

З урахуванням того, що витрати води  $G_1$  та  $G_2$  залежать від теплоємності води, різниці температур води в подавальній і поворотній

мережі  $\Delta t_1$  та  $\Delta t_2$ , відповідних втрат теплоти обгородженнями  $Q_{втр1}$  та  $Q_{втр2}$ , а останні, зокрема, – від температур внутрішнього повітря  $t_{вн1}^p$  та  $t_{вн2}^p$  і температури зовнішнього повітря  $t_n$ , то в випадку, коли  $t_n = t_{p.o}$ , величина  $\Delta t_1 = \Delta t_2$ , і при постійній теплоємності води, формула (4) набуде вигляду

$$\Delta G = \left( \frac{t_{вн2}^p - t_{вн1}^p}{t_{вн1}^p - t_{p.o}} \right) 100 \quad (5)$$

Таким чином, як показують розрахунки, для нових температурних графіків теплових мереж при  $t_n = t_{p.o}$ , а також при будь-якому значенні температури зовнішнього повітря в інтервалі від  $t_{p.o}$  до  $t_{н.зп}$  треба збільшити витрату мережної води від 4,7 % (для температурних графіків при  $t_{p.o} = -25$  °С) до 8,3 % (для температурних графіків при  $t_{p.o} = -6$  °С).

#### Висновки

1. В результаті розрахунків для практичного використання були отримані залежності температур води в подавальній та поворотній лініях теплових мереж при розрахункових температурних графіках 150/70, 130/70, 115/70, 105/70, 95/70 °С для розрахункової температури внутрішнього повітря 20 °С.

2. Розрахунками показано, що зміна  $t_{вн}^p$  до 20 °С призводить до зростання витрат теплоносія у подавальній мережі від 4,7 % (для температурних графіків при  $t_{p.o} = -25$  °С) до 8,3 % (для температурних графіків при  $t_{p.o} = -6$  °С) порівняно з наявними температурними графіками, де нормативне значення температури внутрішнього повітря складало 18 °С.

#### Література

1. Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31: 2006. – К.: Мінбуд України, 2006. – 65 с.
2. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі: ДБН В.2.5-39:2008. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 56 с.
3. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для энергетических специальных ВУЗов/ Е. Я. Соколов. – 4-е издание, переработанное. – М.: Энергия, 1975. – 376 с.
4. Бузников Е. Я. Производственные и отопительные котельные/ Е. Ф. Бузников, К. Ф. Роддатис, Э. Я. Берзиньш. – 2-е изд. перераб. – М.: Энерготомиздат, 1984. – 248 с.

В.А. БРЖЕЗИЦКИЙ, С.Ю. ШЕВЧЕНКО, Д.С. КРЫСЕНКО

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК ВЫБОРА ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ 6-750 КВ

В.О. БРЖЕЗИЦЬКИЙ, С.Ю. ШЕВЧЕНКО, Д.С. КРИСЕНКО

## ПОРІВНЯННЯ МЕТОДИК ВИБОРУ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНИХ 6-750 КВ

V.A. BRZHEZYTSKYI, S.J. SHEVCHENKO, D.S. KRYSENKO

## COMPARISON OF THE METHODS OF SELECTION OF NON-LINEAR SURGE ARRESTERS 6-750 KV

**Аннотация.** Проведено сравнение методик выбора ограничителей перенапряжений нелинейных 6-750 кВ. Показано, что методики выбора ОПН, в основном, выполнены для двух типов сетей: 6-35 кВ и 110-750 кВ. Сравнение основных требований нормативных документов Украины и других стран по выбору ОПН выполнено по характеристикам: выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН, выбор ОПН по коммутационным и грозовым перенапряжениям, выбор ОПН по

условиям взрывобезопасности и по механическим характеристикам. Показана необходимость перехода к статистическим методам расчётов для дальнейшего развития методик выбора ОПН.

