

ЗАХИСТ ВІД ПЕРЕНАПРУГ ЕЛЕКТРОТЯГОВИХ МЕРЕЖ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ: МЕТОДОЛОГІЯ ВИБОРУ ОПН

В статті розглядається методологія вибору обмежувачів перенапруг для тягової мережі постійного струму.

Ключові слова: контактна мережа, перенапряга, обмежувач перенапруг

В статье рассмотрена методология выбора ограничителей перенапряжений для тяговой сети постоянного тока.

Ключевые слова: контактная сеть, перенапряжение, ограничитель перенапряжений

The article is dealt with the selecting methodology of overvoltage arresters for DC traction line.

Keywords: contact line, overvoltage, overvoltage arrester

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Підтримка нормального функціонування тягової мережі в умовах негативних впливів є запорукою забезпечення безперебійного перевізного процесу. Одним з негативних факторів, що впливає на працездатність електрифікованої ділянки, є перенапруги, що виникають в результаті атмосферних явищ та комутаційних процесів. Згідно з аналізом роботи господарства електрифікації та електропостачання Укрзалізниці, за останні роки вплив цих явищ у вигляді пробіїв та перекриття ізоляторів складає від 5 до 17 % у загальній кількості порушень нормальної роботи ізоляторів контактної мережі (КМ) постійного струму. Найбільш важкими пошкодженнями є перекриття з наступним руйнуванням врізних та ізоляторів анкеровок, що призводить до значних затримок руху поїздів.

Типовими причинами комутаційних перенапруг є планові й аварійні відключення і включення ліній, трансформаторів та інших елементів мережі, а також розмикання ушкоджених фаз. До комутаційних перенапруг можна віднести високовольтні коливання в ланцюзі при природному гасінні дуги, що виникає при перекритті зовнішньої ізоляції або іскрових проміжків. Тривалість перенапруг визначається швидкістю релейного захисту або оперативністю обслуговуючого персоналу. Незначне, але довготривале стаціонарне перевищення напруги над робочою може підтримуватися за технологічної необхідності, за необхідності передачі понаднормованої потужності, для забезпечення необхідного рівня напруги у віддалених точках мережі при неномінальних навантаженнях.

Найбільший рівень внутрішніх перенапруг звичайно перебуває в межах 2,5...3,5-кратної величини найбільшої робочої напруги. Тривалість таких перенапруг може досягати 0,05...0,1 с і більше. Рівні ізоляції контактної мережі значно вище величин комутаційних перенапруг, тому останні не можуть викликати відмови роботи лінії. Однак через велику тривалість їхнього існування комутаційні перенапруги є серйозною загрозою для ізоляції підстанційного електроустаткування, електричних апаратів і електричних машин рухомого складу [1].

Перекриття ізоляції в контактній мережі, які спричиняють її відключення, викликають атмосферні перенапруги. Джерелом атмосферних перенапруг є розряди блискавки в елементи мережі: прямі удари блискавки в мережу, її опори або поблизу їх, за яких у мережі виникають індуквані перенапруги. Струми блискавки мають малу тривалість (1...100 мкс), але їхня амплітуда може досягати і навіть перевищувати 100 кА. Частота струмів блискавки з різною амплітудою і крутістю представлена в табл. 1 і 2.

Число атмосферних перенапруг визначається грозовою активністю в розглядуваному регіоні, тобто кількістю грозових годин t , або грозових днів T , протягом року або загальною річною тривалістю гроз у годинах. Ці параметри співвідносяться як:

$$t = 0,72T^{1,3} \quad (1)$$

Для оцінки кількості прямих ударів блискавки у контактну мережу запропоновано два близькі у своїй основі співвідношення:

Таблиця 1

Розподіл амплітуди струмів блискавки

I_b , кА	10	20	30	40	50	60	80	120	150	180	200
Імовірність	0,95	0,7	0,5	0,35	0,25	0,18	0,09	0,028	0,015	0,008	0,005

Таблиця 2

Розподіл крутості фронту струму блискавки

$K_{i,b}$, кА/мкс	9,0	15	25	40	65
Імовірність	0,95	0,75	0,50	0,20	0,05

$$N_{пуб} = nblT; \quad (2) \quad \text{ступними співвідношеннями:}$$

$$N_{пуб} = (4 \div 6)hlt \times 10^{-4}, \quad (3)$$

$$N_{инд} = \frac{562k_0h}{U_i} \exp\left(-\frac{U_i}{360k_0}\right); \quad (4)$$

$$N_{инд} = \frac{9,36th}{U_i} \exp\left(-\frac{U_i}{260}\right), \quad (5)$$

де: n – середнє число розрядів блискавки в землю на 1 км^2 її поверхні, віднесенє до одного грозового дня, для $T = 20$ і $l = 100$ км приймається $n = 0,07 \dots 0,09$;

$b = (8 \dots 10)h$ – розрахункова ширина смуги землі під контактною мережею, м;

h – середня висота підвіски проводів, прийнята рівною 7,5 м;

l – довжина мережі, км.

В Україні середнє число грозових годин протягом року становить 60...80. У Луганській, Харківській областях, північній частині Донецької, східній частині Дніпропетровської області ця величина дорівнює 80...100 годин, в Івано-Франківській і Київській областях кількість грозових годин у році найбільша і може перевищувати 100 годин у рік. У Львівській, Хмельницькій і Вінницькій областях число грозових годин досягає також 80...100 одиниць.

На графіках рис. 1 наведено число прогнозованих прямих ударів блискавки в елементи контактної мережі залежно від інтенсивності гроз, характерної для території України.

Приблизне число індукованих перенапруг в рік, $N_{инд}$, на 100 км лінії можна одержати за на-

де: $k_0 = 0,4 \dots 1$ – коефіцієнт, що залежить від швидкості зворотного розряду блискавки;

U_i – амплітуда індукованої напруги, кВ;

Графічне представлення прогнозованого числа індукованих при грозах перенапруг з різною амплітудою наведено на рис. 2.

