

**РГБ ОД**

25 СЕН 2000

На правах рукописи

УДК 621.315.1.025:621.316. 933.3

**РЕЙХЕРДТ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ТОКОВЫМ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ  
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, УСТАНАВЛИВАЕМЫХ НА ОПОРАХ  
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

05.14.12 – Техника высоких напряжений

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

Новосибирск 2000

Работа выполнена в Новосибирском государственном техническом университете.

- Научный руководитель** - доктор технических наук,  
профессор К.П. Кадомская
- Официальные оппоненты:** доктор технических наук,  
профессор А.А. Дульзон  
кандидат технических наук,  
ст.н.с. А.Л. Ивановский
- Ведущая организация** - ЗАО «НИИ защитных аппаратов  
и изоляции» (г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится 30 мая 2000г. в 17<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета К.063.34.05 при Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ, пр-т К. Маркса 20, Новосибирск, 630092).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НГТУ.

Автореферат разослан « 7 » апреля 2000 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета  
К.063.34.05, к.т.н.

31.03.2000.



В.Е. Глазырин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Повышение надежности эксплуатации воздушных линий электропередач при их грозовых поражениях остается до сих пор одной из важнейших задач электроэнергетики. Актуальность этой проблемы особенно остро ощущается при проектировании и эксплуатации воздушных линий (ВЛ) высших классов напряжения, в том числе и линий на нестандартных конструкциях опор, например, в случаях высоких переходных пролетов через водоемы и другие преграды на трассе ВЛ, многоцепных электропередач с вертикальной подвеской проводов и т.д. Кроме того, повышенная грозопоражаемость может наблюдаться в электропередачах с ослабленной изоляцией, а также на линиях и участках трасс ВЛ, проходящих через районы с локальной интенсивной грозовой деятельностью.

Положительный опыт эксплуатации линейных ограничителей перенапряжений (ОЛН), устанавливаемых на подстанциях, позволяет также рассмотреть применение этих аппаратов для защиты линейной изоляции ВЛ путем их установки на опорах. Актуальность этого вопроса подтверждается решением 33-го комитета CIGRE\*.

Очевидно, что эффективность этой меры защиты в значительной степени зависит от надежности самих защитных аппаратов, подвергающихся воздействию токовых и энергетических нагрузок. В связи с этим внедрению аппаратов ОЛН, устанавливаемых на опорах, должен предшествовать широкий круг исследований, в состав которых входит анализ их токовых и энергетических нагрузок при всех возможных эксплуатационных воздействиях.

В настоящей работе прогнозирование эффективности работы линейных ОЛН, устанавливаемых на опорах ВЛ 110 – 1150 кВ, проведено на ПЭВМ путем математического моделирования процессов, возникающих при

---

\* Application of metal oxide surge arresters to overhead lines Working Group 33.11. Task Force 03. A SCHEI, Convener of WG 33.11.-Electra. –1999. №186

грозовых поражениях ВЛ и при коммутациях на защищаемых электропередачах. Такое моделирование позволило установить статистические характеристики как токовых и энергетических нагрузок ОПН, так и воздействий на линейную изоляцию, параллельно которой установлены защитные аппараты. Поскольку объектом исследований явились также и высокие опоры, то решение поставленной задачи не могло быть проведено при ориентировке лишь на существующие в проектной практике методы оценки грозоустойчивости ВЛ. В настоящее время отсутствуют также методики, которые позволяли бы определить токовые и энергетические воздействия на аппараты, установленные не на подстанциях, а на опорах ВЛ электропередач.

**Целью настоящей работы** является установление технической целесообразности оснащения воздушных линий высокого напряжения линейными защитными аппаратами ОПН, исследование и разработка требований к токовым и энергетическим нагрузкам подвесных ОПН и выявление основных факторов, влияющих на эти нагрузки.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

- разработаны методики, позволяющие оценить законы распределения токовых и энергетических характеристик подвесных ОПН при грозовых и коммутационных воздействиях;
- проведена серия расчетов применительно к ВЛ 110 - 1150 кВ различного конструктивного исполнения, позволившая выявить основные факторы, влияющие на условия эксплуатации ОПН;
- разработаны требования к токовым и энергетическим характеристикам ОПН подвесного типа при их искровом и безыскровом присоединении к проводам ВЛ 110 - 1150 кВ;
- получены оценки надежности эксплуатации как ВЛ, оснащенных подвесными ОПН, так и самих защитных аппаратов.

**Научная новизна работы** и основных ее результатов заключается в следующем:

- предложена новая методика определения законов распределения токовых и энергетических нагрузок в подвесных ОПН, устанавливаемых на

операх ВЛ высокого напряжения для защиты линейной изоляции от грозových воздействий, основанная на учете ориентировки канала лидера при ударе молнии в систему провода ВЛ – грозозащитные тросы;

- с помощью численных экспериментов при использовании разработанной методики произведена оценка влияния ряда факторов (конструкций опор и тросовой защиты, величин сопротивления заземления опор и др.) на законы распределения токовых и энергетических нагрузок ОПН;

- проанализировано влияние типа присоединения подвесных ОПН к проводам ВЛ (с искровым промежутком и без него) на токовые и энергетические характеристики ОПН;

- разработана методика оценки надежности ВЛ, оснащенных подвесными ОПН, и самих защитных аппаратов.

#### **Практическая значимость результатов работы.**

1. Разработанная в процессе выполнения работы методика определения законов распределения токовых и энергетических характеристик ОПН может быть использована для ВЛ любого конструктивного исполнения при разработке системы ее защиты от грозových перенапряжений с помощью подвесных ОПН.

2. Выявленные обобщенные требования к токовым и энергетическим характеристикам подвесных ОПН для ВЛ 110 - 1150 кВ стандартных и нестандартных конструкций могут служить исходной информацией при проектировании защиты конкретной ВЛ с помощью защитных аппаратов.

3. Широкий круг рассмотренных в работе конструкций ВЛ позволяет ориентироваться на подвесные ОПН, как на одну из наиболее эффективных мер повышения грозоупорности ВЛ.

