

На правах рукописи

Попова Юлия Сергеевна

**ГРОЗОЗАЩИТА ДВУХЦЕПНЫХ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 35-110 КВ В НЕФТЯНОЙ И
ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 05.14.12 – техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург - 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Халилов Фирудин Халилович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ефимов Борис Васильевич

кандидат технических наук, доцент
Ярмаркин Михаил Кириллович

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Самарский государственный
технический университет (СамГТУ)»

Защита состоится « 25 » ноября 2011 года в ____ час. ____ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Нефтедобыча в нашей стране является важнейшей отраслью промышленности. Производство энергоресурсов и, прежде всего, нефти и газа, а также рациональное потребление электроэнергии является основой высокого уровня жизни и эффективной экономикой. Добыча, транспорт нефти и газа обладают сложным технологическим процессом.

Большинство линий 35 и 110 кВ на месторождениях нефти и газа выполнены в двухцепном варианте. При этом грозоупорность таких ВЛ в целом ниже грозоупорности одноцепных линий, поэтому неприемлемый показатель надежности грозозащиты приводит к серьезным финансовым потерям вследствие отключения линий и повреждения электрооборудования (выключателей, разъединителей, кабелей, трансформаторов и др.), что ведет к нарушению технологии в отрасли и недоотпуску (недополучению) электроэнергии, а также к значительным затратам временных и материальных ресурсов на их устранение. Они также связаны и с ремонтно-восстановительными работами изоляционных конструкций и других элементов системы электроснабжения.

В связи с вышесказанным снижение числа грозовых отключений воздушных линий 35-110 кВ является важнейшей задачей электроэнергетики.

Традиционные мероприятия по грозозащите ВЛ 35-110 кВ и выше, в том числе в нефтяной и газовой промышленности, рекомендуемые ПУЭ, предусматривают следующие мероприятия:

1. сооружение грозозащитных тросов с углами защиты не более 25° - 30° ;
2. обеспечение необходимого уровня линейной изоляции;
3. обеспечение сопротивления заземления опор не более $R_3=10-20$ Ом в районах с удельным сопротивлением грунтов ρ_2 не более 500 Ом·м и $R_{3\rho} = R_3\sqrt{\rho_2/500}$ - в районах с ρ_2 более 500 Ом·м.

Также к этим мероприятиям косвенно относится и применение автоматического повторного включения (АПВ).

Применение традиционных мероприятий в ряде случаев не дает желаемого результата, а именно приемлемой величины допустимого числа грозовых отключений при заданных грозовой интенсивности и длине линий, и поэтому предпочтение отдается нетрадиционным способам грозозащиты ВЛ 35-110 кВ, основным защитным аппаратом которых являются нелинейные ограничители перенапряжений – ОПН.

- Возможными областями применения нетрадиционной грозозащиты ВЛ могут являться:
- участки воздушных линий с локальной повышенной грозопоражаемостью;
 - участки ВЛ в гололедноопасных районах, где нецелесообразно применение грозозащитных тросов;
 - двухцепные линии с вертикальной подвеской проводов;
 - высокие переходные пролеты через реки, заливы, ущелья и другие преграды по трассе ВЛ;
 - в некоторых районах со сверхвысоким удельным сопротивлением грунтов ($\rho_2 \geq 10000 - 15000$ Ом·м).

Наибольшую величину показателя надежности грозозащиты ВЛ будет иметь место при установке названных аппаратов – ОПН – на каждой опоре и на всех фазах ВЛ (например, на

всех шести фазах двухцепной линии). Однако из-за достаточно большой стоимости ОПН даже подвесного варианта (между фазными проводами и опорой, например, параллельно гирляндам изоляторов) такие защиты нецелесообразны. Могут быть рекомендованы и иные, более экономичные нетрадиционные варианты грозозащиты ВЛ 35 и 110 кВ, например, установка на ВЛ ОПН и сооружение дополнительных тросов не над верхними фазами, а на уровне нижних фаз.

В связи с этим актуальность темы диссертации в первую очередь определяется ее значимостью в области грозозащиты двухцепных ВЛ 35 и 110 кВ предприятий нефти и газа, а именно повышению надежности эксплуатации этих линий при поражениях молнией, а также усовершенствованию расчетной методики защиты от перенапряжений при использовании нетрадиционных методов грозозащиты.

Целью работы являлось решение ряда проблем, вызванных грозовыми перенапряжениями в сетях 35-110 кВ нефтяной и газовой промышленности. В первую очередь, это касалось разработки компьютерной модели для исследования возникающих переходных процессов в ВЛ при ударах молнии, а также определению более эффективного способа грозозащиты ВЛ и оптимального количества ОПН для обеспечения бесперебойного энергоснабжения.

В соответствии с целью сформулированы следующие **основные решаемые задачи**:

1. исследование вопроса грозозащиты двухцепных линий электропередачи 35-110 кВ, питающих предприятия нефти и газа;
2. создание компьютерной программы, учитывающей нетрадиционные способы грозозащиты, для определения мест установки ОПН на опорах ВЛ, частоты их расстановки, обеспечивающие безотказное энергоснабжение;
3. разработка и внедрение нетрадиционных схем, свободных от недостатков, свойственных традиционным схемам грозозащиты двухцепных линий 35-110 кВ;
4. определение показателя надежности грозозащиты предполагаемых нетрадиционных схем и сравнение их с показателями при традиционных схемах грозозащиты;
5. разработка технических требований к ОПН для установки в нетрадиционных схемах грозозащиты ВЛ 35 и 110 кВ предприятий нефти и газа;
6. выполнение технико-экономического обоснования нетрадиционной грозозащиты ВЛ 35 и 110 кВ.

