

# Опыт применения линейных ОПН — разрядников для защиты линейной изоляции ВЛ 110 кВ. Исследование энергетических характеристик разрядников

На сегодняшний день остается актуальной проблема низкой грозоупорности ЛЭП 110 кВ и выше, связанная с высоким сопротивлением грунтов. Эта проблема, например, остро стоит перед энергетическими предприятиями Западной Сибири. Большую долю от общего энергопотребления в этом регионе занимают крупнейшие нефтегазодобывающие предприятия. Любые отключения питающих ЛЭП для этих потребителей даже с успешным автоматическим повторным включением приводят к сбросам нагрузки из-за нарушений в технологических процессах.

**Кемпонен М.Э.,**  
заместитель директора  
АО «Полимер-Аппарат»

**Панов А.В.,**  
заместитель директора  
АО «Полимер-Аппарат»

**Колычев А.В.,**  
к.т.н., доцент Высшей  
школы высоковольтной  
энергетики Института  
энергетики СПбПУ  
Петра Великого

**Гулов А.М.,**  
аспирант Высшей  
школы высоковольтной  
энергетики Института  
энергетики СПбПУ  
Петра Великого

**Лопатин В.В.,**  
начальник сектора  
диагностики  
АО «Россети Тюмень»

Компания АО «Полимер-Аппарат» является производителем нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН), применяемых в электрических сетях всех классов напряжений. Для защиты линейной изоляции воздушных линий электропередачи компанией разработаны, испытаны и аттестованы защитные устройства — линейные разрядники (ЛР) [1], в основе конструкции которых используется рабочий резистор (РР) с нелинейной вольтамперной характеристикой и внешний искровой промежуток (ВИП).

По данным опыта эксплуатации ВЛ 110 кВ и выше АО «Россети Тюмень», ежегодно доля грозовых аварийных отключений ВЛ составляет 50–70% от

общего числа отключений (рисунок 1). Как правило, при обратных перекрытиях отключаются сразу обе цепи двухцепных ВЛ. Число двухцепных отключений достигает более 50% от числа грозовых отключений. В большинстве случаев грозовые отключения сопровождаются УАПВ линии (УАПВ — до 90% случаев).

Меры повышения грозоупорности ВЛ определены в Руководстве по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений [2]. К ним относятся: снижение сопротивления заземляющих устройств ( $R_{зз}$ ) опор, повышение импульсной прочности изоляции, защита опор и участков с ослабленной изоляцией. Реализация