Достоверность полученных результатов работы обоснована использованием при ее выполнении достаточно полных математических моделей, включающих в себя и модель развития лидера молнии в систему провода ВЛ – грозозащитные тросы, и подтверждается хорошим согласием результатов с данными, полученными зарубежными исследователями.

**Апробация работы и публикации.** Отдельные результаты работы и работа в целом обсуждались на научных семинарах кафедры ТнЭВН НГТУ, а также на

- совещании 25-27 марта 1997г. в Санкт-Петербурге на тему «Эксплуатация, качество и надежность вентиляных разрядников и серийно изготавливаемых ОПН 110 кВ и выше»;

- на 11 Международном симпозиуме по высоковольтной технике в Лондоне 23-27 августа 1999 г (Eleventh International Symposium on High-Voltage Engineering, London, UK);

- на Международном Российско-Корейском симпозиуме по науке и технологиям в Новосибирске 22-25 июня 1999 г (Russian – Korean International Symposium on Science and Technology, Novosibirsk, Russia).

По теме диссертации в научно - технической литературе опубликовано восемь научных работ. Часть результатов изложена в двух отчетах о НИР, выполняемой в рамках гранта Министерства образования РФ по фундаментальным исследованиям в области электроэнергетики и электротехники.

**На защиту выносятся:**

- методика определения токовых и энергетических нагрузок подвесных ОПН при грозовых поражениях ВЛ, учитывающая ориентировку канала лидера молнии в провода ВЛ и тросы;

- результаты исследований по определению токовых и энергетических нагрузок в ОПН, установленных на опорах ВЛ 110 – 1150 кВ как традиционных, так и нестандартных конструкций;

- сформулированные требования к токовым и энергетическим нагрузкам подвесных ОПН, позволяющие сделать заключение, что защитные аппараты могут быть изготовлены в одноколонковом исполнении;

- количественные показатели надежности эксплуатации линейных ОПН и ВЛ, оснащенных этими защитными аппаратами, позволяющие оценить эффективность грозозащиты ВЛ и ее участков;

- общие рекомендации по повышению надежности эксплуатации ВЛ при установке подвесных ОПН и снижению токовых нагрузок в этих защитных аппаратах

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 42 наименований и одного приложения. Объем работы составляет 148 страниц, включая 42 рисунка и 44 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **ВВЕДЕНИИ** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные задачи исследования, отражены научная новизна работы, ее практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В **ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** рассмотрены вопросы согласования разрядных напряжений изолирующих подвесок с параметрами линейных ОПН, устанавливаемых на опорах ВЛ. Проведен анализ двух основных способов присоединения подвесных аппаратов к проводам ВЛ: через последовательный искровой промежуток и без искрового промежутка. В первом случае произведен предварительный выбор пробивного напряжения искровых промежутков, а также параметров вольтамперной характеристики (ВАХ) ОПН, исходя из требуемого уровня ограничения грозовых перенапряжений. При безыскровом присоединении подвесного аппарата сформулированы требования к ВАХ ОПН и их энергетическим характеристикам не только при грозовых воздействиях, но и при коммутациях на ВЛ.

Следует отметить, что к основным преимуществам искрового присоединения ограничителей можно отнести отсутствие постоянно протекающего тока в нормальном эксплуатационном режиме. Недостатком этого варианта защиты является достаточно сложная координация пробивных напряжений открытых искровых промежутков с разрядными напряжениями защищаемой линейной изоляции.

Характеристики рассмотренных конструкций ВЛ приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Геометрические характеристики исследуемых опор ВЛ  
различного конструктивного исполнения

№ варианта	$N_{ПР}$	$h_{ПР}$ , м	$Y_{ПР}$ , м	$r_{пр,э}$ , м	$f_{ПР}$ , м	$N_{ТР}$	$h_{ТР}$ , м	$\alpha$ , град.	$r_{тр,э}$ , м	$f_{ТР}$ , м							
110 кВ																	
1	3	13,5 13,5 16,5	1,0 2,5 1,75	0,0076	3,0	1	22,3	17	0,0045	2,0							
330 кВ																	
1	3	22,3	$\pm 9,0$								0,074	10,4	2	29,5	22,6	0,0055	7,8
2	3	40,4	$\pm 9,0$	0,074	10,4	2	47,6	22,6	0,0055	7,8							
3	6	19,3 25,8 33,3	$\pm 5,6$ $\pm 8,8$ $\pm 4,9$	0,074	10,4	1	43,5	25,7	0,0055	7,8							
500 кВ																	
1	3	22,5	$\pm 12,0$								0,135	11,0	2	32,0	22,3	0,0055	7,8
2	3	34,5	$\pm 12,0$	0,135	11,0	2	44,0	22,3	0,0055	7,8							
3	3	51,0	$\pm 12,0$	0,135	11,0	2	65,0	15,6	0,0055	7,8							
4	3	22,5	$\pm 12,0$	0,135	11,0	2	32,0	11,9	0,0055	7,8							
5	3	51,0	$\pm 12,0$	0,135	11,0	2	65,0	-6,9	0,0055	7,8							
750 кВ																	
1	3	24,2	$\pm 17,0$	0,191	9,5	2	38,6	19,1	0,0077	7,0							
2	3	30,0	$\pm 17,0$	0,191	9,5	2	44,4	19,1	0,0077	7,0							
3	3	54,5	$\pm 17,0$	0,191	9,5	2	65,0	25,5	0,0077	7,0							
1150 кВ																	
1	3	30(31)	$\pm 24,2$	0,42	11,0	2	45,0	24,1	0,40	10,0							
2	3	30(31)	$\pm 24,2$	0,42	11,0	2	45,0	-6,8	0,40	10,0							

