл. 1).

Таблица 1

Удельное число отключений ВЛ-6-10 кВ, 1/100 км·100 г.ч. в безлесной зоне (оценка сверху) [4]

Изоляция	ВЛ-6кВ		ВЛ-10 кВ	
	N_{out_DLS}	N_{out_IO}	N_{out_DLS}	N_{out_IO}
ШС-10А	13,0	11,0	17,3	21,1
ШС-10В	13,0	8,0	17,3	15,4
ШС-10Г	13,9	9,4	18,5	23,1
ШФ-10Г	12,2	8,8	16,2	19,7
ШФ-20В	11,4	3,7	15,2	8,4
ШК-10	11,8	8,8	15,7	18,6
ЛК 70/10	12,4	9,9	16,5	21,7
Изолпр. траверса ТИ	3,6	0,5	4,3	1,1

Прим. DLS – прямой удар молнии; IO – индуктивные перенапряжения.

Для тупиковых и незакольцованных линий установка опорно-стержневых изоляторов либо траверс является практически единственным наиболее дешевым способом решения проблемы непредвиденного отключения электроэнергии потребителям и снижения электротравматизма и смерти людей. В Украине опорно-стержневые изоляторы для ВЛ-6-10 кВ не выпускаются.

В связи с этим Научно-проектный центр развития ОЭС Украины совместно с ПАО «Славянский завод высоковольтных изоляторов», на совещании 25 сентября 2017 г. рассмотрели техническую сторону вопроса разработки и освоения производства надежных конструкций опорно-стержневых изоляторов и траверс для ВЛ-10 кВ и ВЛ-20 кВ. Рассматривался вопрос разработки изоляторов и траверс в 2-х исполнениях – полимерных и фарфоровых, пригодных для использования как на ВЛ с изолированными проводниками, так и на ВЛ с защищенными проводниками.

Особое внимание было уделено требованиям к новым изоляторам. Рассмотрим эти вопросы.

Требование к нормированной изгибающей нагрузке. В каталогах на штыревые изоляторы ШФ-10-20 кВ и ШС-10-20 кВ указывается нормированная механическая сила на изгиб $F_{bend} = 12,5$ кН. Поясним обоснование величины $F_{bend} = 12,5$ кН. Это важно понимать при обосновании выбора F_{bend} для полимерных опорно-стержневых изоляторов.

Гарантированная разрушающая нагрузка на изгиб штырей и крючков по всем проектам не превышает 3 кН, а разрушающая нагрузка на опору с тремя изоляторами – не более 8 кН. Фарфоровые изоляторы с учетом возможной разнородности сырьевых материалов (глина, каолин, песок), условий обжига, хрупкости, непрогнозируемого старения конструировались с заранее завышенными характеристиками по прочности, чтобы гарантировать при эксплуатации необходимую (2-3 кН) прочность на изгиб. При этом на практике применяющийся полиэтиленовый колпачок между штырем и фарфоровым изолятором срывается при меньших нагрузках в результате изгиба штыря: на нагрузке порядка 1,5-2 кН.

По условиям проведения испытаний штыревых фарфоровых изоляторов на механическую нагрузку, изолятор со специальным высокопрочным стержнем (сталь 40Х, диаметр у основания – 40 мм) армируют глухой заделкой с помощью цементно-песчаной связки. Только при глухой арматуре со специальным стержнем, который не гнется при нагрузке 12,5 кН, удастся провести испытания.

То есть, в обычных условиях узел «изолятор – нормальный штырь» не выдерживает более 3 кН, поэтому применение на промежуточных опорах изоляторов с большей разрушающей нагрузкой экономически нецелесообразно и может привести к падению самой опоры, дополнительным затратам и времени на восстановление опоры. В случае же поломки изолятора при нагрузке (например, 4 кН) меньшей, чем прочность опоры (8 кН), электроснабжение можно быстро восстановить, заменив изолятор. При этом провод в большинстве случаев не падает на землю, так как остается висеть на сломанном изоляторе, если, конечно, прекращено воздействие нагрузки (например, причиной аварии было падение дерева) [9].

В проектах на железобетонные опоры предусматриваются максимальные тяжения в следующих значениях: 2; 4; 6; 8 кН. Нужен ли полимерный изолятор на нагрузку 12,5 кН? Такой изолятор будет достаточно дорогой. Мы считаем, что для массового применения целесообразно разработать два типоразмера изолятора: на нагрузки 4 кН и 8 кН. Они вполне обеспечат надежность при действующих в эксплуатации механических нагрузках.

