

УДК 621.3.05

**С.Ю. Шевченко**, канд. техн. наук

**О.М. Довгалюк**, канд. техн. наук

**О.Є. Піротті**, канд. техн. наук

НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГИ В МЕРЕЖАХ 6-35 КВ

**С.Ю. Шевченко**, канд. техн. наук

**О.Н. Довгалюк**, канд. техн. наук

**А.Е. Піротті**, канд. техн. наук

НТУ «ХПІ», г. Харьков, Украина

## ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ 6-35 КВ

**S.Y. Shevchenko**, Candidate of Technical Sciences

**O.N. Dovgalyuk**, Candidate of Technical Sciences

**A.Ye. Pirotti**, Candidate of Technical Sciences

NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine

## PECULIARITIES THE CHOICE OF SURGE ARRESTERS IN NETWORKS 6-35 KV

*Розглянуто основні вимоги до вибору обмежувачів перенапруги в мережах 6-35 кВ за такими характеристиками: найбільша робоча напруга, номінальний розрядний струм, питома енергоємність, залишкові напруги для захисту від комутаційних та грозових перенапруг, місце встановлення обмежувача перенапруги та забезпечення умов вибухобезпечності.*

**Ключові слова:** обмежувач перенапруги, електрична мережа, найбільша робоча напруга, залишкова напруга.

*Рассмотрены основные требования к выбору ограничителей перенапряжения в сетях 6-35 кВ по таким характеристикам: наибольшее рабочее напряжение, номинальный разрядный ток, удельная энергоёмкость, остающиеся напряжения для защиты от коммутационных и грозовых перенапряжений, место установки ограничителя перенапряжения и обеспечение условий взрывобезопасности.*

**Ключевые слова:** ограничитель перенапряжения, электрическая сеть, наибольшее рабочее напряжение, остающееся напряжение.

*The main requirements are considered for the selection of surge arresters in networks 6-35 kV for such characteristics: continuous operating voltage, the nominal discharge current, energy intensity, impulse residual voltage to protect against commutation and lightning surges, place of setting a surge arrester and to provide conditions explosion safety.*

**Key words:** surge arrester, electric network, continuous operating voltage, impulse residual voltage.

**Постановка проблеми.** Розподільні електричні мережі напругою 6-35 кВ охоплюють значну територію України, мають складну розгалужену структуру і виконують функції розподілу та передавання електроенергії безпосередньо до споживачів. Пошкодження у розподільчих мережах призводять до збитків, пов'язаних з перервами в електропостачанні споживачів. Однією з причин таких пошкоджень є грозові або комутаційні перенапруги, які спричиняють вихід з ладу ізоляторів, опор, проводів, мережевого устаткування, призводять до замикань на землю, дугових перенапруг та автоматичних вимкнень ліній. Таким чином, надійність електропостачання споживачів значною мірою залежить від ефективності грозозахисних заходів.

Основним видом захисних апаратів, що застосовуються в мережах 6-35 кВ, є обмежувачі перенапруги (ОПН). На сьогодні багато питань, пов'язаних з вибором та експлуатацією ОПН, не знаходять достатнього відображення в нормативних документах. При виборі ОПН необхідно враховувати технічні характеристики ОПН, параметри мережі та захищуваного обладнання. Коректний вибір ОПН забезпечує їх правильну експлуатацію і, як наслідок, сприяє підвищенню надійності захисту електроустановок та електрообладнання від грозових та комутаційних перенапруг.

Таким чином, аналіз вимог до вибору та експлуатації ОПН, особливостей їх функціонування при захисті обладнання електричної мережі від перенапруг є дуже важливим завданням, що має практичний інтерес для енергетики.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням проблем у галузі захисту електричних мереж та обладнання від перенапруг приділяється багато уваги, оскільки вирішення цих питань нерозривно пов'язане з надійною експлуатацією коштовного обладнання електричних мереж, розвитком наукових підходів до вибору захисних апаратів [1; 2]. Розроблено значну кількість методик та нормативних документів щодо вибору та експлуатації ОПН [3-5]. Слід зазначити, що на сьогодні в Україні для електричних мереж 6-35 кВ виробництво і застосування ОПН регламентується документами [6], у той час як міжнародною електротехнічною комісією (МЕК) затверджено стандарт МЭК 60099-5 [7], а розробки виробників ОПН регламентують умови відповідно до [8-10].

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Аналіз досліджень і публікацій показав, що досі немає єдиного підходу до вирішення проблеми вибору типу захисних апаратів та методик погодження їх характеристик для забезпечення надійного захисту мереж та електричного обладнання від перенапруг.

