

На правах рукописи

Хохлов Григорий Григорьевич

**МОЛНИЕЗАЩИТА ВЛ 150 – 220 кВ
ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТИ И ГАЗА**

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
Евдокунин Георгий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент
Колычев Александр Валерьевич

Ведущая организация: ФГАОУ ДПО
Петербургский энергетический
институт повышения квалификации
(«ПЭИПК»)

Защита состоится « » _____ 2011 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая, 29, главный учебный корпус, аудитория _____.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «СПбГПУ».

Автореферат разослан « » _____ 2011 г.

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

Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Значительная доля отключений высоковольтных воздушных линий (ВЛ) из-за их большой протяжённости спровоцирована ударами молний. Поэтому повышение грозоупорности ВЛ является важной задачей современной электроэнергетики.

Добыча нефти и газа – важнейшая отрасль промышленности в современной России, поэтому низкая надежность молниезащиты линий, питающих нефти- и газопромислы, приводит к серьезным финансовым потерям: грозовые отключения линий влекут за собой перебои в электроснабжении, нарушения технологических процессов (вплоть до выхода из строя скважин), и, как следствие, требуют проведения дорогостоящих восстановительных работ.

Разработке методов молниезащиты воздушных линий электропередачи посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых. Над решением проблемы молниезащиты работали Костенко М.В., Разевиг Д.В., Александров Г.Н., Базелян Э.М., Базуткин В.В., Гайворонский А.С., Долгинов А.В., Кадомская К.П., Евдакунин Г.А., Ефимов Б.В., Новикова А.Н. и другие исследователи. Следует отметить отсутствие в многочисленных публикациях единого мнения по отдельным аспектам проблемы молниезащиты.

Традиционные мероприятия молниезащиты ВЛ 150 – 220 кВ в нефтяной и газовой промышленности регламентированы в нормативных документах. Но в случаях, когда они не дают приемлемого показателя грозоупорности (локальное повышение грозопоражаемости, двухцепные линии, переходные пролеты, сверхвысокое удельное сопротивление грунта), предпочтение отдается альтернативным способам молниезащиты ВЛ, основным элементом которых является нелинейный ограничитель перенапряжений – ОПН.

Кроме установки ОПН, существуют иные альтернативные методы молниезащиты ВЛ 150 – 220 кВ, а именно: сооружение дополнительного троса на уровне нижних фаз, а также использование длинно-искровых разрядников (РДИ). Оба этих варианта лишь в некоторых случаях обеспечивают требуемую надёжность молниезащиты. В частности РДИ 150 и 220 кВ в настоящее время находятся лишь в стадии разработки.

Надёжную молниезащиту ВЛ обеспечивает установка ОПН на всех фазах каждой опоры ВЛ. Из-за большой стоимости аппаратов, актуальной является задача минимизации числа ОПН при расстановке их на трассе ВЛ. Для этого необходимо: определить оптимальные места установки аппаратов на опорах ВЛ и предельно допустимые расстояния между ограничителями, обеспечивающие заданную грозоупорность; проанализировать энергетические нагрузки на ОПН при воздействии молнии; а также учесть другие эксплуатационные воздействия.

Цель работы: разработка компьютерной модели ВЛ для расчёта показателя грозоупорности. Выбор наиболее эффективного с технической и экономической точки зрения метода молниезащиты, минимизация числа ОПН, устанавливаемых на ВЛ, обеспечивающего заданную защиту от грозových перенапряжений.

Основные решаемые задачи:

- разработка и внедрение альтернативных схем, обеспечивающих бóльший уровень грозоупорности, нежели традиционные методы молниезащиты линий 150 – 220 кВ;
- анализ областей применения альтернативных способов молниезащиты линий 150 – 220 кВ;
- определение показателя надёжности молниезащиты альтернативных схем и сравнение их с показателями надёжности при традиционных методах молниезащиты;
- выбор мест установки ОПН на линии, обеспечивающих энергоснабжение с высокой надёжностью;
- выполнение технико-экономического обоснования альтернативной молниезащиты ВЛ 150 – 220 кВ.

Методика проведения исследований. Основные результаты работы получены путём компьютерного исследования переходных процессов в ВЛ при ударах молний. Для этого была разработана компьютерная модель воздушной линии, позволяющая рассчитывать число грозových отключений как для линий, питающих предприятия нефти и газа, так и для любых других ВЛ.

Научная новизна:

- разработана гибкая компьютерная модель для анализа грозových перенапряжений в воздушных линиях. Проведено варьирование расчётных параметров ВЛ для определения степени их влияния на конечный результат. Обоснована оптимальная модель линии и опор ВЛ для решения задач молниезащиты.
- проведён анализ снижения годового числа грозových отключений при применении альтернативных способов молниезащиты;
- предложен и апробирован переход от усреднённого количества грозových отключений к неоднородному распределению отключений по длине линии. Показана необходимость учёта неоднородности параметров ВЛ в расчётах задач молниезащиты. Осуществлён анализ влияния локальных параметров линии на локальное число грозových отключений.
- найдены «зоны защиты» ОПН для различных конструкций линий электропередачи.

Практическая ценность:

- разработана оптимальная модель опоры и линий электропередачи для анализа задач молниезащиты;
- выявлены элементы ВЛ, которыми можно пренебречь при расчётах показателей грозоупорности без ущерба для конечного результата;
- разработана инженерная компьютерная программа позволяющая рассчитывать как суммарное, так и распределённое по длине линии количество грозовых отключений ВЛ;
- проведены расчёты грозоупорности ВЛ 150 – 220 кВ с применением ОПН, на основе которых даны рекомендации по выбору схем установки аппаратов на опорах линий, а также частоте их расстановки.

