

Утренние отключения воздушных линий электропередачи за десятки лет так и не получили исчерпывающего объяснения. Отключения такого вида не приносят осязаемого ущерба, но приводят к ряду неприятных последствий. Ток короткого замыкания, стекая через фундамент опоры, вызывает опасное напряжение прикосновения и шаговое напряжение, индуцирует наведенные напряжения в линиях связи, а также в нефте- и газопроводах, проходящих в непосредственной близости параллельно трассе ВЛ. При отключениях и повторных включениях ВЛ срабатывает ресурс выключателей, возникают перенапряжения и мощные помехи во вторичных цепях подстанционного оборудования.

Наши сибирские авторы в своем материале обращают внимание на высокочастотные перенапряжения, роль которых в утренних отключениях ВЛ практически никогда не обсуждалась широким кругом специалистов.

## ОТКЛЮЧЕНИЯ ОТПАЕЧНЫХ ЛИНИЙ ВЛ 110 кВ

### Влияние высокочастотных перенапряжений

**Василий Боровицкий**,  
заместитель главного инженера  
ОАО «Тюменьэнерго»,  
г. Сургут

**Александр Овсянников**,  
д.т.н., профессор кафедры  
техники и электрофизики высоких  
напряжений НГТУ,  
г. Новосибирск

Эксплуатирующие организации постоянно озабочены проблемой утренних отключений воздушных линий электропередачи (ВЛ). Установить причину их возникновения во многих случаях не удается [1], (табл. 1).

Обычно рассматривают две причины утренних отключений ВЛ, различающиеся по сути, но трудно отличимые по признакам: вмешательство птиц и перекрытие гирлянд при увлажнении загрязненной поверхности изоляторов утренним туманом, росой, морозящим дождем, мокрым снегом или жидким налетом.

В некоторых случаях рассматривается сочетанное действие первого и второго явлений.

Проблеме птичьих отключений посвящено много работ [1, 2]. Механизм перекрытия увлажненной и загрязненной изоляции встречается в районах с интенсивным загрязнением атмосферы [3]. Однако в районах с относительно чистой атмосферой влагоразрядный механизм перекрытия не подтверждается лабораторными испытаниями демонтированных с ВЛ изоляторов: во всех случаях влагоразрядные характеристики превышают наибольшее рабочее напряжение линии, хотя по показаниям вольтметров на подстанциях по концам линии напряжение перед перекрытием изоляции оставалось в нормируемых пределах.

Рассмотрим еще одну причину, которая до сих пор не обсуждалась в известных нам публикациях. Речь пойдет о воздействии на изоляцию локальных коммутационных перенапряжений, которые могут возникнуть, например, при отключениях нагрузки на отпаечных линиях. На ВЛ 110 кВ, широко распространенных в электросетевом комплексе, наличие отпаек – явление достаточно привычное. Нередко отпайки построены для электроснабжения промышленных или сельскохозяйственных комплексов, которые при одно- или двухсменном режиме работы, т.е. при сбросе и вводе нагрузки, приводят к некоторым возмущениям режима работы линии электропередачи.

При небольшой длине отпайки переходные процессы сопровождаются перенапряжениями достаточно высокой частоты.

Важно, что эти перенапряжения могут привести к перекрытию загрязненной и увлажненной изоляции на ВЛ, но при этом не фиксируются на подстанциях по концам ВЛ. Тогда становится понятным, почему при испытаниях в лаборатории демонтированные с линии гирлянды изоляторов имеют влагоразрядные напряжения перекрытия больше наибольшего рабочего напряжения ВЛ. Данная гипотеза родилась при анализе многочисленных отключений некоторых ВЛ 110 и 220 кВ.

#### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Для расчета в программе МАЭС [4] одна из реальных схем электропередачи 110 кВ была предельно упрощена: в ней была оставлена одна отпайка, а сброс нагрузки моделировался отключением ПС3, питаемой через отпадку (рис. 1).

Питающая и приемная ПС (ПС1 и ПС2) в пакете МАЭС моделировались с учетом параметров:

- амплитуда ЭДС –  $U_{ф.м.} = 103 \text{ кВ}$  ( $U_{н.р.} = 126 \text{ кВ}$  или  $1,15 U_{ном}$ );
- круговая частота –  $314,1593 \text{ рад/с}$ ;
- начальная фаза: ПС1 – 0; ПС2 –  $0,015 \text{ рад}$ .

Туликовая ПС3 моделировалась активно-индуктивной нагрузкой с  $\cos\phi = 0,5$  ( $R = 1000 \text{ Ом}$ ;  $L = 3 \text{ Гн}$ ).