**Мета статті.** Головною метою цієї роботи є аналіз особливостей вибору обмежувачів перенапруги для надійного захисту обладнання від грозових і комутаційних перенапруг в електричних мережах 6-35 кВ.

**Виклад основного матеріалу.** Вибір ОПН здійснюється у випадках проектування нових об'єктів електроенергетики, реконструкції існуючих та в разі заміни вентиляльних розрядників на ОПН у діючих розподільчих установках.

Для коректного вибору ОПН необхідно вирішити такі головні завдання:

– ОПН має обмежувати комутаційні та грозові перенапруги до значень, за яких буде забезпечено надійну роботу ізоляції захищеного електрообладнання протягом всього терміну служби ОПН;

– ОПН має надійно працювати без руйнування та зниження параметрів під час неперервного впливу тривалих робочих напруг, тимчасових підвищень напруг у робочих режимах, а також квазістаціонарних (усталених) перенапруг в умовах робочих і аварійних комутацій;

– ОПН повинен бути вибухобезпечний при протіканні струмів короткого замикання (КЗ) у результаті внутрішніх пошкоджень;

– ОПН повинен відповідати механічним та кліматичним умовам експлуатації.

Для вирішення цих завдань необхідно виконати [6]:

а) вибір найбільшої робочої напруги ОПН ( $U_{нро}$ );

б) уточнення вибору  $U_{нро}$ , якщо в мережі можливі тривалі підвищення напруги понад нормоване значення найбільшої робочої напруги мережі;

в) вибір номінального розрядного струму ( $I_n$ );

г) вибір питомої енергоємності ( $W_{пит}$ ) і струму пропускної здатності ОПН ( $I_{2000}$ );

д) вибір залишкових напруг ОПН для захисту від комутаційних та грозових перенапруг;

е) вибір ОПН за умовами забезпечення вибухобезпечності;

є) вибір ОПН залежно від умов експлуатації;

ж) вибір місця встановлення ОПН.

Електричні мережі України 6-35 кВ працюють з ізольованою нейтраллю або з компенсацією ємнісного струму на землю і не містять обертових машин, тому умови роботи ОПН у цих мережах відрізняються від умов роботи в мережах 110-750 кВ великими величинами і тривалостями комутаційних і квазістаціонарних перенапруг. Це впливає на методики вибору основних характеристик ОПН та експлуатацію захисних апаратів у таких мережах.

Надійність роботи захисних апаратів забезпечується коректним узгодженням характеристик встановлюваних ОПН з експлуатаційними впливами на ці апарати. Виходячи з цих умов, при виборі ОПН важливо звернути увагу на такі фактори.

Основною характеристикою ОПН є найбільша тривало допустима робоча напруга ОПН  $U_{нро}$ . Це найбільше діюче значення діючої напруги промислової частоти, яку можна підводити до виводів ОПН упродовж усього терміну його служби і яка не призводить до пошкодження або термічної нестійкості ОПН за нормованих дій [6].

Основою для вибору цієї напруги є найбільша робоча (лінійна) напруга в електричній мережі  $U_{нрм}$ .

У вказівках [4; 6; 10] вибір найбільшої тривало допустимої напруги ОПН 6-35 кВ здійснюється, виходячи з умов тривалості існування однофазного замикання на землю:

– у мережах, що допускають необмежено тривале існування стійкого металевого однофазного замикання на землю, згідно з ГОСТ 1516.3  $U_{нро} \geq U_{нрм}$ ;

– у мережах, де тривалість однофазного замикання на землю обмежується часом  $t$ ,  $U_{нро} \geq \frac{U_{нрм}}{K_t}$ , де  $K_t$  – коефіцієнт, що визначається як відношення підвищення напруги в період часу  $t$ , яке допускається виробником, до найбільшої тривало допустимої робочої напруги ОПН. Спосіб визначення  $K_t$  вказано в [4; 6; 10].

Додатково в [6] проводиться уточнення найбільшої тривало допустимої робочої напруги ОПН при однофазних дугових замиканнях на землю і за наявності в мережі квазістаціонарних перенапруг.

Крім того, для класів напруги 6-35 кВ згідно з [7] слід вибирати ОПН з напругою  $U_{нро}$  не менше ніж на 5 % більше за найбільший рівень напруги мережі  $U_{нрм}$ .