Основные положения, выносимые на защиту:

- методика расчёта числа грозовых отключений ВЛ, упрощения и допущения в модели воздушной линии;
- расчётное количество отключений при традиционных и альтернативных методах молниезащиты ВЛ;
- переход от усреднённого количества грозовых отключений к неоднородному распределению отключений по длине линии;
- частота расстановки ОПН на линии.

Реализация результатов работы. Одним из основных результатов работы является инженерная компьютерная программа по определению грозоупорности ВЛ, способная осуществлять расчёты показателей грозоупорности как для линий предприятий нефти и газа, так и для любых других ВЛ.

Апробация работы и достоверность результатов.

Основные положения диссертации и её отдельные разделы докладывались и обсуждались на:

- научно-технической конференции «ЭМС-2008»;
- XXXVI неделе науки СПбГПУ;
- при докладе на кафедре Э,Т,ВН СПбГПУ.

Основные результаты работы – расчётное количество грозовых отключений, полученное при помощи разработанной программы. Этот показатель, рассчитанный для реально существующей ВЛ, близок к эксплуатационным данным. Результаты работы использованы:

- при расчётах задач молниезащиты для ОАО «НК «Роснефть», АО «Ноябрьскнефтегаз», ОАО «Нижневартовскнефтегаз» и НПФ ЭЛНАП;

- при чтении лекций в ФГАОУ ДПО «ПЭИПК»;
- в учебном процессе на кафедре Э,ТВН СПбГПУ.

Публикации. Результаты выполненных исследований опубликованы в 11 печатных работах, в том числе в 3 изданиях из списка ВАК Минобрнауки России.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы из 74 наименований. Работа изложена на 246 страницах и 6 приложениях, содержит 183 рисунка и 57 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы работы.

В первой главе проведён анализ грозовых отключений ВЛ 150 и 220 кВ, а также способов защиты от них. Грозовые отключения составляют до 75 % от всех аварийных отключений линий. В районах даже со слабой грозовой активностью, количество грозовых отключений в разы превышает допустимое. Комплекс традиционных методов молниезащиты способен обеспечить сравнительно высокий уровень грозоупорности линий, однако, в ряде случаев необходимо прибегать к альтернативным методам, в том числе к установке ОПН на опорах. Анализ опыта эксплуатации показал, что защитные аппараты на линиях значительно уменьшают число грозовых отключений, но вопрос о минимизации количества ограничителей и технических требованиях к ним не является однозначно решённым.

Выполнен анализ интенсивности грозовой деятельности. Количество грозовых часов трудно прогнозируемо и в разные годы в одном и том же регионе может изменяться более чем в 2 раза, что затрудняет точную оценку количества грозовых отключений ВЛ.

Также, в первой главе выполнен обзор методик расчёта грозоупорности ВЛ с указанием их достоинств и недостатков.

Во второй главе представлена модель ВЛ в грозовом режиме и оценена степень влияния различных допущений на конечные результаты расчётов. Установлено, какими явлениями в переходном процессе можно пренебречь при решении задач молниезащиты. Для этого в пакете визуального программирования “Simulink” разработаны модели с различными схемами замещения ВЛ. По результатам расчётов, выполненных с помощью этих моделей, определялась степень влияния принимаемых допущений на конечный результат. Большую помощь при составлении модели ВЛ оказала доцент кафедры Э,ТВН СПбГПУ Гумерова Н.И.

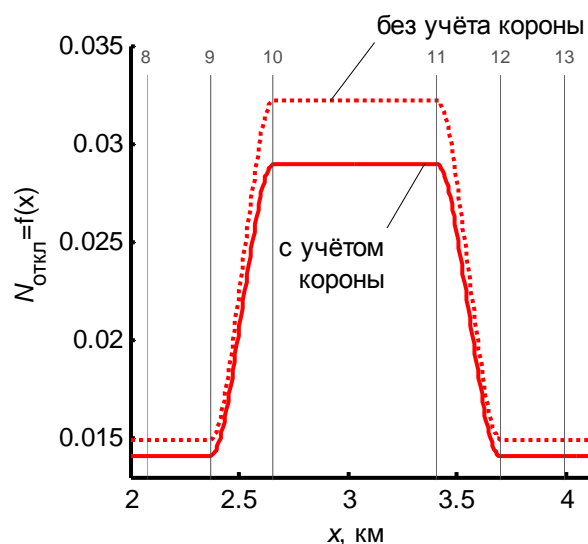
Основными результатами расчётов задач молниезащиты является годовое число грозовых отключения $N_{откл}$. Для его определения находится кривая опасных токов (КОТ): для ряда значений длин фронтов импульса тока молнии τ_{ϕ} определяется минимальные

величины амплитуд импульсов I_{max} , приводящие к перекрытию хотя бы одной гирлянды изоляторов на любой из опор моделируемого участка линии. Из этих пар чисел определяются скорости нарастания токов молний I'_{max} и строится КОТ. Вероятность перекрытия линейной изоляции находится путем интегрирования совместного распределения плотностей вероятностей амплитуд и крутизн токов молнии. Отмечено, что предписываемый РД 153-34.3-35.125-99 логнормальный закон распределения параметров молнии даёт несколько большее число отключений, чем распределение по закону Вейбулла, применяемое во многих работах. Показано, что для оценки числа отключений линии без влияния на конечный результат можно ограничиться тремя точками на КОТ.

Участки ВЛ между пролётами моделировались многопроводными однородными линиями. Расчёт распространения волн напряжений и токов в этих длинных линиях производился по методу бегущих волн Бержерона, учитывающему коэффициенты связи между проводами и тросами аналогично методу эквивалентной волны для многопроводных линий М.В. Костенко. Показано, что отсутствие в методике учёта связи между проводами и тросами приводит к значительной (более чем в 1,5 раза) погрешности в результатах.