Требования к грозоупорности. Для удовлетворения требований по высокой грозоупорности необходимо выполнить два условия:

1. Не допустить сквозного пробоя диэлектрика при прямых ударах молнии в провод.
2. Не допустить перекрытия изоляторов при индуктированных перенапряжениях с последующим переходом искрового разряда в дуговую.

Удовлетворение этих требований позволит исключить в воздушных линиях опасных режимов ОЗЗ по причине низкой грозоупорности изоляторов.

Для исключения пробоя необходимо увеличить толщину диэлектрика в изоляционной части (детали) изолятора, а для исключения перекрытия – увеличить разрядное расстояние по поверхности (расстояние между металлическими частями по воздуху). В обоих случаях цель достигается увеличением изоляционной высоты опорно-стержневого изолятора h .

Разрядное расстояние ℓ_d для опорных изоляторов определяется по известному выражению [10]:

$$U_{\text{imp.}+} = 670 \cdot \ell_d, \quad (1)$$

где $U_{\text{imp.}+}$ – воздействующее на изолятор импульсное напряжение от индуцированных волн при грозовом разряде (амплитудное значение), кВ_{max}; ℓ_d – разрядное расстояние, м.

Амплитудные значения импульсных перенапряжений $U_{\text{imp.}+}$ имеют статистическую природу. Экспериментальные законы распределения амплитуд индуцированных перенапряжений в сетях 6-10 кВ изучались в работе [4]. В ней показано, что на уровне вероятности $P(U_{\text{DLS}}) < 0,08 \div 0,05$ амплитудные значения $U_{\text{imp.}+}$ составляют 200-300 кВ_{max}.

Подставив эти значения в формулу (1), находим, что ℓ_d может быть принято в диапазоне 300-570 мм. Учитывая достаточно малую вероятность перекрытия при таких разрядных расстояниях ℓ_d , а также коэффициент перехода импульсного перекрытия в дугу 0,5-0,7 [4], опасная в линии ситуация, связанная с возникновением ОЗЗ при индуцированных перенапряжениях, будет сведена до минимума.

Для опорно-стержневых изоляторов 6-20 кВ соотношение ℓ_d равно примерно 1,2; поэтому при $\ell_d = 300-570$ мм толщина изоляционной детали по оси изолятора составит 250-475 мм. При таких толщинах внутренний пробой изоляторов маловероятен, то есть первое условие грозоупорности также выполняется.

На основании вышеприведенных разъяснений были сформулированы основные требования к опорно-стержневым изоляторам для воздушных линий 10-20 кВ, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Основные технические требования к опорно-стержневым изоляторам для ВЛ-10-20 кВ

Наименование показателя	Фарфоровые изоляторы		Полимерные изоляторы	
	10 кВ	20 кВ	10 кВ	20 кВ
Механическая сила на изгиб F_{bend} , кН	8	8	4	4
Разрядное расстояние ℓ_d , мм	400	450	400	450
Испытательное напряжение грозового импульса, кВ _{max}	280	300	280	300
Длина пути тока утечки (не менее), мм	700	700	700	700
Вероятность перекрытия при индуцированных перенапряжениях $P(U_{10})$, не более	0,08	0,075	0,05	0,075

Выводы.

1. Сформулированы основные технические требования к опорно-стержневым линейным изоляторам для ВЛ 10-20 кВ.

2. На ВЛ 10 кВ, расположенных в районах с повышенной грозовой деятельностью, рекомендуется при-

менять линейные опорно-стержневые изоляторы вместо штыревых. На ВЛ-20 кВ рекомендуется применять только опорно-стержневые изоляторы.

3. Применение на ВЛ-10-20 кВ опорно-стержневых изоляторов высокой грозоупорности существенно повысит электробезопасность и надежность электрооборудования потребителей.

4. Увеличенная в 2-3 раза стоимость опорно-стержневых изоляторов по сравнению с применяемыми будет компенсирована за счет эффектов от сокращения количества разрушаемых опор, ущерба от недоотпуска электроэнергии, от затрат при транспортировании и восстановлении разрушенных опор, моральной стороны от снижения несчастных случаев при поражении электрическим током в зоне аварийной ситуации.

5. Предлагаемые для ВЛ-10-20 кВ изоляторы могут быть использованы для крепления как голых так и защищенных проводов.

