

І.В. Ліщак, М.М. Борецький

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕСМ

Ю.М. Жовнір, О.П. Жовнір

Державне підприємство “Львівський проектно-вишукувальний інститут  
залізничного транспорту України “Львівтранспроект””

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЇВ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕНАПРУГ ДЛЯ БЛИСКАВКОЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 6–35 кВ ІЗ ЗАХИЩЕНИМИ ПРОВОДАМИ

© Борецький М.М., Жовнір Ю.М., Жовнір О.П., Ліщак І.В., 2012

Розглянуто особливості встановлення пристрою захисту від перенапруг на фазний провід на опорі для надійного захисту повітряних ліній 6–35 кВ із захищеними проводами від атмосферних перенапруг.

*Ключові слова: обмежувач перенапруг нелінійний, індуковані перенапруги, розподільчі мережі, повітряні лінії з захищеними проводами, ізолятор.*

The features of establishment of device of protecting are considered from overstrains on a phase wire on support for reliable defence of open-wires of 6–35 kV with the protected send-offs from atmospheric overstrains.

*Key words: Terminator of overstrains nonlinear, induced overstrains, distributive networks, air-tracks with the protected send-offs, insulator.*

### Постановка проблеми

Небезпечні для ізоляції лінії перенапруги можуть виникати внаслідок прямих ударів блискавки в лінію, або від індукованих перенапруг [1], що виникають внаслідок ударів блискавки поблизу траси лінії.

Особливістю повітряних ліній з номінальною напругою 6–35 кВ є те, що частка прямих ударів блискавки небезпечних для ізоляції лінії залежить від ступеня екранування, і в сукупності становить від 0 до 10 %. Крім того, імовірність удару блискавки з амплітудою, що перевищує 65 кА становить лише 0,2 [5]. Тому для таких ліній основну небезпеку становлять індуковані перенапруги.

Одним з перспективних способів захисту ПЛЗ 6–35 кВ від атмосферних перенапруг є пристрій захисту від перенапруг (ПЗПН). Захист ПЛЗ від індукованих перенапруг може бути забезпечений шляхом встановлення одного ПЗПН на фазний провід на опорі ПЛЗ 6–35 кВ; встановлення ПЗПН на кожний фазний провід та іншими способами.

В Україні немає нормативних документів, що регламентують встановлення ПЗПН на ПЛЗ [6], а закордонні нормативні документи [7] містять лише рекомендації загального характеру, які не можуть бути використані для виконання конкретного технічного завдання. З огляду на викладене, вивчення особливостей електромагнітних процесів під час грозових перенапруг на ПЛЗ, ізоляція яких захищена ПЗПН, є важливою задачею.

### Аналіз останніх досліджень

Сьогодні одним з основних технічних засобів, що зменшує збитки від грозових вимкнень ПЛ 6-10 кВ, є автоматичне повторне ввімкнення [8], ефективність якого в середньому не перевищує 50 %. Недоліком АПВ є його негативна дія на комутуюче й інше високовольтне устаткування. Тому

АПВ ефективно далеко не скрізь. Також автоматичне повторне ввімкнення не захищає проводи ПЛЗ від перепалювання.

Одним з варіантів захисту ПЛЗ від перепалювання проводу згідно з [4] є використання обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН) з іскровим проміжком. Пристрої захисту від перенапруг призначені для захисту ізоляції ПЛЗ від індукованих перенапруг і від прямих ударів блискавки з амплітудами до 65 кА. Прямий удар блискавки з більшою амплітудою може викликати ушкодження ("спікання") ОПН, але, завдяки особливості ПЗПН – наявності зовнішнього іскрового проміжку в колі ОПН, – це не призведе до постійного замикання проводу на землю [3].

На підставі закордонного досвіду експлуатації ПЗПН на ПЛ середньої напруги й експериментальній перевірці працездатності ПЗПН під час впливу імпульсів струму блискавки реальної тривалості встановлено, що ПЗПН на ПЛ 10 кВ без грозозахисного троса піддаються частим руйнуванням, і їхнє використання для захисту ПЛЗ від прямих ударів блискавки необхідно детально вивчати [9].