Научная новизна и практическая значимость работы

Комплекс решенных в диссертации задач при их методическом единстве является шагом вперед в решении проблемы защиты от грозовых перенапряжений электрических сетей, питающих предприятия нефти и газа.

Научная новизна заключается в следующем:

1. впервые на основе подробной модели ВЛ в грозовом режиме варьировались расчетные параметры ВЛ с целью их влияния на окончательный результат;
2. для моделирования ВЛ были сформулированы и обоснованы наиболее оптимальные параметры линий и опор;
3. произведена оценка снижения годового числа грозовых отключений при применении нетрадиционных способов грозозащиты;
4. впервые выдвинут и осуществлен переход от усредненного количества грозовых отключений к неоднородному распределению по всей длине линии;
5. определена степень влияния локальных параметров ВЛ на локальное число грозовых отключений линии;

6. рассчитана так называемая «зона защиты» ОПН для различных конструкций линий 35-110 кВ.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что в ней:

1. разработана компьютерная модель ВЛ в грозовом режиме, позволяющая рассчитывать как суммарное, так и распределенное вдоль линии (при неоднородных параметрах линий) количество грозовых отключений;

2. определены элементы схемы замещения опоры, которыми при расчете показателя надежности линий 35-110 кВ можно пренебречь;

3. на основании выполненных расчетов показателя грозоупорности ВЛ 35-110 кВ даны рекомендации о выборе места установки ОПН на опоре и частоте расстановки ОПН вдоль линии.

На защиту выносятся:

1. Основные положения и упрощения предложенной методики расчета количества грозовых отключений ВЛ 35-110 кВ.

2. Сравнительный анализ количества грозовых отключений, полученных в результате расчета при традиционных и нетрадиционных способах грозозащиты ВЛ 35-110 кВ для системы электропитания предприятий нефти и газа.

3. Определение места установки ОПН на опоре и частоты расстановки ОПН вдоль ВЛ 35 и ВЛ 110 кВ.

4. Результаты технико-экономического обоснования использования нетрадиционных способов грозозащиты.

Внедрение результатов работы

Разработанная компьютерная модель в пакетах систематического моделирования расширяет возможности исследования. Методические результаты представляют самостоятельную ценность и могут быть использованы для решения других задач электроэнергетики, техники высоких напряжений, а также могут быть использованы не только для линий, питающих объекты нефти и газа, но для других ВЛ.

Полученные результаты также могут быть использованы в учебном процессе СПбГПУ и других ВУЗов страны.

Достоверность результатов

Сравнение эксплуатационных показателей количества грозовых отключений и полученных результатов расчета по созданной компьютерной программе для существующих линий 35-110 кВ практически одинаковы.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались:

1. на кафедре «Электроэнергетика, техника высоких напряжений» ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» (в 2009 и 2011 гг.);

2. на кафедре «Электрооборудование электрических станций и подстанций» ГОУ ДПО ПЭИПК (в 2009, 2010 и 2011 гг.);

3. на семинаре Кольского центра РАН (в 2008 г.);

4. в форуме в Словакии (Стара Лесна, 19-21 сентября 2007 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работы (из них 6 в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России), которые приведены в списке публикаций.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы из 60 наименований и 6 приложений. Полный объем диссертации – 195 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначена необходимость защиты от перенапряжений системы электропитания предприятий нефти и газа и обоснована актуальность выбранной темы.

В первой главе рассмотрены применяемые ранее методики расчета годового числа грозовых отключений двухцепных ВЛ 35 и 110 кВ традиционными способами грозозащиты с указанием их достоинств и недостатков.

Приведен анализ аварийных грозовых отключений ВЛ 35 и 110 кВ, который показывает, что при ударе молнии на двухцепные линии, кроме отключения одной из цепей, в ряде случаев одновременно отключаются обе цепи. Так, обработка информации о грозовых отключениях показывает, что в 2003 году в Ноябрьских электрических сетях (НЭС) ОАО «Тюменьэнерго», откуда получают электроэнергию объекты ОАО «Ноябрьскнефтегаз», имело место 132 отключения ВЛ 110 кВ, из которых в 40 случаях одновременно отключались обе цепи, то есть для НЭС доля двухцепных отключений равна ~30%.

Число грозовых отключений для бестросового участка ВЛ 110 кВ без установки на нем ОПН, составляет 0,141, что в пересчете на 100 км ВЛ составляет 5,64 грозовых отключения.

Аналогичная ситуация имеет место и в сетях 35 кВ. Это показывает статистические данные, собранные в ряде предприятий нефти и газа за 1995 – 2005 гг. (таблица 1).

Таблица 1

Соотношение грозовых отключений одноцепных и двухцепных ВЛ 35 кВ.

Годы	Общее число отключений при ударах молнии, шт.	Число одновременного отключения обеих цепей, шт.	Доля двухцепных отключений, %
1995	149	51	34,2
1996	165	55	33,3
1997	203	63	31,0
1998	153	51	33,3
1999	163	54	33,1
2000	170	58	34,1
2001	181	63	34,8
2002	191	70	36,6
2003	203	75	36,9
2004	148	51	34,4
2005	147	50	34,0

Выполнен обзор альтернативных способов грозозащиты двухцепных ВЛ 35-110 кВ и различных решений по установке ОПН на опорах на основе опыта эксплуатации, которые

показали, что защитные аппараты на линии значительно снижают количество грозových отключений, но вопрос о технических требованиях к ним и о минимизации их количества не является однозначно решенным. Рассмотрены также различные конструкции ВЛ.

Сделаны выводы по главе и сформулированы основные задачи диссертации.