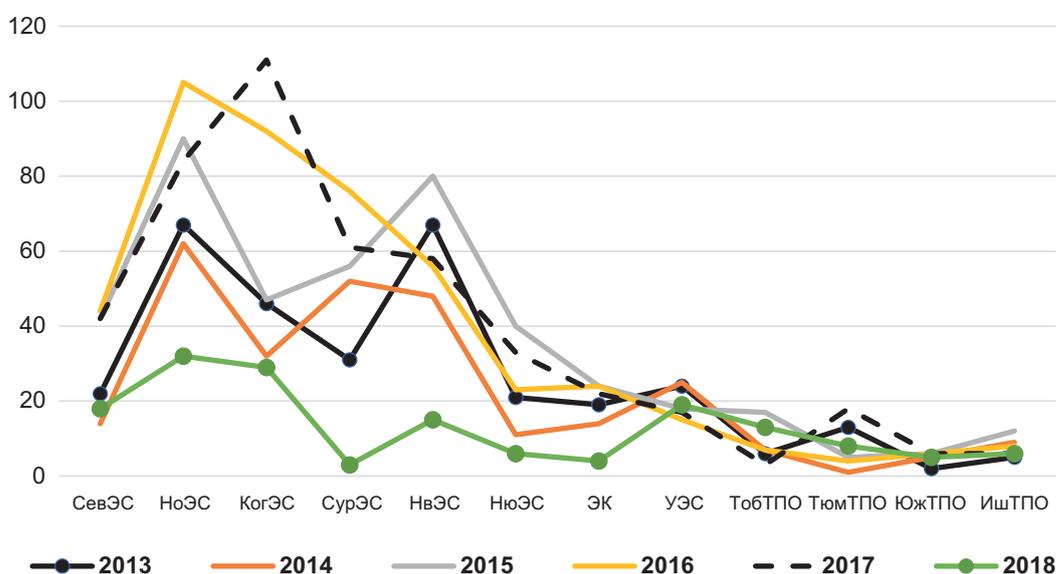


Рис. 1. График грозовых отключений по АО «Россети Тюмень» за 2013–2018 годы

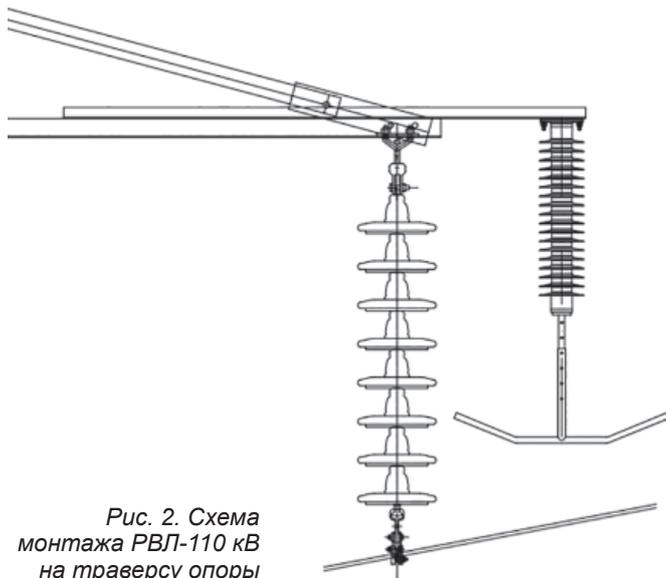


Рис. 2. Схема монтажа РВЛ-110 кВ на траверсу опоры

данных мер в АО «Россети Тюмень» показала недостаточную эффективность. Они были не в состоянии исключить обратные перекрытия изоляции и гарантировать отсутствие двухцепных отключений на ВЛ в условиях плохопроводящих грунтов. Грунты с высоким удельным сопротивлением приводят к недостаточной эффективности традиционных средств грозозащиты (защитных тросов, заземления опор). В указанных условиях заземляющие устройства опор, выполненные по проектным решениям, не обеспечивают нормируемые ПУЭ значения. Измерения сопротивлений заземления опор на ряде проблемных ВЛ показали величину  $R_{з\gamma}$  опор от 50 до 300 Ом и выше при нормативе 10–30 Ом.

В качестве альтернативного средства грозозащиты ВЛ филиалом АО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ был предложен вариант повышения грозоупорности ВЛ при помощи линейных ограничителей перенапряжений — разрядников, эффективность работы которых обеспечивается, в том числе, при имеющихся высоких сопротивлениях заземления опор [3, 4].

Линейный разрядник конструктивно представляет собой рабочий резистор с нелинейной вольт-амперной характеристикой, последовательно соединенный с внешним искровым промежутком между электродом и фазным проводом (рисунок 2).

### ЧИСЛО ОТКЛЮЧЕНИЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ, ВЫЗВАННОЕ МОЛНИЕВЫМИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯМИ. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЛР-110 КВ

На двухцепных ВЛ 110 кВ с тросовой защитой наиболее широкое применение нашла схема установки ЛР-110 кВ на одной из цепей (рисунок 3). Такая схема расстановки разрядников практически полностью исключает двухцепные отключения ВЛ 110 кВ и в 2–3 раза снижает число одноцепных отключений, но

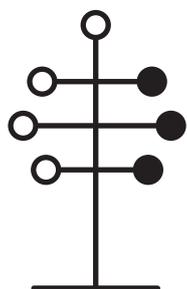


Рис. 3. Схема расстановки ЛР-110 кВ на двухцепной ВЛ 110 кВ: ○ — ЛР отсутствует; ● — ЛР установлен