Параметры линий определялись с учётом проникновения электромагнитного поля в землю, посредством расчёта глубины нахождения нулевого потенциала. Эта глубина, как оказалось, зависит от удельной проводимости грунта и формы импульса перенапряжения $h_э = f(\rho_{гр}, f_{возд})$. Потери в земле с учетом скин-эффекта находились при помощи вычисления интеграла Карсона.

Импульсная корона на проводах и тросах моделировалась при помощи введения



динамической ёмкости C_d на отрезках линии. Значение этой ёмкости зависит от напряжения на соответствующем участке линии $C_d = f(u)$. Как только напряжение на фронте волны превосходит напряжение начала короны, увеличивается сглаживание фронта волны. Степень влияния импульсной короны зависит от длины пробега волны перенапряжения. Учёт импульсной короны даёт снижение $N_{откл}$, как минимум на 10 ÷ 15 % (см. рис. 1).

Рис 1 Распределение количества отключений по длине линии с длинным пролётом, рассчитанное с учётом и без учёта импульсной короны

Вероятность перекрытия распределена по пролёту неравномерно, поскольку удар молнии

может произойти в любую случайную точку в пролёте. Расчёт числа обратных перекрытий только для двух пограничных мест ударов молнии (в трос посередине пролёта и в вершину

опоры) без учёта промежуточных точек в пролёте, приводит к занижению результатов на $10 \div 25 \%$.

Рабочее напряжение. Напряжение на проводе складывается из напряжения, вызванного ударом молнии, и рабочего напряжения. Удар молнии в линию может произойти при любом мгновенном значении фазного напряжения. Расчёты для различных мгновенных значениях рабочего напряжения показали, что оно изменяет величину $N_{откл}$ на $10 - 20 \%$ (в зависимости от сопротивления заземления опоры). Наибольшее количество отключений происходит, когда на проводе нижней фазы рабочее напряжения имеет полярность, противоположную полярности молнии ($\varphi_0 = 30^\circ$).

Число опор в модели. Отражённые от соседних опор волны существенно снижают величину напряжения на гирляндах изоляторов поражённой опоры, поэтому количество отключений, рассчитанное с учетом лишь одной опоры, будет завышено. С другой стороны, за счёт стекания тока в землю на соседних опорах, а также за счёт потерь при распространении волн перенапряжений, напряжение на гирляндах изоляторов опор, удалённых от места удара молнии, будет существенно ниже, чем в месте удара. Расчёты показали, что глубина распространения грозового перенапряжения в ВЛ не превышает $4 - 6$ опор. Увеличение количества опор в модели линии сверх шести даёт уточнение конечного результата не более чем на 2% .

Схема замещения опоры. Расчёты в моделях с различными схемами замещения опор ВЛ показали, что без особой погрешности для результата, достаточно использовать схему, учитывающую только индуктивность тела опоры между траверсами. Учёт индуктивностей траверс, ёмкостей тела опоры на землю, а также волновых процессов в опоре не даёт заметного (более 5%) уточнения результатов, однако, сильно усложняет процесс расчёта.

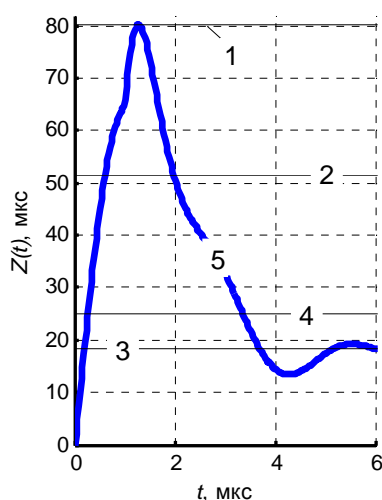


Рис 2 Динамическое сопротивление ЗУ опоры

Динамическое сопротивление опоры. Согласно РД 153-34.3-35.125-99 для расчета грозоупорности ВЛ необходимо использовать сопротивление заземляющего устройства (ЗУ) опор, измеренное на частоте 50 Гц. Однако различие сопротивлений заземления на этой частоте и в диапазоне, соответствующем грозовым воздействиям, подтверждено большим числом экспериментальных исследований (работы КНЦ РАН). На рис. 2 показана характеристика ЗУ одной из опор, полученная экспериментальным путем как отношение мгновенных значений импульсов напряжения и тока, а в табл. 1 приведены

значения $N_{откл}$ при различных моделях замещения ЗУ опоры. Очевидно, что максимальное и

минимальные значения отличаются примерно на порядок. Наиболее соответствующей реальности является величина, полученная при моделировании ЗУ схемой, воспроизводящей экспериментальные кривые тока и напряжения и соответственно реальную его характеристику.

Таблица 1 – Число грозовых отключений ВЛ при различных моделях ЗУ

Модель ЗУ опоры	Кривая на рис. 2	Сопротивление ЗУ, Ом	Число грозовых отключений
Активное, $R_{оп} = Z_{зу, max}$	1	80,19	23,37
Активное, $R_{оп} = \frac{U_{зу, max}}{I_{зу, max}}$	2	51,53	13,23
Активное, $R_{оп} = Z_{зу}(t \rightarrow \infty)$	3	18,3	1,21
Активное, $R_{оп} = Z_{действ}$	4	25,21	2,85
Динамическое сопротивление	5	$Z_{зу} = f(t)$	7,64

В третьей главе диссертации проведён анализ традиционных методов молниезащиты путем варьирования факторов, влияющих на грозоупорность (таких как тип опоры, сопротивление ЗУ, длина пролёта, марка проводов и т.д.).