З огляду на статистичний розкид інтенсивності грозової діяльності можна говорити про порівнянність прогнозованої кількості атмосферних перенапруг у контактній мережі, обчисленої за різними формулами. Слід зазначити, що в контактній мережі число індукованих перенапруг істотно більше, ніж кількість прямих ударів блискавки для малих $U_i \leq 35$ кВ. Остання обставина має істотне значення для мережі постійного струму.

У табл. 3 виділено кількість індукованих перенапруг для амплітуд напруг, що представляють практичний інтерес. Там же наведено кількість можливих прямих ударів блискавки.

Таблиця 3

Питомє число розрахункових грозових перенапруг у контактній мережі.

Амплітуда U_i , кВ	Формули (2) і (4)	Формули (3) і (5)			
		Інтенсивність грозової діяльності, гр. год			
	35,4 (20 гр. днів)	35,4	60	80	100
Прямий удар блискавки	15,4...34,4	16,8	28,5	38	47,5
240	4,6...11	5,2	8,8	12	15
100	16...40	21	36	48	61
75	23...58	31	53	71	89
35	55...138	79	133	178	222
20	101...253	146	247	329	412
10	208...519	303	513	684	856

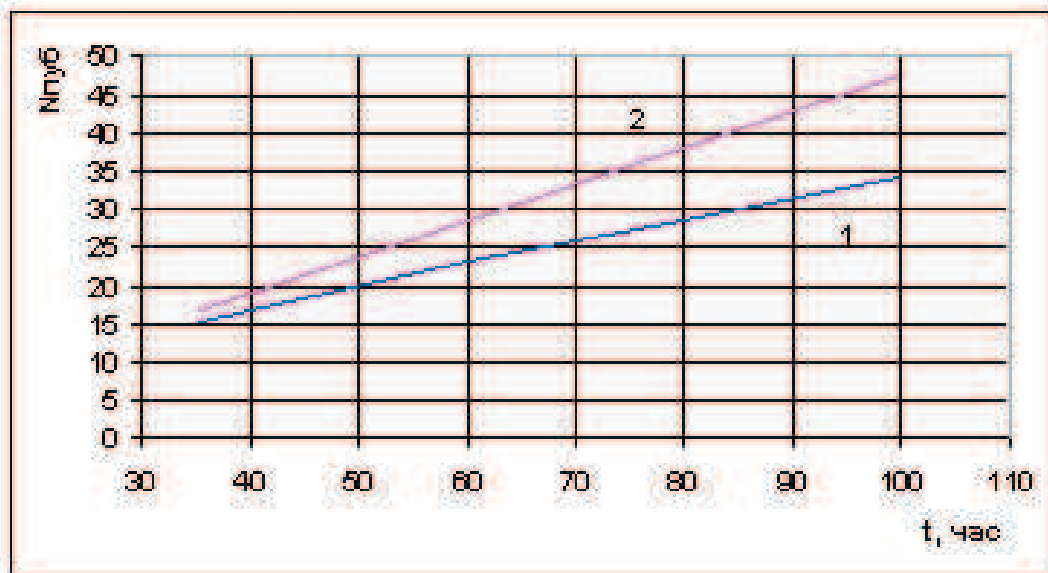


Рис. 1. Число прямих ударів блискавки в році на 100 км лінії залежно від інтенсивності грозової діяльності, що відповідає формулам: 1 – (2); 2 – (3)

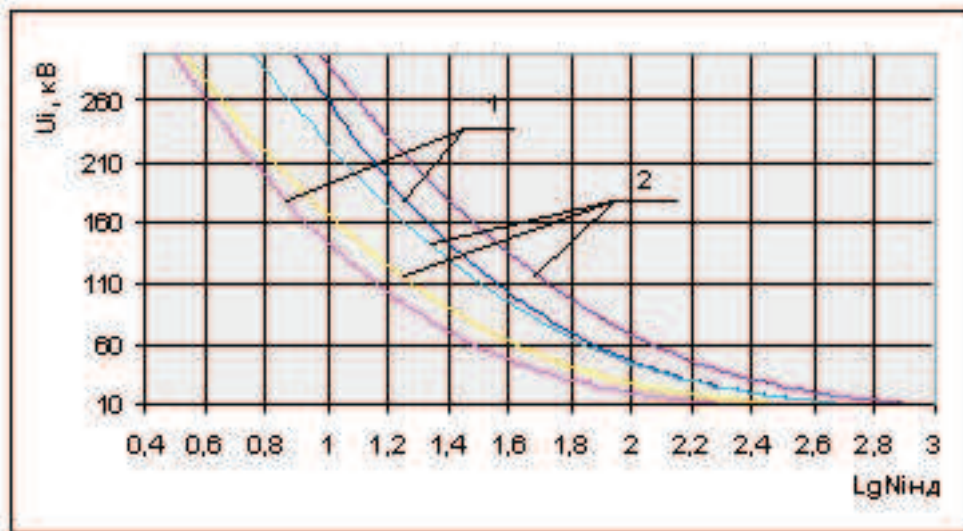


Рис. 2. Питоме число індукованих перенапруг з різною амплітудою залежно від інтенсивності гроз, за формулами: 1 – (4); 2 – (5)

Імпульсна міцність ізоляції в контактній мережі постійного струму перебуває на рівні 100 кВ, у мережі змінного струму – 210...240 кВ. Тому при прямих ударах блискавки уникнути перекриття ізоляторів практично не вдається. Очевидно, що в мережах постійного струму перекриття ізоляторів відбуваються значно частіше внаслідок впливу індукованих перенапруг (див. табл. 3). Підвищення грозостійкості за рахунок використання грозозахисних тросів або частого встановлення блискавковідводів уздовж лінії в контактних мережах не застосовується через економічну недоцільність. Такі заходи передбачені на тягових підстанціях і на підходах до них, а на лініях вважається виправданим забезпечення системою автоматичного

повторного включення (АПВ) мережі після перекриття ізоляції.