Згідно з [7; 9] тривало допустима робоча напруга ОПН 6-35 кВ визначається за формулою:

$$U_{нро} \geq \frac{K_0 \cdot U_{нрм}}{K(t)}, \quad (1)$$

де  $K_0$  – коефіцієнт, який залежно від особливостей електричної мережі та умов її роботи може набувати значень від 1 до 1,1;  $K(t)$  – кратність, що характеризує здатність ОПН витримувати підвищення напруги частотою 50 Гц і тривалістю  $t$ . Точні значення величин  $K_0$ ,  $K(t)$  визначають за допустимим для зазначеного випадку часом однофазного замикання на землю відповідно до залежності «напруга-час» [6; 8].

Якщо рівень  $U_{нро}$  в результаті вибору ОПН був прийнятий недостатнім, це призведе до втрати його теплової стійкості та аварійного пошкодження.

Номинальний розрядний струм  $I_n$  – це максимальне (амплітудне) значення грозового імпульсу струму форми 8/20 мкс. Вибір  $I_n$  проводять у разі встановлення ОПН для захисту від грозових і комутаційних перенапруг для нормальної ізоляції.

Згідно з рекомендаціями МЕК [7] максимальна амплітуда струму для діапазону номінальної лінійної напруги менше 142 кВ становить 5 кА; менше 360 кВ – 10 кА; більше 360 кВ – 20 кА.

Згідно з рекомендаціями [4; 6; 10] при встановленні ОПН 6-35 кВ для захисту від грозових перенапруг його номінальний розрядний струм приймають рівним 10 кА у випадках: грозової активності більше 50 грозових годин на рік; у мережах з повітряними лініями (ПЛ) на дерев'яних опорах; у схемах грозозахисту двигунів і генераторів, приєднаних до ПЛ; у районах з мірою забрудненості атмосфери IV (відповідно до ГОСТ 9920), а також при встановленні ОПН на відстані менше 1000 м від моря. В інших випадках приймається розрядний струм 5 кА.

Питома енергоємність ОПН (значення поглинутої енергії без руйнування при протіканні через нього струмів, обумовлених виникненням перенапруг, віднесене до тривало допустимої робочої напруги)  $W_{пит.ОПН}$  визначається за умови:

$$\begin{aligned} W_{\text{пит.ОПН}} &> W_{\text{пит.з}}, \\ W_{\text{пит.ОПН}} &> W_{\text{пит.к}}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $W_{\text{пит.з}}$ ,  $W_{\text{пит.к}}$  – питома енергія, що поглинається ОПН при грозових та комутаційних перенапругах відповідно.

Визначення енергоємності та струму пропускної здатності при виборі ОПН при грозових, комутаційних і дугових перенапругах з урахуванням досвіду експлуатації та чисельних розрахунків представлено у [2; 6].

Для розподільчих установок у мережах 6-35 кВ значення енергоємності ОПН у режимі однофазного дугового замикання на землю, при якому ОПН піддається найбільш важким енергетичним діям, повинне становити не менше ніж 2,1 кДж/кВ, а пропускна здатність ОПН повинна відповідати другому класу і вище (струм пропускної здатності має бути не нижче ніж 401 А).

Забезпечення надійної роботи ізоляції електрообладнання при комутаційних і грозових перенапругах здійснюється за умови дотримання узгодження залишкової напруги при комутаційних та грозових імпульсах з необхідними рівнями захисту ізоляції [6]:

$$\begin{aligned} U_{\text{зал.к}} &\leq U_{\text{зах.к}}, \\ U_{\text{зал.з}} &\leq U_{\text{зах.з}}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $U_{\text{зал.к}}$ ,  $U_{\text{зал.з}}$  – залишкові напруги при комутаційних та грозових імпульсах відповідно, визначені з урахуванням вибраних раніше значень  $U_{\text{нро}}$ ;  $U_{\text{зах.к}}$ ,  $U_{\text{зах.з}}$  – необхідні рівні захисту ізоляції від комутаційних і грозових перенапруг.

У рекомендаціях [4] вказано, що значення залишкової напруги на ОПН 6-35 кВ при розрахунковому струмі комутаційних перенапружень повинно бути не більше напруги, що витримується ізоляцією захищеного електрообладнання. Напруга комутаційних імпульсів, що витримується ізоляцією, визначається за виразом [4; 6]:

$$U_{\text{зах.к}} = \sqrt{2} \cdot K_{\text{имп}} \cdot K_{\text{зносу}} \cdot U_{\text{випробув.}}, \quad (4)$$

де  $K_{\text{имп}}$  – коефіцієнт імпульсу, який враховує зміцнення ізоляції при більш короткому порівняно з випробувальним імпульсом;  $K_{\text{зносу}}$  – коефіцієнт зносу ізоляції в результаті багаторазовості впливу перенапруг і старіння ізоляції. Для ізоляції силових трансформаторів ці коефіцієнти дорівнюють  $K_{\text{имп}} = 1,3$  і  $K_{\text{зносу}} = 0,85$ , а для ізоляції апаратів  $K_{\text{имп}} = 1,1$  і  $K_{\text{зносу}} = 0,9$  [6];  $U_{\text{випробув.}}$  – однохвилинна випробувальна напруга внутрішньої та зовнішньої ізоляції промислової частоти 50 Гц в сухому стані згідно з ГОСТ 1516.3.