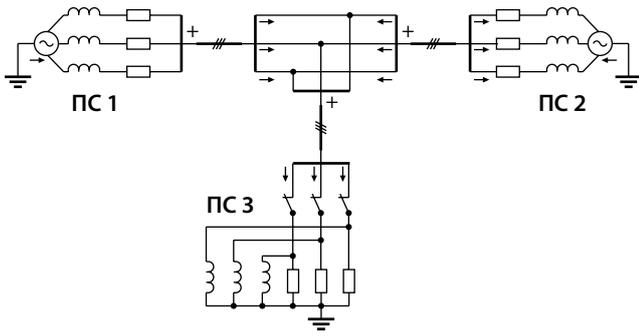
Значения других параметров ПС1 и ПС2 (индуктивное и активное сопротивления по прямой и нулевой последовательностям) и ВЛ (погонные индуктивные и активные сопротивления и емкостная проводимость по прямой и нулевой последовательностям) были получены в результате расчетов в пакете MatLab по методикам, изложенным в [5].

Длина линии между ПС1 и ПС2 выбиралась равной 100 км. Расчеты проводились для двух отпаек: отпайка А была на расстоянии 30 км от ПС № 1 и имела длину 5 км; отпайка Б включалась посередине линии и имела длину 20 км.

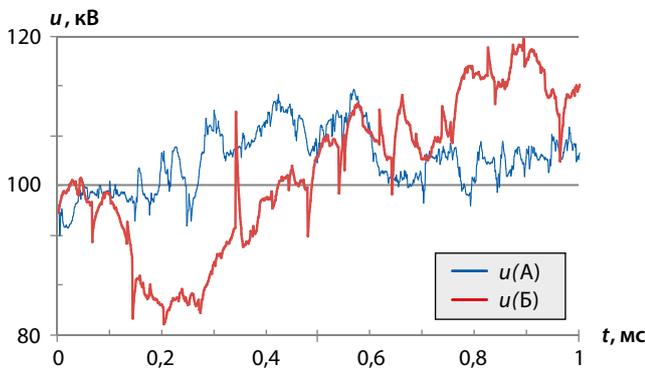
• Таблица 1. Процент отключений ВЛ по неустановленной причине по данным [1]

Россия	Украина		Германия	ЮАР	Швеция	Финляндия	
35–110 кВ	110 кВ	330 кВ	500 кВ	6 кВ и выше	132 кВ	130 кВ	110 кВ
40%	60%	30%	28%	50%	38%	46%	21%

Упрощенная схема ВЛ 110 кВ «ПС1 – ПС2» с отпайкой на ПС3 **Рис. 1**

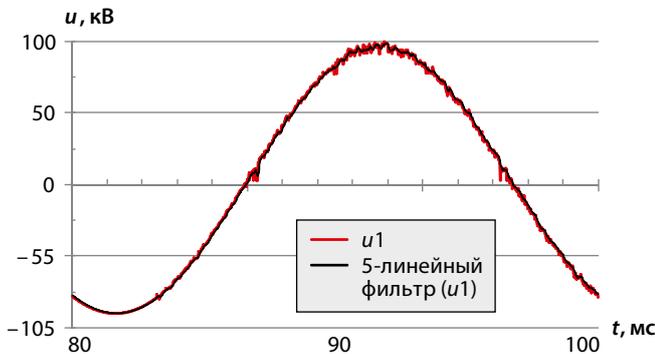


Фазные напряжения в конце отпайки А и Б при отключении ПС3 **Рис. 2**



1/2

Фазное напряжение на выходе с ПС1 при отключении отпайки А **Рис. 3**



Коммутации производились выключателями с токами среза около 10 А, т.е. имитировался достаточно плохой но вполне реальный случай работы выключателя. В расчетах варьировалась нагрузка на ПС3. При коммутируемой мощности намного меньшей, чем транзитная,  $S_3 = 0,1 S_2$  перенапряжения были невелики и составили  $K_{пер} = 1,01 \div 1,03 U_{н.р.м.}$ . Основные расчеты были проведены для  $S_3 = 0,6 S_2$ , т.е. для наиболее неблагоприятных, но имевших место в реальности случаев.

Результаты расчетов приведены на рис. 2 для случаев отключения отпайки А и Б с указанным выше отношением мощностей  $S_3 = 0,6 S_2$ . Момент отключения нагрузки примерно совпадал с максимумом переменного напряжения на фазе С. На ней же возникали наибольшие перенапряжения.

На рис. 3 приведена расчетная осциллограмма фазного напряжения на выходе с ПС1 при отключении отпайки А в момент амплитудного значения напряжения.