**Ключевые слова:** ограничитель перенапряжений нелинейный, перенапряжения.

**Анотація.** Проведено порівняння методик вибору обмежувачів перенапруг нелінійних 6-750 кВ. Показано, що методики вибору ОПН, в основному, виконані для двох типів мереж: 6-35 кВ та 110-750 кВ. Порівняння основних вимог нормативних документів України та інших країн з вибору ОПН виконане по характеристикам: вибір найбільшої тривало допустимої робочої напруги ОПН, вибір ОПН по комутаційним та грозовим перенапругам, вибір ОПН за умовами вибухобезпечності та по механічним характеристикам. Показана необхідність переходу до статистичних методів розрахунку для подальшого розвитку методик вибору ОПН.

**Ключові слова:** обмежувач перенапруг нелінійний, перенапруги.

**Annotation.** Comparison of the methods of selection of non-linear surge arresters 6-750 kV is carried out. It is shown that methods of selections of SA are mainly performed for two types of networks: 6-35 kV and 110-750 kV. Comparison of the main requirements of normative documents of Ukraine and other countries at the selection of SA is performed by features: selection of continuous operating voltage of SA, selection of SA on switching and lightning overvoltages, selection of SA on conditions of explosion safety and on mechanical characteristics. A need for a transition to the statistical methods of calculations for the further development of the methods of SA selection is shown.

**Key words:** non-linear surge arrester, overvoltages.

### Введение.

Защита электроустановок 6-750 кВ от перенапряжений играет важную роль при эксплуатации электроэнергетических объектов. В настоящее время основным способом защиты электрооборудования от перенапряжений в электрических сетях 6-750 кВ является применение нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН).

В настоящее время применение ОПН регламентируется следующими документами:

1. В Украине:
  - СОУ-Н ЕЕ 40.12-00100227-47 “Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 110-750 кВ. Настанова щодо вибору та застосування” [1];
  - СОУ-Н МЕН 40.1-00100227-67:2012 “Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35 кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках” [2].
2. В России:
  - “Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ” [3];
  - “Методические указания по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 6-35 кВ” [4].
3. Международные стандарты:
  - МЭК 60099-5 Разрядники для защиты от перенапряжений. Часть 5. Рекомендации по выбору и применению [5].
4. Разработки фирм-производителей ОПН:
  - “Методические указания по выбору ограничителей перенапряжений нелинейных производства предприятия «Таврида Электрик» для электрических сетей 6-35 кВ” [6];
  - Хинрихсен Фолькер. Siemens. Металлоксидные ограничители. Основы [7].
  - Выбор, испытание и применение металлооксидных ограничителей перенапряжений в сетях среднего напряжения. – Киев: Представительство АББ Украина [8].
  - Exlim. Техническая информация. Руководство по выбору высоковольтных ограничителей перенапряжений производства фирмы АББ [9].
  - Характеристики, выбор и размещение ограничителей перенапряжений (110-220) кВ: Учебное пособие / Г. М. Иманов, Ф. Х. Халилов, А. И. Таджибаев. – Санкт-Петербург: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1997 [10].

Основной задачей при выборе ОПН является ограничение перенапряжений до безопасного для защищаемого электрооборудования уровня и в это же время обеспечение устойчивости ограничителей к опасным для него видам перенапряжений. ОПН для электрических сетей 6-750 кВ, представленные на украинском рынке, производятся различными заводами (как отечественными, так и зарубежными) на основе собственных технических решений, поэтому ОПН различных заводов-изготовителей, предназначенные для одного класса напряжения, могут отличаться по характеристикам, что необходимо учитывать при их выборе.

Электрические сети Украины 6-35 кВ работают, в основном, с изолированной или заземленной через дугогасительный реактор нейтралью, поэтому условия работы ОПН в этих сетях отличаются от условий

работы в сетях 110-750 кВ большими величинами и длительностями коммутационных и квазистационарных перенапряжений. В связи с этим обзор методик выбора основных характеристик ОПН производится для двух типов сетей: 6-35 кВ и 110-750 кВ.

#### Выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН.

Основной характеристикой ОПН является наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН  $U_{\text{нрo}}$ . Это наибольшее значение действующего напряжения промышленной частоты, которое может быть приложено непрерывно к ОПН в течение всего срока его эксплуатации, и не приводит к повреждению или термической неустойчивости ОПН [1].

Основой для выбора данного напряжения является наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение электрической сети  $U_{\text{нc}}$  (линейное напряжение).

В указаниях [2, 4, 8] выбор наибольшего длительно допустимого напряжения ОПН 6-35 кВ осуществляется, исходя из условий длительности существования однофазного замыкания на землю:

– в сетях, допускающих неограниченно длительное существование однофазного замыкания на землю,  $U_{\text{нрo}} \geq U_{\text{нc}}$ ;

– в сетях, где длительность однофазного замыкания на землю ограничивается временем  $t$ ,  $U_{\text{нрo}} \geq U_{\text{нc}} / K_t$ , где  $K_t$  – коэффициент, равный отношению допустимого изготовителем повышения напряжения в течении времени  $t$  к наибольшему длительно допустимому рабочему напряжению ОПН. Способ определения  $K_t$  указан в [2, 4, 8].

Дополнительно в [2] проводится уточнение наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН при однофазных дуговых замыканиях на землю и при наличии в сети квазистационарных перенапряжений.

Для классов напряжения 6-35 кВ согласно [5] следует выбирать ОПН с напряжением  $U_{\text{нрo}}$  не менее, чем на 5% больше наибольшего уровня напряжения сети  $U_{\text{нc}}$  (линейное напряжение).

Согласно [6] длительно допустимое рабочее напряжение ОПН 6-35 кВ определяется по формуле:

$$U_{\text{нрo}} \geq \frac{K_0 \cdot U_{\text{нc}}}{T(t)}, \quad (1)$$

где  $K_0$  – коэффициент, который в зависимости от особенностей электрической сети и условий её работы может принимать значения от 1 до 1,1;

$T(t)$  – кратность, характеризующая способность ОПН выдерживать повышения напряжения частотой 50 Гц и длительностью  $t$ .

Точные значения величин  $K_0$ ,  $T(t)$  и способы их нахождения определены в [6].

Для классов напряжения 110-750 кВ согласно [3] во всех случаях для повышения надежности выбирают ОПН с фазным напряжением  $U_{\text{нрo}}$  не менее, чем на 2-5% больше наибольшего уровня напряжения сети  $U_{\text{нc}}$  (фазное напряжение). При возможности устойчивого существования высших гармоник методические указания РАО ЕЭС [3] и стандарт [1] по выбору ОПН 110-750 кВ рекомендуют поступать следующим образом [1, 3]:

– если измерены амплитуды напряжений основной частоты и гармоники, то наибольший уровень напряжения сети в месте установки ОПН в нормальном режиме принимают равным их сумме [3];

– если амплитуда гармоники неизвестна, то наибольший уровень напряжения сети в месте установки ОПН в нормальном режиме принимают равным [1, 3]:

$$U_{\text{нрo}} \geq \frac{1,1 \cdot U_{\text{нc}}}{\sqrt{3}}. \quad (2)$$

В [1] введен коэффициент уровня длительно допустимого напряжения ОПН, который зависит от предельной длины присоединенной линии и составляет:

\* 1,05 – при максимальной длине присоединенной к подстанции линии, меньшей половины предельной для классов напряжения 110-330 кВ;

\* 1,1 – при максимальной длине присоединенной к подстанции линии, большей или равной половине предельной для классов напряжения 110-330 кВ;

\* 1,05 – для классов напряжения 500-750 кВ.

Длины предельных линий для Украины указаны в [1] на основании существующих данных НЭК “Укрэнерго”.

В электрических сетях западных стран, которые характеризуются значительно более высокими показателями качества электрической энергии,  $U_{\text{про}}$  рекомендуется определять по формуле [5, 7]:

$$U_{\text{про}} \geq \frac{1,05 \cdot U_{\text{нс}}}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

В некоторых других методиках длительно допустимое рабочее напряжение ОПН определяется равным или большим (не уточнено насколько) наибольшего рабочего напряжения сети, см. например [9].