Для мереж 35 кВ додатково враховується координаційний захисний інтервал (співвідношення захисного рівня ізоляції і залишкової напруги) [6]:

$$U_{\text{зал.к}} \leq \frac{U_{\text{зах.к}}}{K_{\Delta}}, \quad (5)$$

де  $K_{\Delta}$  – коефіцієнт, який враховує координаційний захисний інтервал  $\Delta U$  (перепад напруги між ОПН та захищуваним об'єктом). При комутаційних перенапругах  $K_{\Delta} = 1,15$ .

Під час розгляду комутаційних перенапруг необхідно також виконати перевірку вибраних ОПН за поглинанням (розсіюванням) енергії. Стандарт МЕК [7] рекомендує 2 види перевірки ОПН за поглинанням енергії комутаційних перенапруг. Перша з них відповідає перевірці ОПН за розрядом приєднаної лінії, заряд якої зберігся, наприклад, у результаті автоматичного повторного включення (АПВ). Енергія, яка поглинається ОПН, розраховується в цьому випадку за формулою:

$$W = 2U_{ps}(U_e - U_{ps})\frac{T_w}{Z}, \quad (6)$$

де  $U_{ps}$  – залишкова напруга при комутаційному імпульсі;  $U_e$  – амплітуда перенапруги;  $Z$  – хвильовий опір лінії;  $T_w$  – час проходження хвилі перенапруги по лінії.

Згідно з [9] у формулу (6) додатково вводиться множник 3 (для урахування, наприклад, маловірогідного, але можливого триразового спрацьовування АПВ).

Для уніфікації процедури визначення енергії, що поглинається, від розряду лінії МЕК вводить поняття класу розряду лінії відповідно до номінальної лінійної напруги.

У разі використання в мережах батарей конденсаторів ємністю  $C$  стандарт МЕК [8] рекомендує проводити додаткову перевірку за енергоємністю  $W$ , яка визначається за формулою:

$$W = \frac{1}{2}C \left[ (3U_o)^2 - (\sqrt{2}U_r)^2 \right], \quad (7)$$

де  $U_o$  – амплітуда найбільшої тривало допустимої робочої напруги фаза-земля;  $U_r$  – номінальна напруга ОПН.

У [4; 6] розрахунок енергоємності ОПН 6-35 кВ рекомендують проводити при дугових перенапругах однофазного замикання на землю. Вибір величини максимального струму пропускної спроможності ОПН визначається залежно від величини ємнісного струму замикання на землю і режиму роботи мережі.

Залишкова напруга при грозовому імпульсі визначається для струму з формою хвилі 8/20 мкс і нормованими амплітудами – 5, 10, 20 кА залежно від класу напруги обмежувача.

Перевірка залишкової напруги при виборі ОПН 6-35 кВ у [6; 8] проводиться, виходячи з умов відповідності, тобто вона має бути менше або дорівнювати залишковій напрузі вентильного розрядника. У [4; 6] вказано, що для ОПН при грозових перенапругах залишкова напруга повинна бути не вище залишкової напруги вентильного розрядника групи III або групи IV. Для мереж 35 кВ в [6] додатково враховується координаційний захисний інтервал, який при грозових перенапругах характеризується коефіцієнтом 1,3.

У міжнародному стандарті МЕК [7] пропонується оцінити енергію, яка поглинається ОПН при грозових перенапругах, за формулою:

$$W = \left[ 2U_f - NU_{pl} \left( 1 + \ln \frac{2U_f}{U_{pl}} \right) \right] \cdot \frac{U_{pl} \cdot T_l}{Z}, \quad (8)$$

де  $U_{pl}$  – залишкова напруга на ОПН при грозовому імпульсі;  $U_f$  – напруга перекриття лінійної ізоляції негативної полярності;  $Z$  – хвильовий опір лінії;  $N$  – кількість ліній, приєднаних до ОПН;  $T_l$  – тривалість струму при ударі блискавки, враховуючи перший і наступні удари.

Другим аспектом при виборі ОПН за грозовими перенапруженнями є визначення припустимої відстані встановлення ОПН від захищеного електрообладнання.

У [6] при визначенні допустимої відстані від ОПН 6-35 кВ до електроустаткування мають бути розглянуті 4 випадки:

- 1) заміна вентильного розрядника на ОПН при реконструкції;
- 2) заміна ОПН на ОПН з іншою залишковою напругою при реконструкції;
- 3) проектування нових підстанцій за типовими проектами;
- 4) проектування нової підстанції, яка за схемою і розташуванням електроустаткування не відповідає типовим проектам.

У першому та третьому випадках необхідно керуватися рекомендаціями ПУЕ [11].

У другому випадку допустима відстань має бути уточнена з використанням виразу:

$$\Delta L \leq \frac{0,7V(U_{3a11} - U_{3a12})}{2a}, \quad (9)$$

де  $\Delta L$  – різниця між відстанями до захищеного обладнання від ОПН1, який замінюється, і ОПН2, який встановлюється;  $U_{зал1}$  – залишкова напруга на ОПН1;  $U_{зал2}$  – залишкова напруга на ОПН2;  $V$  – швидкість поширення електромагнітної хвилі;  $a$  – середня крутизна грозових хвиль.

У четвертому випадку необхідно виконувати спеціальні розрахунки блискавкозахисту підстанції, які дозволять визначити місця установки ОПН.

При виборі ОПН за умовами вибухобезпечності нормується величина струму спрацьовування противибухового пристрою, при якій не відбувається вибухового руйнування покриття ОПН при його внутрішньому пошкодженні.

У [6; 7; 9] сказано, що вибір ОПН за умовами вибухобезпечності повинен забезпечувати гарантію відсутності вибухового руйнування ОПН при протіканні в середині його корпусу струмів КЗ.

Струм спрацьовування пристрою скидання тиску ОПН 6-35 кВ, згідно з [4; 6], вибирають не менше ніж на 10 % більшим значення двофазного або трифазного (більшого з них) струму короткого замикання в місці установки ОПН.

Згідно з [6; 8] ОПН 6-35 кВ повинні витримувати механічні навантаження при ожеледі з товщиною стінки льоду до 20 мм і вітрі зі швидкістю 15 м/с, а за відсутності ожеледі – зі швидкістю 40 м/с і при тяжінні проводів у горизонтальному напрямі згідно з ГОСТ 16357 [12].

**Висновки і пропозиції.** Затверджені в Україні методики вибору і застосування ОПН 6-35 кВ потребують подальшого розвитку в напрямку узгодженості з вимогами виробників та застосування статистичних методів розрахунку показників роботи ОПН, а також показників надійності захисту обладнання.

За таких умов удосконаленими методиками можливо буде користуватись при обґрунтуванні вибору ОПН без додаткових погоджень, що значно спростить проектувальну роботу.

#### Список використаних джерел

1. *Защита* сетей 6-35 кВ от перенапряжений / Ф. Х. Халилов, Г. А. Едокунин, В. С. Поляков, Г. В. Подпоркин, А. И. Таджибаев. – СПб. : Энергоатомиздат, 2002. – 272 с.
2. *Дмитриев М. В.* Применение ОПН в электрических сетях 6-750 кВ / М. В. Дмитриев. – СПб. : Нива, 2007. – 57 с.
3. *Иманов Г. М.* Методика выбора нелинейных ограничителей, необходимых для защиты изоляции низкого, среднего, высокого и сверхвысокого напряжения трехфазного переменного тока / Г. М. Иманов, Ф. Х. Халилов, А. И. Таджибаев. – СПб. : Изд-во Петербургского энергетического института повышения квалификации руководящих работников и специалистов Минэнерго РФ, 2004. – 32 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. *Режим* доступу : <http://1kv.com.ua/vibor-uc-opn.html>.
6. *СОУ-Н* МEB 40.1-21677681:2012. Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35 кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках. – К. : Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2012. – 50 с.
7. *Стандарт* МЭК 60099-5:2000. Разрядники для защиты от перенапряжений. Часть 5. Рекомендации по выбору и применению.
8. *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.
9. *Фолькер Хинрихсен.* Металлооксидные ограничители. Основы / Фолькер Хинрихсен ; пер. с немецкого под ред. В. П. Вертикова. – СПб. : ООО «Сименс», Департамент РТД, 2000. – 114 с.
10. *Выбор*, испытание и применение металлооксидных ограничителей перенапряжений в сетях среднего напряжения. – К. : Представительство АББ Украина, 1995. – 52 с.