Во второй главе приводится подробное описание модели линии в грозovém режиме и определяется степень влияния различных допущений и упрощений на интегральный результат расчета. Выполнен ряд расчетов при помощи пакета визуального программирования «Simulink», установлено какими элементами можно пренебречь при расчете переходного процесса в линии при ударе молнии в созданных моделях ВЛ с различными схемами их замещения.

Для определения количества грозových отключений $N_{откл}$ в каждой расчетной модели строилась кривая опасных токов (КОТ) постепенным увеличением с нулевого значения находится минимальная величина импульса тока молнии I_m , при которой происходит перекрытие хотя бы одной гирлянды изоляторов на любой из опор моделируемого участка ВЛ. Из этих пар чисел вычисляется скорость нарастания тока молнии I'_m . Вероятность перекрытия линейной изоляции определялась путем вычисления двойного интеграла от произведения плотностей вероятностей амплитуд и скоростей нарастания фронтов молнии. Распределение амплитуд токов молнии по Вейбуллу дает несколько меньшее число отключений по сравнению с нормативным логнормальным законом распределения.

Для оценки числа отключений линий при построении КОТ можно ограничиться всего лишь тремя точками для нахождения минимального тока молнии, вызывающего перекрытие, например, для фронтов $\tau_\phi = 1; 4; 10$ мкс.

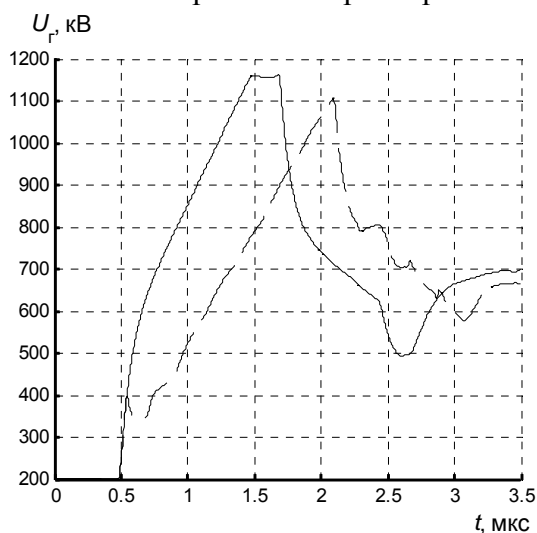
Для упрощения расчётов и увеличения точности конечного результата, ток молнии моделировался как косоугольный импульс с длиной фронта τ_ϕ , временем полуспада волны τ_s и максимальным значением тока I_{max} . Для практических расчетов грозозащиты (за исключением расчета энергоемкости ОПН) моделируется только первый импульс, потому что вероятность перекрытия линейной изоляции при воздействии последующих импульсов на порядок меньше.

С помощью метода бегущих волн Бержерона, учитывающего коэффициенты связи между проводами и тросами аналогично методу эквивалентной волны М.В. Костенко, участки ВЛ 35-110 кВ между пролетами моделировались многопроводными линиями. Условная глубина, на которой находится условная граница раздела сред (проникновения электромагнитного поля в землю), определяется нулевым потенциалом, зависит от удельного объёмного сопротивления грунта, частоты импульса при учёте потерь в земли и рассчитывается по формуле:

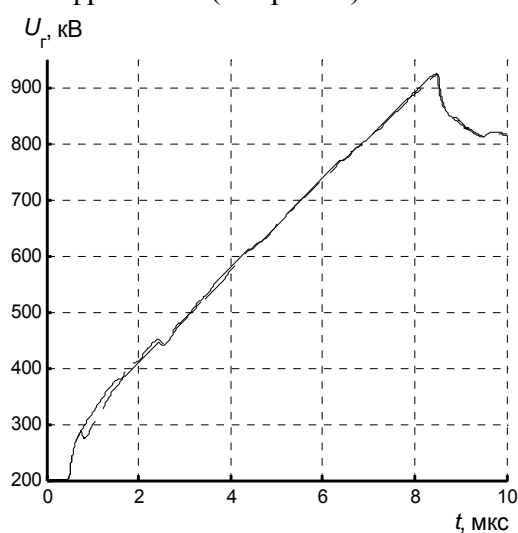
$$h_z(\omega) = \sqrt{\frac{\rho_{zp}}{j\omega\mu_0}}$$

Потери в земле, определяемые с учетом скин-эффекта, моделировались при помощи приближенного вычисления интеграла Карсона. Такой метод моделирования участка линии точно отражает связь между тросами и проводами. В случае отсутствия в модели учета связи между проводами и тросами, погрешность в результатах расчета составляет больше, чем в 1,5 раза.

Для моделирования импульсной короны на проводах и тросах линия разбивалась на отрезки длиной l_k . Как только напряжение начала короны превышает допустимое значение, включается дополнительная сосредоточенная динамическая емкость $C_n \cdot l_k$, значение которой зависит от напряжения на соответствующем участке линии $C_n = f(U)$. Длину участка линии l_k достаточно принять равной 50 – 70 м. Кроме этого степень влияния импульсной короны зависит от длины пробега волны перенапряжения. Таким образом, импульсная корона оказывает существенное влияние на результаты расчёта грозоупорности ВЛ, особенно сильно она сглаживает грозовые перенапряжения с короткими фронтами (см. рис. 1).



а) Длина фронта импульса молнии 1,2 мкс



б) Длина фронта импульса молнии 8 мкс

Рис. 1. Напряжения на нижней гирлянде изоляторов опоры с учётом (пунктирная линия) и без учета (сплошная линия) импульсной короны.

Напряжение на проводе складывается из напряжения, вызванного ударом молнии, и рабочего напряжения. Удар молнии в линию может произойти при любом мгновенном значении фазного напряжения. Рабочее напряжение можно рассматривать как постоянное во времени, в силу того, что переходные процессы заканчиваются полностью за время равное $t \approx 100-200$ мкс.