Величина удельного сопротивления грунта ($\rho_{гр}$) влияет на грозоупорность линии двояко. С одной стороны большее $\rho_{гр}$ обуславливает большую деформацию грозовых волн, снижая напряжения на гирляндах изоляторов, и, тем самым уменьшает вероятность их перекрытия (расчёты, проведённые для разных $\rho_{гр}$ показали, что деформация волны перенапряжения снижает число отключений примерно в 1,15 раза). С другой стороны, при одинаковых конструкциях заземлителя, большее $\rho_{гр}$ увеличивает сопротивление заземления опор.

При увеличении количества изоляторов в гирлянде растёт напряжение, приводящее к перекрытию этой гирлянды. Одновременно с этим растёт и расстояние между тросом и фазными проводами, что приводит к некоторому снижению коэффициентов связи между ними. Из расчётов следует, что при добавлении к гирлянде одного изолятора, количество отключений снижается примерно на 10 %.

На рисунке 3 представлена доля различных воздействий молний в общем числе $N_{откл.}$. Видно, что число отключений, вызванных прорывами молний, минуя тросовую защиту, существенно только при низких $R_{оп}$ когда практически все грозовые отключения происходят вследствие прорывов. Однако, при таких значениях сопротивлений ЗУ общее количество отключений невелико. При более высоких значениях $R_{оп}$ вклад прорывов незначителен.

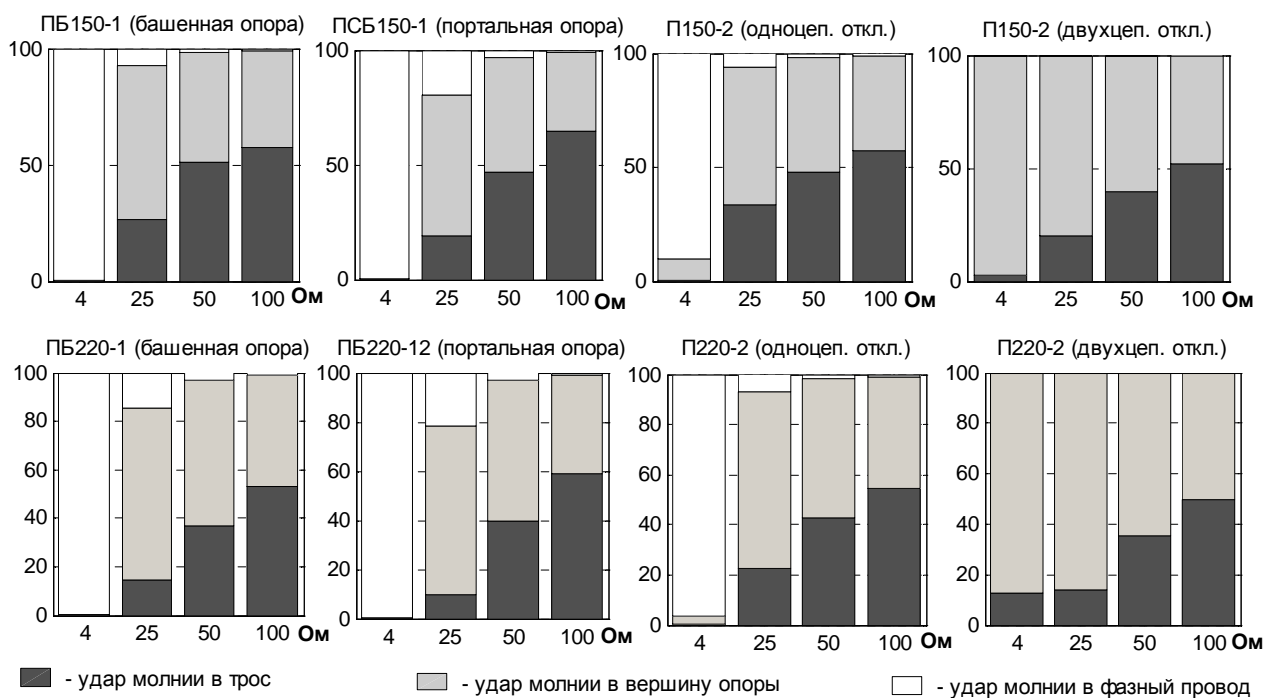


Рис 3 Доля различных воздействий молнии в суммарном числе отключений

Также в третьей главе проводится анализ эффективности применения дополнительных грозозащитных тросов, который показал, что при переносе троса с вершины опоры на уровень нижних фаз все молнии, не перехваченные опорами ВЛ, ударяют в фазные провода, и с высокой вероятностью приводят к перекрытию линейной изоляции. Количество отключений от ударов молнии в фазный провод возрастает на порядок, и тем самым значительно повышает суммарное число отключений. По сравнению с ВЛ с тросом на вершине опоры, количество грозовых одноцепных отключений возрастает в $2 \div 5$ раз для всех типов рассматриваемых опор. В тоже время, установка троса на уровне нижних фаз повышает коэффициент связи между тросом и нижними проводами, что приводит к некоторому уменьшению количества отключений от ударов молнии в вершину опоры. Из-за этого число одновременных отключений обеих цепей для двухцепных ВЛ снижается в $1,5 \div 2$ раза. Тем не менее, эксплуатация линии с тросом только на уровне нижних фаз без защитных аппаратов нецелесообразна из-за недопустимо большого количества одноцепных отключений ВЛ даже при малых сопротивлениях заземления опор.

Указанного недостатка лишён метод молниезащиты, при котором тросы сооружаются и на вершине опоры, и на уровне нижних фаз. Кроме улучшения коэффициента связи, за счёт наличия дополнительного троса возрастает доля отводимого от поражённой опоры тока. Уровень грозоупорности линий обоих классов напряжений увеличивается в $2 \div 4$ раза для башенных опор и $1,7 \div 2,5$ раза для порталных опор.