### Задачі досліджень

Для обґрунтування та вибору оптимального способу встановлення ПЗПН необхідно:

- здійснити аналіз технічної необхідності встановлення ПЗПН на конкретній ділянці траси проходження ПЛЗ;
- вибрати спосіб встановлення ПЗПН на підставі розрахунків значення індукованої перенапруги на ПЛЗ.

У роботі розглядаються два способи встановлення ПЗПН, залежно від типу ізолятора.

### Виклад основного матеріалу

Розглянемо встановлення ПЗПН на проміжних опорах зі штирьовими ізоляторами. У цьому випадку іскровий проміжок утворений електродами, один із яких закріплений на верхньому фланці обмежувача, а другий – на проводі за допомогою затискача (на ПЛЗ – проколюючий затискач).

### Встановлення пристроїв захисту від перенапруг на один фазний провід на опорі

Індуковані перенапруги на проводах всіх трьох фаз приблизно однакові й поширюють свою дію відразу на велику ділянку ПЛЗ, що об'єднує кілька опор. У момент часу  $t_{сп.ПЗПН}$  відбувається спрацьовування ПЗПН на опорах. Для уточнення розглянемо процеси, що відбуваються, на опорі № 1 (на опорах № 2 й 3 ситуація аналогічна) (рис. 1). Під дією індукованої перенапруги з обох сторін до спрацьованого ПЗПН фази А по проводу протікають струми, які потім, підсумовуючись, протікають по каналу іскрового проміжку ПЗПН і через опір заземлення опори (рис. 2, а, б).

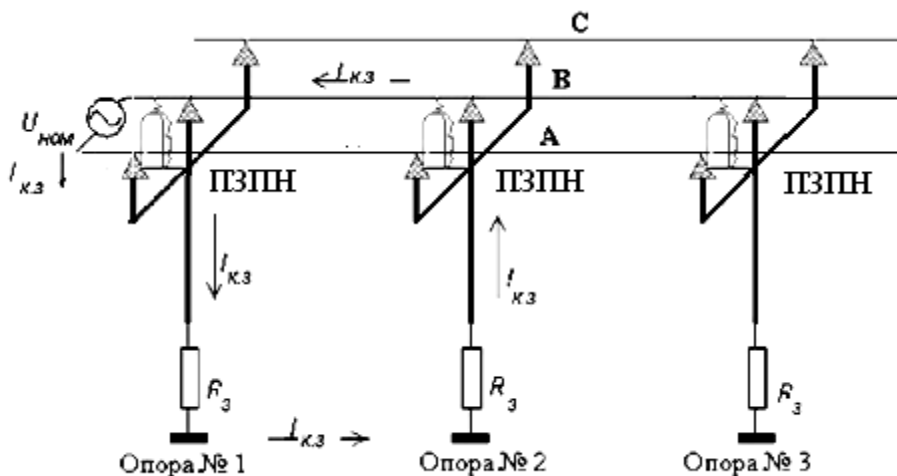


Рис. 1. Схема встановлення ПЗПН по лінії на одну фазу

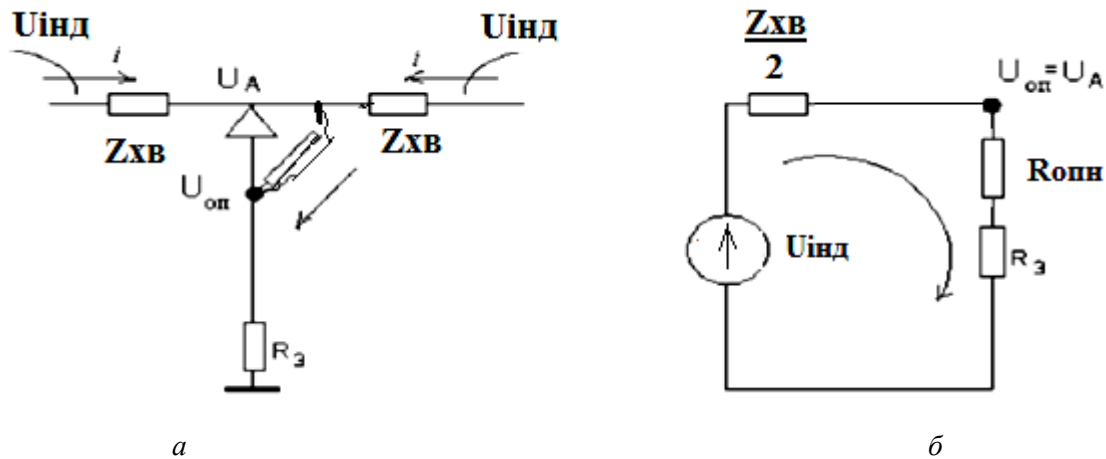


Рис. 2. Схеми:  
а – заступна; б – розрахункова

Нехтуючи опорами каналу розряду й тіла опори, струм можна оцінити за формулою

$$I = U_{\text{інд}} / (Z_{\text{xb}}/2 + R_3 + R_{\text{опн}}), \quad (1)$$

де  $R_3$  – опір заземлення опори;  $Z_{\text{xb}}$  – хвильовий опір провoda, де  $R_{\text{опн}}$  – опір лінеаризованої ділянки вольт-амперної характеристики (ВАХ) нелінійного обмежувача перенапруг, під час дії грозового імпульсу.

За цих умов відбувається спад напруги на резистансі заземлення й потенціал опори, по якій протікає струм, і провoda фази А можна визначити за формулою

$$U_{\text{оп}} = U_A = I \cdot (R_3 + R_{\text{опн}}) = U_{\text{інд}} \cdot ((R_3 + R_{\text{опн}}) / (Z_{\text{xb}}/2 + R_3 + R_{\text{опн}})) = m \cdot U_{\text{інд}}, \quad (2)$$

де  $m = (R_3 + R_{\text{опн}}) / (Z_{\text{xb}}/2 + R_3 + R_{\text{опн}})$ .

Відповідно різниця потенціалів між провodom фази В і траверсою опори № 1, тобто напруга, прикладена до ізолятора фази В на опорі № 1, зменшується на значення напруги  $U_{\text{оп}}$ . Внаслідок електромагнітної взаємодії між проводами фаз А і В, що може бути враховано коефіцієнтом зв'язку  $k_{\text{зв}}$ , потенціал провoda фази В зменшиться на значення наведеної напруги

$$\Delta U_{\text{нав}} = (U_{\text{інд}} - U_A) \cdot k_{\text{зв}} = (U_{\text{інд}} - m \cdot U_{\text{інд}}) \cdot k_{\text{зв}} = U_{\text{інд}} \cdot (1 - m) \cdot k_{\text{зв}}, \quad (3)$$

$$U_B = U_{\text{інд}} - \Delta U_{\text{нав}} = U_{\text{інд}} \cdot (1 - (1 - m) \cdot k_{\text{зв}}). \quad (4)$$

У підсумку, напруга, прикладена до ізолятора фази В, може бути визначена за формулою

$$U_{\text{із}} = U_B - U_{\text{оп}} = U_{\text{інд}} [1 - (1 - m) \cdot k_{\text{зв}}] - m \cdot U_{\text{інд}} = U_{\text{інд}} \cdot (1 - m) \cdot (1 - k_{\text{зв}}) = U_{\text{інд}} \cdot k, \quad (5)$$

де  $k = (1 - m) \cdot (1 - k_{\text{зв}})$ .

Коефіцієнт зв'язку  $k_{\text{зв}}$  визначається за формулою

$$k_{\text{зв}} = k_{\text{зв0}} \cdot k = (\alpha_{12} / \alpha_{12}) \cdot k_k = [(\ln(D'/D)) / (\ln(2 \cdot H / r_0))] \cdot k_k = f(D) \quad (6)$$

де  $k_{\text{зв0}} = (\alpha_{12} / \alpha_{12})$  – геометричний коефіцієнт зв'язку;  $k_k = 1,1$  – коефіцієнт, що враховує вплив корони;  $\alpha_{12}$ ,  $\alpha_{12}$  – власні й взаємні потенціальні коефіцієнти;  $D$  – відстань між фазами;  $D'$  – відстань між першим (верхнім) провodom і відбитим у площині землі другим (нижнім, крайнім) провodom;  $H$  – висота першого провoda над землею;  $r_0$  – радіус провoda.

За заданого габариту провід-земля й радіуса провoda коефіцієнт зв'язку повністю визначається відстанню між фазами  $D$ , тобто  $k_{\text{зв}} = f(D)$ . Підставляючи (6) в (5), одержимо

$$U_{\text{із}} = U_{\text{інд}} \cdot (1 - m) \cdot (1 - f(D)). \quad (7)$$

На рис. 3 подано результати розрахунку напруги на ізоляторі незахищеної фази (фази В) залежно від відстані між проводами при  $U_{\text{інд}} = 300$  кВ, висоті нижнього провoda над землею 8 м і радіусі провoda 8 мм для різних значень резистансу заземлення опори.

Як видно з рис. 2, напруга на ізоляторі незахищеної ПЗПН фази істотно знижується при зменшенні відстані між фазами й порівняно слабо зменшується у разі збільшення резистансу заземлення опори. Якщо, наприклад, розрядна напруга ізолятора перевищує 130 кВ, то при відстані між фазами  $D < 0,5$  м і спрацьовуванні ПЗПН, встановленого на верхній фазі, ізолятор нижньої фази не перекриватиметься при індукованих перенапругах.

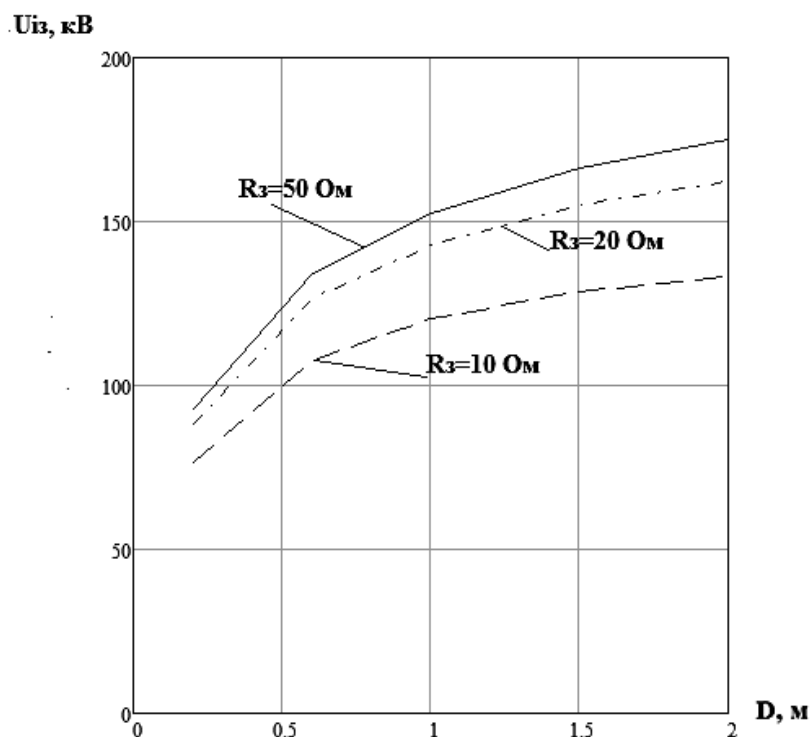


Рис. 3. Залежності напруги на ізоляторі незахищеної ПЗПН-м фази (фази В) ( $U_{13}$ ) від відстані між проводами ( $D$ ) за  $U_{інд}=300$  кВ для різних значень резистансу заземлення опори ( $R_3$ )

50 % розрядні напруги найпоширеніших ізоляторів ШФ 10-Г і ШФ 20-Г під час впливу імпульсів грозових перенапруг становлять [5]:

ШФ 10-Г –  $U_{50\%}^+ = 130$  кВ,  $U_{50\%}^- = 140$  кВ;

ШФ 20-Г –  $U_{50\%}^+ = 195$  кВ,  $U_{50\%}^- = 230$  кВ.

З рис. 3 видно, що ізолятор ШФ 10-Г не буде перебиватися при  $D < 0,5$  м, а ізолятор ШФ 20-Г – при  $D < 2$  м. Отже, у розглянутій схемі встановлення ПЗПН (по одному ПЗПН на опорі, на фазу А) застосування ізоляторів типу ШФ 10 – Г доцільно тільки за досить компактного розташування фаз  $D < 0,5$  м. Таке компактне розташування фаз може бути реалізовано, наприклад, при використанні компактних ПЛЗ ( $D = 0,4$  м). Застосування ж ізоляторів ШФ 20-Г забезпечує відсутність перебивання при індукованих перенапругах як на компактних лініях з захищеними проводами, так і на лініях традиційних конструкцій з відстанню між фазами  $D = 1,2-2$  м.

Порівнюючи отримані результати з результатами, наведеними в [5], де подано розрахунок для довго-іскрового розрядника (РДІ), можемо зробити висновок про те, що ПЗПН за такого способу встановлення з ізолятором ШФ 20-Г є оптимальнішим варіантом, тому що розташування між фазами в ПЗПН ( $D < 0,5$  м) є більшим, ніж у РДІ ( $D < 0,3$  м).

### Встановлення пристроїв захисту

#### від перенапруг на фазний провід з чергуванням по фазах

Для захисту ліній традиційних конструкцій з порівняно більшими відстанями між фазами ( $D = 0.6$  м) від індукованих перенапруг під час використання ізоляторів ШФ 10 – Г може бути рекомендована схема встановлення ПЗПН на фазний провід на опорі з подальшим чергуванням по фазах, тобто на першій опорі ПЗПН встановлюється на фазу А, на другій опорі ПЗПН встановлюється на фазу В, на третій опорі – на фазу С і т.д. (рис. 3).

Під час впливу індукованих перенапруг перебиваються ПЗПН, встановлені на сусідніх опорах на різних фазах. При цьому утворюється електричний контур, що містить два резистанси заземлення опор. По контуру проникає струм міжфазного замикання. Завдяки наявності резистансів заземлення опор, струм цей обмежується до значень, що не перевищують 500 А.

Розглянемо схему ПЛЗ, наведену на рис. 4. Для спрощення міркувань розглянемо процеси, що відбуваються на двох фазах А і В. При цьому приймаємо, що ПЗПН-10 захищає ізолятор фази А на опорі № 1 й ізолятор фази В на опорі № 2.

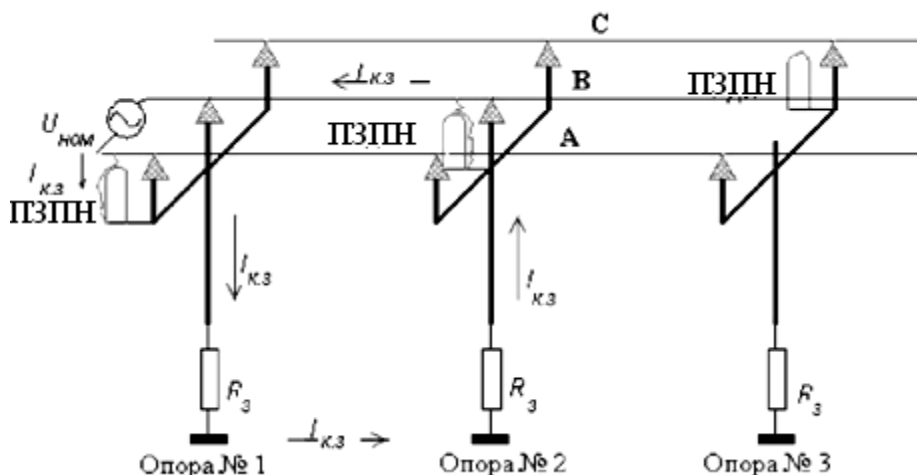


Рис. 4. Схема встановлення ПЗПН по лінії на різні фази (чергування по фазах)

Припускаємо, що індуквані перенапруги на проводах обох фаз у зонах опори № 1 й опори № 2 однакові й змінюються за законом лінійного наростання із крутизною  $a$  за формулою [5]

$$U_{\text{інд}} = a \cdot t. \quad (8)$$

У момент часу  $t_{\text{ПЗПН}}$  відбувається спрацьовування ПЗПН на обох опорах. Для уточнення розглянемо процеси, що відбуваються на опорі № 1 (на опорі № 2 ситуація аналогічна). Напруга на ізоляторі незахищеної фази В з врахуванням (7) і (8) дорівнює

$$U_{\text{ІЗ}} = k \cdot U_{\text{інд}} = k \cdot a \cdot t. \quad (9)$$

У момент часу  $t_{\text{ПЗПН}}$  починається поширення хвиль зрізу напруги по проводу фази А від опори № 1 до опори № 2 і відповідно по проводу фази В від опори № 2 до опори № 1 (рис. 4).

Якщо час пробігу цих хвиль між опорами перевищуватиме час, достатній для наростання перенапруги на ізоляторі фази В на опорі № 1, і на ізоляторі фази А на опорі № 2 до величини розрядної напруги ізолятора, то відбудеться їхнє перекриття. Якщо ж хвилі зрізу напруги встигнуть поширитися між опорами до цього моменту, то перенапруга на розглянутих ізоляторах різко знизиться, і їхнього перекриття не відбудеться, що буде означати виконання ПЗПН заданої захисної функції.

Відповідно до прийнятої розрахункової моделі умову неперекриття ізоляторів за індукваного грозового впливу можна виразити співвідношенням

$$t_{\text{сп.ІЗ}} - t_{\text{сп.ПЗПН}} > \Delta t = l_{\text{пр}} / c, \quad (10)$$

де  $\Delta t = l_{\text{пр}} / c$  – час пробігу хвилі напруги між сусідніми опорами;  $l_{\text{пр}}$  – довжина прогону;  $c \sim 300$  м/мкс – швидкість поширення електромагнітної хвилі вздовж лінії.

З (10) можна визначити критичну довжину прогону

$$l_{\text{пр.кр}} = (t_{\text{сп.ІЗ}} - t_{\text{сп.ПЗПН}}) \cdot c \quad (11)$$

Якщо фактична довжина прогону на лінії менша, ніж критична довжина прогону, то забезпечується захист від індукованих перенапруг.

Вольт-секундні характеристики ізолятора й ПЗПН можна апроксимувати такою формулою:

$$U = \gamma \cdot t^{\delta} \quad (12)$$

Для знаходження параметрів  $t_{\text{сп.ПЗПН}}$  і  $t_{\text{ІЗ}}$  необхідно розв'язати системи рівнянь:

– для ПЗПН:

$$\begin{aligned} U_{\text{ПЗПН}} &= \gamma_{\text{ПЗПН}} \cdot t_{\text{сп.ПЗПН}}^{\delta_{\text{ПЗПН}}}, \\ U_{\text{ПЗПН}} &= a \cdot t_{\text{сп.ПЗПН}}, \end{aligned} \quad (13)$$

– для ізолятора:

$$U_{i3} = \gamma_{i3} \cdot t_{\text{сп.і3}}^{\delta_{i3}},$$

$$U_{i3} = a \cdot t_{\text{сп.і3}},$$

де  $\gamma_{\text{пзпн}}$ ,  $\delta_{\text{пзпн}}$ ,  $\gamma_{i3}$ ,  $\delta_{i3}$  – коефіцієнти апроксимації з таблиці для ПЗПН й ізолятора відповідно.

Таблиця 1

**Коефіцієнти  $\gamma$  і  $\delta$  функції  $U = \gamma \cdot t^\delta$ , що апроксимують експериментальні вольт-секундні характеристики ізоляторів і ПЗПН (0,2 мкс < t < 2 мкс)**

№	Об'єкт	Полярність імпульсу	$\gamma$	$\delta$
1	Ізолятор ШФ10-Г	+	190	-0,352
2	Ізолятор ШФ10-Г	-	185	-0,285
3	Ізолятор ШФ20-Г	+	243	-0,407
4	Ізолятор ШФ20-Г	-	280	-0,28
5	ПЗПН-10	-	160	-0,65

Вольт-секундні характеристики (ВСХ) досліджених ПЗПН [8] й ізоляторів добре апроксимуються статичними функціями у вигляді  $U = \gamma \cdot t^\delta$ , де  $U$  – розрядна напруга, кВ;  $t$  – передрозрядний час, мкс;  $\gamma$  і  $\delta$  – емпіричні коефіцієнти. Значення коефіцієнтів  $\gamma$  і  $\delta$  наведені в таблиці.

З (13) одержимо

$$t_{\text{пзпн}} = (a/\gamma_{\text{пзпн}})^{1/(\delta_{\text{пзпн}}-1)}, \quad (14)$$

$$t_{i3} = (k \cdot a/\gamma_{i3})^{1/(\delta_{i3}-1)}.$$

Підставляючи (11) в (14), одержимо формулу для критичної довжини прогону

$$l_{\text{пзпн}} = [(k \cdot a/\gamma_{i3})^{1/(\delta_{i3}-1)} - (a/\gamma_{\text{пзпн}})^{1/(\delta_{\text{пзпн}}-1)}] \cdot c, \quad (15)$$

де  $k = (1 - m) \cdot (1 - k_{\text{зв}}) = (1 - (R_3 + R_{\text{опн}})/(Z_{\text{ХВ}}/2 + R_3 + R_{\text{опн}})) \cdot (1 - 1,1 \cdot (\ln(D'/D)/\ln(2 \cdot H/r_0)))$ .

Як видно з (15), критична довжина прогону залежить від параметрів вольт-секундних характеристик  $\gamma_{\text{пзпн}}$ ,  $\delta_{\text{пзпн}}$ ,  $\gamma_{i3}$ ,  $\delta_{i3}$  ПЗПН й ізолятора, крутизни напруги, що впливає –  $a$ , резистансу заземлення опор  $R_3$ , і відстані між фазами  $D$ .

На рис. 4 наведені розраховані залежності критичної довжини прогону  $l_{\text{кр.пр}}$  від відстані між фазами ПЛЗ при різних значеннях опору заземлення  $R_3$  при крутизні напруги додатньої полярності  $a = 300$  кВ/мкс ( $H = 8$  м;  $r_0 = 8$  мм, значення  $\gamma_{\text{пзпн}}$ ,  $\delta_{\text{пзпн}}$ ,  $\gamma_{i3}$ ,  $\delta_{i3}$  взяті з таблиці для додатньої полярності імпульсу для ПЗПН-10 й ізолятора ШФ 10-Г відповідно).

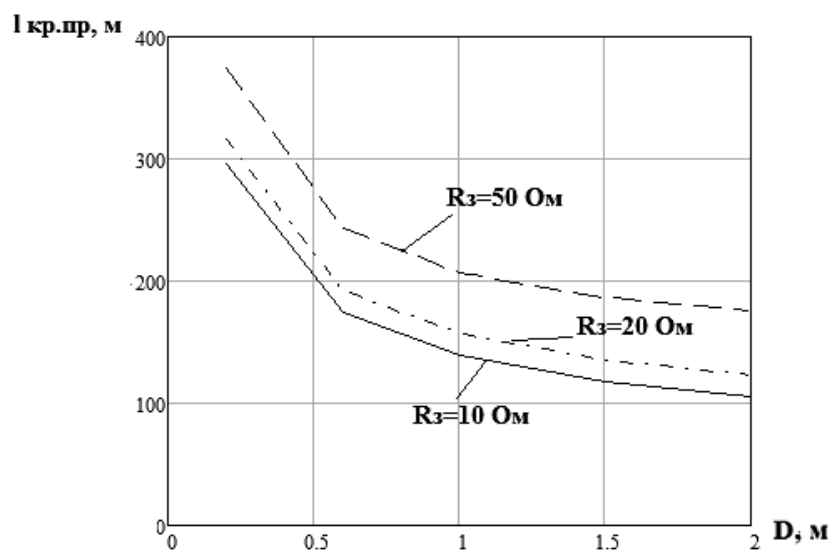


Рис. 5. Залежності критичної довжини прогону ( $l_{\text{пр.кр}}$ ) від відстані між фазами ( $D$ ) ПЛЗ при різних опорах заземлення опор ( $R_3$ )

Як видно з рис. 5, зі зменшенням відстані між фазами, а також зі збільшенням опору заземлення опор критична довжина прогону збільшується. З рис. 5 видно також, що у майже всіх реальних випадках критична довжина прогону має величину більша від 100 м. На практиці середня довжина прогону ПЛЗ 10 кВ становить близько 60 м, тобто вона менше критичної. Отже, запропонована схема встановлення ПЗПН чергуванням по фазах забезпечує координовану роботу ПЗПН-10 з ізоляторами типу ШФ 10-Г і захист від індукованих перенапруг не тільки ПЛЗ, а й звичайних ПЛ.

Порівнюючи отримані результати з результатами, наведеними в [31], де був проведений розрахунок для РДІ [5], можна зробити висновок про те, що ПЗПН та РДІ при цьому способі встановлення є оптимальними способами блискавкозахисту.

### Висновки

1. Отримано графік залежності напруги на ізоляторі незахищеної фази від відстані між фазами за умови встановлення ПЗПН на один фазний провід;
2. У розглянутій схемі встановлення ПЗПН (на один фазний провід на опорі, на верхню фазу) застосування ізоляторів типу ШФ 10-Г доцільно тільки у разі доволі компактного розташування фаз  $D = 0,4$  м, в цьому випадку напруга на ізоляторі незахищеної ПЗПН фази порівняно слабо зменшується при збільшенні опору заземлення опори;
3. Отримано графік залежності напруги на ізоляторі незахищеної фази від відстані між фазами за умови встановлення ПЗПН на один фазний провід з подальшим чергуванням по фазах;
4. Цей спосіб встановлення ПЗПН є оптимальним для ПЛЗ з відстанню між проводами 0,6 м, а також підходить для традиційних ПЛ з голими проводами;
5. При такому встановленні ПЗПН, застосування ізоляторів типу ШФ 10-Г є доцільне, оскільки в даному випадку зі зменшенням відстані між фазами, а також зі збільшенням опору заземлення опор критична довжина прогону збільшується;
6. Застосування ізоляторів ШФ20-Г забезпечує відсутність перекриття при індукованих перенапругах як на компактних лініях з захищеними проводами, так і на лініях традиційних конструкцій з відстанню між фазами  $D = 1,2-2$  м;
7. Аналіз результатів свідчить про гарантоване "попереджувальне спрацьовування" пристрою відносно моменту перекриття ізолятора й, відповідно, надійному захисті ізолятора від перекриття.

1. Жовнір Ю.М., Жовнір О.П., Ліщак І.В., Борецький М.М. Аспекти проблеми захисту повітряних ліній із захищеними проводами 6–35 кВ від атмосферних перенапруг // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2011. 2. Zeng R., He J.L., Chen S.M., Fu F.W., Guan Z.C. 10 kV insulated compact distribution line supported by composite spacers // Proc. IEEE Industrial Commercial Power Systems, Tech. Conf. – May 4–8, 2003. – P. 69–76. 3. Дмитриев М.В. Применение ОПН для защиты изоляции ВЛ 6–750 кВ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 92 с. 4. Методические указания по защите распределительных электрических сетей напряжением 0,4–10 кВ от грозовых перенапряжений. – М.: ОАО «РОСЭП», ОАО «ФСК ЕЭС», 2004. 5. Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений. – СПб., 2002. – 260 с. 6. Правила улаштування електроустановок. – Х.: Форт, 2009. – 708 с. 7. IEEE Std 1243-1997. IEEE Guide For Improving the Lightning Performance of Transmission Lines//The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. – New York, 1997. – 36 p. 8. Устройство защиты от перенапряжений // Промышленный Казахстан. – Апрель 2011. – № 4 (64). 9. Подпоркин Г.В., Сиваев А.Д. О применении ОПН для грозозащиты ВЛ 6–10 кВ. – СПб., 16 июля 2009.