У мережі постійного струму, у якій кількість перекриттів від грозових впливів істотно вища, напруга уставки рогових розрядників складає близько 35 кВ, тобто нижче імпульсної міцності ізоляторів, тому вони захищають ізолятори від перекриття і наступних теплових впливів силових дуг. Відповідно, система АПВ налаштовується з урахуванням роботи захисних пристроїв на лінії. Згідно вимог [2], для захисту КМ від перенапруг повинні застосовуватись рогові розрядники і обмежувачі перенапруг (ОПН), які встановлюються:

- біля анкеровок проводів контактної мережі;

- на неізолюючих спраженнях і нормально замкннутих ізолюючих спраженнях – на одній вітці спраження, а на ізолюючих нормально розімкннутих спраженнях – на обох вітках спраження, що анкеруються;

- біля штучних споруд на анкерівках контактної мережі з двох сторін споруди, при довжині 80 м і більше та з однієї сторони споруди при довжині менше 80 м;

- на живлячих лініях біля місць приєднання до контактної мережі або до пунктів групування перемикачів, а також на відстані не більше 100 м від тягової підстанції при довжині цих ліній більше 150 м і через кожні 1...1,5 км на протяжних лініях.

МЕТА РОБОТИ

Найбільш дієвим засобом захисту від перепадів напруг на сьогодні є застосування ОПН [3]. В той же час механізм здійснення захисних функцій ОПН на сьогодні недостатньо досліджений, що вимагає додаткового аналізу причин пошкоджень ізолюючих конструкцій при прямому ударі блискавки (ПУБ) в КМ [3, 4]. В цьому сенсі дуже важливим фактором є методологія правильного вибору ОПН, яка розглядається нижче.

КРИТЕРІЙ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ОПН

На відміну від розрядників старого типу для ОПН регламентована набагато більша кількість характеристик, які характеризують умови експлуатації і функціональність їхнього призначення. До них відносяться довготривалі і короткочасно допустимі напруги, припустимі струми з різною тривалістю і залишкові напруги при номінальних грозових струмах і струмах із крутим фронтом хвилі, при струмах комутаційних імпульсів.

МЕК рекомендує в маркуванні розрядника ввести наступні параметри:

- довгостроково допустиме напруження;
- нормована напруга;
- номінальний розрядний струм;
- нормований витримуваний (допустимий) короткого замикання.

Також слід зазначити:

- найменування виробника або його товарний знак;
- рік виготовлення;
- серійний номер виробу.

Перелік параметрів, регламентованих МЕК 60099-4 [5] характеристик ОПН, наведено нижче:

Довготривала допустима напруга (діюче значення), U_d , кВ	
Нормована напруга (діюче значення), $U_{нор}$, кВ	
Номінальний розрядний струм грозового імпульсу з хвилею 8/20мкс, I_n , кА	
Залишкова напруга при струмі грозового імпульсу, $U_{зал.г}$, кВ	500 А
	5 000 А
	10 000 А
	20 000 А
Залишкова напруга при номінальному струмі із крутим фронтом хвилі 1/4мкс, $U_{зал.кр}$, кВ	
Залишкова напруга при струмі комутаційного імпульсу з хвилею 30/60мкс, $U_{зал.к}$, кВ	125
	250
	500
Тривалий (2000 мкс) струм, А	
Пропускна здатність (кількість нормованих імпульсів струму)	
Питома енергоємність, $W_{пит}$, кДж/кВ	
Кваліфікаційна напруга (при 2 мА), кВ	
Характеристики корпусу ОПН відповідно до вимог, встановлених до лінійних і підстанційних ізоляторів, у тому числі:	
- нормований витримуваний струм короткого замикання;	
- нормована механічна міцність;	
- довжина шляху витоку, $L_{вит}$, мм	
Маса, кг	

Вибір необхідного обмежувача перенапруг у загальному випадку зводиться до пошуку компромісного рішення між умовами забезпечення надійної і довгострокової роботи самого захисного апарату і виконання ним захисних функцій при перенапругах.

Діаграма ітераційного вибору параметрів характеристик ОПН, що відповідає рекомендації МЕК 60099-5 [6], наведена на рис. 4.

Вибір ОПН здійснюється встановленням їхніх характеристик у наступній послідовності:

- **Стійкість до довготривалої впливаючої напруги.** Довгостроково припустима робоча напруга, $U_{д}$, визначається величиною робочої напруги мережі і можливим коливанням напруги. Як правило, на практиці за довгостроково допустиму напругу ОПН приймається напруга, рівна або більша найбільшої робочої напруги мережі:

$$U_{д} \geq U_{н.р} . \quad (5)$$

- **Стійкість до короткочасного перевищення робочої напруги.** У мережі завжди мають місце короткочасні перевищення напруги вище найбільшої робочої напруги. Підвищена напруга в мережах із заземленою нейтраллю може тривати при замиканні фази на землю від частки секунд до 10 с: при заземленій нейтралі через індуктивність – до декількох годин залежно від оперативності усунення неполадок. Короткочасне підвищення напруги виникає у випадку відключення навантаженого об'єкта, при цьому амплітуда напруги може досягати залежно від тривалості до 1,5 крат робочої напруги і навіть вище, якщо скидання навантаження супроводжувалось резонансними явищами. По суті, короткочасні підвищення напруги відносяться до комутаційних перенапруг, які характеризуються невисоким рівнем і при яких струми через нелінійні елементи ще не перевищують одиниць амперів.

Експериментальними дослідженнями встановлено [6], що короткочасні перенапруги в мережі, як функція від їхньої тривалості, в інтервалі від 0,1 до 100 с можна апроксимувати наступним виразом:

$$U_{т.с} = U_{Ек} \times \left(\frac{T_t}{10} \right)^{-m} , \quad (6)$$

де $U_{т.с}$ – амплітуда короткочасної перенапруги в мережі;

$U_{Ек}$ – амплітуда короткочасної перенапруги, що відповідає тривалості 10 с;

T_t – тривалість короткочасної перенапруги;
 m – показник ступеня, що приймається рівним 0,02.