Важным является увеличение наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН в схемах с разземлением нейтрали. Так, в [1] указано, что для классов напряжения 110-220 кВ в режиме, когда на ОРУ часть трансформаторов работает с разземленной нейтралью, коэффициент уровня длительно допустимого рабочего напряжения ОПН составляет 1,1.

Если уровень  $U_{\text{про}}$  в результате выбора ОПН был принят недостаточным, это приведет к потере его тепловой устойчивости и аварийному повреждению.

### Выбор ОПН по коммутационным перенапряжениям.

Следующим критерием выбора ОПН является его надежная работа при коммутационных перенапряжениях. При выборе должно быть рассмотрено согласование остающихся напряжений при коммутационных импульсах с нормируемыми испытательными напряжениями. Так, в методических указаниях РАО ЕЭС [3] для определения остающегося напряжения ОПН 110-750 кВ также используется соотношение испытательного и остающегося напряжений коммутационного импульсов, которое характеризуется коэффициентом 1,15–1,2, а для оборудования со сроком эксплуатации свыше 10 лет – коэффициентом 1,3-1,4. В случае невыполнения этого условия необходимо выбирать ОПН с тем же значением  $U_{\text{про}}$ , но большего класса энергоемкости, поскольку с увеличением энергоемкости для одинаковых номинальных напряжений уровень остающегося напряжения снижается.

Испытательное напряжение коммутационным импульсом нормируется ГОСТ 1516.3 [12] для электрооборудования 330 кВ и выше. Для классов напряжения 110-220 кВ согласно [3] при расчете некоторого эффективного испытательного напряжения коммутационного импульса следует руководствоваться формулой:

$$U_{\text{ки}} = \sqrt{2} \cdot 1,35 \cdot 0,9 \cdot U_{\text{исп}50}, \quad (4)$$

где  $U_{\text{исп}50}$  – одноминутное испытательное напряжение промышленной частоты 50 Гц;

коэффициенты 1,35 и 0,9 – коэффициент импульса, учитывающий упрочнение изоляции при более коротком по сравнению с испытательным импульсе, и коэффициент кумулятивности, учитывающий многократность воздействия перенапряжений и возможное старение изоляции соответственно.

В рекомендациях [1] соотношение испытательного и остающегося напряжений коммутационных импульсов приводится только для классов 330-750 кВ и характеризуется коэффициентом 1,15. Следует отметить, что значения испытательных напряжений коммутационным импульсом в [1] принимаются для уровня  $a$  по ГОСТ 1516.3 [12].

В рекомендациях [4] указано, что значение остающегося напряжения на ОПН 6-35 кВ при расчетном токе коммутационных перенапряжений должно быть не более выдерживаемого напряжения изоляцией защищаемого электрооборудования. Выдерживаемое напряжение изоляцией коммутационных импульсов определяется по формуле (4), в которой для изоляции силовых трансформаторов коэффициент импульса и коэффициент кумулятивности составляют 1,35 и 0,9 соответственно, а для изоляции аппаратов – 1,1 и 1,0 соответственно. В [2] защитный уровень ОПН при коммутационных перенапряжениях (согласно [2, 4] это остающееся напряжение на ограничителе при расчетном токе коммутационных перенапряжений) определяется также по формуле (4), только коэффициенты импульса и кумулятивности составляют: для изоляции силовых трансформаторов – 1,3 и 0,85 соответственно; для изоляции аппаратов – 1,1 и 0,9 соответственно. Для сетей 35 кВ в [2] дополнительно учитывается координационный защитный интервал (соотношение защитного уровня изоляции и остающегося напряжения), который при коммутационных перенапряжениях характеризуется коэффициентом 1,15.