6. Исключение из конструкции наиболее слабых элементов – колпачков и штырей повысит надежность силового изоляционного узла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сантоцкий В.Г. Некоторые результаты автоматической регистрации замыканий на землю в воздушных сетях 10 кВ // Информационный сборник института «Укрсиленергопроект» «Розподільчі електромережі». – 2016. – №3-4. – С. 17-24.
2. Иерусалимов М.Е., Ильенко О.С., Козюра В.Н., Соколовский С.А. Исследование импульсных характеристик штыревых изоляторов // Техническая электродинамика. – 1983. – №5. – С.3-9.
3. Сантоцкий В.Г. Об остаточной электрической прочности штыревых изоляторов 10 и 20 кВ, пробитых грозowymi импульсами, и продолжительности их пребывания в электрической сети 10 кВ под рабочим напряжением // Тезисы рабочего совещания 4-й секции научного совета по теоретическим и электрофизическим проблемам повышения надежности и долговечности изоляции сетей с изолированной нейтралью. – Таллин, 1981. – 180 с.
4. Малышева Е.П. Повышение надежности распределительных сетей от 6 до 10 кВ на основе моделирования и усиления грозоупорности: дис. канд. техн. наук. – Новосибирск, 2006.
5. Арайс Р.Ж., Стелманис И.О. Эксплуатация электрических сетей сельской местности. – М.: «Энергия», 1977. – 280 с.
6. Федосенко Р.Я., Мельников А.Я. Эксплуатационная надежность электросетей сельскохозяйственного назначения. – М.: «Энергия», 1997. – 320 с.
7. Шерстобитов Р.М., Юндин М.А. Влияние однофазных замыканий на землю в сети ВЛ 10 кВ на надежность электрооборудования потребителей // Надежность и безопасность энергетики. – 2010. – №10. – С.63-66.
8. Номенклатура высоковольтных полимерных изоляторов. Основные линейные штыревые полимерные изоляторы для ВЛЭП 20 кВ. Каталог ЗАО «Арматурно-изоляционный завод». – Лыткарино, 2013.
9. Опорные линейные стержневые полимерные изоляторы. Режим доступа: <https://elektromontagnik.ru/lectures/part2/file/OLK.pdf>.
10. Синявский В.Н. Расчет и конструирование электрокерамических изоляторов. – М.: «Энергия», 1977. – 192 с.
11. Sangkasaad S. Research and experience with new insulator technologies in Thailand // Proceeding of 2001 World insulator congress: applying new technologies for better reliability and lower costs. – Shanghai, 2001. – pp. 154-167.

REFERENCES

1. Santotskiy V.G. Some results of automatic detection of ground faults in 10 kV air grids. *Information collection of the UkrSilEnergoProject Institute «Distribution Grids»*, 2016, no.3-4, pp. 17-24. (Rus).
2. Ierusalimov M.Ye., Il'yenko O.S., Kozyura V.N., Sokolovskiy S.A. Investigation of impulse characteristics of pin insulators. *Technical electroynamics*, 1983, no.5, pp. 3-9. (Rus).
3. Santotskiy V.G. On the residual electrical strength of 10 and 20 kV pin insulators, pierced by lightning impulses, and the duration of their stay in the 10 kV electric grid under operating voltage. *Abstracts of the workshop of the 4th Section of the Scientific Council on Theoretical and Electrophysical Problems of Increasing the Reliability and Durability of Isolating Networks with Isolated Neutral*. USSR, Tallin, 1981. 180 p. (Rus).
4. Malysheva Ye.P. *Povysheniye nadezhnosti raspredelitel'nykh setey ot 6 do 10 kV na osnove modelirovaniya i usileniya grozoupornosti*. Diss. cand. techn. nauk [Increase of reliability of distribution networks from 6 to 10 kV on the basis of modeling and strengthening of lightning resistance. Cand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 2006. (Rus).
5. Arays R.Zh., Stelmanis I.O. *Ekspluatatsiya elektricheskikh setey sel'skoy mestnosti*. [Operation of rural electric grids]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 280 p. (Rus).
6. Fedoseyenko R.Ya., Melnikov A.Ya. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost elektrosetey selskokhozyaystvennogo naznacheniya*. [Operational reliability of agricultural grids]. Moscow, Energiya Publ., 1997. 320 p. (Rus).
7. Sherstobitov R.M., Yundin M.A. Influence of single-phase earth faults in the 10 kV overhead line on reliability of power supply to consumers. *Safety & Reliability of Power Industry*, 2010, no.10, pp. 63-66. (Rus).
8. *The nomenclature of high-voltage polymer insulators. The main linear pin polymer insulators for VLEP 20 kV*. Catalog of ZAO «Rebar-insulator plant». Lytkarino, 2013. (Rus).
9. *Supporting linear rod polymeric insulators*. Available at: <https://elektro-montagnik.ru/lectures/part2/file/OLK.pdf> (accessed 02 May 2013). (Rus).
10. Sinyavskiy V.N. *Raschet i konstruirovaniye elektrokeramicheskikh izolyatorov*. [Calculation and construction of electroceramic insulators]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 192 p. (Rus).
11. Sangkasaad S. Research and experience with new insulator technologies in Thailand. *Proceeding of 2001 World insulator congress: applying new technologies for better reliability and lower costs*. Shanghai, 2001, pp. 154-167.