Примечание: № - номер варианта конфигурации ВЛ;  $N_{ПР}$  - общее количество фазных проводов;  $h_{ПР}$  - высота подвеса провода (системы проводов);  $Y_{ПР}$  - горизонтальное смещение провода относительно центра опоры;  $r_{пр,э}$  - эквивалентный радиус провода;  $f_{ПР}$  - стрелы провеса проводов;  $N_{ТР}$  - количество грозозащитных тросов на опоре;  $h_{ТР}$  - высота подвеса тросов;  $\alpha_{ТР}$  - угол тросовой защиты;  $r_{тр,э}$  - эквивалентный радиус троса;  $f_{ТР}$  - стрелы провеса тросов; длина одного пролета ВЛ составляла в среднем 350 - 420 м

В этой же главе получены законы распределения амплитуд волн токов молнии, прорвавшихся на провода ВЛ 110 - 1150 кВ при ударе молнии в линию. Определение этих законов проводилось с учетом теории ориентировки канала лидера молнии в систему провода - тросы ВЛ, разработанной в СибНИИЭ. Полученные законы сравнивались с логарифмическими нормальными законами распределения амплитуд волн



токов молнии, полученными по общепринятой методике, не учитывающей ориентировку канала лидера молнии. Рассматривались также амплитуды волн токов молнии, подчиненные бета распределению.

Методика, разработанная в СибНИИЭ, основана на физическом представлении процесса распространения канала лидера молнии в системе провода ВЛ – грозозащитные тросы. Процессы распространения нисходящего лидера и развития встречных разрядов определяются характеристиками электрического поля в рассматриваемой системе. Источниками поля являются заряды грозового облака, которые формируют заряды лидера молнии, а также заряды, индуцированные на проводах и тросах ВЛ. Иницирование последних обусловлено усилением напряженности поля между нисходящим лидером молнии и металлическими элементами конструкции ВЛ. Такое усиление непосредственным образом связано с сечениями и конструкцией проводов и тросов, а также их взаимным расположением относительно друг друга и относительно земли.

Анализ результатов расчетов показал, что учет ориентировки канала лидера молнии приводит к существенному снижению амплитуды волны тока молнии в точке ее удара. Так, отношение амплитуды волны тока молнии при неучете ориентировки лидера к амплитуде при ее учете составляет в зависимости от типа и конструкции ВЛ от 1,2 до 2,5. Влияние учета ориентировки канала лидера молнии на плотность распределения вероятностей амплитуды волны тока молнии для ВЛ 500 кВ стандартной конструкции ( $h_{np} = 22,5$  м;  $h_{тр} = 32$  м) проиллюстрировано на рис. 1.

Было отмечено также, что амплитуды волн тока молнии, прорвавшихся сквозь грозозащиту, зависят от конструктивных особенностей подвески проводов и тросов ВЛ. При этом выявлены некоторые закономерности грозопоражаемости ВЛ при учете ориентировки канала лидера молнии:

- увеличение высоты подвеса проводов относительно земли приводит к возрастанию амплитуды прорвавшихся волн токов молнии и вероятности прорыва; так при увеличении высоты подвеса проводов ВЛ 500 кВ с 22,5 до 51 м расчетная амплитуда волны тока молнии на

проводе увеличилась с 42 до 52 кА, а вероятность прорыва – с 0,0066 до 0,0355;

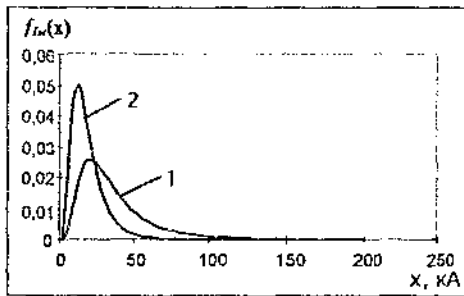


Рис.1. Плотности распределения вероятностей амплитуд токов молнии, поразивших фазы одноцепной ВЛ 500 кВ (№1), при *неучете* (кривая 1) и *учете* (кривая 2) ориентировки канала молнии

- при переходе к отрицательным углам тросовой защиты амплитуды волн тока молнии в точке ее удара в провод снижаются в среднем на 20–30 %, соответственно снижается и вероятность прорыва молнии сквозь тросовую защиту;
- в случае двухцепных опор ВЛ с вертикальной подвеской проводов и одним грозозащитным тросом, наиболее часто поражаются верхние фазы, нижние же фазы практически не подвергаются ударам молнии, так как оказываются экранированными фазными проводами, расположенными выше;
- в ВЛ 110 – 750 кВ на одноцепных опорах с горизонтальным расположением проводов поражаются практически лишь крайние фазы, поскольку при применяемых в настоящее время опорах с положительными углами тросовой защиты, а также при нулевых и малых отрицательных углах средний провод экранируется двумя тросами и двумя крайними фазными проводами. На ВЛ же 1150 кВ наблюдается прорыв молнии и на среднюю фазу; при переходе к отрицательным углам доля ударов в среднюю фазу возрастает.

Однако, для надежной эксплуатации линейной изоляции ВЛ требуемый

защитный уровень  $I_3 = \frac{2U_{\text{ср.макс}}}{Z_B}$  имеет слишком высокое значение даже при

учете ориентировки канала лидера молнии. Ориентировочная оценка этого

уровня, отвечающая  $P_{\text{перекр}} \approx 0$ , для опор стандартной конструкции с горизонтальной подвеской проводов дана в табл.2.

Таблица 2

$$I_3 = \frac{2U_{\text{зоны молн}}}{Z_n} \text{ при условии } P_{\text{перекр}} \approx 0, \text{ в кА}$$

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	110	330	500	750	1150
При неучете ориентировки	195				
При учете ориентировки	132	122	87	107	101

Поэтому существенного повышения надежности эксплуатации линейной изоляции ВЛ без увеличения ее габаритов можно добиться лишь при установке на опорах защитных аппаратов типа ОПН. Это обстоятельство и определило дальнейшие исследования.