При рассмотрении коммутационных перенапряжений необходимо также выполнить проверку выбираемых ОПН к поглощению (рассеиванию) энергии. Стандарт МЭК [5] рекомендует 2 вида проверки ОПН по поглощению энергии коммутационных перенапряжений. Первая из них соответствует

проверке ОПН по разряду присоединённой линии, заряд которой сохранился, например, в результате АПВ. Энергия, которая поглощается ОПН, рассчитывается в этом случае по формуле:

$$W = 2U_{ps} (U_e - U_{ps}) \frac{T_w}{Z}, \quad (5)$$

где  $U_{ps}$  – остающееся напряжение при коммутационном импульсе;

$U_e$  – амплитуда перенапряжения;

$Z$  – волновое сопротивление линии;

$T_w$  – время прохождения волны перенапряжения по линии.

В [7, 9] в формулу (5) дополнительно вводится множитель 3 (для учета, например, маловероятного, но возможного трехкратного срабатывания АПВ), в [1] в формулу (5) дополнительно вводится множитель 2 (для учета возможного двукратного срабатывания АПВ).

Для унификации процедуры определения поглощаемой энергии от разряда линии МЭК вводит понятие класса разряда линии соответственно номинальному линейному напряжению.

В случае использования в сетях батарей конденсаторов ёмкостью  $C$  стандарт МЭК [5] рекомендует проводить дополнительную проверку по энергоёмкости  $W$ , которая находится по формуле:

$$W = \frac{1}{2} C [(3U_0)^2 - (\sqrt{2} U_r)^2], \quad (6)$$

где  $U_0$  – амплитуда наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения фаза-земля;

$U_r$  – номинальное напряжение ОПН.

Подобные требования к оценке энергоёмкости ОПН приведены в [6, 7, 9, 10,]. В методических указаниях РАО ЕЭС [3] формула (5) не приводится, а формула (6) приведена с грубой ошибкой.

В [2, 4] расчет энергоёмкости ОПН 6-35 кВ рекомендуют проводить при дуговых перенапряжениях однофазного замыкания на землю. Выбор величины максимального тока пропускной способности ОПН определяется в зависимости от величины емкостного тока замыкания на землю и режима работы сети.

#### **Выбор ОПН по грозovým перенапряжениям.**

Основой для определения грозových перенапряжений является выбор номинального разрядного тока грозовой формы 8/20 мкс. Согласно рекомендациям МЭК [5] максимальная амплитуда тока для диапазона номинальных линейных напряжений меньше 142 кВ составляет 5кА; меньше 360 кВ – 10 кА; более 360 кВ – 20 кА. В методических указаниях РАО ЕЭС [3] сохранились ранее принятые в СССР уровни номинального разрядного тока 5-10 кА.

Согласно рекомендациям [2, 4, 6] при установке ОПН 6-35 кВ для защиты от грозových перенапряжений его номинальный разрядный ток принимают равным 10 кА в случаях: грозовой активности больше 50 грозочасов в год; в сетях с ВЛ на деревянных опорах; в схемах грозозащиты двигателей и генераторов, присоединенных к ВЛ; в районах со степенью загрязнённости атмосферы IV (по ГОСТ 9920), а также при установке ОПН на расстоянии меньше 1000 м от моря. В остальных случаях принимается разрядный ток 5 кА.

Одним из параметров, характеризующих работу ОПН при грозových перенапряжениях, является его остающееся напряжение при грозовом импульсе тока с формой волны – 8/20 мкс и нормируемыми амплитудами –5, 10, 20 кА в зависимости от класса напряжения ограничителя.

Проверка остающегося напряжения выбранного ОПН 6-35 кВ в [6] производится, исходя из условий соответствия, то есть она должна быть меньше или равна остающемуся напряжению вентильного разрядника. В [2, 4] указано, что остающееся напряжение ОПН при грозových перенапряжениях должно быть не выше остающегося напряжения вентильного разрядника группы III или группы IV. Для сетей 35 кВ в [2] дополнительно учитывается координационный защитный интервал (соотношение защитного уровня изоляции и остающегося напряжения), который при грозových перенапряжениях характеризуется коэффициентом 1,3.