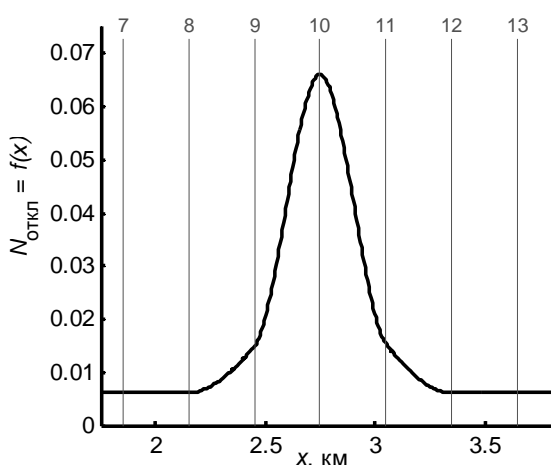
Ещё большее снижение числа грозовых отключений обеспечивает установка двух тросов на уровне нижних фаз совместно с тросом на вершине опоры. Расчёт с варьированием

расстояний между нижними тросами показал, что с увеличением расстояния повышается коэффициент связи с нижними проводами и снижается число грозových отключений.

В четвёртой главе рассматривается молниезащита линий при помощи подвесных ОПН. При монтаже ОПН на опоре ВЛ надёжно защищены только те фазы, на которых непосредственно установлен аппарат. Несмотря на отвод в фазные провода через ограничители части тока молнии, протекающего по телу опоры, может произойти перекрытие незащищённых гирлянд. Расчёты, проведённые для поиска наиболее эффективного места установки ограничителя на опоре ВЛ показали, что установка ОПН на нижних фазах опоры более эффективна: на них ограничители обеспечивают наибольшее снижение числа обратных перекрытий, в то время как аппараты на верхних фазах в первую очередь защищают линию от отключений, вызванных ударами молний в фазный провод.

Для минимизации числа ограничителей (поиска максимального расстояния между ОПН), обеспечивающее заданный показатель молниезащиты, необходимо перейти от суммарного усреднённого числа отключений для всей ВЛ к распределению отключений по длине линии. Грозвые отключения распределены по длине ВЛ неравномерно и их число зависит от параметров каждого отдельного участка линии. Поэтому, число грозových отключений рассматривалось как функция от координаты x , лежащей в пределах от нуля (начало линии) до $l_{\text{лин}}$ (конец линии), $N_{\text{откл}} = f(x)$. Такая функция названа эпюрой числа грозových отключений. Суммарное количество отключений для ВЛ пропорционально площади под эпюрой.

На локальное изменение числа грозových отключений влияют такие параметры как: сопротивления ЗУ (см. рис. 4), длина пролёта, высота опоры, уровень линейной изоляции,



высота тела опоры, а также сочетание этих и прочих параметров отдельных участков линии.

В работе был проведён ряд расчётов, цель которых – определение «зоны защиты» ОПН, т.е. участка линии по обе стороны от опоры с установленным ограничителем, на котором, благодаря аппарату, снижается число грозových отключений. Было установлено, что ширина такой зоны во многом зависит от характеристик участка линии, на котором установлен

Рис 4 Эпюра числа грозových отключений при высоком сопротивлении заземления опоры №10

ограничитель. С увеличением сопротивления заземления опоры увеличивается и защитная зона аппаратов (см. рис. 5). Также ширина защитной зоны от двухцепных перекрытий несколько шире, нежели от одноцепных (см. рис. 6). В общем случае зону защиты

ограничителей обоих классов напряжения можно оценить в 700 – 850 м. При бестроссовой молниезащите ВЛ защитная зона ОПН не превышает одной опоры при любых параметрах линии.

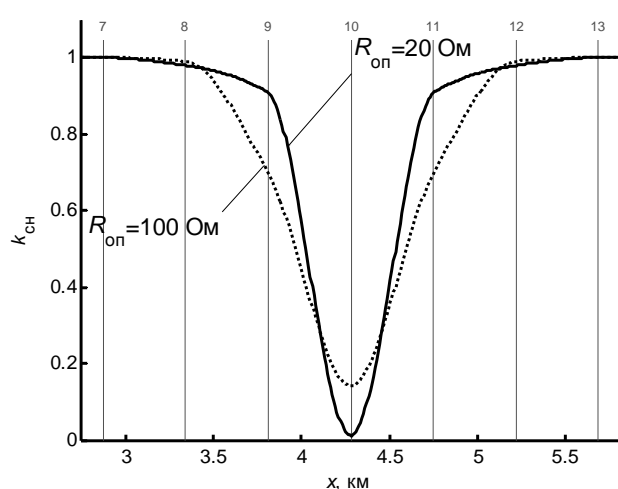


Рис 5 «Зона защиты» ОПН

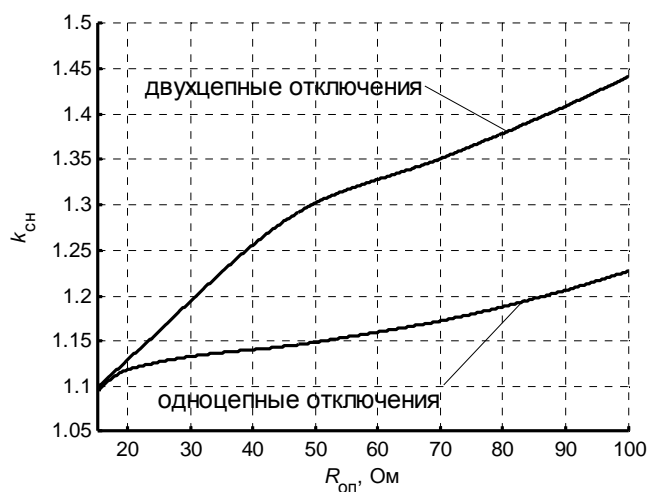


Рис 6 Снижение числа отключений опоры соседней с защищённой ОПН

В диссертационной работе выполнены расчёты количества грозовых отключений ВЛ 150 – 220 кВ предприятий нефтегазовой отрасли при различных сопротивлениях заземлений опор, разных схемах и частоте установке ОПН. Грозовая активность для этих расчётов была взята равной 40 грозовым часам в год – средний показатель активности для нефтеносных районов России. Расчёты были произведены при наличии молниезащитного троса на вершине опоры и без него. В обоих случаях, расчёты показали необходимость установки аппаратов на каждой опоре при высоких требованиях к надёжности молниезащиты (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Количество грозовых отключений ВЛ 220 кВ при разной частоте установки ОПН на нижних фазах