Оценка переувражений на искровом промежутке между проводом и ОПН при его искровом присоединении показала, что при установлении требований к ОПН, расположенных на опорах ВЛ 330 - 1150 кВ с сопротивлением заземления, не превышающим 10 Ом, следует рассматривать лишь прямые удары молнии в провод ВЛ. Расчетными случаями для ВЛ 110 кВ будут являться как прямой удар в провод при прорыве молнии сквозь тросовую защиту, так и удар молнии в опору или в трос вблизи от опоры.

В случае же повышенных сопротивлений заземления опор (при  $R_2$  более 10 Ом) для ВЛ всех классов напряжения необходимо учитывать удары молнии как в фазные провода, так и в опоры (или в тросы вблизи от опоры).

Во *ВТОРОЙ ГЛАВЕ* на основе исследований, проведенных с помощью разработанной математической модели, сформулированы требуемые токовые и энергетические характеристики подвесных ОПН при ударе молнии в провода ВЛ. Расчетная схема в этом случае приведена на рис.2.

Пролеты, прилегающие к расчетным, моделировались активными сопротивлениями, по величине равными волновым сопротивлениям ВЛ при распространении волны по одной фазе с учетом коронирования провода ( $Z_B$ ).

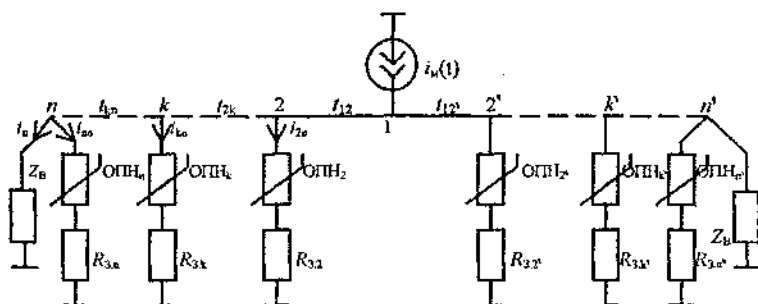


Рис.2. Расчетная схема по определению токовых нагрузок в подвесных ОПН при грозовых поражениях ВЛ

Молния моделировалась в виде генератора тока

$$i_m(t) = I_m^* [ \exp(-\gamma t) - \exp(-\beta t) ], \quad (1)$$

$$\text{где } \beta \approx \tau_\phi / 5, \gamma = \frac{\ln 0.5}{(\tau_\phi - \tau_\theta)}, I_m = I_m^* \exp(-\gamma \tau_\phi), \tau_\phi \approx l_m / I_m^* .$$

$I_m, I_m^*, \tau_\theta$  - амплитуда, крутизна и длительность волны тока молнии.

Расчеты показали, что для оценки токовых и энергетических нагрузок подвесных аппаратов можно моделировать лишь один - три пролета ВЛ, примыкающих к пораженному молнией пролету

Типичные осциллограммы напряжения в пролете ВЛ при ударе молнии в фазные провода приведены на рис.3. Изменение места удара молнии в пролете ВЛ ( $t_{12} = 0,1$  мкс,  $t_{12'} = 1,3$  мкс;  $t_{12} = 0,3$  мкс,  $t_{12'} = 1,1$  мкс;  $t_{12} = 0,6$  мкс,  $t_{12'} = 0,8$  мкс) практически не привело к сколь-нибудь заметному изменению амплитуд токов, так как эти амплитуды наступают раньше прихода волн, отраженных от соседних узлов. Таким образом, при оценке законов распределения токовых и энергетических нагрузок ОПН случайность места удара молнии в пределах одного пролета может не приниматься во внимание. В этом случае токовые и энергетические нагрузки ограничителей будут зависеть от трех случайных величин: амплитуды, крутизны и

длительности волны тока молнии. Определение функциональной связи нагрузок ОПН с этими характеристиками волны тока молнии произведено путем осуществления вычислительных экспериментов в точках трехфакторного композиционного плана, составленного на основе полного факторного эксперимента порядка  $2^k$  ( $k = 3$  – число факторов). Композиционный план  $F$  содержал 15 опытов.

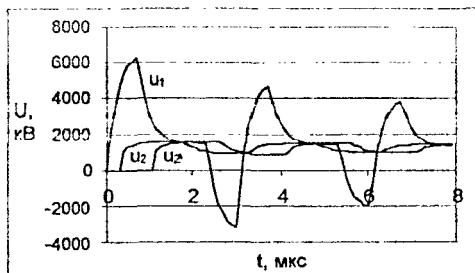


Рис.3. Вычислительные осциллограммы напряжений в узлах 1, 2 и 2' (рис.2) пролета ВЛ 500 кВ при установке подвесных ОПН;  $I_w=42$  кА;

В качестве регрессионной модели был принят полный квадратичный полином

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_1^2 + b_5X_2^2 + b_6X_3^2 + b_7X_1X_3 + b_8X_1X_2 + b_9X_2X_3 + b_{10}X_1X_2X_3. \quad (2)$$

Коэффициенты регрессионного полинома определялись как

$$B = C^{-1}F^T Y, \quad (3)$$

где  $C = F^{-1}F$  – информационная матрица.

$Y = [y_1, y_2, \dots, y_{15}]^T$  – матрица-столбец функции отклика в точках плана.

Регрессионный полином (2) позволяет при известных законах распределения факторов ( $I_w, I'_w$  и  $\tau_p$ ) определить законы распределения функций отклика ( $I_{\text{опн}}$  и  $W_{\text{опн}}$ )

В качестве гипотетического закона распределения токовых и энергетических нагрузок защитных аппаратов принимался усеченный нормальный закон

$$f(x) = \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

где  $c$ ,  $m$ ,  $\sigma$  - параметры закона, определяемые из следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} c &= \frac{1}{\Phi_0\left(\frac{X_{\max}-m}{\sigma}\right) - \Phi_0\left(\frac{X_{\min}-m}{\sigma}\right)}, \\ M[X] &= m + \frac{c\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left( e^{-\frac{(X_{\min}-m)^2}{2\sigma^2}} - e^{-\frac{(X_{\max}-m)^2}{2\sigma^2}} \right), \\ D_X &= \sigma^2 - (m - m_X)^2 + \frac{c\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left[ (X_{\min}-m)e^{-\frac{(X_{\min}-m)^2}{2\sigma^2}} - (X_{\max}-m)e^{-\frac{(X_{\max}-m)^2}{2\sigma^2}} \right]. \end{aligned} \right\}$$

Функции распределения энергетических нагрузок в ОПН, устанавливаемых на опорах ВЛ 500 кВ при искровом присоединении аппаратов, приведены на рис. 4.

