

3. Джон Райли. NGOSS: Построение эффективных систем поддержки и эксплуатации сетей для оператора связи / Джон Райли, Мартин Кринер : пер. с англ. – М.: Бизнес Букс, 2007. – 192 с.
4. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи / А.Ю. Гребешков. – М.: ЭКО\_ТРЕНД, 2008. – 288.
5. Управление неоднородными сетями [Электронный ресурс] // Сервер информационных технологий. – Режим доступа : <http://unix.stat.burnet.ru/tpns/glava4.htm>

УДК 621.31.31.27

Самков А.В., д.т.н. (Институт электродинамики НАН Украины)

### НЕЛИНЕЙНЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

**Самков О.В. Нелінійні обмежувачі перенапруги в системах високовольтного електроживлення.** Розглянуто підвищення надійності експлуатації повітряних ліній (ПЛ) електропередач при грозових та комутаційних впливах. Запропоновано застосування нелінійних обмежувачів перенапруги (ОПН) для підвищення блискавкозахисту ПЛ 35 .. 750 кВ. Представлений досвід застосування ОПН для захисту від комутаційних та грозових перенапруг, визначені оптимальні місця їх встановлення

**Ключові слова:** ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ, НЕЛІНІЙНІ ОБМЕЖУВАЧІ ПЕРЕНАПРУГИ, ГРОЗОВІ ТА КОМУТАЦІЙНІ ПЕРЕНАПРУГИ, ЗАСОБИ ЗАХИСТУ

**Самков А.В. Нелинейные ограничители перенапряжения в системах высоковольтного электропитания.** Рассмотрено повышение надежности эксплуатации воздушных линий (ВЛ) электропередач при грозовых и коммутационных воздействиях. Предложено применение нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) для повышения грозоупорности ВЛ 35...750 кВ. Представлен опыт применения ОПН для защиты от коммутационных и грозовых перенапряжений, определены оптимальные места их установки.

**Ключевые слова:** ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, НЕЛИНЕЙНЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ, ГРОЗОВЫЕ И КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ, СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ

**Samkov O.V. Nonlinear surges in the systems of high-voltage power supply.** Increasing reliability of overhead transmission lines, when it is supported by switching and lightning effects, still remains one of the major problems of electric power. Application arrester is now an established method of increasing lightning performance line of 35 .. 750 kV. The paper presents the experience of the arrester use to protect line isolation against switching and lightning surges and optimal arresters location.

**Keywords:** POWER LINES, NON-LINEAR SURGE, LIGHTNING AND SWITCHING SURGES, PROTECTION

**Введение. Постановка задачи.** Перенапряжения в электрических сетях возникают в результате воздействия мощных внешних источников электрической энергии, например, разрядов молний, а также вследствие переходных процессов, вызванных изменением конфигурации сети при коммутациях. Они могут приводить к необратимому повреждению изоляции основного оборудования электрических сетей. Поэтому для бесперебойного снабжения потребителей электроэнергией необходимо ограничивать перенапряжения до уровня, безопасного для изоляции оборудования.

В настоящее время в электрических системах для защиты изоляции электрооборудования от перенапряжений наиболее эффективным является применение нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН). Однако по-прежнему используются также и вентильные разрядники (ВР). При реконструкции электрических сетей и в новых проектных разработках применяют только ОПН.

Анализ опыта применения ОПН для защиты ВЛ от грозовых и коммутационных перенапряжений и создания рекомендаций относительно мест установки ограничителей.

**Отличие ОПН от ВР.** Вентильные разрядники комплектуются нелинейными резисторами (варисторами) на основе карбида кремния (SiC) и искровыми промежутками, которые подключают нелинейный резистор между фазным проводом и землей только на короткое время, для ограничения грозových, а в установках сверхвысокого напряжения и коммутационных перенапряжений. Вследствие относительно невысокой нелинейности их варисторов ВР не позволяют обеспечить достаточное ограничение перенапряжений. Искровые промежутки даже достаточно сложной конструкции не в состоянии погасить большие сопровождающие токи. Включение варисторов под рабочее напряжение без искровых промежутков оказывается невозможным вследствие сравнительно небольшого тока, протекающего по варистору постоянно, а также из-за их низкой термической устойчивости.