полностью их не исключает. Это связано с тем, что при пробое внешнего искрового промежутка к опоре подключается рабочий резистор разрядника, соединенный с фазным проводом, который характеризуется волновым сопротивлением. Часть тока молнии отводится через разрядник и фазный провод, то есть к опоре подключается дополнительное активное сопротивление. Это снижает общее эквивалентное сопротивление, которое образовано параллельным соединением сопротивления заземления опоры и половины волнового сопротивления провода с учетом активного сопротивления разрядника. То есть применение линейных разрядников уменьшает число одноцепных отключений, но не устраняет их полностью. В свою очередь, перекрытие линейной изоляции на незащищенной цепи приводит к уменьшению токов, протекающих через ЛР-110 кВ.

Методика применения линейных разрядников описана в СТО 56947007-29.130.10.197-2015 [5]. На рисунке 4 показаны зависимости удельного числа отключений в год на 100 км двухцепной ВЛ 110 кВ на промежуточных опорах П110-4 в зависимости от сопротивления заземления опор при 40 грозовых часах, рассчитанные по методике СТО [5].

Опыт применения линейных разрядников на ВЛ 110 кВ АО «Россети Тюмень» показан в таблице 1. Первые линейные ОПН-110 кВ с искровым промежутком были установлены в 2008 году на ВЛ 110 кВ Губкинская — Новогодняя-1,2 и ВЛ 110 кВ Контур — Ай-Пимская-1,2 (суммарной длиной — 119,8 км) [6]. На начало 2016 года было установлено 6726 защитных аппаратов на ВЛ 110 кВ протяженностью 640 км. На начало 2019 года количество ВЛ 110 кВ, оснащенных ЛР 110 кВ в АО «Россети Тюмень» составило 29 линий. Количество установленных ЛР-110 кВ — 18 282 шт. Суммарная протяженность ВЛ 110 кВ с ЛР составила 1820 км.

Разрядники ЛР-110 кВ производства АО «Полимер-аппарат» поставлялись и эксплуатируются на многих ВЛ 110 кВ АО «Россети Тюмень» (рисунок 5). Испытания разрядников АО «Полимер-Аппарат»

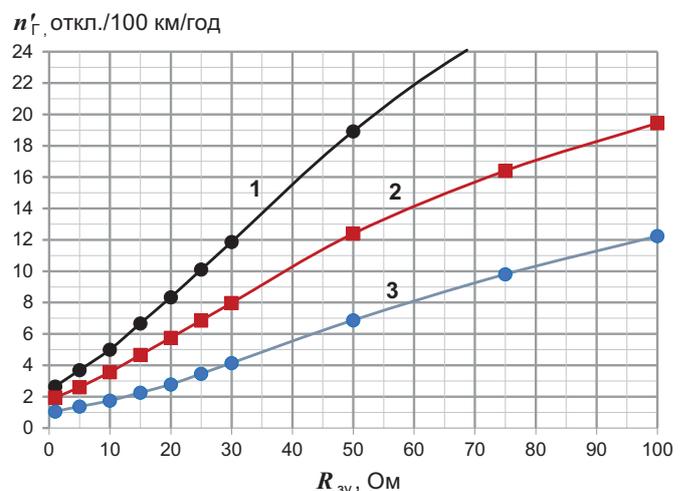


Рис. 4. Зависимость удельного числа грозовых отключений на 100 км/год двухцепной ВЛ 110 кВ на промежуточных опорах П110-4: 1 — суммарное число отключений без ЛР-110 кВ; 2 — число одноцепных отключений без ЛР-110 кВ; 3 — число одноцепных отключений при установке 3-х ЛР-110 кВ на опору

в высоковольтной лаборатории АО «СибНИИЭ», выведенных из эксплуатации на ВЛ 110 кВ, показали, что их защитные и изоляционные характеристики не изменились и соответствуют техническим требованиям АО «Россети Тюмень», предъявляемым к линейным разрядникам 110 кВ [7].