Видно, что после коммутации форма напряжения слегка искажена наложенными высокочастотными колебаниями в те-

• Рис. 4. Участок ВЛ вблизи отпайки и с солончаками на почве



чение времени, примерно равном полупериоду напряжения. Линейная фильтрация осциллограммы имитировала запись возможной аварийной осциллограммы «черным ящиком». На ней высокочастотные перенапряжения практически не видны.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

При выбранных параметрах модели максимальные перенапряжения возникали на отпайках и составили около 120 кВ, что соответствовало коэффициенту перенапряжения  $K_{пер} \approx 1,18$ .

Поскольку процесс перекрытия загрязненной и увлажненной изоляции имеет некоторую инерционность, то представляется очевидным, что на вероятность перекрытия должна влиять не только амплитуда, но и длительность перенапряжения. В этом смысле, исходя из вида осциллограмм, приведенных на рис. 2, можно было предположить, что наиболее вероятные места перекрытия изоляции должны сосредотачиваться вблизи и на отпайке Б (120 кВ с длительностью около 0,2 мс).

Вблизи питающей ПС1 и приемной ПС2 перекрытия маловероятны из-за меньшей амплитуды и короткой длительности импульсов перенапряжения.

Заметим, что если бы в расчетах было учтено затухание импульсных перенапряжений при их распространении по ВЛ за счет потерь в земле, тросах и проводах (скин-эффект), то на ПС перенапряжения имели бы еще меньшие кратности.

Расчеты и знание характеристик реальных устройств для измерения напряжения на ПС в какой-то мере объясняют тот факт, что отключения ВЛ возникают якобы при неизменной величине напряжения. Действительно короткие и знакопеременные импульсы напряжения, наложенные на синусоиду, практически не влияют на действующее значение напряжения, что демонстрируется на рис. 3. Кроме того, надо помнить о том, что в соответствии с частотными характеристиками измерительных трансформаторов напряжения и при реально существующей недостаточно большой частоте дискретизации высокочастотные перенапряжения не фиксируются и «черны-

ми ящичками», которые при отключениях ВЛ срабатывают от действия релейной защиты. На реальной ВЛ наиболее часто перекрытия изоляции (в случаях, когда они были обнаружены) возникали на участке ВЛ с солончаковыми почвами (рис. 4) и в пяти пролетах от отпайки Б.

Таким образом, есть источник загрязнения и увлажнения изоляции и возможность локального повышения напряжения при сбросе нагрузки при сбросе нагрузки на отпаечной линии.

Совместное действие всех факторов, конечно же, увеличивало вероятность перекрытия изоляции.

#### ВЫВОДЫ

1. При расследовании причин случайных отключений ВЛ, связанных наиболее вероятно с перекрытием загрязненной и увлажненной изоляции, предлагается учитывать влияние локальных перенапряжений. Они могут формироваться, например, при отключении отпайек и/или сбросах нагрузки, подключенной к ним, и при работе устройств РПН на автотрансформаторах на конечных подстанциях. На отпайках с тяговыми ПС контактной сети переменного тока перенапряжения могут возникать при торможении и трогании с места тяжелых составов и т.д. Перенапряжения способны инициировать перекрытия загрязненной и увлажненной изоляции линии, но оставаться незаметными для измерительных и регистрирующих приборов на конечных подстанциях вследствие высокой частоты и короткой длительности.
2. Необходимо провести расчеты реальных линий электропередачи с вариацией возможных переменных параметров и оценкой кратностей перенапряжений по всей трассе ВЛ. Для проверки выдвинутой гипотезы требуются экспериментальные регистрации перенапряжений на реальных ВЛ при коммутациях нагрузки на отпайках, при работе РПН и других случайных воздействиях.
3. Отдельный интерес представляет исследование механизма и оценка величины напряжений перекрытия увлажненной и загрязненной изоляции при сочетанном действии переменного напряжения и высокочастотных перенапряжений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gutman I., Solomonik E., Vosloo W. Research Provides Insight into Unexpected Line outages //INMR, Q4, 2011. С. 78–86.
2. Боровицкий В.Г., Овсянников А.Г. Проблемы утренних отключений воздушных линий электропередачи // Сб. докладов 4-й Российской научно-практической конференции «Линии электропередачи – 2010: Проектирование, Строительство, Опыт эксплуатации и научно-технический прогресс». Новосибирск: ЭЛСИ, 2010. С. 274–279.
3. Мерхалев С.Д., Соломоник Е.А. Выбор и эксплуатация изоляции в районах с загрязненной атмосферой. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Программа МАЭС для численного моделирования сложных электроэнергетических схем: Руководство пользователя. Новосибирск: СибНИИЭ, 2006. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005610081.
5. Лыкин А. В. Электрические системы и сети: Учебное пособие. М.: Издательская группа «Логос», 2006.