Поступила (received) 10.11.2017

Шумилов Юрий Николаевич¹, д.т.н., проф.,
 Сантоцкий Виктор Григорьевич², в.ед. инж.,
 Шумилова Эмилия Дмитриевна³, к.т.н., доц.,
¹ ПАО «Славянский завод высоковольтных изоляторов»,
 84105, Донецкая обл., Славянск, ул. Краматорская, 79,
 тел/phone +380 95 1813515, e-mail: sumilovurij2@gmail.com
² Научно-проектный центр развития ОЭС Украины,
 04112, Киев, ул. Дорогожицкая, 11/8,
 тел/phone +380 95 2757375, e-mail: nprc-kanc@ua.energy
³ Донбасский Государственный педагогический университет,
 84116, Донецкая обл., Славянск, ул. Г. Батюка, 19,
 e-mail: shumilov3@ukr.net

Yu.N. Shumilov¹, V.G. Santotskiy², E.D. Shumilova³

¹ PSC «Slavyansk High Voltage Insulators Works»,
 79, Kramatorskaya Str., Slavyansk, Donetsk Reg., 84105,
 Ukraine.

² Research & Design Center for development of the IPS of
 Ukraine,
 11/8, Dorohozhytska Str., Kyiv, 04112, Ukraine.

³ Donbass State Pedagogical University,
 19, G. Batyuka Str., Slavyansk, Donetsk Reg., 84116, Ukraine.

On the need to increase the reliability of linear insulators for distribution networks 10-20 kV.

Introduction. In Ukraine high voltage overhead distribution lines (OL) of class 6 and 10 kV are the most extended. Their total length exceeds 280,000 km. More than 95% of the lines are made on line supports from reinforced concrete racks. On all poles of the overhead line, pin insulators are installed. According to the data of operation experience, up to 60-70% of single-phase earth (SPE) faults due to «insulation» occurs on VL supports due to damage to line pin insulators, mainly during the thunderstorm period. **Problem.** Insufficient reliability of pin insulators leads to interruptions in power supply, accidents on the line, accidents in the area of reinforced concrete poles, where in the case of insulator damages, a long process of SPE occurs. **Goal.** The purpose of the work is to select the design and develop requirements for new linear insulators of 10-20 kV overhead lines that provide high resistance to lightning overvoltages with direct and inductive effects of lightning. **Methodology.** The research methodology consists in analyzing operational experience, calculating insulator parameters and laboratory tests. **Results.** Using statistical data on lightning parameters and data on mechanical loads on insulators, the main dimensions of line post insulators have been determined that will ensure their reliable operation under conditions of intense thunderstorm activity and extreme ice and wind loads. **Conclusions.** The main technical requirements for line post insulators for 10-20 kV distribution lines were formulated. On the 10 kV OL located in areas with increased thunderstorm activity it is recommended to use line post insulators instead of pin-type ones. On the OL-20 kV it is recommended to use only line post insulators. The use of high-lightning-resistant line post insulators on OL-10-20 kV will significantly increase the electrical safety and reliability of power supply to consumers. Increased by 2-3 times the cost of line post insulators in comparison with those used will be compensated for by the effects of reducing the number of collapsible supports, damage from under-supply of electricity, labor costs during transportation and restoration of destroyed supports, the moral side of reducing accidents in case of electric shock in the emergency zone. The insulators offered for OL-10-20 kV can be used for fixing both bare and protected wires. The exclusion from the design of the weakest elements – polyethylene caps and metal pins will increase the reliability of the power isolation unit. References 11, tables 2, figures 1.

Key words: overhead power line, pin insulators, line post insulators, lightning over voltages, electrical breakdown, flashover of insulator, power supply interruptions, electrical safety, reliability.