В методических рекомендациях [7] для выбора ОПН 110-750 кВ по грозovým перенапряжениям используется соотношение испытательных и остающихся напряжений грозового импульса, определенное коэффициентом 1,15.

В стандарте [1] остающееся напряжение ОПН при грозовых перенапряжениях определялся по двум критериям:

1. Остающееся напряжение на ОПН при грозовом импульсе должно быть меньше 90% остающегося напряжения заменяемого РВ при таком же импульсе [11];
2. Соотношение испытательных и остающихся напряжений при грозовых импульсах характеризуется коэффициентом 1,4 – для классов напряжения 110-500 кВ; 1,3 – для класса напряжения 750 кВ.

В качестве допустимого остающегося напряжения на ОПН при грозовом импульсе принимается меньшее из рассчитанных двух величин.

В международном стандарте МЭК [5] предлагается оценить энергию, которая поглощается ОПН при грозовых перенапряжениях, по формуле:

$$W = [2U_f - NU_{pl} (1 + \ln(2U_f / U_{pl}))] \frac{U_{pl} T_l}{Z}, \quad (7)$$

где  $U_{pl}$  – остающееся напряжение на ОПН при грозовом импульсе;

$U_f$  – напряжение перекрытия линейной изоляции отрицательной полярности;

$Z$  – волновое сопротивление линии;

$N$  – количество линий, присоединенных к ОПН;

$T_l$  – длительность тока при ударе молнии, учитывая первый и последующие удары.

В стандарте [1] формула (7) применена для случая подключения одной линии (наиболее тяжелый вариант – тупиковая подстанция).

Вторым аспектом при выборе ОПН по грозовым перенапряжениям является определение допустимого расстояния установки ОПН до защищаемого оборудования.

Для защиты от грозовых перенапряжений электрооборудования 35-750 кВ [3] и [11] требуется определять допустимое расстояние от ОПН до защищаемого электрооборудования по формуле:

$$L_{ОПН} = \frac{L_{РВ} \cdot (U_{исп} - U_{ОПН})}{U_{исп} - U_{РВ}}, \quad (8)$$

где  $L_{ОПН}$  – расстояние от ОПН до защищаемого электрооборудования;

$L_{РВ}$  – расстояние от разрядника до защищаемого электрооборудования;

$U_{исп}$  – испытательное напряжение защищаемого оборудования при полном грозовом импульсе;

$U_{ОПН}$ ,  $U_{РВ}$  – остающееся напряжение на ОПН (РВ) при грозовом токе 5 кА – для классов напряжения 110-220 кВ; 10 кА – для классов напряжения 330 кВ и выше.

Стандарт [1] также использует формулу (8), но только для случая определения допустимого расстояния от ОПН до защищаемого оборудования, если изоляция оборудования соответствует уровню *b* (защита с помощью РВ) согласно ГОСТ 1516.3 [12]. В случае использования на ОРУ 330-750 кВ электрооборудования с уровнем изоляции *a* (защита с помощью ОПН), допустимое расстояние рекомендуется рассчитывать по формуле:

$$L_{ОПН} = \frac{L_{РВ} \cdot (U'_{исп} - U_{ОПН})}{U_{исп} - U_{РВ}}, \quad (9)$$

где  $U'_{исп}$  – испытательное напряжение защищаемого оборудования с уровнем изоляции *a* согласно ГОСТ 1516.3 [12];

$U_{исп}$  – испытательное напряжение защищаемого оборудования с уровнем изоляции *b* согласно ГОСТ 1516.3 [12].

Таким образом, в стандарте [1] впервые вводится наибольшее защитное расстояние от ОПН до электрооборудования классов напряжения 330-750 кВ с уровнем изоляции *a*.