Расчёты при разных мгновенных значениях рабочего напряжения показали, что оно изменяет величину $N_{откл}$ на 15 – 20 % (в зависимости от сопротивления заземления опоры) (см. рис. 2).

Наибольшее количество отключений происходит тогда, когда на проводе нижней фазы мгновенное значение напряжения имеет полярность, противоположную полярности молнии ($\varphi_0 = 30^\circ$).

Удар молнии может прийти в любую случайную точку в пролёте, поэтому расчет числа обратных перекрытий для двух пограничных точек удара молнии: в трос в середину пролета и в вершину опоры, без учета промежуточных точек в пролете, приводит к занижению результата приблизительно на 10 ÷ 25 %.

Определение минимального количества опор в модели является важным вопросом. Отражённые волны от соседних опор существенно снижают величину напряжения на гирляндах изоляторов поражённой опоры, поэтому количество отключений, рассчитанное с учетом только одной опоры, будет завышенным.

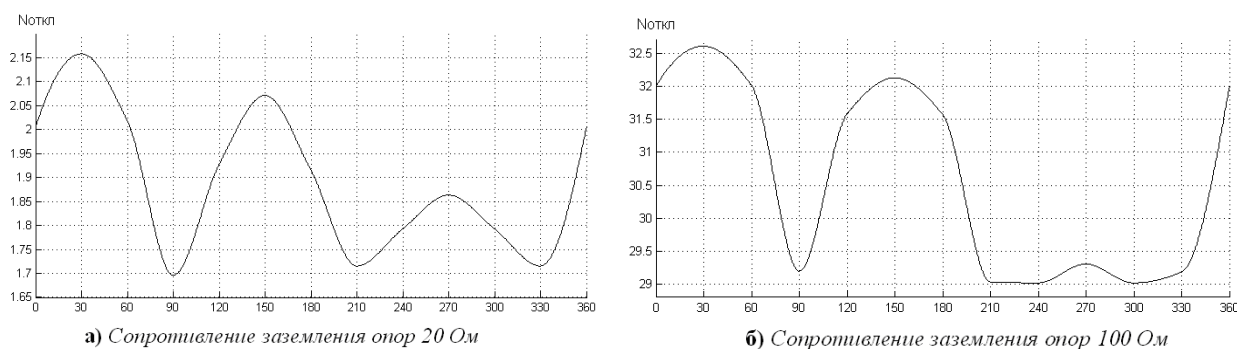


Рис.2. Зависимость количества грозových отключений от угла φ_0 .

Хотя за счёт стекания тока в землю на соседних опорах и потерь при распространении волн перенапряжений за счет импульсной короны, а также сопротивления проводов и грунта, напряжение на гирляндах изоляторов опор, удалённых от места удара молнии, будет существенно ниже, чем в месте удара. Расчёт моделей линий с разным количеством опор показал, что глубину распространения грозowego перенапряжения в ВЛ можно оценить 4 – 6 опорами. С увеличением количества опор в модели ВЛ больше 6, точность результата расчета увеличивается не более чем на 1,5-2 %.

По результатам расчетов для моделей с различными схемами замещения опор ВЛ было определено, что достаточно использовать схему замещения опоры, учитывающую индуктивности тела опоры между траверсами, которые не оказывают влияния на конечный результат.

Значение погонной индуктивности тела опоры L_{noz} зависит от типа опоры и обычно находится в пределах от 0,5 мкГн/м (металлическая опора с оттяжками) до 1,5 мкГн/м (портальная деревянная опора). Как показали результаты расчета, значение L_{noz} начинает оказывать влияние на суммарное количество грозových отключений, если оно превышает $L_{noz} = 1,1$ мкГн/м.

Напряжение на опоре, поражённой молнией, содержит кроме падения напряжения на сопротивлении заземления и индуктивностях тела опоры, ещё одну составляющую, вызванную индуктивной связью между каналом молнии и телом опоры. Коэффициент взаимной индукции описывается выражением $M_{ом} = M'_{ом} \cdot h$, где $M'_{ом} = 0,2$ мкГн/м – погонная взаимная индуктивность, h – длина участка тела опоры. Учёт этой взаимосвязи несколько снижает напряжение на линейной изоляции поражённой опоры и вклад такого снижения напряжения в суммарное количество грозových отключений ВЛ не превышает 10-12%.

В третьей главе для выбора оптимального варианта грозозащиты ВЛ 35-110 кВ был выполнен расчет при традиционных способах грозозащиты для последующего сравнения полученных результатов с результатами при нетрадиционных способах грозозащиты с применением ОПН.

Для анализа грозозащиты линий при традиционных способах по ПУЭ варьировались факторы, оказывающие влияние на количество отключений линий. Для расчетов показателя $N_{откл}$ было принято базисное удельное число грозových отключений $N_б$ на 100 км длины линии и 100 грозových часов в год, и без учета успешного АПВ. Для других длин линий $l_{лин}$, других чисел грозových часов $T_г$ и вероятности успешного срабатывания АПВ $P_{АПВ}$, $N_{откл}$ можно пересчитать по формуле:

$$N_{\text{откл. лин}} = N_{\sigma} \cdot \frac{l_{\text{лин}}}{100} \cdot \frac{T_q}{100} \cdot (1 - P_{\text{АПВ}}) = N_{\text{откл.}} \cdot \frac{l_{\text{лин}}}{100} \cdot \frac{T_q}{100} \cdot (1 - P_{\text{АПВ}}).$$

Расчет грозозащиты произведен по методике, описанной во второй главе для 5 опор 35 кВ и 6 опор 110 кВ.

С ростом высоты опоры увеличивается число прямых ударов молнии (ПУМ) в линию приблизительно в 2 раза, т.к. оно прямо пропорционально зависит от числа грозовых отключений линии.

Существенным фактором, влияющим на число грозовых отключений линий, является сопротивление заземления опор $R_{\text{оп}}$. Потенциал всей опоры и напряжение на гирляндах изоляторов при ударах молнии в ВЛ как раз и зависят от падения напряжения на $R_{\text{оп}}$. Значение $R_{\text{оп}}$ зависит от конструкций заземляющих устройств опор, удельной проводимости грунта и его влажности и др. Величина $R_{\text{оп}}$ в расчете принимается усредненной по всей длине линии.

Увеличение длины пролета между опорами ВЛ приводит к провесу проводов и тросов, что влечет за собой уменьшение коэффициента связи между ними и вместе с тем увеличивает значение $N_{\text{откл}}$ приблизительно на 20%, так как при длинных пролетах отраженные волны от соседних опор приходят с большим запозданием и снижают напряжение на гирляндах изоляторов.

С увеличением количества изоляторов увеличивается напряжение, приводящее к перекрытию гирлянды, а вместе с тем растет расстояние между тросом и верхним фазным проводом, что приводит к снижению связи между ними. Из рисунков 3 и 4 можно сделать вывод о том, что мероприятие по усилению изоляции, а именно добавление к гирлянде одного изолятора, снижает количество грозовых отключений примерно на 10%. Следует отметить, что такой способ повышения грозоупорности линии экономически нецелесообразен, технически сложен вследствие увеличения механической нагрузки на опоры.

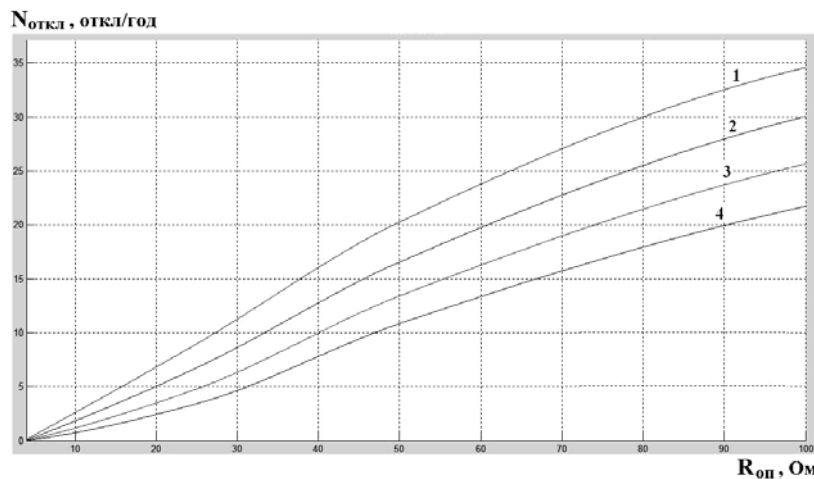


Рис. 3. Зависимость количества отключений двухцепной линии 35 кВ от длины гирлянды при различных $R_{\text{оп}}$:
1 – 3 изол. хПФ6-Б; 2 – 4 изол. хПФ6-Б; 3 – 5 изол. хПФ6-Б; 4 – 6 изол. хПФ6-Б.

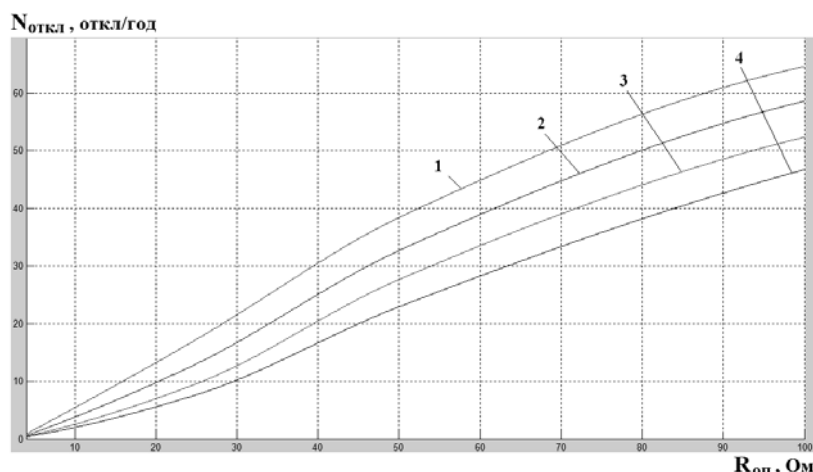


Рис. 4. Зависимость количества отключений двухцепной линии 110 кВ от длины гирлянды при различных $R_{оп}$:

1 – 6 изол. хПФ6-Б; 2 – 7 изол. хПФ6-Б; 3 – 8 изол. хПФ6-Б; 4 – 9 изол. хПФ6-Б.

Проанализировано влияние числа и расположения грозозащитных тросов на количество грозовых отключений линий 35 и 110 кВ. Расчеты показали, что:

1. при расположении троса на уровне нижних фаз без грозозащитного троса на вершине опоры все удары, не пришедшие на опоры ВЛ, попадают в фазные провода, вследствие чего количество отключений от ударов молнии в фазный провод возрастет на порядок, что в значительной мере повышает суммарное число грозовых отключений. Количество грозовых одноцепных отключений при таком расположении троса, по сравнению с линией с тросом на вершине опоры, возрастает приблизительно в 2-5 раз для всех рассматриваемых в диссертации опор.