Линейные разрядники устанавливались на трех фазах одной цепи каждой опоры двухцепных ВЛ 110 кВ. Как показал опыт эксплуатации, установка разрядников на одной цепи практически полностью исключает двухцепные отключения ВЛ 110 кВ. Двухцепные отключения ВЛ 110 кВ могут происходить, если установка разрядников не охватывает всю длину линии. Например, отключения происходили за счет незащищенных отпаек ВЛ 110 кВ.

На основании опыта эксплуатации ВЛ 110 кВ с применением ЛР-110 кВ можно сделать выводы об эффективности применения линейных разрядников:

- число грозовых отключений защищенной ЛР цепи ВЛ снижается в 5 раз и более;
- число двухцепных отключений ВЛ снижается в 4 раза и более;
- число грозовых отключений на защищенной ЛР цепи ВЛ снижается до двух раз.

Результаты проведенных работ в АО «Россети Тюмень» позволяют сделать вывод, что в условиях плохопроводящих грунтов и умеренной грозовой активности традиционные способы повышения грозозащиты ВЛ неэффективны. Для решения данной проблемы требуются специальные средства грозозащиты — линейные разрядники.



Рис. 5. Промежуточная опора ВЛ 110 кВ Варьеган — Бахилловская-1,2 с защитой разрядниками 2-й цепи

Табл. 1. Опыт применения линейных защитных аппаратов на линиях электропередачи 110 кВ АО «Россети Тюмень»

Наименование ВЛ	Цепь ВЛ	Удельное число грозовых отключений, 1/100 км/год	
		До установки ЛР	После установки ЛР
ВЛ 110 кВ Новогодняя — Губкинская-1,2	1 цепь*	5,7	0,7
	2 цепь	5,9	2,3
	1 и 2 цепь	3,7	0,3
ВЛ 110 кВ Муравленковская — Сугмутская-1,2	1 цепь	5,5	2,1
	2 цепь*	3,7	0
	1 и 2 цепь	1,4	0
ВЛ 110 Контур — Ай-Пимская-1,2	1 цепь*	5,2	1,1
	2 цепь	5,6	3,1
	1 и 2 цепь	3,8	0,3
ВЛ 110 кВ Холмогорская — Пуль-Яха ВЛ 110 кВ Холмогорская — Крайняя ВЛ 110 кВ Пуль-Яха — Крайняя	1 цепь*	4,1	0,4
	2 цепь	3,5	3,5
	1 и 2 цепь	1,7	0,4
ВЛ 110 кВ Северный — Харампурская-1,2	1 цепь	3,2	1,7
	2 цепь*	2,2	0,2
	1 и 2 цепь	0,9	0,2

\* номер цепи, защищаемой разрядниками

Положительный опыт применения ЛР с внешним искровым промежутком в АО «Россети Тюмень» позволяет рекомендовать их для дальнейшего внедрения на ВЛ 110 кВ ПАО «Россети» в качестве эффективного средства грозозащиты ВЛ в районах с высоким удельным сопротивлением грунта.

### ЧИСЛО ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ

Для применяемых ЛР-110 кВ допустимая энергия  $W_{\text{доп}}$  при ограничении молниевых перенапряжений равна 450 кДж. По методике, приведенной в [4], с использованием распределений из СТО [5] было рассчитано ожидаемое число повреждений ЛР-110 кВ для различных ЗУ опор (рисунок 6).

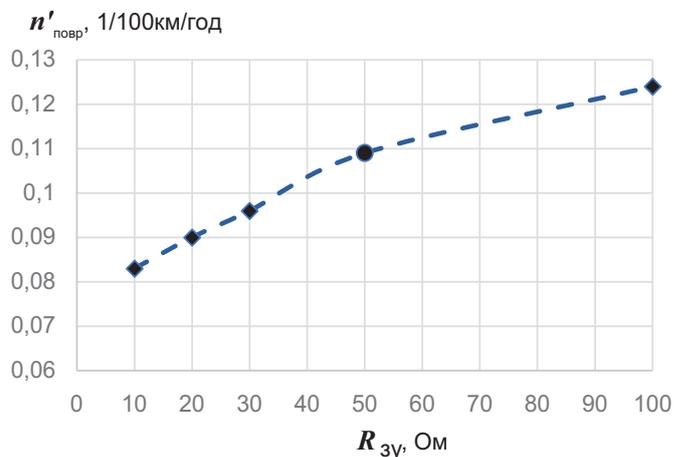


Рис. 6. Ожидаемое число повреждений ЛР-110 кВ при установке 3-х ЛР на опору в зависимости от сопротивления ЗУ опоры