В [2] при определении допустимого расстояния от ОПН 6-35 кВ до электрооборудования должны быть рассмотрены 4 случая:

- 1) замена РВ на ОПН при реконструкции;
- 2) замена ОПН на ОПН с другим остающимся напряжением при реконструкции;
- 3) проектирование новых подстанций по типовым проектам;

4) проектирование новой подстанции, которая по схеме и расстановке электрооборудования не отвечает типовым проектам.

В случаях 1) и 3) необходимо руководствоваться рекомендациями ПУЭ [11].

В случае 2) допустимое расстояние должно быть уточнено с использованием выражения:

$$\Delta L \leq \frac{0,7 \times (U_{\text{ост.1}} - U_{\text{ост.2}}) \times V}{2 \times a}, \quad (10)$$

где  $\Delta L$  – разница между расстояниями до защищаемого электрооборудования от ОПН1, который заменяется, и ОПН2, который устанавливается;

$U_{\text{ост.1}}$  – остающееся напряжение на ОПН1;

$U_{\text{ост.2}}$  – остающееся напряжение на ОПН2;

$V$  – скорость распространения электромагнитной волны;

$a$  – средняя крутизна грозových волн.

В случае 4) необходимо выполнять специальные расчеты молниезащиты подстанции, которые позволят определить места установки ОПН.

#### Выбор ОПН по условиям взрывобезопасности.

При выборе ОПН по условиям взрывобезопасности нормируется величина тока срабатывания противовзрывного устройства, при которой не происходит взрывного разрушения покрышки ОПН при его внутреннем повреждении. Так, по [3] при выборе ограничителей 110-750 кВ с токами срабатывания противовзрывного устройства до 40 кА, его значение должно быть на 15-20% больше значения тока (однофазного или трехфазного) короткого замыкания. Для ОПН с токами срабатывания противовзрывного устройства свыше 40 кА и оговоренным в ТУ поведением покрышки при горении вдоль ее поверхности дуги введение коэффициента запаса не требуется.

В [5, 7, 9] сказано, что выбор ОПН по условиям взрывобезопасности должен обеспечивать гарантию отсутствия взрывного разрушения ОПН при протекании в середине его корпуса токов короткого замыкания.

В [1] дополнительно к требованиям [3] по взрывобезопасности приводятся требования к ОПН в зависимости от его конструкции согласно МЭК 60099-4 [13]. Так, для ОПН “конструкции А” нормируют значения тока срабатывания противовзрывного устройства, при котором не возникает взрывного разрушения покрышки ОПН в случае его внутреннего повреждения. Для ОПН “конструкции Б” определенный фирмой-производителем максимальный выдерживаемый ОПН ток короткого замыкания должен быть больше величины максимального тока короткого замыкания на ОРУ, для которого выбирается ОПН.

Ток срабатывания устройства сброса давления ОПН 6-35 кВ, согласно [2, 4], выбирают не менее, чем на 10% больше значения двухфазного или трехфазного (большого из них) тока короткого замыкания в месте установки ОПН.

#### Выбор ОПН по механическим характеристикам.

Согласно [1, 2] ОПН 110-750 кВ опорного исполнения категории размещения 1 должны выдерживать механические нагрузки при гололеде с толщиной стенки льда до 20 мм и ветре со скоростью 15 м/с, а без гололеда – со скоростью 30 м/с (по желанию заказчика со скоростью ветра 40 м/с) и при натяжении проводов в горизонтальном направлении согласно ГОСТ 16357 [14]. В [1] нагрузки от тяжения проводов взяты как для вновь разрабатываемых разрядников по [14], а в [2] – как для разрядников категории размещения I, разрабатываемых до 1983 года согласно [14].

Расчет изгибающего момента ОПН 110-750 кВ от силы ветра и натяжения проводов проводят по формуле [1, 13]:

$$M = \frac{1,29}{2} \cdot V^2 \cdot H \cdot (d_m + 2 \cdot d_{\text{тол}}) \cdot 0,8 \cdot \frac{H}{2} + H \cdot P_{\text{пр}}, \quad (11)$$

где  $V$  – скорость ветра;

$H$  – высота ОПН;

$P_{\text{пр}}$  – сила натяжения проводов;

$d_m$  – внешний диаметр изоляционной части ограничителя;

$d_{\text{тол}}$  – толщина стенки льда.