Частота установки ОПН	Количество грозовых отключений			
	$R_{оп}=25 \text{ Ом}$	$R_{оп}=50 \text{ Ом}$	$R_{оп}=75 \text{ Ом}$	$R_{оп}=100 \text{ Ом}$
Без ОПН	0,91	3,56	4,91	6,41
Через 3 опоры	0,58	2,18	3,47	4,43
Через 2 опоры	0,55	1,99	3,43	4,36
Через опору	0,43	1,47	2,98	3,74
На каждой опоре	0,14	0,82	1,67	2,56

Реально эксплуатируемые линии, как правило, обладают резко неоднородными параметрами по всей длине. Так величины сопротивлений заземлений для разных опор в пределах одной линии могут колебаться от единиц до сотен Ом. В работе были проведены расчёты $N_{откл}$ для участка из 18 опор реальной ВЛ. Четыре опоры этого участка имеют

относительно высокое сопротивление заземления (см. рис. 7), кроме того грозопоражаемость данных четырёх опор повышена из-за аномалий в грунте. Результат расчёта со всеми усреднёнными параметрами (усреднённое сопротивление ЗУ опор составило $R_{оп} = 10,8 \text{ Ом}$), т.е. расчёт без учёта высокого числа отключений опор с повышенным сопротивлением заземления показал результат $N_{откл} = 0,175 \text{ откл/год}$. При учёте всех «неоднородностей» ВЛ расчётное количество $N_{откл}$ составило $0,924 \text{ откл/год}$. Таким образом, всего несколько опор с относительно высокими сопротивлениями заземления могут привести к значительному увеличению числа грозовых отключений.

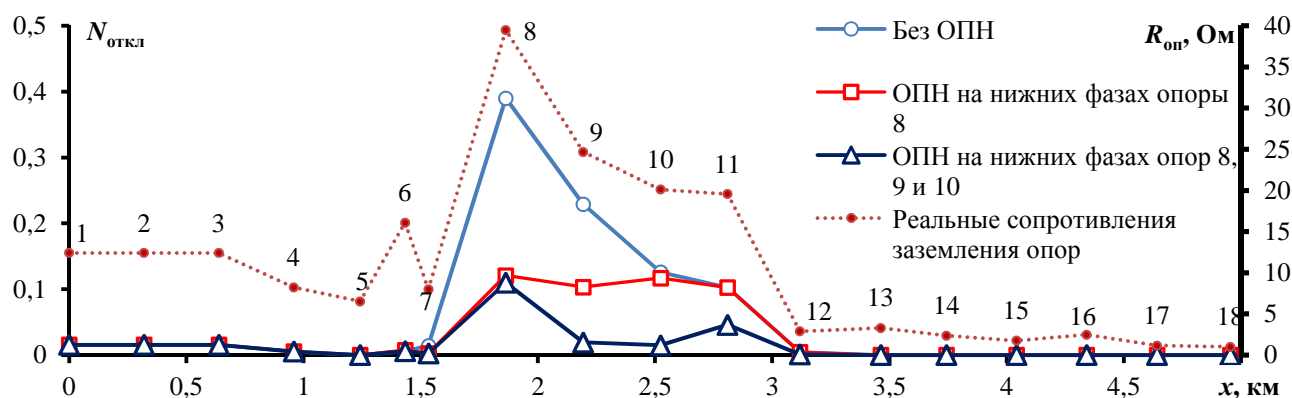


Рис 7 Типичная эпора числа грозовых отключений реальной ВЛ

Кроме того, использование усреднённых параметров приводит к потере индивидуальных данных и исключает применение конкретных технических решений. Очевидно, что поиск мест установки ОПН должен производиться по реальными характеристикам ВЛ без их усреднения и переноса усреднённых параметров на все опоры линии. Защита ограничителями лишь нескольких «проблемных» опор при правильном выборе мест установки ОПН существенно снижает суммарное число отключений ВЛ (см. рис. 7).