Сооружение троса на уровне нижних фаз несколько повышает коэффициент связи между тросом и нижними проводами, что приводит к повышению уровня напряжения на верхних гирляндах изоляторов и снижению на нижних, а вместе с тем к снижению количества отключений от ударов молнии в вершину опоры. В общем случае, эксплуатация линии с тросом на уровне нижних фаз даже при малых $R_{оп}$ без защитных аппаратов недопустима из-за большого количества отключений ВЛ.

2. при расположении одного троса на вершине опоры и одного троса на уровне нижних фаз - этот метод в отличие от метода, представленного в п.1, лишен большого количества грозовых отключений вследствие ударов молнии в фазные провода. За счет наличия троса внизу увеличивается коэффициент связи между проводами, и возрастает доля отводимого тока от пораженной молнией опоры. Уменьшаются волновые сопротивления фазных проводов, и уменьшается общее волновое сопротивление двух тросов.

3. при расположении одного троса на вершине опоры и двух тросов на уровне нижних фаз увеличивает грозоупорность линии больше, чем сооружение одного троса по п. 2, так как возрастает коэффициент связи между проводами и доля тока отводимого от пораженной опоры, снижается количество грозовых отключений от сопротивления заземления опор для опор 35-110 кВ.

Для всех рассмотренных линий, при различных мероприятиях по грозозащите, связанных с применением дополнительных тросов, усиления гирлянды изоляторов годовое число грозовых отключений превышает допустимое (1 грозовое отключение в год) уже при сопротивлениях заземления $R_{оп}$ больших 20 - 25 Ом. Поэтому для повышения грозоупорности ВЛ

35-110 кВ требуется применение нетрадиционных способов, одним из которых является установка ОПН на ВЛ.

В четвертой главе были выполнены расчеты по грозозащите линий с помощью нетрадиционных способов при установке ОПН.

Ограничитель, установленный на опоре, имеет свою «зону защиты» – это участок линии по обе стороны от опоры с установленным ОПН, на котором благодаря его установке уменьшается число грозовых отключений. Однако в настоящее время нет однозначного ответа на вопрос о ширине такой зоны и о минимально допустимом расстоянии между ограничителями на линии.

В диссертационной работе для определения наиболее эффективного места установки ОПН на линии был произведен ряд расчетов с различными местами установки аппаратов. Анализ результатов показал, что наиболее эффективной является установка ОПН на нижних фазах опоры, так как такая установка обеспечивает наибольшее снижение количества обратных перекрытий, нежели ОПН, установленные на верхних фазах, которые защищают линию от ударов молнии в фазный провод.

Для решения задачи о нахождении минимального расстояния в работе для усовершенствования расчета «зоны защиты» ОПН, был осуществлен переход от усредненного количества отключений по всей длине линии к распределению отключений по длине линии. Количество грозовых отключений $N_{откл}$ неравномерно распределено по длине линии и поэтому оно рассматривается как функция от координаты x ($N_{откл}=f(x)$), которая лежит в пределах от начала линии до ее конца (0 до $L_{лин}$). Данную функцию $N_{откл}=f(x)$ называют эпюрой количества грозовых отключений (см. рис. 5).

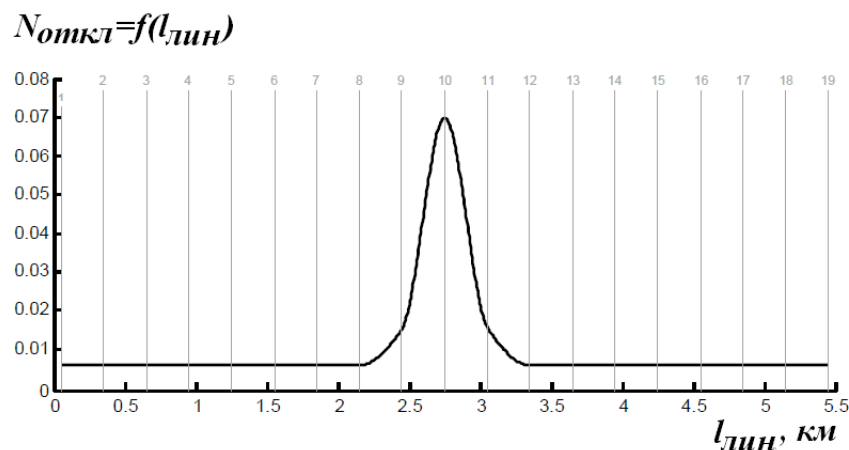


Рис. 5. Эпюра количества грозовых отключений с высоким сопротивлением заземления одной из опор (вертикальными линиями показаны места расположения опор с номерами).

Были выполнены расчеты по определению «зоны защиты» ОПН, ширина этой зоны зависит во многом от параметров участка линии, на котором установлен ОПН. С ростом значения $R_{от}$, «зона защиты» ОПН увеличивается как для двухцепных, так и для одноцепных перекрытий из-за уменьшения снижения части тока молнии отводимой в землю каждой опорой линии. «Зона защиты» ОПН от двухцепных перекрытий несколько шире (см. рис.6).

В общем случае «зону защиты» ограничителя можно оценить в 650 – 800 и не превышает 2 опор.

Был произведен расчет энергоемкости ОПН, из которого определено, что в более тяжелых условиях по энерговыделению находится ОПН, установленный на нижних фазах. При ударе молнии в вершину опоры в ограничителе выделяется больше энергии, чем при ударе в трос. Выделяемая энергия в ОПН зависит не только от максимального тока молнии, но и от длины фронта и волны ее импульса. Выделяемая энергия в ОПН зависит не только от максимального тока молнии, но и от длины фронта и волны ее импульса. Выделяемая энергия в ОПН зависит не только от максимального тока молнии, но и от длины фронта и волны ее импульса. Из-за того, что значения этих характеристик являются случайными величинами, то необходима вероятностная оценка величины выделяемой энергии в ОПН. На рис. 8 приведены графики вероятности P выделения энергии в ограничителе при наличии троса на вершине опоры при разных сопротивлениях заземления опор ВЛ 35 и 110 кВ, из которого видно, что большие значения $R_{оп}$ приводят к более жестким требованиям к выбору класса энергоемкости аппарата.