Согласно [6] ОПН 6-35 кВ должны выдерживать механические нагрузки в соответствии с ГОСТ 16357 [14]. Аналогичные требования в [2], однако при отсутствии гололеда скорость ветра увеличена до 40 м/с.

Согласно [1] определяется сейсмостойкость ОПН 110-750 кВ по шкале MSK-64 в зависимости от областей Украины и изменяется от 6 (например, Киевская область) до 9 (например, АР Крым) баллов.

Согласно [2] при установке ОПН 110-750 кВ в зонах с повышенной сейсмической опасностью (выше 7 баллов по MSK-64) необходимо обратиться к производителю ОПН для выбора наиболее подходящей конструкции ОПН.

#### Выводы.

1. В Украине разработаны методики выбора и применения ОПН 6-750 кВ, благодаря которым возможен выбор ограничителей для замены разрядников на подстанциях, а также для вновь проектируемых подстанций, непосредственно проектными организациями, не прибегая к помощи производителей.

2. Для дальнейшего развития методик выбора ОПН необходимо переходить к статистическим методам расчетов и выработке норм вероятностей допустимой эффективности защиты от перенапряжений.

3. Для развития теоретических исследований в области перенапряжений необходима разработка новых математических моделей, учитывающих значительную нелинейность ОПН и других средств защиты.

#### Литература

1. СОУ-Н ЕЕ 40.12-00100227-47:2011 Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 110-750 кВ. Настанова щодо вибору та застосування
2. СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-67:2012 Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35 кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках
3. Методические указания по применению ограничителей перенапряжений в электрических сетях 110–750 кВ. Утверждены Департаментом стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России» 30.09.1999. — М.: «С.ПРИНТ», 2000. — 68 с.
4. Методические указания по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 6-35 кВ. Утверждены Департаментом стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России» 27.04.2001. — М.: «С.ПРИНТ», 2001. — 73 с.
5. МЭК 60099-5:2000 Разрядники для защиты от перенапряжений. Часть 5. Рекомендации по выбору и применению.
6. Методичні вказівки з вибору обмежувачів перенапруг нелінійних виробництва підприємства «Таврида Електрик Україна» для електричних мереж 6-35 кВ. Затверджено наказом Державного департаменту електроенергетики Мінпаливенерго України від 02.08.2001 № 4. — Севастополь: НВЦ «СКОСІ-Гідрофізика», 2002. — 40 с.
7. Хинрихсен Фолькер. Siemens. Металлоксидные ограничители. Основы. — АО «Сименс», 2000. — 111 с.
8. Выбор, испытание и применение металлоксидных ограничителей перенапряжений в сетях среднего напряжения. — Киев: Представительство АББ Украина. — 52 с.
9. Exlim. Техническая информация. Руководство по выбору высоковольтных ограничителей перенапряжений производства фирмы АББ. — ЗАО АББ УЭТМ, 1996. — 24 с.
10. Характеристики, выбор и размещение ограничителей перенапряжений (110-220) кВ: Учебное пособие / Г. М. Иманов, Ф. Х. Халилов, А. И. Таджикибаев. — Санкт-Петербург: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1997 — 42 с.
11. Правила устройства электроустановок. 3-е изд., перераб. и доп. — Х.: Изд-во «Форт», 2010.
12. ГОСТ 1516.3-96 «Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции». Введен в действие в качестве государственного стандарта Украины приказом Госстандарта Украины от 12.03.1999 № 104 с 2000-01-01. — Киев: Госстандарт, 2000. — 50 с..
13. МЭК 60099-4 (2009) Разрядники для защиты от перенапряжений. Часть 4. Оксидно-металлические разрядники без искровых промежутков для защиты от перенапряжений в системах переменного тока.
14. ГОСТ 16357–83 Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия