

Применение ОПН для защиты изоляции воздушных линий от грозových перенапряжений

(Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А.)

Введение

На стадии проектирования ВЛ расчетное число отключений из-за грозových перенапряжений снижают “привычными” способами - уменьшая импульсное сопротивление заземления опор, применяя грозозащитные тросы, снижая высоту опор (применение железобетонных опор вместо металлических), увеличивая импульсную прочность гирлянд линейных изоляторов.

В тех случаях, когда традиционные средства грозозащиты оказываются неэффективными из-за неблагоприятных геофизических условий (высокое удельное сопротивление грунтов) или метеоусловий (высокие гололедно-ветровые нагрузки для тросов), единственным способом повышения грозоупорности ВЛ является использование подвесных ограничителей перенапряжений, как эффективного средства снижения числа отключений ВЛ, вызванных грозowymi перенапряжениями. Существенное повышение грозоупорности ВЛ при помощи подвесных ОПН подтверждается многими авторами.

При анализе публикаций по вопросам защиты ВЛ 110-750 кВ подвесными ОПН было проработано более 30 источников [1-31]. Публикации зарубежных авторов, как правило, посвящены защите от грозových перенапряжений какой-либо конкретной линии, исходные данные для расчета грозозащиты которой представлены читателю достаточно скудно. Российские публикации и книги содержат информацию более общего характера.

Ряд авторов считает, что линейные ОПН не должны подвергаться коммутационным перенапряжениям; задачу ограничения коммутационных перенапряжений должны решать подстанционные ОПН. Другие считают, что коммутационные перенапряжения слабо влияют на работу ОПН и выбор их характеристик, так как линейные ОПН за счет своего числа прекрасно справятся и с ограничением коммутационных перенапряжений.

Нет единого мнения и по вопросу необходимости снабжения подвесных ОПН искровыми промежутками. С одной стороны, искровые промежутки исключают воздействие на ОПН рабочего напряжения промышленной частоты и воздействие коммутационных перенапряжений (как правило, искровые промежутки настраивают таким образом, чтобы они не срабатывали при коммутационных перенапряжениях, что особенно важно при малом числе установленных на линии подвесных защитных аппаратов). Искровые промежутки позволяют снизить высоту столба варисторов ОПН, что делает его несколько дешевле по сравнению с ОПН без промежутков. С другой стороны, при оснащении ОПН искровыми промежутками необходима координация их характеристик с вольт-секундными характеристиками

линейных изоляторов, что представляется непростой задачей. Искровые промежутки практически исключают параллельную работу ОПН, установленных на соседних опорах, в режиме ограничения грозových перенапряжений; иными словами, каждый аппарат должен быть рассчитан на большие энергетические воздействия, что является увеличивающим фактором стоимости аппарата.

По данным [8] подавляющее большинство подвесных ОПН в Японии имеют искровые промежутки. Европа и Америка устанавливают на своих воздушных линиях ОПН как с искровыми промежутками, так и без них, но предпочтение отдается ОПН без искровых промежутков. Как видно, в мире нет единого мнения по выбору типа присоединения подвесных ОПН (искровое, безыскровое).

Еще одним принципиальным вопросом является вопрос о требованиях к энергоемкости устанавливаемых на линиях ОПН. Авторы практически каждой зарубежной публикации рассматривают этот вопрос как наиболее важный. В качестве удельной энергоемкости линейных ОПН различными авторами называются величины от 1-2 кДж/кВ и вплоть до 15 кДж/кВ. Эти значения удельной поглощаемой энергии соответствуют диапазону с первого по пятый класс пропускной способности, т.е. всему диапазону энергоемкости выпускаемых в настоящее время варисторов и ОПН.

Нет единого мнения и по выбору мест первоочередной установки ОПН. Прорывы молнии сквозь тросовую защиту наиболее вероятны на верхние фазы, поэтому именно их в первую очередь надо при таком воздействии молнии защищать подвесными ОПН. С другой стороны, известно, что главной причиной отключения ВЛ классов напряжения 110-220 кВ с тросами являются обратные перекрытия изоляции (также как и для ВЛ 330 кВ с высокими сопротивлениями заземления опор). Обратные перекрытия наиболее вероятны для нижних фаз ВЛ (при высоких сопротивлениях заземления опор) и для верхних фаз (при низких сопротивлениях заземления опор), поэтому нельзя однозначно указать, в какие именно фазы в первую очередь должна осуществляться установка ОПН для защиты изоляции от обратных перекрытий, т.е. определенного внимания требует вопрос о схеме защиты от перенапряжений в случае размещения ограниченного количества комплектов ОПН на опоре.

От положения ОПН на опоре зависит риск повреждения подвесного ОПН. Так, максимальный риск повреждения у ОПН верхней фазы на опоре, минимальный – на нижних фазах. Поэтому, например в [26], предлагается в верхнюю фазу ВЛ устанавливать ОПН, энергоемкость которого больше, чем для ОПН нижней фазы.

При размещении ограниченного числа комплектов подвесных ОПН по трассе ВЛ также, если возможно, необходимо выявить наиболее проблемные места: наиболее часто поражаемые опоры или участки трассы ВЛ; опоры с большим сопротивлением заземления и проч.

Многими авторами эффективным считается применение ОПН для защиты двухцепных ВЛ, когда подвесные аппараты устанавливаются только

параллельно изоляторам одной из цепей. Такая мера приводит к резкому уменьшению или исключению двухцепных отключений.

Следует отметить, что подавляющее большинство подвесных ОПН в мире установлено в сетях номинальных напряжений не более 400 кВ. Применение подвесных ОПН для снижения числа грозových отключений ВЛ 400-750 кВ встречается достаточно редко, поскольку гроззовые перенапряжения для линий этих классов напряжения заметной опасности уже не представляют, за исключением случаев повышенного сопротивления заземления опор. Исключение составляет Япония, которая традиционно считается лидирующей страной в области использования подвесных ОПН. Так, по данным [8], уже к 1994 году в Японии подвесные ОПН были установлены на 22 воздушных линиях класса 500 кВ.

Для России в качестве основной области применения подвесных ОПН следует ожидать повышение грозоупорности линий 110-220 кВ, реже – повышение грозоупорности линий 330 кВ. Применение ОПН на ВЛ 500-750 кВ, скорее всего, будет ограничено защитой отдельных опор и пролетов.

Отечественная нормативная документация

В России действует два нормативных документа, которые касаются защиты от перенапряжений и применения ОПН 110-750 кВ: “Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений” и “Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ”.

В методических указаниях [12] отмечено, что ОПН является одним из основных элементов подстанции, обеспечивающим защиту оборудования распределительного устройства (РУ) и линий от коммутационных и грозových перенапряжений. Тем не менее, несмотря на возможность защиты изоляции ВЛ с помощью ОПН, здесь сказано: “Настоящие Указания не распространяются на выбор ОПН, устанавливаемых на линии электропередачи параллельно гирляндам изоляторов для защиты изоляции линии от коммутационных и грозových перенапряжений”.

В руководстве [9] наиболее освещенными являются общие понятия грозозащиты воздушных линий, дан ряд определений, указаны различные факторы, влияющие на число грозových отключений воздушных линий различных классов номинального напряжения. В седьмом разделе [9] приведен ряд показателей грозоупорности линий и перечислены основные средства грозозащиты.

Показателем грозоупорности ВЛ является число ее грозových отключений. Как отмечается в [9], взаимосвязь показателей грозоупорности и конструкции ВЛ наиболее ярко проявляется для ВЛ напряжением 110 кВ и выше, защищенных тросом и выполненных на металлических или железобетонных опорах.

Критические значения тока молнии, приводящие к перекрытию линейной изоляции, при прорывах молнии на провода невелики: изоляция ВЛ 110–330 кВ перекрывается при амплитуде тока молнии от 3 до 10 кА и выше.

Практически каждый удар молнии в провод ВЛ 110 кВ вызывает перекрытие изоляции.

Обратные перекрытия возникают при значительно большей амплитуде тока молнии. Например, изоляция ВЛ 110 кВ перекрывается при ударах молнии в опору с током, достигающим нескольких десятков килоампер. При удалении точки удара молнии от опоры к середине пролета вероятность обратного перекрытия изоляции уменьшается из-за перераспределения тока молнии между двумя опорами, снижения крутизны тока за счет потерь на импульсную корону при пробеге по тросу и удаленности канала молнии.

По данным [9] на вероятность обратного перекрытия изоляции влияют следующие конструктивные параметры ВЛ:

- ✓ импульсная прочность линейной изоляции, зависящая от класса номинального напряжения ВЛ. Эта зависимость выражена значительно сильнее, чем при прорывах молнии на провода, так как с ростом импульсной прочности значения опасных для изоляции амплитуд тока молнии изменяются от десятков килоампер (для ВЛ 110 кВ), имеющих вероятность появления (0,3–0,4), до сотен килоампер (для ВЛ 500 кВ и выше) – с вероятностью появления 0,05 и менее;
- ✓ тип и размеры опоры (с увеличением высоты опоры возрастает поражаемость ВЛ разрядами молнии и увеличивается индуктивность опоры; одностоечные железобетонные и стальные опоры имеют большую индуктивность, чем порталные или опоры с оттяжками; наибольшую индуктивность на единицу длины опоры имеют одностоечные железобетонные опоры, но такие опоры обычно имеют меньшую высоту);
- ✓ тросовая защита (подвеска троса за счет электростатического экранирования снижает разность потенциалов на линейной изоляции и уменьшает долю тока молнии, стекающего по опоре, что способствует снижению падения напряжения на индуктивности и сопротивлении заземления опоры; эффективность тросов возрастает при увеличении числа тросов, разнесении их на большее расстояние по горизонтали и приближении к проводам по вертикали);
- ✓ сопротивление заземления опоры (уменьшение значений сопротивления заземления R_3 приводит к снижению перенапряжений на изоляции ВЛ; меньшие значения R_3 необходимо обеспечить на ВЛ, выполненных на одностоечных опорах, имеющих более высокую поражаемость разрядами молнии и большую индуктивность опор. Наиболее жесткие требования следует предъявлять к R_3 для ВЛ 110 кВ, выполняемых в настоящее время исключительно на одностоечных опорах и имеющих сравнительно невысокую импульсную прочность линейной изоляции).

Соотношение числа отключений из-за обратных перекрытий ($n_{оп} + n_{тр}$) и прорывов $n_{пр}$ зависит от класса номинального напряжения U_n и конструкции ВЛ (типа опоры, числа и расположения тросов, сопротивления заземления). С ростом U_n и повышением импульсной прочности линейной

изоляции повышается общая грозоупорность ВЛ и снижается доля отключений от обратных перекрытий.

Основными природно-климатическими характеристиками, влияющими на показатели грозоупорности ВЛ, являются интенсивность грозовой деятельности, статистическое распределение амплитуды тока молнии и электрофизические характеристики грунтов в районе прохождения трассы ВЛ (удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость и пробивная электрическая прочность грунта).

На показатели грозоупорности могут влиять такие особенности трассы ВЛ, как прохождение ВЛ в одном коридоре с другими ВЛ или экранировка ВЛ лесным массивом. Во всех указанных случаях поражаемость ВЛ разрядами молнии уменьшается по сравнению с ВЛ, проходящей по открытой местности. Поражаемость разрядами молнии каждой из двух одинаковых ВЛ, идущих в одном коридоре, составляет около половины поражаемости отдельно идущей ВЛ.

Показатели грозоупорности экранируемых ВЛ улучшаются также за счет более благоприятного статистического распределения амплитуды тока молнии разрядов, поражающих ВЛ: опасные для линейной изоляции разряды с большими значениями I , ориентирующиеся на наземные объекты с больших высот, поражают преимущественно близко расположенные к ВЛ высокие объекты (здания городской застройки или лесной массив). Указанные обстоятельства могут быть причиной значительного расхождения расчетных и эксплуатационных показателей грозоупорности из-за невозможности учета в существующих методиках таких особенностей трассы ВЛ.

Согласно [9] в качестве основных средств грозозащиты ВЛ используются:

- ✓ подвеска грозозащитных тросов;
- ✓ снижение сопротивления заземления опор;
- ✓ повышение импульсной прочности линейной изоляции;
- ✓ защита отдельных опор и участков с ослабленной изоляцией;
- ✓ ОПН.

Резервным средством повышения надежности работы ВЛ является автоматическое повторное включение (АПВ), в особенности быстродействующее (БАПВ) и однофазное (ОАПВ). АПВ позволяет частично компенсировать низкую грозоупорность ВЛ при трудностях устройства хороших заземлений и т.п. Однако применение АПВ не должно исключать использование основных средств грозозащиты, так как большое число к.з. снижает ресурс оборудования ПС.

Подвеска заземленных тросов позволяет уменьшить в сотни раз число ударов молнии непосредственно в провода, представляющих наибольшую опасность для изоляции ВЛ. Расположение тросов относительно проводов должно обеспечить наибольшую эффективность тросовой защиты при преобладающем для данной ВЛ типе грозовых отключений (прорывы или обратные перекрытия). В первом случае снижение вероятности прорыва

достигается уменьшением угла защиты троса (тросов), в том числе подвеской тросов с отрицательным углом защиты, и увеличением расстояния между тросом и проводом по вертикали. Во втором случае вероятность обратного перекрытия уменьшается при увеличении числа тросов, разнесении их на большее расстояние, в том числе при подвеске части тросов под проводами. Перечисленные мероприятия способствуют уменьшению импульсного тока через опору и усиливают электростатическое экранирование проводов тросами.

Для снижения потерь энергии от индуктированных в тросах токов, а также для использования тросов в качестве канала высокочастотной связи или в целях емкостного отбора мощности грозозащитный трос крепится к опорам на изоляторах, снабженных шунтирующими искровыми промежутками. При разряде молнии искровые промежутки пробиваются уже во время развития лидерного канала, и в стадии главного разряда молнии трос работает как заземленный наглухо.

Снижение сопротивлений заземления опор ВЛ с тросом является одним из основных средств уменьшения вероятности импульсного перекрытия изоляции при ударе молнии в трос или опору. Исключением являются ВЛ или участки на очень высоких опорах (переходы через реки и т.п.), грозоупорность которых в значительной мере определяется индуктивностью опор. В тех случаях, когда не удается достичь низкого сопротивления заземления опор, тросовая защита может оказаться малоэффективной, так как большинство ударов молнии в трос или опору будет приводить к перекрытиям изоляции.

Сопротивление заземления металлических и железобетонных опор на ВЛ без троса должно быть по возможности низким. Это способствует уменьшению вероятности перекрытия изоляции при ударах в опору и уменьшению вероятности перехода однофазных перекрытий в многофазные при ударах молнии в опоры и провода.

Для повышения грозоупорности ВЛ, проходящих в районах с высоким удельным сопротивлением грунта, по совокупности факторов (трудности прокладки, повреждаемость в эксплуатации, низкая эффективность при стекании тока молнии) можно увеличить число тросов (с подвеской одного или двух из них под проводами).

Импульсная прочность изоляции ВЛ с тросом определяется типом изоляторов, длиной гирлянды, длиной воздушных промежутков на опоре и промежутка трос-провод в пролете. Тип изоляторов и длина гирлянды для ВЛ всех классов напряжения выбираются не по соображениям грозозащиты, а по рабочему напряжению. Увеличение длины гирлянды и скоординированных с ней воздушных промежутков на опоре повышает капитальные затраты и практически не используется как средство грозозащиты.

Средством повышения грозоупорности ВЛ могут служить ОПН, устанавливаемые непосредственно на опорах ВЛ. Применение ОПН на ВЛ наиболее эффективно в следующих случаях:

- ✓ на одной из цепей двухцепной ВЛ, что практически полностью предотвращает грозовые отключения одновременно двух цепей;
- ✓ при высоком сопротивлении заземления опор;
- ✓ на ВЛ, проходящих по районам с неблагоприятными гидрометеорологическими условиями (высокая гололедно-ветровая нагрузка), препятствующими использованию грозозащитных тросов;
- ✓ на высоких опорах, например, на переходах через водные преграды.

При этом ОПН могут устанавливаться либо на каждой опоре, либо только на некоторых опорах; либо во все фазы на опоре, либо только в некоторые ее фазы.

Международные стандарты

Среди действующих зарубежных нормативных документов в области защиты от перенапряжений изоляции воздушных линий можно назвать [31] – «Руководство по повышению грозоупорности воздушных линий электропередач». Этот стандарт распространяется только на ВЛ, класс напряжения которых более 69 кВ. В этом документе кратко рассмотрены различные факторы, предопределяющие результирующую грозоупорность воздушных линий:

- ✓ грозовая активность и параметры молнии в районе прохождения ВЛ;
- ✓ характер трассы ВЛ (проходит в лесу, на равнине, в ущелье, на холмах);
- ✓ высота опоры;
- ✓ удельное сопротивление грунта вдоль трассы ВЛ и сопротивление заземления опор;
- ✓ число тросов на опоре, защитные углы тросовой защиты;
- ✓ импульсная прочность линейной изоляции.

Все перечисленные факторы в [31] считаются «основными». Помимо «основных» определяющих грозоупорность ВЛ факторов рассмотрены «специальные меры» повышения грозоупорности. К таким мерам в [31] относят:

- ✓ дополнительные грозозащитные тросы, которые могут устанавливаться как над фазными проводами, так и под ними;
- ✓ дополнительные оттяжки к опорам, имеющим повышенные импульсные сопротивления заземления;
- ✓ применение подвесных ОПН, устанавливаемых параллельно гирляндам линейных изоляторов;
- ✓ применение дифференцированной изоляции на двухцепных ВЛ, позволяющее снизить число двухцепных отключений;
- ✓ установку на опорах ВЛ специальных «антенн», увеличивающих долю ударов молнии непосредственно в опору по сравнению с тросом в полете.

В стандарте [31] отмечается, что подвесные ОПН бывают:

- ✓ с искровыми промежутками, устанавливаемыми последовательно с нелинейными элементами;
- ✓ без искровых промежутков, устанавливаемых последовательно с нелинейными элементами.

Подвесные ОПН, согласно [31], могут устанавливаться либо вдоль всей трассы ВЛ, либо выборочно - на части опор. Наиболее эффективным называется применение ОПН на опорах с высокими импульсными сопротивлениями заземления, на высоких опорах при переходах через реки. Рекомендуется применение ОПН на одной из цепей двухцепных ВЛ для снижения числа двухцепных отключений.

В [31] отмечается, что ОПН является дорогостоящим средством повышения грозоупорности ВЛ, однако о целесообразности применения ОПН в каждом конкретном случае следует судить по эффективности их работы и исходя из экономических оценок.

Заключение

Подвесные ОПН являются эффективным средством защиты изоляции ВЛ от грозовых перенапряжений. Однако до сих пор нет единого мнения по многим вопросам, среди которых:

- выбор типа ОПН (с искровым промежутком или без);
- выбор наиболее эффективных с точки зрения снижения числа перекрытий изоляции ВЛ мест размещения ограниченного числа комплектов ОПН на опоре (в верхние фазы, в нижние);
- основные характеристики ОПН и прежде всего его энергоемкость.

Список использованных источников

1. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 10, October 1985. "Application of special arresters on 138 kV lines of Appalachian power company". C.H. Shih and others, USA.
2. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, October 1989. "Development and application of lightning arresters for transmission lines". Shuji Furukawa and others, Japan.
3. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, July 1993. "Development of suspension-type arresters for transmission lines". Takeshi Yamada and others, Japan.
4. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, January 1994. "Lightning protection of distribution lines". T.E. McDermott and others, USA.
5. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996. "Measurement of lightning surges on test transmission line equipped with arresters struck by natural and triggered lightning". Y. Matsumoto and others, Japan.
6. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, July 1997. "Use of line surge arresters for improvement of the lightning performance of 63 kV and 90 kV shielded and unshielded transmission lines". S. Sadovic and others, France.

7. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997. "Energy absorption of surge arresters on power distribution lines due to direct lightning strokes". K. Nakada and others, Japan.
8. CIGRE Session 1998. Report No. 33-301. "Experience and effectiveness of application of arresters to overhead transmission lines". T. Kawamura and others, Japan.
9. РАО "ЕЭС России". "Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений". Санкт-Петербург, Издательство ПЭИПК, 1999.
10. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, January 1999. "Energy stress on transmission line arresters considering the total lightning charge distribution". L. Stenstrom and others, Sweden.
11. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, October 1999. "Distribution arrester failures caused by lightning current flowing from customer's structure into distribution lines". K. Nakada and others, Japan.
12. РАО "ЕЭС России". "Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ". Москва, 2000.
13. Журнал "Электричество", № 3, 2000. "Анализ токовых нагрузок ограничителей перенапряжений, устанавливаемых на опорах воздушных линий". К.П. Кадомская, А.А. Рейхердт.
14. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, July 2000. "Transmission line arrester energy, cost, and risk of failure analysis for partially shielded transmission lines". Eva J. Tarasiewicz and others, Canada.
15. "Аппараты для ограничения перенапряжений в высоковольтных сетях". А.И. Афанасьев, И.М. Богатенков, Н.И. Фейзуллаев. Учебное пособие, Санкт-Петербург, Издательство СПбГТУ, 2000.
16. Сборник материалов научно-технической конференции "Научные аспекты и актуальные проблемы разработки, производства, испытаний и применения ОПН", АООТ "НИИ "Электрокерамика", 8-10 октября 2001 года, Санкт-Петербург. "Повышение надежности эксплуатации изоляции воздушных линий при установке ОПН на опорах". К.П. Кадомская, А.А. Рейхердт.
17. Сборник материалов научно-технической конференции "Научные аспекты и актуальные проблемы разработки, производства, испытаний и применения ОПН", АООТ "НИИ "Электрокерамика", 8-10 октября 2001 года, Санкт-Петербург. "Области рационального использования подвесных ОПН (ОПНЛ) для повышения грозозащиты ВЛ 110 и 220 кВ". В.В. Крыжановский, А.Н. Новикова, О.В. Шмараго.
18. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 28 Oct. – 2 Nov. 2001. IEEE/PES, volume 1, pp. 339-342. "Performance of 230 kV transmission lines applying externally gapped type arresters". Ramiro Hernandez-Corona and others, Mexico.
19. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 28 Oct. – 2 Nov. 2001. IEEE/PES, volume 2, pp. 1025-1029. "Line arrester application field study". John McDaniel, Canada.

20. Научный вестник НГТУ. №1(12), 2002. Электромеханика и Электроэнергетика. “Влияние способа моделирования ОПН и волны тока молнии на энергетические характеристики защитных аппаратов, установленных на опорах ВЛ”. К.П. Кадомская, А.А. Рейхердт.
21. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, January 2003. “Application studies of line arresters in partially shielded 138 kV transmission lines”. L.C. Zanetta and others, Brazil.
22. CIGRE Session 2002. Report No. 33-203. “Installation of composite surge arresters on transmission lines”. B. Demailly and others, France.
23. Международная научно-техническая конференция “Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния”. 15-19 сентября, 2003, Новосибирск, Россия. “Грозопоражения и грозозащита дальних линий электропередачи”. С.Г. Куатов, Н.М. Никитин, Ю.В. Целебровский.
24. Международная научно-техническая конференция “Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния”. 15-19 сентября, 2003, Новосибирск, Россия. “Проблемы грозозащиты ВЛ 110 и 220 кВ в районах с многолетнемерзлыми плохопроводящими грунтами и пути их решения”. А.С. Гайворонский, А.В. Клепиков, Е.Н. Прокофьева.
25. Международная научно-техническая конференция “Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния”. 15-19 сентября, 2003, Новосибирск, Россия. “Разрядники подвешенного исполнения на основе нелинейных ZnO сопротивлений с внешним искровым промежутком на классы напряжения 110-500 кВ”. А.С. Гайворонский, А.В. Клепиков.
26. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, July 2003. “Evaluation of line surge arrester failure rate for multiphase lightning stresses”. Luiz Cera Zanetty, Brazil.
27. Г.Н. Александров. “Ограничение перенапряжений в электрических сетях”. Учебное пособие. Санкт-Петербург, СЗФ АО “ГВЦ Энергетики”, 2003.
28. “Техника высоких напряжений”. И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Н.И. Гумерова, Г.М. Иманов и др. Под ред. Г.С. Кучинского. Санкт-Петербург, Энергоатомиздат, 2003.
29. Научно-техническая конференция “Интеграция науки и производства”. 26-27 мая, 2004, Московская область, Россия. Доклад 3.06. “Использование ограничителей перенапряжений для защиты изоляции ВЛ от обратных перекрытий при ударах молнии в опору или грозозащитный трос”. В.Л. Дмитриев, М.В. Дмитриев.
30. Журнал “Электричество”, №6, 2004. “Оценка влияния импульсной прочности линейной изоляции на грозоупорность линий электропередачи 110 кВ”. А.Р. Корявин, О.В. Волкова, В.З. Трифонов.
31. “IEEE Guide For Improving the Lightning Performance of Transmission Lines”. IEEE Std 1243-1997.