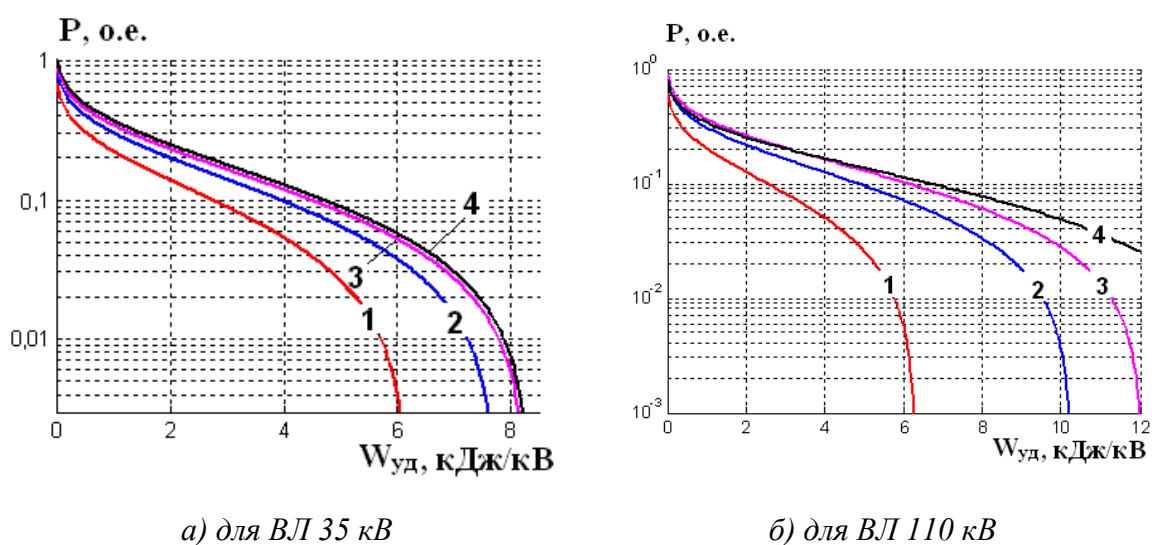


Рис. 8. Вероятность выделения энергии в ОПН:

1 – при $R_{оп}=25$ Ом; 2 - при $R_{оп}=50$ Ом; 3 - при $R_{оп}=75$ Ом; 4 - при $R_{оп}=100$ Ом.

В пятой главе произведено технико-экономическое обоснование целесообразности использования ОПН на ВЛ 35-110 кВ, питающих нефтепромысловых потребителей. Расчет был произведен для трех вариантов грозозащиты для одноцепных, так и для двухцепных линий. По величине годовых приведенных затрат наиболее выгодным является вариант, когда на двух верхних фазах линии устанавливаются подвесные ограничители перенапряжений, а на уровне нижних фаз сооружается один грозозащитный трос. Наиболее невыгодным является вариант, являющийся базовым - с одним грозозащитным тросом над верхними проводами и без применения ОПН.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ аварийных грозовых отключений как одноцепных, так и двухцепных ВЛ 35-110 кВ в нефтяной и газовой промышленности, показал, что повышение показателя надежной работы названных линий является весьма актуальной задачей и представляет собой ком-

плекс специальных средств и мероприятий. Для повышения эффективности грозозащиты в данной диссертации наглядно показано, что применение традиционных способов по улучшению грозоупорности ВЛ 35-110 кВ, определенных в ПУЭ [1] и Руководстве по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений [2] (сооружение тросов с углом защиты не более 30^0-35^0 , обеспечение сопротивления заземления опор не более 10-20 Ом, обеспечение необходимой импульсной прочности гирлянды изоляторов, АПВ), является неэффективным. Поэтому в данной работе предпочтение отдается нетрадиционным способам: установке ОПН на опорах ВЛ; усилению изоляции линий; монтажу дополнительного грозозащитного троса; в некоторых случаях бестросовой грозозащите линий.

2. Для усовершенствования расчетной методики грозозащиты двухцепных ВЛ 35 и 110 кВ в диссертации в пакете визуального программирования Simulink был создан ряд моделей, позволяющий производить расчет переходных процессов, протекающих в ВЛ при ударах в неё молнии, и определять интегральный показатель надёжности грозозащиты - годовое число грозовых отключений $N_{откл}$. При помощи достаточно подробной модели воздушной линии в грозовом режиме варьировались расчётные параметры ВЛ, некоторые из них впервые, для оценки степени их влияния на результаты, что позволило сделать следующие выводы:

а) для моделирования и обеспечения точного результата расчета грозозащиты достаточно использовать схему замещения опоры, учитывающую индуктивности тела опоры между траверсами (причем индуктивности траверс и ёмкости тела опор на землю не дают значительного (более 5%) уточнения результата расчетов);

б) для моделирования ударов молний в ВЛ, достаточно рассматривать участок ВЛ, состоящий из 6 опор;

в) значительное влияние на результаты оказывают: коэффициенты связи между проводами, импульсная корона и потери в земле после возникновения волн грозовых перенапряжений;

г) в наибольшей степени на число грозовых отключений оказывают влияние высота опоры и импульсное сопротивление заземляющего устройства опоры;