Согласно данным, предоставленным АО «Россети Тюмень», на начало 2019 года суммарно было установлено 18 282 ЛР на ВЛ 110 кВ общей длиной 1820 км. Расчетное ожидаемое число повреждений разрядников за 11 лет эксплуатации для сопротивления  $R_{3y}$  опор 30 Ом представлено на рисунке 7.

Суммарно за 11 лет эксплуатации вследствие молниевых перенапряжений должно было повредиться около 43 ЛР. Однако за этот период в АО «Россети Тюмень» не было зарегистрировано ни одного случая повреждения аппаратов, вызванных молниевыми перенапряжениями.

### РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЛР-110 кВ

Расчеты энергии проводились при помощи программного комплекса EMTP, в котором была составлена схема замещения участка двухцепной ВЛ с тросом (рисунок 8).

При проведении расчетов энергии, выделяемой в ЛР-110 кВ, было отмечено заметное влияние перекрытий изоляционных подвесок незащищенной цепи, поэтому далее для сравнения будут приведены результаты для двух расчетных случаев:

- с учетом перекрытия изоляции незащищенной цепи ВЛ;
- без учета перекрытия изоляции незащищенной цепи ВЛ.

Величина разрядного тока через ЛР (рисунок 9), а следовательно, и количество выделяемой в нем энергии заметно уменьшаются в случае расчета с учетом перекрытий изоляции незащищенной цепи.

Энергия, рассеиваемая в разряднике при молниевых перенапряжениях, зависит от ряда случайных величин (параметры импульса тока молнии, места удара молнии в пролете, сопротивления заземления опор). При определении поглощаемой разрядником энергии необходимо учитывать возможность появления повторных разрядов молнии, которые также будут способствовать нагреву защитного аппарата. Характеристики последующих разрядов молнии будут отличны от первичного, расчетная модель переноса заряда для определения полной энергии принималась согласно [4]: первый удар — импульс тока  $2/140$  мкс с зарядом  $Q_1$ ; последующие удары — 2 импульса тока  $2/140$  мкс с зарядом  $Q_2 = 0,25 Q_1$ .



Рис. 7. Количество установленных разрядников и ожидаемое ежегодное количество поврежденных ЛР-110 кВ

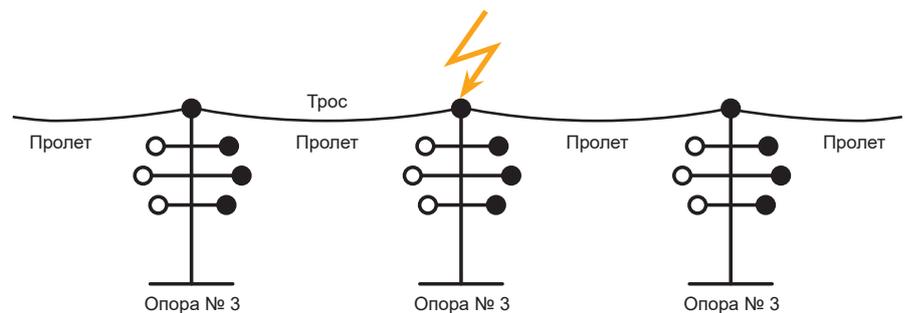
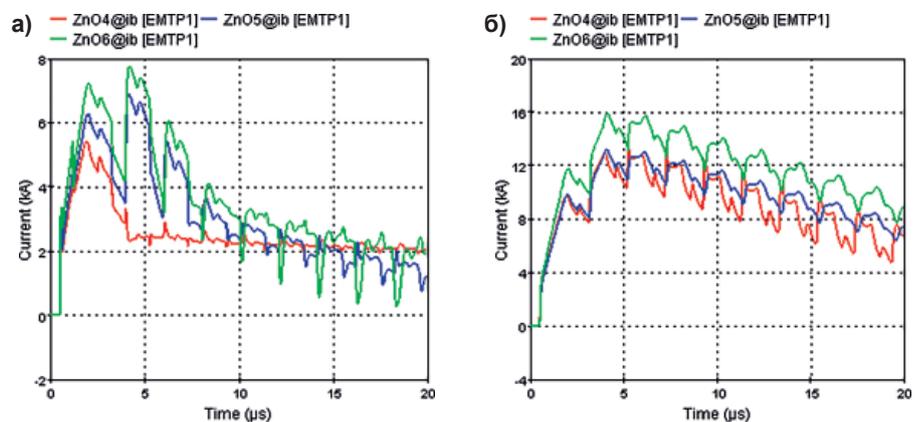


Рис. 8. Схема расчетной модели ВЛ 110 кВ



А, В, С – верхняя, средняя и нижняя фазы, соответственно

Рис. 9. Осциллограммы разрядного тока через ЛР для расчетной схемы из трех опор с сопротивлением ЗУ 100 Ом (один импульс тока молнии —  $2/140$  мкс, амплитуда — 100 кА): а) разрядный ток через ЛР с учетом перекрытия изоляции; б) разрядный ток через ЛР без учета перекрытия изоляции

Используя известные статистические данные о параметрах разряда молнии [8], были получены интегральные распределения энергии в ЛР-110 кВ. На рисунке 10 представлены расчетные и приведенные из СТО [5] интегральные распределения энергии в ЛР для сопротивлений заземления опор 50 Ом соответственно.

При расчете без учета перекрытий линейной изоляции незащищенной цепи распределение энергии приблизительно совпадает с приведенными в [5] распределениями, так как функция, при помощи которой аппроксимируются распределения из [5], справедли-

ва в диапазоне энергий от 200 до 2000 кДж. Стоит отметить, что величина энергии более 200 кДж была получена при заряде молнии от 30 Кл. Если учитывать перекрытия изоляционных подвесок, то энергия, выделяемая в ЛР, получаются меньше 100 кДж даже при заряде молнии 40 Кл (амплитуда тока 200 кА для импульса 2/140 мкс), следовательно, сравнивать эти результаты с [5] некорректно.

### ВЫВОДЫ

- Опыт применения ЛР 110 кВ на двухцепных ВЛ 110 кВ в районах с высоким удельным сопротивлением грунтов в АО «Россети Тюмень» можно считать положительным. Эффективность применения линейных разрядников:
  - число грозовых отключений защищенной ЛР цепи ВЛ снижается в 5 раз и более;
  - число двухцепных отключений ВЛ снижается в 4 раза и более;
  - число грозовых отключений на защищенной ЛР цепи ВЛ снижается до двух раз.
- Полученные на основе расчетов интегральные распределения энергии в ЛР-110 кВ и расчетов

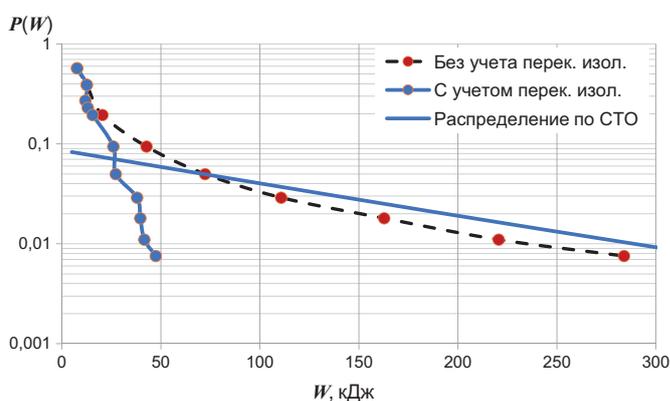


Рис. 10. Интегральные распределения энергии в ЛР-110 кВ, установленных на двухцепных одностоечных опорах ВЛ 110 кВ при  $R_{3y} = 50 \text{ Ом}$

по СТО [5] показали, что ожидаемое число повреждений разрядников определено в СТО без учета влияния перекрытий линейной изоляции незащищенной цепи. В случае расчета с перекрытиями линейной изоляции величина энергии, выделяемой в ЛР, имеет значительно меньшие значения. **Р**

### ЛИТЕРАТУРА

- Протокол испытаний № 02/1-01-08. Линейный разрядник типа РВЛ 110/75-10/550 УХЛ1. Приемочные испытания на соответствие требованиям рабочего проекта по договору № 3221 и ТУ 3414-015-15207362-2006. г. Новосибирск, ул. Кленовая, 10/1. январь 2008 г.
- РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений / Под науч. ред. Н.Н. Тиходеева. 2-е издание. Санкт-Петербург: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.
- Гайворонский А.С. Линейные разрядники — радикальное средство грозозащиты ВЛ // Новости электротехники, 2006, № 2(38).
- Гайворонский А.С., Заболотников А.П. Технологии грозозащиты ВЛ высших классов напряжения на основе применения линейных ОПН и разрядников с внешним искровым промежутком // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2015, № 3. С. 103–117.
- СТО 56947007-29.130.10.197-2015. Методические указания по применению ОПН на ВЛ 6–750 кВ. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Утв. 19.01.2015. М.: ОАО «ФСК ЕЭС». 138 с.
- Данилов Г.А., Зубков А.С., Боровицкий В.Г., Лошаков Ю.Е. Подвесные ОПН как средство повышения надежности работы воздушных линий электропередачи (опыт при-
- менения) // Энерго-Инфо, 2008, № 11(23).
- Протокол испытаний № 02-03-2017. Разрядники вентильные линейные типа РВЛ-110/75-10/680 УХЛ1-А (П). Инспекционные испытания после эксплуатации на соответствие техническим требованиям АО Энергетики и электрификации «Тюменьэнерго». ИЦ высоковольтного электрооборудования Филиала АО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ, г. Новосибирск, ул. Кленовая, 10/1. март 2017 г.
- Anderson R.B., Eriksson A.J. Lightning parameters for engineering application. Electra, 1980, no. 69, pp. 65-102.



В издательстве Инфра-Инженерия вышла в свет новая книга к.т.н. В. И. Гуревича объемом свыше 500 страниц под интригующим названием **«Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва и защита электрооборудования от него»**

В этой необычной книге рассказывается об истории развития военных ядерных программ в СССР и США, роли разведки в создании ядерного оружия в СССР, обнаружении электромагнитного импульса при ядерном взрыве (ЭМИ ЯВ), многочисленных испытаниях ядерных боеприпасов.

В доступной для неспециалистов в области ядерной физики форме описан процесс образования ЭМИ ЯВ при подрыве ядерного боеприпаса на большой высоте, показано влияние многочисленных факторов на интенсивность ЭМИ ЯВ и его параметры. Рассмотрено влияние ЭМИ ЯВ на электронные компоненты и устройства, а также и на силовое электрооборудование энергосистем.

Большую часть книги занимает описание практических (а не теоретических, как в сотнях отчетов на эту тему) средств и методов защиты электрон-

ного и электротехнического оборудования от ЭМИ ЯВ, испытания этого оборудования на устойчивость к ЭМИ ЯВ, оценки эффективности средств защиты.

В книге использованы многочисленные документы и фотографии с грифами секретности, которые были рассекречены и стали общедоступными лишь недавно. По широте охвата проблемы, новизне, глубине и практической значимости описанных технических решений книга является фактически энциклопедией ЭМИ ЯВ и не имеет аналогов на книжном рынке.

Книга рассчитана на инженеров-электриков и энергетиков разрабатывающих, проектирующих и эксплуатирующих электронное и электротехническое оборудование, а также будет полезна преподавателям вузов и студентам. Много интересного найдут в ней также и любители истории техники.

Заказать книгу можно на сайте издательства [www.infra-e.ru](http://www.infra-e.ru) или по электронной почте [infra-e@yandex.ru](mailto:infra-e@yandex.ru) и телефону 8 (8172) 75-15-54