Здатність ОПН витримувати короткочасні перевищення напруги визначає нормована напруга, $U_{нор}$. Цей параметр повинен задовольняти умові:

$$U_{нор} \geq U_{т.м}(T_t = 10 \text{ с}) = U_{Ек} . \quad (7)$$

У випадку зі змінною напругою в співвідношенні (7) під величиною нормованої напруги $U_{нор}$ розуміється її амплітудне значення.

Крім вимоги (7), вольт-часові характеристики ОПН у вигляді залежності короткочасно витримуваної напруги розрядником, $U_{т.р}$ від тривалості впливу, повинні погоджуватися з короткочасними коливаннями напруги в мережі, що представляють у вигляді співвідношення (8):

$$U_{т.р} \geq U_{т.м} . \quad (8)$$

На практиці прийнято зіставляти між собою відносні величини: кратності короткочасних перенапруг щодо найбільшої робочої ($U_{н.р} = U_{д}$) або еквівалентної напруги $U_{Ек}$ (7), як це показано на рис. 5.

- **Номінальний струм.** Встановлення нормованого розрядного струму, $I_{н}$, має важливе значення, оскільки захисний рівень розрядника від перенапруг оцінюється параметром $I_{н}$. Крім того, здатність ОПН абсорбувати енергію без виходу з теплової стійкості прямо зв'язана також з нормованим розрядним струмом.

Згідно [5] для лінії з найбільшою робочою напругою від 1 кВ до 245 кВ очікувані розрядні струми приймаються: 5 кА і 10 кА. Для лінії від 1 кВ до 72,5 кВ із низьким опором заземлюючих пристроїв і з помірною грозовою активністю, у випадку розташування розрядників не далі 5 км один від одного, приймається ефективним використання ОПН із номінальним розрядним струмом 5 кА. А розрядники з $I_{н} = 10$ кА рекомендується встановлювати на відповідальних ділянках мережі.

Для контактної мережі України, де грозова активність відносно висока, виправдано прийняти:

$$I_{н} = 10 \text{ кА} . \quad (9)$$

- **Пропускна здатність.** Через ОПН у «відкритому» стані протікають супровідні струми мережі, відповідно стійкість розрядників до струмів перехідного стану визначається припустимою енергією абсорбції, $W_{аб}$.