д) увеличение длины пролёта между опорами (l_{np}) для ВЛ 35 кВ от $l_{np} = 350$ м до $l_{np} = 450$ м и для ВЛ 110 кВ $l_{np} = 400$ м до $l_{np} = 500$ м увеличивает число грозовых отключений до 20%, а усиление гирлянды на один изолятор снижает число отключений на ~10%. Марки проводов и тросов, удельное сопротивление грунта и отклонение гирлянды изоляторов незначительно влияют на значение $N_{откл}$;

е) практически не влияет на конечное значение $N_{откл}$ изменение погонной индуктивности тела опоры в пределах от 0,5 до 1,1 мкГн/м при сопротивлении заземления опор более 35 Ом. Учёт же взаимной индуктивности между телом опоры и каналом молнии изменяет число отключений линии не более чем на 11%;

ж) наибольшее количество отключений происходит при полярности рабочего напряжения нижней фазы на опоре, противоположной полярности тока молнии ($\varphi_0 = 30^0$);

з) в моделях использовался логнормальный закон распределения, который даёт большее число отключений при расчёте вероятностей амплитуд токов молнии и скоростей их нарастания, по сравнению с законом распределения по Вейбуллу. Для построения КОТ достаточно использовать 3 значения τ_ϕ .

3. Анализ результатов расчёта по разработанным моделям, описанным выше, показали, что при невысокой грозовой активности $T_{\text{г}} \leq 20$ часов и сопротивлениях заземлений опор менее 15 Ом традиционные и нетрадиционные методы грозозащиты ВЛ дают приблизительно одинаковые результаты, а в остальных случаях необходимо повышение грозоупорности ВЛ 35-110 кВ при помощи нетрадиционных способов, результаты расчета которых позволяют сделать следующие выводы:

- наиболее эффективным местом установки ОПН на опоре с тросом на вершине являются нижние гирлянды изоляторов. Если ВЛ эксплуатируется без тросов на вершинах опор, то ОПН должны быть установлены на верхних фазах каждой опоры;

- установка троса под нижними фазами и с тросом на вершине опоры по сравнению с установкой троса только под нижними фазами увеличивает уровень грозоупорности линии приблизительно в 3 раза. Установка двух тросов под нижними фазами с тросом на вершине опоры приводит к ещё большему снижению $N_{\text{откл}}$ и увеличению грозоупорности линий вследствие увеличения коэффициента связи между проводами и доли тока, отводимого от пораженной опоры.

4. Частота установки ОПН вдоль ВЛ была определена при осуществлении перехода от усреднённого количества грозовых отключений к неоднородному распределению отключений по длине линии. Наибольшее снижение отключений происходит на опоре с установленным ОПН, а снижения $N_{\text{откл}}$ на соседних опорах зависит от сопротивлений заземлений опор, длин пролётов и др. «Зона защиты» ограничителя, как показывают результаты расчета, невелика и составляет не более 2 опор.

Однако параметры ВЛ по всей длине линии резко неоднородны, поэтому необходимо осуществлять поиск мест установки ограничителей, задаваясь реальными параметрами ВЛ.

5. Целесообразность и эффективность установки ОПН на ВЛ 35-110 кВ оценена не только с технической точки зрения, но и с экономической.

По теме диссертации опубликованы работы:

1. Халилов Ф.Х., **Попова Ю.С.** Ограничение перенапряжений в электрических сетях нефтяной и газовой промышленности // Научно-технический, информационно-аналитический и учебно-методический журнал «Энергобезопасность и энергосбережение». - 2010. - №1. – С. 5-9.

2. **Попова Ю.С.**, Серебренников Д.С. Результаты расчетов грозозащиты ВЛ 35-220 кВ, питающих предприятия нефти и газа, с помощью традиционных способов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2011. – №2(30). – С. 254-257.

3. Боровских А.Н., **Попова Ю.С.**, Колычев А.В., Халилов Ф.Х. Результаты полномасштабных испытаний ОПН-500 кВ подвесной конструкции // Производственно-технический журнал «Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность». – 2010. - № 2. - С. 49-52.

4. Колычев А.В., **Попова Ю.С.**, Халилов Ф.Х. Современное состояние и перспективы развития производства нелинейных ограничителей перенапряжений 0,22-750 кВ в России // Производственно-технический журнал «Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность». – 2009. - № 5. - С. 20-23.

5. Колычев А.В., **Попова Ю.С.**, Титков В.В., Халилов Ф.Х. Ограничители перенапряжений высокого напряжения подвесной конструкции // Ежемесячный производственно-массовый журнал «Энергетик». – 2010. - № 1. - С. 37-39.

6. Боровских А.Н., **Попова Ю.С.**, Колычев А.В., Халилов Ф.Х. Полномасштабные испытания нелинейных ограничителей перенапряжений 500 кВ подвесной конструкции // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. - №2. - С. 69-72.

7. Халилов Ф.Х., **Попова Ю.С.**, Хохлов Г.Г. Обоснование установки ОПН на ВЛ 35-110 кВ в нефтяной и газовой промышленности // Труды Кольского научного центра РАН «Энергетика». - Апатиты, 2011. – Вып.2. - С. 118-127.

8. Колычев А.В., **Попова Ю.С.**, Титков В.В., Халилов Ф.Х., Шилина Н.А. Ограничители перенапряжений ОПН 35-500 кВ подвесной конструкции // Сборник научных трудов «Моделирование переходных процессов и установившихся режимов в высоковольтных сетях». - Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2008. - С. 118-122.

9. Гордиенко А.Н., Новоселов Ю.Б., Свергин А.А., Танаев А.К., **Попова Ю.С.** Грозозащита двухцепных ВЛ 110 кВ системы электроснабжения предприятий нефти и газа // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования.– СПб.: ПЭИПК, 2008. – Вып. 6. - С. 22-29.