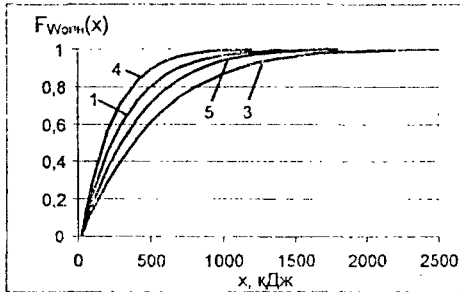


Рис. 4. Функции распределения энергии, поглощаемой в варисторах подвесных ОПН, установленных на ВЛ 500 кВ (№ в табл. 1)

Сравнение токовых и энергетических нагрузок ОПН при их искровом и глухом присоединении к проводам ВЛ отражено в табл. 3. Из этой таблицы видно, что способ присоединения ОПН к проводам ВЛ существенно сказывается на токовых нагрузках ОПН при прямом ударе молнии в

провода ВЛ. Энергия же, поглощаемая варисторами ОПН при безыскровом присоединении, оказывается меньше, чем в случае искрового присоединения ОПН к проводам ВЛ. Различие в энергиях возрастает с увеличением класса ВЛ. Это связано с тем, что на ВЛ 110 - 330 кВ искровые промежутки ОПН на опорах участков, примыкающих к пораженному, срабатывают практически

при всех грозových волнах, что приводит к близким по характеру процессам при обоих способах установки защитных аппаратов.

Таблица 3

Токовые и энергетические нагрузки подвесных ОПН при различных способах их присоединения к проводам ВЛ

Класс и тип ВЛ	$I_{\text{сн.р.}}$ , кА		$W_{\text{опн}}$ , кДж/кВ (кДж) $F_{\text{к}}(\gamma) = 0,95 / 0,99$	
	с ИП	без ИП	с ИП	без ИП
110 кВ (№1)	50,0	50,0	4,5 (500) / 8,5 (940)	4,1 (450) / 8,0 (880)
330 кВ (№1)	47,9	-	3,5 (1150) / 6,3 (2070)	-
330 кВ (№3)	68,0	-	5,2 (1700) / 9,4 (3100)	-
500 кВ (№1)	33,9	32,2	1,7 (870) / 3,6 (1800)	1,4 (710) / 2,8 (1400)
500 кВ (№2)	39,1	38,2	2,8 (1400) / 4,1 (2070)	1,8 (900) / 3,4 (1700)
500 кВ (№3)	50,1	48,1	2,8 (1390) / 5,2 (2600)	2,3 (1150) / 4,2 (2120)
500 кВ (№4)	25,1	24,0	1,3 (670) / 2,5 (1270)	1,1 (530) / 2,0 (1000)
500 кВ (№5)	35,4	33,9	2,1 (1050) / 3,8 (1920)	1,7 (850) / 3,1 (1530)
750 кВ (№1)	44,0	-	1,8 (1380) / 3,0 (2240)	-
750 кВ (№3)	59,0	-	1,9 (1400) / 4,0 (3000)	-
1150 кВ (№1)	41,0	37,9	1,1 (1300) / 2,7 (3140)	0,9 (1050) / 2,0 (2270)
1150 кВ (№2)	24,9	22,4	0,6 (700) / 1,7 (1980)	0,5 (550) / 1,2 (1400)

В случае же ВЛ 500 кВ и выше вероятность срабатывания искровых промежутков на соседних опорах уменьшается, поэтому возрастает поглощаемая энергия в защитных аппаратах.

Из таблицы видно, что увеличение высоты подвеса проводов и тросов ВЛ относительно земли, приводит к возрастанию токов в ОПН (например, при увеличении высоты подвеса провода ВЛ 500 кВ в два раза, максимальный ток в ограничителе возраст примерно в 1,5 раза). Применение же конструкций с отрицательными углами тросовой защиты приводит к снижению токовых и энергетических нагрузок ОПН в среднем на 20 – 30 %.

Токовые и энергетические нагрузки защитных аппаратов зависят также от класса напряжения ВЛ. Для ОПН, установленных на ВЛ 110 кВ, характерны значительные амплитуды токов (40 – 50 кА) при удельной энергии в 4,1 – 8,5 кДж/кВ. Удельная энергия, поглощаемая в подвесном аппарате 1150 кВ,

составляет 0,5 – 1,7 кДж/кВ при относительно небольших значениях амплитуд токов (20 – 40 кА).

Влияние ориентировки канала лидера молнии при ее ударе в ВЛ на высоких опорах (более 50 м) уменьшается за счет увеличения амплитуды прорвавшегося на провода ВЛ тока молнии. Так, для ВЛ 500 кВ с высотой подвеса проводов 51 м максимальный ток через ОПН при неучете ориентировки составил ~72 кА, тогда как при учете ориентировки – ~50 кА, т.е. амплитуда тока в ОПН оказалась меньше лишь в 1,4 раза.

Во второй главе проанализировано также влияние сопротивления заземления ( $R_3$ ) опор ВЛ на токовые и энергетические нагрузки подвесных ОПН. Исследование проводилось на примере стандартных ВЛ 110 (ПБ110-1) и 500 кВ (ПБ1), оснащенных ОПН с искровым присоединением. Сопротивление заземления опор варьировалось в диапазоне (10...100) Ом. При повышенных сопротивлениях заземления опор характерных, например, для северных районов, учитывались удары молнии в опору (или в тросы вблизи опоры).