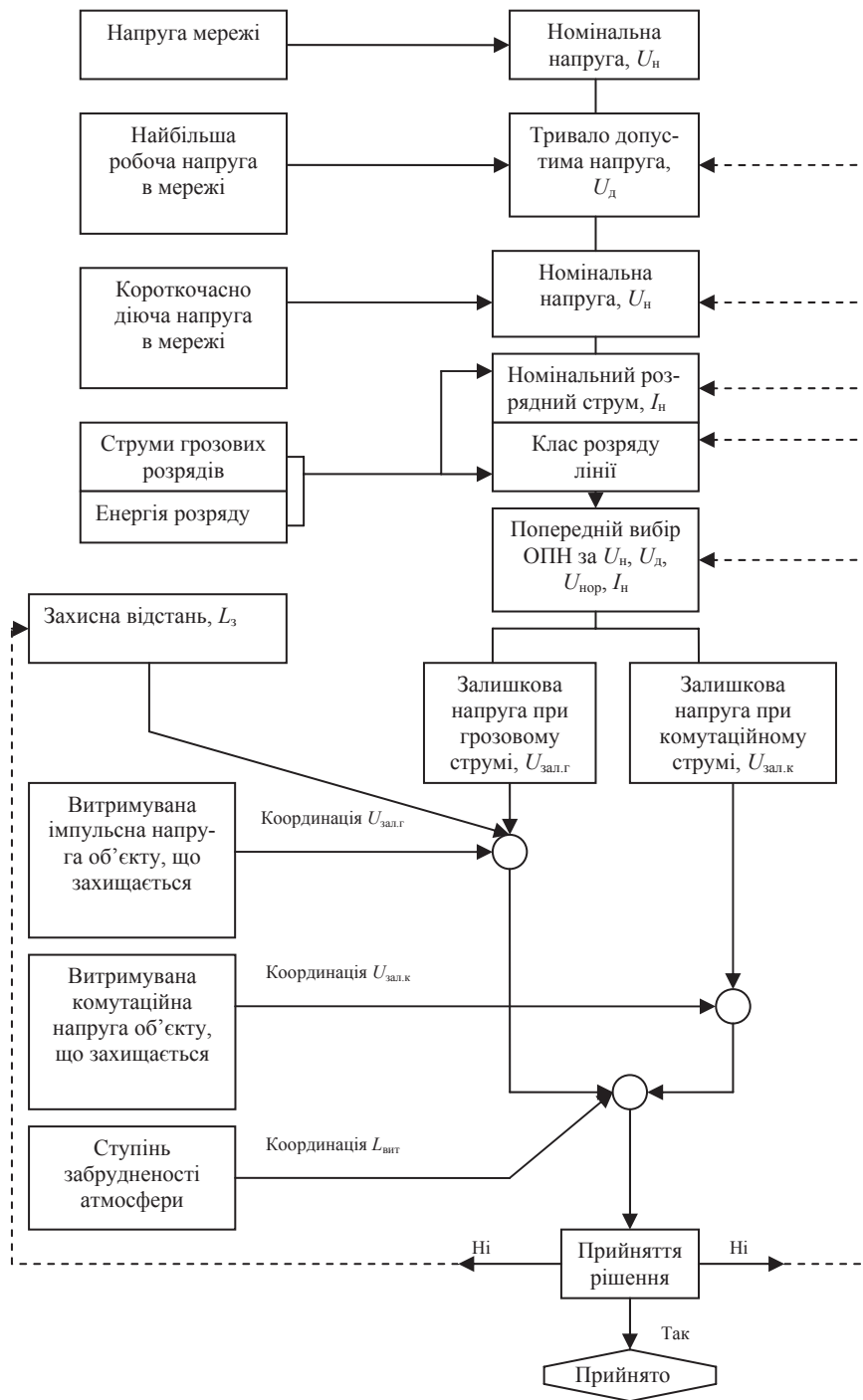


Рис. 4. Схема вибору ОПН

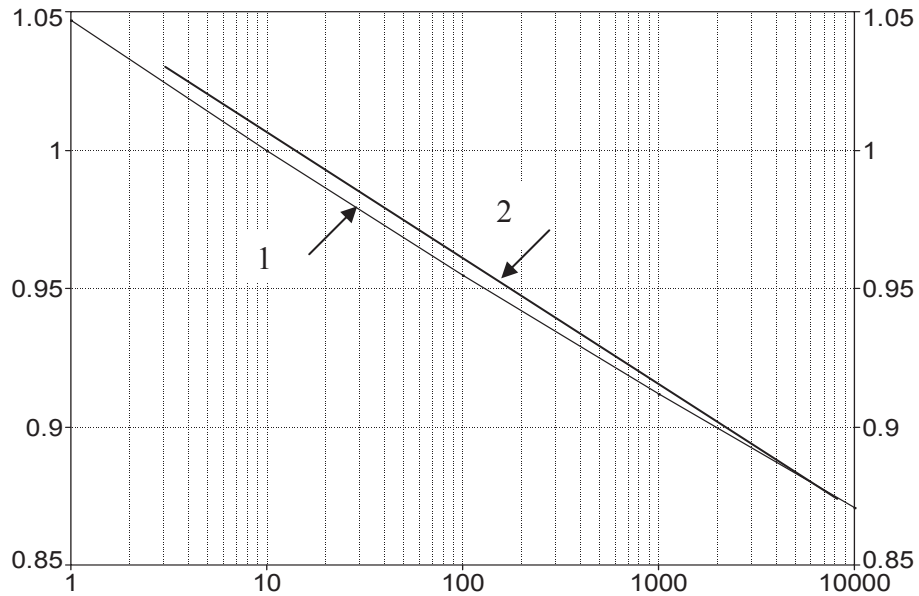


Рис. 5. Графічне подання співвідношень (7) і (8): 1 - $U_{т.м}/U_{Ек}$; 2 - $U_{т.р}/U_{Ек}$

Стійкість ОПН до енергії, що виділяється в них, характеризує їхні класи розряду лінії; вони, у свою чергу, визначаються величинами

номінальних, комутаційних і сильних струмів (табл. 4).

Таблиця 4

Клас лінійних розрядних струмів ОПН

Кваліфікація ОПН		Пікове значення струму комутаційної хвилі, I_k , А	Сильний струм, $I_{н.с.}$ кА
Клас лінійного розрядного струму	Номінальний струм, I_n , А		
1 і 2	10 000	125 і 500	1кл - 65; 2кл - 100
3	10 000	250 і 1 000	100
4 і 5	20 000	500 і 2 000	100

При відомих номінальних струмах (див. табл. 4) і робочих параметрах ОПН, що обираються, контрольні рівні енергії W_k , з якими зв'язується припустима енергія абсорбції, $W_{аб}$:

$$W_{аб} > W_k \{W_{кл}, W_{кс}\}, \quad (10)$$

обчислюються за наступними формулами:

- у випадку комутації лінії:

$$W_{кл} = 2U_{зал.к} (U_e - U_{зал.к}) \frac{T_b}{Z_l}, \quad (11)$$

де U_e – амплітуда перенапруги при замиканні фази на землю (МЕК60071-2);

$U_{зал.к}$ – залишкова напруга комутаційного імпульсу струму;

T_b – час пробігу хвилі;

Z_l – хвильовий опір лінії;

- у випадку включених ємнісних об'єктів:

$$W_{кс} = 0,5C \left[(3U_{м.р})^2 - (\sqrt{2}U_{нор})^2 \right], \quad (12)$$

де C – еквівалентна ємність об'єкта;

$U_{м.р} = \sqrt{2}U_n$ – пікове значення робочої напруги;

$U_{нор}$ – нормована напруга ОПН.

В енергосистемах Росії [3] прийнята більш деталізована градація ОПН за пропускною здатністю, тому вона зручніша для користування.

Відповідно до табл. 5 приймаємо:

$$W_{аб} = W_{пит} \times U_{н.р}.$$

Для ізоляції контактної мережі загрозу представляють практично тільки грозові перенапруги. Із цієї причини вибір захисного рівня розрядника полягає в координації між витримуваною напругою об'єкта, що захищається – ізоляторів, $U_{в.імп}$, і залишковою напругою ОПН при номінальних розрядних струмах грозових імпульсів з крутизною фронту в діапазоні від 1 мкс до 8 мкс, $U_{зал.г}$.

Класи ОПН за пропускну здатністю

Клас	Номинальний струм, I_n , А	Пікове значення струму комутаційної хвилі (2000мкс), $I_{пр}$, А	Питома до робочої напруги енергія поглинання, $W_{пит}$, кДж/кВ	Сильний струм, $I_{н.с.}$, кА
1	5 000...10 000	250...400	1...2	65
2	10 000	401...750	2,1...3,2	100
3	10 000	751...1 100	3,3...4,5	100
4	10 000...20 000	1 101...1 600	4,6...6,0	100
5	20 000	1 601...21 000	6,1...7,0	100

Коефіцієнт координації приймається рівним 1,15, тобто:

$$U_{зал.г} \leq U_{в.імп} / 1,15 . \quad (13)$$

При координації ОПН з ізоляцією електроустаткування, окрім вимоги (13), необхідно оптимізувати і місце установки захисного розрядника. За можливості рекомендується максимально наблизити ОПН до введень устаткування, однак з різних причин, у тому числі, з економічних міркувань – бажанням одним ОПН охопити більшу кількість об'єктів, не завжди доцільно встановлювати їх у безпосередній близькості до одного об'єкта. Координація в цьому випадку здійснюється з урахуванням лінійних розмірів лінії і місця підключення розрядника за емпіричною формулою МЕК 60071-2 [7]:

$$U_{к.імп} = U_{зал.г} + \frac{Q}{N} \times \frac{L_c}{L_n + L_d} , \quad (14)$$

де $U_{к.імп} = U_{в.імп} / 1,15$ – координувана захисна імпульсна напруга;

$U_{зал.г}$ – захисний рівень імпульсної напруги ОПН;

Q – напруга, що залежить від конфігурації лінії підходу до підстанції (табл. 6);

N – кількість ліній, приєднаних до підстанції;

$L_c = d + d_1 + d_p + d_2$ – сумарна довжина приєднання ОПН із об'єктом (рис. 6);

L_n – довжина прольоту лінії;

$L_d = H_o / H_d$ – довжина ділянки лінії з нормованим рівнем відмови;

H_o – нормоване число відмов устаткування, що захищається;

H_d – нормоване число простою підходящої до підстанції лінії на одиницю довжини і часу. МЕК 60071-2 дає значення H_o в діапазоні 0,1...0,4 % у рік. У розподільних мережах питома число простою лінії істотно більше, ніж нормоване число відмов устаткування, тому параметром L_d можна зневажити.

Якщо нормований захисний рівень устаткування (див. (13)) відомий, то з (14) одержуємо довжину захисної зони $L_3 = L_c$:

$$L_3 = \frac{N}{Q} \left(\frac{U_{в.імп}}{1,15} - U_{зал.г} \right) (L_n + L_d) . \quad (15)$$

Відомий виробник сучасних ОПН – фірма АВВ – дає аналогічну формулу розрахунку довжини захисної зони:

$$L_3 = \frac{v}{2S} \left(\frac{U_{в.імп}}{1,2} - U_{зал.г} \right) , \quad (15^1)$$

Таблиця 6

Напруга Q у формулі (14) для різних випадків на лінії

Розподільна лінія	Магістральна лінія	Q , кВ
Заземлена траверса		900
Лінія на дерев'яній опорі		2 700
	Однопровідна фаза	4 500
	Двухпровідна фаза	7 000
	У чотири розщеплені фази	11 000
	У 6 і 8 розщеплені фази	17 000

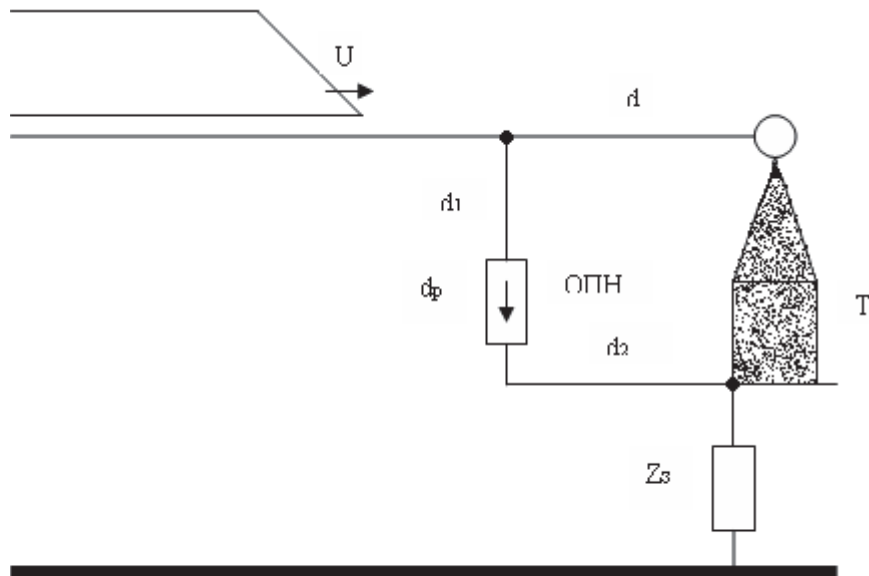


Рис. 6. Схема установки ОПН

де v – швидкість набігання хвилі (300 м/мкс);

S – крутість фронту хвилі перенапруги, що набігає.

Для оцінки захисної відстані рекомендується прийняти крутість фронту, рівною: 1550 кВ/мкс – при дерев'яних опорах; 800 кВ/мкс – при заземлених траверсах.

Наведені величини по грозовій активності відповідають даним для середньоевропейських регіонів, де середньорічне число прямих ударів блискавки на 100 км лінії становить 25 (див. рис. 1). При цьому прориви блискавки з наведеною крутістю на підстанцію прогноуються можливими один раз за 400 років.

ОПН без іскрових проміжків мають істотні переваги перед вентиляними розрядниками в обмеженні комутаційних перенапруг, що є дуже важливою характеристикою при захисті електроустаткування. При виборі захисного рівня комутаційних перенапруг необхідно враховувати статистичний розкид перенапруг. Зі зниженням припустимої для об'єкта перенапруги, що впливає, збільшується ризик ушкодження ізоляції при незначному перевищенні напруги. Для нівелювання такого ефекту запропоновано ввести коригувальний коефіцієнт, $K_{к.к}$, що залежить від співвідношення між захисним рівнем, $U_{з.к}$, і перенапругою, очікуваною з 2 % частотою, U_{32} :

$$K_{к.к} = 1,24 - 0,2 \frac{U_{з.к}}{U_{32}}, \quad 0,7 < \frac{U_{з.к}}{U_{32}} \leq 1,2. \quad (16)$$

Відповідно, маємо наступну координацію між витримуваною для устаткування комутаційною перенапругою, $U_{в.к}$, і захисною напругою ОПН, $U_{зал.к} = U_{з.к}$:

$$U_{в.к} \geq K_{к.к} \times U_{зал.к}, \quad 1,0 < K_{к.к} \leq 1,1. \quad (17)$$

На практиці, якщо частота виникнення комутаційних перенапруг мала, то коригувальний коефіцієнт приймається рівним 1, при великій частоті, що має місце в контактній мережі – 1,1.

ЗАГАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ВИБОРУ ОПН

Вибір ОПН починається з визначення основних параметрів розрядника: $U_{д}$, $U_{нор}$ – з умови забезпечення надійної роботи при нормальному режимі експлуатації; номінальних розрядних струмів, $I_{н}$ – по номінальній напрузі мережі і інтенсивності грозової діяльності. Для встановлених параметрів $U_{д}$, $U_{нор}$ та $I_{н}$ проводиться перевірка стійкості розрядника до абсорбції енергії починаючи для ОПН з мінімально припустимою $W_{аб}$ (табл. 4 або 5). У випадку невідповідності даному критерію береться ОПН із більшою величиною $W_{аб}$, що відповідає переходу на більш високий клас за розрядом лінії або за пропускну здатністю. Якщо в характеристиках обраного ОПН не наведено нормованої енергії абсорбції, то її можна обчислити за співвідношенням:

$$W_{аб} = U_{зал.к} (U_{з.к} - U_{зал.к}) \frac{T_{п}}{Z}, \quad (18)$$

де значення $U_{з.л}$, $T_{п}$ і Z надані в табл. 7.

Параметри для оцінки енергії абсорбції

Номинальний струм ОПН, I_n , А	Клас лінійного розряду	Хвильовий опір лінії, Z , Ом	Тривалість прямокутного імпульсу, T_n , мкс	Зарядна напруга лінії, $U_{з.л.}$, кВ
10 000	1	$4,9U_{нор}$	2 000	$3,2U_{нор}$
10 000	2	$2,4U_{нор}$	2 000	$3,2U_{нор}$
10 000	3	$1,3U_{нор}$	2 400	$2,8U_{нор}$
20 000	4	$0,8U_{нор}$	2 800	$2,6U_{нор}$
20 000	5	$0,5U_{нор}$	3 200	$2,4U_{нор}$

$U_{нор}$ – нормована напруга ОПН, кВ

Після виконаного коригування для прийнятих параметрів U_d , $U_{нор}$ та I_n встановлюються нормовані захисні характеристики ОПН: $U_{зал.г}$ і $U_{зал.к}$, які координуються з витримуваними перенапругами або з випробувальними напругами об'єкта, що захищається. Змінними коригування захисних характеристик ОПН можуть бути робочі параметри U_d , $U_{нор}$, а для імпульсних перенапруг також і довжина захисної зони. Коригування може йти як у бік зниження, так і підвищення раніше обраних як робочих, так і захисних параметрів розрядника. Відповідно, умови роботи ОПН у нормальному режимі можуть трохи погіршитися або покращитися, а захисна зона – зменшитися або збільшитися. Можливо, виявиться доцільним застосування більш дорогого розрядника зі свідомо підвищеними експлуатаційними і захисними параметрами.

Корпус ОПН за своїми електричними характеристиками повинен відповідати вимогам до лінійних і підстанційних ізоляторів з урахуванням особливості матеріалу діелектрика. Не рекомендується встановлювати розрядники в зоні

забруднення вище IV ступеня забруднення (С3) атмосфери, тому що сильні забруднення на поверхні ОПН можуть привести до небажаного збільшення нерівномірності розподілу потенціалу уздовж нелінійних елементів і, відповідно, передчасному виходу їх з ладу. У випадку значних забруднень доцільно проводити профілактичне очищення зовнішньої поверхні корпусу.

При виборі розрядників по зовнішній ізоляції, якщо немає особливих вимог, можна орієнтуватися по ефективній питомій довжині шляху витоку, λ_e , нормованій у «Правилах улаштування електроустановок» (ПУЕ). У табл. 8 надано еквівалентні ступені забруднення атмосфери, прийняті в ПУЕ і в «Правилах улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць» (ЦЕ-0023).

ОПН повинні мати також свідоцтво про випробування на вибухобезпеку. ОПН у полімерних корпусах відносяться до вибухобезпечних об'єктів.

Таблиця 8

Питома ефективна довжина шляху витоку зовнішньої ізоляції

Ступінь забруднення по кваліфікації		Питома поверхнева провідність, χ , мксм	Питома ефективна довжина шляху витоку, λ_e , см/кВ	
ПУЕ	ЦЕ-0023		До 35 кВ включно	110-750 кВ
1	III	5	1,90	1,60
2	IV	10	2,35	2,00
3	V	20	3,00	2,50
4	VI	30	3,50	3,10
5	VII	50	4,20	3,70

ПРИКЛАД ВИБОРУ ОПН ДЛЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вихідні дані лінії:

- $U_M = 3,3$ кВ – номінальна напруга мережі;
- $U_{н.р} = 4$ кВ – найбільша робоча напруга;
- $U_{в.імп} = 100$ кВ – імпульсна витримувана напруга ізоляторів;
- $C_{л} \leq 0,014$ мкФ/км – погонна ємність лінії;
- $L_{л} \approx (0,8 \dots 1,25)$ мГн/км – погонна індуктивність лінії;
- $Z_w = (225 \dots 300)$ Ом – хвильовий опір лінії;
- $t \approx (60 \dots 100)$ – число грозових годин у році;
- забруднення – помірне, IV СЗ;
- найбільше поперечне зусилля – не більше 300 Н.

Вихідні дані схеми заміщення тягової підстанції:

- $C_{е.п} \approx (0,03 \dots 0,05)$ мкФ – еквівалентна вхідна ємність при відсутності згладжуючих фільтрів;
- $C_{е.ф} \approx (125 \dots 165)$ мкФ – еквівалентна вхідна ємність при наявності згладжуючих фільтрів, визначається еквівалентною ємністю фільтра;
- $U_{в.імп} = 12$ кВ – витримувана перенапруга грозового імпульсу вентильного агрегату;
- $U_{в.ком} \leq 8$ кВ комутаційна витримувана перенапруга вентильного агрегату;
- $L_{е.ф} \approx (5,0 \dots 7,5)$ мГн – еквівалентна індуктивність при наявності згладжуючих фільтрів, визначається як сума індуктивностей фільтра і згладжуючого реактора;
- забруднення – помірне, IV СЗ;
- найбільше поперечне зусилля – не більше 300 Н.

Вихідні дані тягового трансформатора на 35 кВ типу ТМРУ-5600(6200)/35 на підстанції:

- $L_T \approx (1,7 \dots 2,0)$ мГн – еквівалентна індуктивність тягового трансформатора, віднесена до вторинної обмотки;
- $C_T \approx (0,0015 \dots 0,002)$ мкФ – еквівалентна ємність тягового трансформатора;
- $U_{в.імп} = 180$ кВ – допустима перенапруга грозового імпульсу;
- $U_{в.ком} = 80 \times \sqrt{2} = 113$ кВ – допустима перенапруга комутаційного імпульсу, прийнята як амплітудне значення однохвилинної випробувальної напруги робочої частоти;
- забруднення – помірне, IV СЗ;
- найбільше поперечне зусилля – не більше 300 Н.

Встановлення границь допустимих параметрів ОПН

Наведені дані лінії і підстанції дозволяють встановити припустимі граничні значення характеристик ОПН для захисту мережі і її підходів до підстанції згідно критеріїв, викладених вище. Результати розрахунків представлені в табл. 9.

ВИСНОВКИ

На основі існуючих нормативних матеріалів розроблено робочий алгоритм розрахунку параметрів ОПН і рекомендацій щодо вибору відповідних розрядників, що забезпечують оптимальний захист електроенергетичних об'єктів електрифікованих залізниць постійного струму від грозових і комутаційних перенапру. Наведено приклад використання даної методології при виборі ОПН для захисту обладнання контактної мережі постійного струму.

Таблиця 9

Результати розрахунків

Вихідні дані об'єкта, що захищається			Допустимі параметри ОПН	
№ з/п	Найменування характеристик	Значення	Найменування характеристик	Значення
1	2	3	4	5
Лінія контактної мережі				
1	Номінальна напруга мережі	3,3 кВ	Номінальна напруга, U_M	3,3 кВ
2	Найбільша робоча напруга мережі	4,0 кВ	Довгостроково допустима напруга, U_d	Не менше 4 кВ
3	Короткочасні перенапруги мережі, до 10 с	4,2...4,5 кВ*	Нормована напруга, $U_{нор}$	Не менше** 4,2...4,5 кВ
4	Грозава активність	80...100 грозоводин	Номінальний розрядний струм, $I_n, 8/20$ мкс	10 кА

Таблиця 9 (закінчення)

1	2	3	4	5
5	Імпульсна витримувана напруга ізоляції мережі	100 кВ	Залишкова напруга при $I_{нл}$, $U_{зал.г}$	Не більше 100/1,15 = 87 кВ
6	Енергія заряду мережі з погонною ємністю 0,014 мкФ і при розрахунковій довжині 100 км ***	0,11 кДж	Питома енергія абсорбції ОПН для захисту лінії, $W_{пит}$	Достатньо 1 кДж/кВ, ОПН класу 1, $I_{сил} = 65$ кА
Тягова підстанція з боку контактної мережі 3,3 кВ				
7	Гранично припустима перенапруга випрямного агрегату	$U_{в.імп} = 12$ кВ $U_{в.ком} = 9,0$ кВ	Захисні рівні ОПН:	$U_{зал.г} \leq 12$ кВ $U_{зал.к} \leq 9,0$ кВ
8	Енергія заряду вхідної ємності тягової підстанції зі згладжуючим фільтром, 165 мкФ	12,8 кДж	Питома енергія абсорбції ОПН на вході тягової підстанції, $W_{пит}$	Не менше 12,8/3,3 ≤ 4 кДж/кВ, ОПН класу 3
Тяговий трансформатор ТМРУ-5600(6200)/35 з боку живильної лінії 35 кВ				
9	Найбільша робоча напруга	35 кВ	Довгостроково допустима напруга, U_d	Не менше 35 кВ
10	Короткочасні перенапруги мережі, до 10 с	40,5 кВ*	Нормована напруга, $U_{нор}$	Не менше ** 40,5 кВ
11	Гривозна активність	80...100 грозоводин	Номинальний розрядний струм, $I_{нл}$, 8/20 мкс	10 кА
12	Випробувальна (припустима) перенапруга живильного устаткування тягової підстанції	$U_{в.імп} = 180$ кВ $U_{в.ком} = 113$ кВ	Захисні рівні ОПН:	$U_{зал.г} \leq 156,5$ кВ $U_{ост. до} \leq 102,7$ кВ
13	Енергія заряду еквівалентної ємності тягового трансформатора, $C_{е.тр} = 0,002$ мкФ; + енергія заряду фази ВЛ 35кВ із $C_d = 0,005$ мкФ/км із розрахунковою довжиною 100 км***	5,2 кДж	Питома енергія абсорбції ОПН, $W_{пит}$	Достить 1 кДж/кВ, ОПН класу 1, $I_{сил} = 65$ кА

Примітки по табл. 9:

* – підлягає уточненню в кожному окремому випадку;

** – рекомендується звертати стійкість ОПН до короткочасних перенапруг на всьому часовому діапазоні, для чого зазначити від постачальника вольт/часові характеристики ОПН (див. співвідношення (8) і рис. 5);

*** – довжина лінії береться реальна.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Радченко, В. Д. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги [Текст] / В. Д. Радченко. – М.: Транспорт, 1975. – 360 с.
2. ЦЕ-0023. Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць [Текст]. – К., 2008. – 208 с.
3. Халилов, Ф. Х. Техника высоких напряжений [Текст] / Ф. Х. Халилов, В. В. Егоров, А. А. Смирнов. – СПб.: ИПК «Бионт», 2007. – 540 с.
4. Карякин, Р. Н. Форма волны тока молнии в контактной сети [Текст] / Р. Н. Карякин, В. Г. Лосев // Электричество. – 2008. – № 11. – С. 12-22.
5. Косарев, А. Б. Импульсные перенапряжения в системе тягового электроснабжения в грозовой период [Текст] / А. Б. Косарев, А. В. Симаков // Вестник ВНИИЖТ. – 2008. – № 3. – С. 13-18.
6. IEC60099-4:2006. Surge Arresters. Part 4: Metal-Oxide Arresters without Gaps for A.C. Systems [Text].
7. IEC60099-5:2000. Surge Arresters. Part 5: Selection and Application Recommendations [Text].
8. IEC60071-2:1996. Insulator Co-ordination. Part 2: Application Guide [Text].

Надійшла до редколегії 22.12.2010.

Прийнята до друку 29.12.2010.