В то время, когда для использования варисторов из карбида кремния в сочетании с искровыми промежутками разработаны достаточно эффективные ограничители перенапряжений: *магнитно-вентильные разрядники* (МВР) для защиты изоляции от грозových перенапряжений; *магнитно-вентильные комбинированные разрядники* (МВКР) для защиты изоляции установок сверхвысокого напряжения 330...750 кВ от грозových и коммутационных перенапряжений; *магнитно-вентильные разрядники с растягивающейся дугой* (МВРД) для защиты изоляции вращающихся машин от грозových перенапряжений и т. д.), однако их возможности практически исчерпаны [1].

Поэтому приблизительно 40 лет тому назад в бывшем СССР производство вентильных разрядников было приостановлено и началось интенсивное развитие работ по созданию новых защитных аппаратов – ОПН на основе высоконелинейных оксидно-цинковых варисторов. В те годы аналогичные работы велись только в США и Японии [2].

На замену ВР пришли ОПН – защитные аппараты изоляции электрооборудования от грозových и коммутационных перенапряжений, представляющие собой последовательно и/или параллельно соединенные металлооксидные варисторы без каких-либо последовательных или параллельных искровых промежутков, заключенные в изоляционный корпус, постоянно подключенные между фазным проводом и землей.

В отличие от ВР, ОПН имеют ряд преимуществ: *более глубокий* уровень ограничения всех видов перенапряжений; отсутствие сопровождающего тока после затухания волны перенапряжения; *сравнительная простота* конструкции и высокая надежность в эксплуатации; *стабильность* характеристик и устойчивость к старению; *способность* к рассеиванию больших энергий импульсов; существенно меньшие габариты и вес.

Отметим также, что на ВЛ электропередачи (ВЛ) происходит замена трубчатых разрядников (ТР) на ОПН, которые устанавливаются вместо ТР на *опорах* ВЛ в местах с ослабленной изоляцией, в начале и конце защищенного подхода перед подстанцией; на *опорах* при пересечениях ВЛ; на *длинных* переходах ВЛ и т. д. Такое применение ОПН, как показал зарубежный опыт, позволило осуществить широкую программу улучшения технико-экономических показателей сетей высокого, сверхвысокого и ультравысокого классов напряжений.

Необходимо отметить, что в настоящий момент в объединенной энергосистеме Украины установка ОПН на ВЛ для ограничения перенапряжений не используется, а предпочтение отдается одному из традиционных средств защиты – грозозащитному тросу.

На сегодня электротехническая промышленность России производит ОПН для защиты от грозových и коммутационных перенапряжений электроустановок всех принятых классов напряжения от 0,22 до 750 кВ. Основным рабочим элементом таких ОПН является нелинейный резистор – варистор, который набирается из металлооксидной керамики, собранный последовательно в виде столбов. Особое место в конструктивном исполнении занимают ограничители перенапряжений с элегазовой изоляцией – ОПНЭ. Они заключены в герметичный металлический корпус, заполненный элегазом под давлением. Обычно ОПНЭ являются модулем комплексного распределительного электроустройства КРУЭ. Однако существуют ОПНЭ, которые могут использоваться как отдельный самостоятельный аппарат.

Требуемое значение защитного уровня ОПН обеспечивается последовательным включением соответствующего числа резисторов, а необходимое значение пропускной способности (допустимого разрядного тока) – увеличением диаметра дисков резисторов или параллельным включением соответствующего числа резисторов. Эти два фактора являются основными и определяют конструкцию, размеры всего устройства ОПН с учетом требований по термической устойчивости, безопасности обслуживания и эксплуатации и других факторов. Следовательно, режим работы и выбор ОПН определяются конкретным местом его присоединения в электроустановке, что определяет требования к нему по защитному уровню, с одной стороны, и по пропускной способности – с другой.

Правильно выбранный и установленный ОПН не требует технического обслуживания в течение всего срока эксплуатации при условии, что с ним не было аварийных ситуаций. В условиях эксплуатации периодически контролируется состояние корпуса ОПН.

При его выборе необходимо решать две главные задачи: ОПН *должен ограничивать* коммутационные и грозовые перенапряжения до значений, при которых обеспечивается нормальная работа изоляции защищаемых электроустановок; он *должен работать* надежно, не теряя своей термической устойчивости, при непрерывном воздействии длительных рабочих напряжений, а также напряжений, превышающих в течение предельно допустимого времени нормированные рабочие напряжения. Наряду с решением указанных задач требуется также обеспечить взрывобезопасность ОПН, надежную работу его изоляции. Должна быть согласована механическая прочность ОПН с воздействующими механическими нагрузками.

Уровень ограничения коммутационных перенапряжений с помощью ОПН составляет  $(1,65 \dots 1,8)U_{\phi}$ , а уровень ограничения грозовых перенапряжений –  $(2,2 \dots 2,4)U_{\phi}$  в сетях 110 кВ и снижается до  $2U_{\phi}$  – для линий 750 кВ [3].

Выбранный тип ОПН обеспечивает защиту от коммутационных перенапряжений при выполнении условия  $U_{ост.к} \leq U_{доп.к}$ , где  $U_{ост.к}$  – остаточное коммутационное напряжение ОПН, кВ;  $U_{доп.к}$  – допустимое напряжение для изоляции защищаемого электрооборудования при коммутационном импульсе, кВ.

Для определения защитного уровня при грозовых перенапряжениях необходимо найти такое расположение ОПН в схеме защищаемого оборудования, чтобы при сложных волновых процессах в схеме воздействующее напряжение грозового импульса не превышало допустимых напряжений для изоляции.

К сожалению, в отечественной нормативной документации отсутствуют методики, позволяющие обоснованно выбрать основные характеристики ОПН, с учетом накопленного опыта эксплуатации. Это усугубляет массовое внедрение защитных аппаратов типа ОПН, при использовании которых зачастую некорректно решаются задачи по выбору числа ОПН, мест установки и основных характеристик их, что приводит к повышенной аварийности как защищаемого оборудования, так и самих ОПН.

Основная причина отказа ОПН это применение резисторов при их сборке без учета тщательного индивидуального подбора вольт-амперных характеристик и без учета различия при комплектации элементов ОПН. Всего лишь один резистор, вольт-амперная характеристика которого первоначально или отличалась от вольт-амперных характеристик других резисторов, или изменилась во время эксплуатации в большей мере, чем у других резисторов, может быть причиной отказа всего ОПН.

**Способы и места установки ОПН.** Возможными объектами, защищаемыми ОПН от грозовых перенапряжений, могут быть высокие переходные пролеты через водоемы и другие преграды на рельефе трассы ВЛ, участки ВЛ с ослабленной изоляцией, двухцепные электропередачи с вертикальной подвеской проводов, участки трассы ВЛ, проходящей через районы с локальной повышенной грозопоражаемостью, а также в гололедных районах, где подвеска тросов нецелесообразна.

Практика эксплуатации ОПН показала, что наибольший эффект улучшения показателя грозоупорности ВЛ обеспечивает установка их на каждой опоре (например, между фазными проводами и опорой, параллельно гирляндам изоляторов) и на всех фазах ВЛ (на трёх фазах

одноцепной или на шести фазах двухцепной). Однако из-за достаточно большой стоимости ОПН такие защиты нецелесообразны. Возникает задача выбора оптимального варианта расстановки их вдоль трассы с частичной защитой фаз ВЛ. Если по экономическим соображениям число ОПН ограничено, то можно сопоставить эффективность различных схем защиты при фиксированном числе их на опорах.

На данный момент нет единого мнения по выбору типа присоединения подвесных ОПН (искровое либо безыскровое). Согласно данным [4] подавляющее большинство подвесных ОПН в Японии имеет 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.

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, при таком воздействии молнии надо 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 сказать, в какие именно фазы в первую очередь должна осуществляться установка ОПН для защиты изоляции от обратных перекрытий, т.е. определенного внимания требует вопрос о схемах защиты от перенапряжений в случае размещения ограниченного количества комплектов ОПН на опорах ВЛ.

На основании проведенных моделирований и с учетом опыта эксплуатации рекомендуется устанавливать ОПН на фазных проводах ВЛ в зависимости от конструкции линии: на двухцепных ВЛ зачастую можно устанавливать аппараты лишь на верхних фазах, на ВЛ одноцепного исполнения с горизонтальным расположением фазных проводов – лишь на крайних фазах.

Следует отметить, что подавляющее большинство подвесных ОПН 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 грозвые перенапряжения для линий этих классов напряжения заметной опасности уже не представляют, за исключением случаев повышенного сопротивления заземления опор. Исключение в данном случае составляет Япония, которая традиционно считается лидирующей страной в области использования подвесных ОПН.

Для выбора оптимального способа расстановки ОПН на ВЛ рекомендуется сопоставлять варианты с одинаковым числом ОПН на опоре. На выбор оптимального варианта влияет сопротивление заземления опоры ( $R_{оп}$ ), поэтому, если ограничители применяются для защиты ВЛ по всей длине, целесообразно варьировать схемы расстановки ОПН вдоль трассы в зависимости от значений  $R_{оп}$  на отдельных ее участках, а также учитывать рельеф местности и наличие водоемов.

**Опыт применения ОПН.** К 1992 году в электрических сетях Японии было установлено 29580 аппаратов: 840 – на ВЛ 22...33 кВ (2,84 %); 26495 – на ВЛ 66...77 кВ (89,57 %); 1879 – на ВЛ 110...154 кВ (6,35 %); 366 – на ВЛ 187...500 кВ (1,24 %) [5]. В Японии ежегодно устанавливаются около 7000 штук ОПН-Л. Аналогичное происходит в США и в других странах. В США более половины из 30 энергокомпаний применяют защитные аппараты на линиях 69...230 кВ.

Согласно данным [4] 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 повышения 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.

Эффективность применения защитных аппаратов типа ОПН подтверждается опытом эксплуатации подвесных ОПН в электрических сетях Японии. Так, на двухцепных ВЛ, где

ОПН установлены на каждой фазе, двухцепных повреждений не наблюдалось, одноцепные повреждения наблюдались примерно в 60 % случаев, а в 40 % случаев повреждения линейной изоляции ВЛ отсутствовали. На ВЛ, не оснащенных подвесными ОПН, в 60 % случаев наблюдались двухцепные повреждения, в остальных – одноцепные.

**Выводы.** Отказы в системах электроснабжения приводят к огромным ущербам и неудовлетворенности потребителей, что особенно важно в связи с созданием единого рынка электроэнергии. В настоящее время проблема молниезащиты и защиты от перенапряжений приобретает все большую актуальность в связи с тем, что в электрических сетях возрастает количество потребителей, чувствительных к импульсам перенапряжений и электромагнитным помехам.

Металлооксидные нелинейные ограничители перенапряжений без промежутков являются эффективным аппаратом по ограничению как грозовых, так и коммутационных перенапряжений в электрических сетях 6...750 кВ. Их достоинством является то, что из-за значительной нелинейной характеристики сопротивления металлооксидного резистора они позволяют в случае необходимости существенно снизить грозовые перенапряжения по сравнению с вентильными разрядниками.

Во многих странах также становится все труднее получить разрешение на строительство новых линий нормативных размеров. Поэтому возводимые новые линии чаще всего должны быть линиями с “компактной изоляцией”. Это, в свою очередь, требует оптимального управления перенапряжениями, вызванными грозовыми или коммутационными импульсами. В этом случае ограничители перенапряжений на линии или на нескольких выбранных критических опорах могут оказаться привлекательным решением или дополнением к другим средствам.

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 ОПН, как эффективного средства снижения числа отключений ВЛ, вызванных грозовыми перенапряжениями.

Однако эффективность использования ОПН в сетях различного напряжения и их состава существенно зависит от правильного выбора характеристик аппарата. Проектировщики и эксплуатационники должны иметь достоверную информацию о тех параметрах ОПН, которые необходимо учитывать при их установке. Требуется индивидуальный подход к выбору ОПН. Существенное повышение грозоупорности ВЛ при помощи подвесных ОПН подтверждается многими исследованиями и опытом их эксплуатации.

### Литература

1. Ограничители перенапряжения в электроустановках 6-750 кВ. Методическое и справочное пособие / М.А. Аронов, О.А. Аношин, О.И. Кондратов, Т.В. Лопухова. – М.: Знак, 2001. – 232 с.

2. Опыт эксплуатации аппаратов 110 кВ и выше, выпускаемых АООТ «Корниловский фарфоровый завод» / Г.М. Иманов, В.Е. Розет, Ф.Х. Халилов, А.В. Колычев // Эксплуатация, качество и надежность вентильных разрядников и серийно изготавливаемых ОПН-110 кВ и выше : сб. материалов совещания 25-27 марта 1997. – Санкт-Петербург: изд. ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1997. – 464 с.

3. Базутки В.В. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах : учебник для вузов / В.В. Базутки, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.

4. CIGRE Session 1998. Report No. 33-301. «Experience and effectiveness of application of arresters to overhead transmission lines». T. Kawamura and others, Japan.

5. Gal E. Kaytar. Improvement of Power Quality and Reliability through selective installation of line arresters in the Romanian Transmission Network.