В табл.4 приведены результаты расчетов токовых и энергетических нагрузок подвесных ОПН при ударе молнии в фазный провод и в опору. Энергетические нагрузки подвесных аппаратов приведены как с надежностью 0,95 (над чертой), так и с надежностью – 0,99 (под чертой).

Таблица 4

Токовые и энергетические нагрузки подвесных ОПН, устанавливаемых через искровые промежутки на опорах ВЛ 110 и 500 кВ при различных  $R_3$

ВЛ	$R_{3и}$ , Ом	Удар молнии в провод		Удар молнии в опору	
		$I_{опт.т.}$ , кА	$W_{опд.}$ , кДж	$I_{опт.т.}$ , кА	$W_{опд.}$ , кДж
110 кВ	10	50,0	500 / 944	2,15	22 / 59
	30	46,8	460 / 881	7,13	150 / 291
	60	42,1	375 / 752	12,34	310 / 590
	100	37,0	330 / 661	16,45	465 / 850
500 кВ	10	33,9	870 / 1800	0,87	- / 28
	30	30,0	840 / 1700	6,02	- / 486
	60	26,0	780 / 1490	11,3	420 / 1200
	100	22,1	650 / 1160	14,7	1450 / 1700



Из таблицы видно, что при увеличении сопротивления заземления опор с 10 до 100 Ом в случае удара молнии в фазный провод амплитуды токов молнии и энергетические нагрузки снижаются в среднем в 1,3 – 1,5 раза, при этом увеличивается количество срабатываний искровых промежутков на опорах, прилегающих к пораженному пролету.

В случае же удара молнии в опору или в трос вблизи от опоры энергетические нагрузки подвесных ОПН превышают соответствующие нагрузки при ударе молнии в провод при сопротивлениях заземления опор более 60 Ом. При этом характерны относительно небольшие амплитуды волн тока молнии, протекающих через защитный аппарат.

Таким образом, при определении токовых и энергетических нагрузок защитных аппаратов в случае повышенных значений сопротивлений заземления опор необходимо помимо ударов молнии в провода ВЛ учитывать также и удары молнии в опору или в трос вблизи от опоры.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ анализируются условия эксплуатации подвесных ОПН с искровым и безыскровым присоединением при воздействии коммутационных перенапряжений. В качестве расчетной коммутации рассматривалось включение ВЛ в цикле трехфазного автоматического повторного включения (ТАПВ).

При габаритах искровых промежутков ОПН, отвечающих их надежному пробоем при грозовых перенапряжениях, пробоем промежутков при воздействии коммутационных перенапряжений наблюдались практически лишь на ВЛ 1150 кВ ( $P_{пр.рц} \approx 0,4$ ).

При безыскровом присоединении подвесных ОПН энергия, выделяемая в их варисторах при коммутационных перенапряжениях, на порядок меньше, чем при грозовых воздействиях. Распределение поглощаемой энергии при коммутациях в аппаратах, расположенных по длине ВЛ, приводит к тому, что определяющими при выработке требований к энергетическим характеристикам линейных аппаратов напряжением 500 кВ и ниже будут грозовые перенапряжения. Так, например, удельная поглощаемая энергия в ОПН, установленных на ВЛ 500 кВ, при коммутационных перенапряжениях

составляет 0,1-0,2 кДж/кВ, тогда как при грозовых – 1,4-2,8 кДж/кВ. Максимальные энергетические воздействия на ОПН-1150 кВ при коммутационных перенапряжениях в среднем в 1,4 раза меньше (при установке ОПН на 5 опорах), чем при грозовых воздействиях.

Типичные вычислительные осциллограммы перенапряжений при ТАПВ ВЛ 500 кВ и токовых нагрузок в подвесных ОПН при их установке на трех опорах без искровых промежутков приведены на рис.5.

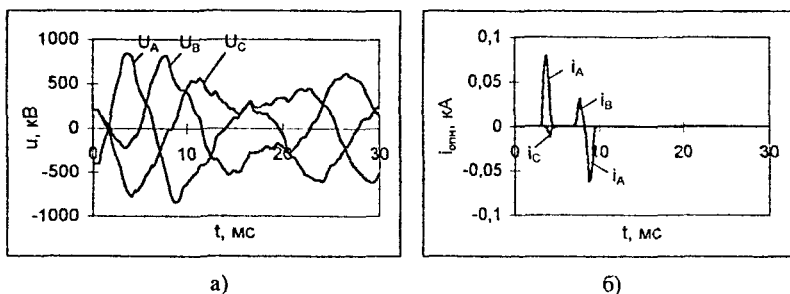


Рис.5. Коммутационные перенапряжения (а) и токовые нагрузки подвесных ОПН (б) при ТАПВ ВЛ 500 кВ

Токовые и энергетические воздействия на аппараты при коммутационных перенапряжениях снижаются с увеличением количества линейных ограничителей. Так, при увеличении числа линейных ОПН, установленных на опорах с 1 до 5, максимальные токи и поглощаемая энергия в ОПН 500 и 1150 кВ уменьшились более, чем в 2 раза. При этом наибольшим воздействиям подвергаются защитные аппараты, расположенные по концам ВЛ.

При установке на линии безыскровых защитных аппаратов наблюдается существенное снижение (в 1,2...2,5 раза) токовых и энергетических воздействий на подстанционные аппараты. Однако, следует отметить, что условия эксплуатации подстанционных ОПН при грозовых поражениях ВЛ вблизи подстанций могут несколько утяжелиться. Это связано с тем, что незащищенная линия является как бы дополнительным защитным устройством для подстанционного оборудования. при перекрытии линейной

изоляция возникают волны с весьма крутыми фронтами, которые интенсивно затухают при их пробеге по ВЛ до подстанции.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ приведена методика оценки показателей надежности эксплуатации линейных ОПН и ВЛ, защищенных этими аппаратами, при грозных воздействиях. Приводятся также сравнительный анализ результатов по определению вероятности прорыва молнии сквозь тросовую защиту, полученных при использовании методик, предложенных различными авторами.

В качестве показателя надежности эксплуатации подвесных ОПН принято математическое ожидание числа разрушений ОПН в течение года или средний срок безаварийной эксплуатации ограничителей. Среднее годовое число превышений токовых и энергетических нагрузок в ограничителе некоторых уровней можно определить как

$$N_{\text{пр}} = N_{\text{гроз}} \frac{I_{\text{пр}} N_i}{100 \cdot 100} P_{\text{пр}} P_{\text{пр.и.в.тос.}}, \quad (5)$$

где  $N_{\text{гроз}}$  - удельное число поражений ВЛ на 100 км и 100 грозных часов,  $N_i$  - количество грозных часов в год (в расчетах принималось  $N_i = 30$  1/год),  $I_{\text{пр}}$  - длина пролета ВЛ,  $P_{\text{пр}}$  - вероятность прорыва молнии на провода,  $P_{\text{пр.и.в.тос.}}$  - вероятность превышения токовыми и энергетическими нагрузками ОПН уровней  $I_{\text{огн}}$  и  $W_{\text{огн}}$ .

Для определения  $P_{\text{пр.и.в.тос.}}$  была найдена плотность распределения вероятности двух зависимых величин, подчиненных усеченному нормальному закону на плоскости

$$f_{\text{пр}}(x, y) = f_X(x) f_Y(y) \frac{C_1 C_2}{2\pi\sigma_1\sigma_{2,x}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-m_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y-m_{2,x})^2}{\sigma_{2,x}^2}\right)\right], \quad (6)$$

где  $\sigma_{2,x} = \sigma_2 \sqrt{1-r^2}$ ,  $m_{2,x} = m_2 + r \frac{\sigma_2}{\sigma_1}(x-m_1)$ ,  $r$  - коэффициент корреляции между величинами  $X$  и  $Y$ .

При равновероятном ударе молнии в любой пролет ВЛ среднее число выходящих из строя ограничителей, установленных на рассматриваемом участке ВЛ  $l_x$ , определялось как

$$N_{\text{огп}} = n_{\text{гр}} \frac{l_x}{l_{\text{пр}}} . \quad (7)$$

Таким образом, при установке ограничителей, рассчитанных на меньшие значения максимального протекающего тока и энергетических нагрузок, необходима более частая их замена. Так, например, если для ОПН-110 принять в качестве расчетных 15 кА и 0,9 кДж/кВ, то средний срок службы аппарата составит примерно 6 лет, при расчетном токе 30 кА и удельной поглощаемой энергии 3,6 кДж/кВ - около 20 лет.

Следует отметить, что математическое ожидание срока службы подвесных ОПН существенно зависит от допустимой удельной энергии, поглощаемой варисторами этих аппаратов. Например, если защитный аппарат, установленный на ВЛ 500 кВ (№5), будет рассчитан при токе 42 кА лишь на 1,6 кДж/кВ вместо 2,4 кДж/кВ, то математическое ожидание времени до выхода одного ограничителя из строя на участке в 100 км уменьшится в среднем с 40 до 9 лет. Существенно же больший срок службы подвесных ОПН наблюдается на ВЛ с улучшенной тросовой защитой.

В качестве показателя надежности эксплуатации ВЛ принималось, как обычно, среднее число отключений участков рассматриваемых электропередач при грозовых воздействиях. Математическое ожидание числа отключений ВЛ определялось как

$$N_{\text{отк}} = N_{\text{тр}} + N_{\text{оп}} + N_{\text{пр}} , \quad (8)$$

где  $N_{\text{тр}}$ ,  $N_{\text{оп}}$ ,  $N_{\text{пр}}$  - соответственно количество отключений за счет попадания молнии в трос, опору и провод.

При определении математического ожидания числа отключений ВЛ за счет попадания канала молнии в опору и провод учитывалась вероятность перекрытия линейной изоляции за счет превышения напряжением на подвешенном ОПН напряжения перекрытия линейной изоляции.

Результаты расчетов показали, что оснащение ВЛ подвесными ограничителями приводит к уменьшению количества отключений при грозовых поражениях линий и их участков в среднем на 2-3 порядка. Например, при установке подвесных ОПН на ВЛ 500 кВ стандартной конструкции количество отключений от прорывов канала лидера молнии на провода снижается на 4 порядка. Несколько меньшая эффективность применения подвесных ОПН отмечается на ВЛ 1150 кВ со стандартными конструкциями опор типа ПОГ1150-5: количество отключений ВЛ при их оснащении подвесными ОПН уменьшилось лишь на один порядок. Это обстоятельство обусловлено сравнительно высокими вероятностями прорыва канала лидера молнии на провода ВЛ и перекрытия линейной изоляции за счет остающегося напряжения на защитном аппарате

#### *Основные результаты исследований*

1. Для получения независимых токовых и энергетических нагрузок подвесных ОПН при грозовых поражениях ВЛ необходимо учитывать ориентировку канала лидера молнии в систему провода – грозозащитные тросы.

2. Основными факторами, влияющими на условия эксплуатации ОПН, являются конструкции ВЛ (включая способы подвески грозозащитных тросов), величины сопротивления заземления опор и в несколько меньшей степени способы присоединения ОПН к проводам ВЛ (при искровом присоединении или без него).

3. При безыскровом присоединении подвесных ОПН к проводам ВЛ определяющими при выработке требований к энергетическим характеристикам защитных аппаратов являются грозовые перенапряжения. Лишь в ВЛ 1150 кВ необходимо также учитывать и коммутационные воздействия.

4. При сопротивлениях заземления опор, не превышающих 10...15 Ом, определяющими грозовыми воздействиями являются удары молнии в провода при прорыве сквозь тросовую защиту. При больших значениях сопротивления при установлении требований к токовым и энергетическим

нагрузкам ОПН следует учитывать также и удары молнии в опору или в трос вблизи от опоры.

5. Энергетические нагрузки ОПН, устанавливаемых на опорах ВЛ 110 – 330 кВ, практически не зависят от способа присоединения ОПН к проводам ВЛ (из-за срабатывания искровых промежутков ОПН на соседних опорах). В ВЛ 500 кВ и выше энергия, поглощаемая в варисторах ОПН при их глухом присоединении, оказывается на 20...30 % ниже, чем при искровом присоединении. Амплитуды же токов в ОПН практически не зависят от способа присоединения аппарата к проводам ВЛ любых классов напряжения.

6. Увеличение высоты подвеса проводов и тросов приводит к увеличению токовых и энергетических нагрузок ОПН. Это обстоятельство необходимо учитывать при грозозащите высоких переходных пролетов ВЛ, в том числе и ВЛ, проходящих по лесным массивам.

7. Переход к отрицательным углам тросовой защиты при горизонтальной подвеске проводов ВЛ приводит к уменьшению вероятности прорыва молнии сквозь тросовую защиту на 1...2 порядка и к снижению на 20...30 % токовых и энергетических нагрузок ОПН.

8. При увеличении числа аппаратов, устанавливаемых на ВЛ, токовые и энергетические нагрузки ОПН при воздействии коммутационных перенапряжений снижаются. Так, при увеличении количества ОПН-500 кВ с 1 до 5 на фазу энергетические нагрузки аппаратов уменьшились в 1,6 раза, на ВЛ 1150 кВ – в 3 раза.

9. При оснащении ВЛ подвесными ОПН существенно повышается надежность эксплуатации ее изолирующих подвесок: количество отключений ВЛ при грозовых поражениях уменьшается не менее чем на два порядка ( $n_{\text{откл}}/100 \text{ км и } 100 \text{ г.ч.} \approx 0,000005...1,0$  вместо 0,07...13). Надежность эксплуатации самих подвесных ограничителей также является вполне приемлемой (срок службы аппаратов составляет не менее 20 лет).

10. Разработанные методики оценки законов распределения токовых и энергетических нагрузок подвесных ОПН и надежности их эксплуатации, реализованные в виде комплекса программ для ПЭВМ, могут быть использованы при проектировании системы грозозащиты ВЛ любого класса и конструктивного исполнения.

**Общее заключение по работе можно сформулировать следующим образом.**

*Подвесные защитные аппараты, установленные на опорах ВЛ, являются технически реализуемым и технически целесообразным средством повышения надежности эксплуатации электропередач высокого напряжения.*

*Аппараты на напряжение 110...1150 кВ могут быть выполнены в одноколонковом исполнении и рассчитаны на протекание импульсного тока 15 - 60 кА при удельной поглощаемой энергии 0,5 - 10 кДж/кВ, зависящей от класса ВЛ, ее конструктивного исполнения и принятого показателя надежности. Способ присоединения защитного аппарата к проводам ВЛ (с искровым промежутком или без него) не является критичным и может выбираться при конкретном проектировании с учетом особенностей грозовой защиты ВЛ, метеорологических условий, параметров ВАХ ОПН и т.д.*

#### **ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:**

1 Анализ условий эксплуатации ОПН для защиты от грозовых перенапряжений, устанавливаемых на опорах ВЛ. Кадомская К.П., Рейхердт А.А. Сб маг сов 25 - 27 марта 1997 г. « Эксплуатация, качество и надежность ветвильных разрядников и серийно изготавливаемых ОПН 110 кВ и выше » СПб - 1997. - с 40 - 46

2 Кадомская К.П., Рейхердт А.А. Грозостойкость воздушных линий 500 и 1150 кВ при установке на опорах ограничителей перенапряжений подвешенного типа // Научный вестник НГТУ.-1998.- №2(5) «Актуальные проблемы техники и электрофизики высоких напряжений». - С.33 - 41.

3 Kadomskaja K.P., Reicherdt A.A. A study of operating conditions of lightning arresters installed on overhead line towers. // Eleventh International Symposium on High-Voltage Engineering, London, UK, 23-27 August 1999 (Topic F Vol 4 Insulators and materials)

4 Рейхердт А.А. Анализ токовых нагрузок ограничителей перенапряжений, устанавливаемых на опорах воздушных линий 500 кВ с различными сопротивлениями заземления // Сборник научных трудов НГТУ.-1999.- №1 (14).- С.103 - 108.

5. Kadomskaja K.P., Reicherdt A.A. Accounting of orientation of lightning leader channel for evaluation of current and power impacts on arresters installed on overhead line towers // Russian - Korean International Symposium on Science and Technology, Novosibirsk, Russia.-1999.-С.736 (Тез докл)

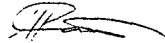
6. Рейхердт А.А. Повышение надежности эксплуатации воздушных линий высокого напряжения при установке нелинейных ограничителей перенапряжений на опорах // Материалы докладов пятой всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность».-1999.-Томск.-С.83 – 85.

7. Кадомская К.П., Рейхердт А.А. Анализ условий эксплуатации нелинейных ограничителей перенапряжений, устанавливаемых на опорах воздушных линий высокого напряжения. // Электричество.- 2000. – №3. – С.2 – 6.

8. Рейхердт А.А. Анализ воздействий коммутационных перенапряжений на подвесные защитные аппараты, устанавливаемые на опорах воздушных линий. // Сборник научных трудов НГТУ.-1999.-№3 (16).-С.117 – 122.

9. Анализ условий эксплуатации защитных аппаратов типа ОПН, установленных на опорах воздушных линий высокого напряжения. Отчет о НИР (закл.). – Новосиб. госуд. техн. ун-т. – Новосибирск. – 1996. № г.р. 01940009230, инв.№ 02970000346. – 51с.

10. Требования к ОПН, устанавливаемым на опорах ВЛ 330 – 750 кВ. Отчет о НИР (промеж.). - Новосиб. госуд. техн. ун-т. – Новосибирск. – 1998. № г.р. 01.9.50006710, инв.№ 02980004734. - 99с.



Подписано в печать 31.03.2008г. Формат 84x60x1/16

Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Печ.л.

Заказ № 270

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630092, г. Новосибирск, пр.К.Маркса,20