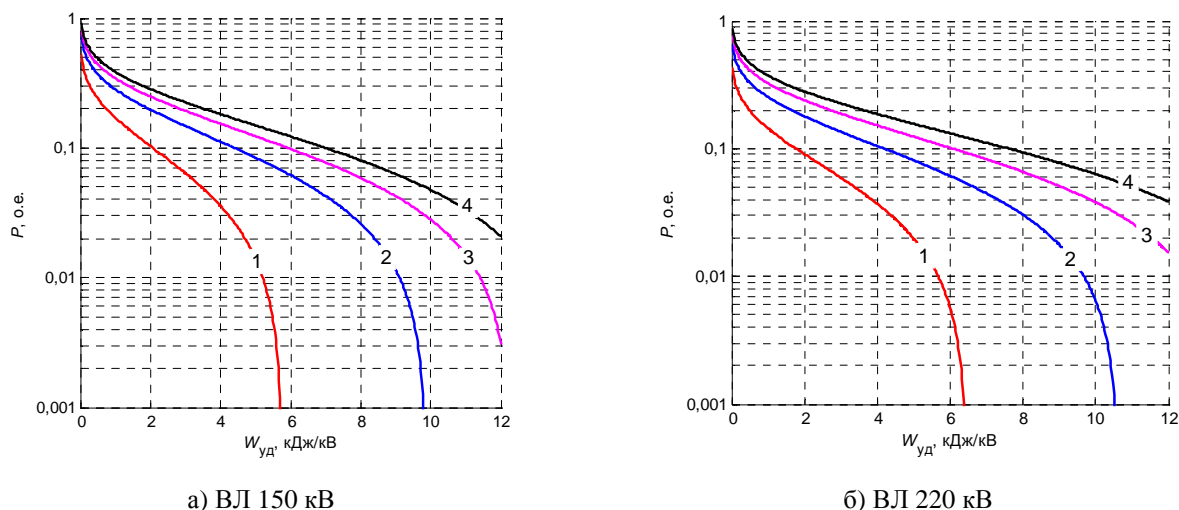


Рис 8 Вероятность выделения энергии в ОПН при наличии троса на вершине опоры
 1 – $R_{оп} = 25 \text{ Ом}$; 2 – $R_{оп} = 50 \text{ Ом}$; 3 – $R_{оп} = 75 \text{ Ом}$; 4 – $R_{оп} = 100 \text{ Ом}$.

При выборе ОПН для грозозащиты ВЛ важным является вопрос об энергетических нагрузках. Анализ показал, что при ударе молнии в молниезащитный трос, в ограничителе выделяется значительно меньше энергии, чем при ударе молнии в вершину опоры. В наиболее тяжёлых условиях по энерговыделению находится ограничитель, установленный на нижних фазах опоры.

Энергия, выделяемая в ограничителе, зависит от максимального тока молнии, крутизны фронта и волны её импульса. Так как значения параметров молнии являются случайными величинами, необходима вероятностная оценка выделяемой в ограничителе энергии. На рисунке 8 представлены графики вероятности P выделения энергии в ОПН при наличии троса на вершине опоры ВЛ 150 и 220 кВ.

Большие сопротивления заземления опор приводят к более жёстким требованиям к классу энергоёмкости аппарата: если при сопротивлении $R_{оп} = 25$ Ом удельная энергия, выделяемая в ограничителе, не превышает 6 кДж/кВ, то при $R_{оп} = 100$ Ом эта энергия будет превышена с вероятностью 0,1.

В пятой главе проведён технико-экономический расчёт эффективности использования ОПН. Расчёт проводился путём поиска варианта молниезащиты с минимальными годовыми затратами. Эти затраты складываются из капитальных вложений на ежегодные издержки по организации молниезащиты (стоимости установки ограничителей, подвески молниезащитных тросов, сооружения заземляющих устройств опор) и, кроме того, ущерба от грозовых отключений. Ущерб от грозовых отключений в свою очередь складывается из прямых затрат на ремонтно-восстановительные работы и ущерба, вызванного недоотпуском электроэнергии (потери сырой нефти; выход из строя нефтяных скважин; повреждение погружных насосов). Для линий 150 кВ предприятий нефти и газа ущерб на одно грозовое отключение составляет 2 880 тыс. руб, для ВЛ 220 кВ – 16 896 тыс. руб.

Проведённые технико-экономические расчёты показали эффективность установки ОПН на каждой опоре ВЛ предприятий нефтегазовой отрасли не только с технической, но и с экономической точки зрения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Повышение эффективности молниезащиты ВЛ является актуальной, а в случае питания предприятий нефти и газа необходимой задачей из-за значительных финансовых потерь, вызванных перебоями в электроснабжении при грозовых отключениях. Особую актуальность эта проблема приобретает в условиях, когда традиционные меры молниезащиты, диктуемые нормативными документами, не эффективны. В этих случаях

должны применяться альтернативные методы молниезащиты, в том числе установка ОПН на опорах ВЛ.

2. Разработана инженерная компьютерная программа, позволяющая посредством численных расчётов переходных процессов, протекающих в ВЛ при ударах в неё молнии определить интегральный показатель надёжности молниезащиты – годовое число грозовых отключений $N_{откл}$. С помощью подробной и гибкой модели воздушной линии в грозовом режиме, проведено варьирование расчётных параметров ВЛ (некоторых из них впервые) для определения степени их влияния на конечный результат:

- при моделировании ударов молний в линию, достаточно рассматривать участок ВЛ, состоящий из 6 опор;
- на число грозовых отключений в наибольшей степени влияют высота опоры и импульсное сопротивление ЗУ опоры. С увеличением длины пролёта между опорами до 20 % растёт число грозовых отключений. Усиление гирлянды на один изолятор снижает число отключений на 10 %;
- наиболее простой для моделирования схемой замещения опоры, обеспечивающей достаточно точный результат, является схема, учитывающая индуктивности тела опоры между траверсами. Учёт индуктивностей траверс, ёмкостей опоры и волновых процессов в опоре не сказывается на окончательном результате;
- при невозможности учёта реальных динамических характеристик ЗУ опоры, наиболее точный результат обеспечивает замещение заземлителя активным сопротивлением, равным отношению максимума напряжения к максимуму тока;
- значительное влияние на результаты имеют: коэффициенты связи между проводами и импульсная корона;
- варьирование значением погонной индуктивности тела опоры в пределах от 0,5 до 1,1 мкГн/м практически не влияет на значение $N_{откл}$ при $R_{оп} > 35$ Ом. Учёт взаимной индуктивности между каналом молнии и телом опоры изменяет расчётное число отключений не более чем на 12 %;
- наибольшее количество отключений происходит при полярности рабочего напряжения нижней фазы на опоре, противоположной полярности тока молнии ($\varphi_0=30^\circ$);
- марки проводов и тросов, удельное сопротивление грунта и отклонение гирлянды изоляторов влияют на $N_{откл}$ незначительно;
- при расчёте вероятностей амплитуд токов молнии и скоростей их нарастания, логнормальный закон распределения даёт большее число отключений, по

сравнению с законом распределения Вейбулла. Для построения КОТ достаточно использовать три значения длительности фронта τ_{ϕ} .

3. При помощи разработанной программы выполнен сравнительный анализ эффективности применения традиционных и альтернативных методов молниезащиты ВЛ. Расчёты показали, что при невысокой грозовой активности и сопротивлениях заземлений опор менее 15 Ом достаточно применение традиционных методов. В остальных случаях необходимо усиление грозоупорности линии альтернативными методами:

- ОПН, установленные на опоре ВЛ, надёжно защищают только те фазы, на которые они установлены. Вероятность перекрытия незащищённых фаз сохранятся. Грозоупорность линии возрастает с увеличением числа аппаратов, установленных на опорах ВЛ;
- наиболее эффективными местами установки ОПН на опоре являются нижние гирлянды изоляторов;
- установка троса под нижними фазами совместно с тросом на вершине опоры увеличивает уровень грозоупорности линии в $2 \div 4$ раза для башенных опор и в $1,7 \div 2,5$ раза для порталных опор. Установка двух тросов под нижними фазами приводит к ещё большему снижению числа отключений;
- установка ОПН совместно с дополнительными тросами способна снизить годовое число отключений линии в $5 \div 20$ раз.

4. Для определения частоты установки ОПН на ВЛ осуществлён переход от усреднённого $N_{\text{откл}}$ к неоднородному распределению отключений по длине линии. При установке ОПН, наибольшее снижение отключений происходит на опоре с установленным аппаратом. Степень снижения $N_{\text{откл}}$ на соседних опорах зависит от многих параметров линии: сопротивлений заземлений опор, длин пролётов и т.д., но в общем случае «зона защиты» ограничителя невысока и не превышает 2 опор. При эксплуатации ВЛ без тросов на вершинах опор, ограничители необходимо устанавливать на верхних фазах каждой опоры.

5. Параметры ВЛ как правило резко неоднородны по всей длине линии, поэтому расчёты с усреднёнными параметрами приводят к значительному занижению результатов. Расчёт задач молниезащиты, а также поиск мест установки ограничителей необходимо проводить задаваясь реальными параметрами ВЛ без их усреднения и распространения усреднённых параметров на все опоры линии.

6. Техничко-экономический расчёт показал эффективность установки ОПН на всех опорах ВЛ, питающих предприятия нефти и газа, не только с технической, но и экономической точки зрения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гумерова Н.И., Халилов Ф.Х., Хохлов Г.Г. Грозозащита двухцепных ВЛ с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений. // Сборник трудов X Российской НТК «ЭМС-2008». – СПб.: ВИТУ, 2008. –С. 37 – 42.
2. Гумерова Н.И., Хохлов Г.Г. Алгоритм определения напряжения в месте удара молнии в воздушную линию и в месте расположения опоры // Сборник КФАН Моделирование переходных процессов и установившихся режимов высоковольтной сети. – Апатиты: изд. КНЦ РАН. 2008. –С. 38-46.
3. Гумерова Н.И., Халилов Ф.Х., Хохлов Г.Г. Вопросы грозозащиты двухцепных ВЛ с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений. // Сборник КФАН Моделирование переходных процессов и установившихся режимов высоковольтной сети. – Апатиты: изд. КНЦ РАН, 2008. –С. 110-114.
4. Халилов Ф.Х., Хохлов Г.Г. Грозозащита двухцепных ЛЭП 35-110 кВ установкой ОПН на фазах. // XXXVI неделя науки СПбГПУ. Материалы Всероссийской межвузовской НТК студентов и аспирантов СПбГПУ. Часть II. – СПб.: Изд-во Политехнического у-та, 2008 -С. 10 – 12.
5. Н.И. Гумерова, Ф.Х. Халилов, Г.Г. Хохлов. Оценка степени влияния допущений на результаты моделирования переходных процессов при ударах молнии в ВЛ. // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. –2011. – Вып. 2. –С. 60 – 65.
6. Ф.Х. Халилов, Г.Г. Хохлов. Выбор модели опоры ВЛ 35–220 кВ при анализе грозовых перенапряжений. // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. –2011. – Вып. 2. –С. 112 – 117.
7. Халилов Ф.Х., Попова Ю.С., Хохлов Г.Г. Обоснование установки ОПН на ВЛ 35-110 кВ нефтяной и газовой промышленности. // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. –2011. – Вып. 2. –С. 118 – 127.
8. Н.И. Гумерова, Ф.Х. Халилов, Г.Г. Хохлов, И.А. Косорлуков. Оценка влияния допущений на результаты моделирования переходных процессов при ударах молнии в ВЛ. // Вестник СамГТУ. Серия Технические науки. –2011. –№2(69). –С. 133 – 138.
9. Халилов Ф.Х., Хохлов Г.Г. Молниезащита ВЛ 150 – 220 кВ с использованием традиционных и альтернативных методов. // Научно-Технический журнал «Электро». –2011. –№4. –С. 45 – 48.
10. Гумерова Н.И., Хохлов Г.Г., Косоруков А.В. Расчёт грозоупорности ВЛ 110 кВ и выше. // Новости электротехники. –2011. –№3 (69). –С. 44 – 47.

11. Гумерова Н.И., Халилов Ф.Х, Попова Ю.С., Хохлов Г.Г. Шишкова Е.М. Оценка частоты установки ОПН на опорах ВЛ 35 – 220 кВ. // Вестник СамГТУ. Серия Технические науки. –2011. –№3 (31).