

А. В. Журахівський¹
Т. В. Бінкевич¹

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ГРОЗОЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕСИЛАННЯ ШЛЯХОМ ЗНИЖЕННЯ ОПОРІВ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

¹Національний університет «Львівська політехніка»

Проведено аналіз впливу зміни опорів заземлення на надійність та ефективність грозозахисту повітряних ліній електропересилання (ЛЕП). Виконано серію математичних симуляцій для опор ЛЕП з різними значеннями опорів заземлення, в результаті чого побудовані криві небезпечних параметрів, а також розраховані числові характеристики надійності грозозахисту. Розраховано ймовірності появи небезпечних атмосферних перенапруг від величини опорів заземлення опор під час удару блискавки в опору чи трос ЛЕП.

Ключові слова: повітряна лінія електропересилання, імпульсний опір заземлення, крива небезпечних параметрів, ймовірність небезпечних перенапруг, інтенсивність грозових пошкоджень.

Вступ

Надійність грозозахисту повітряних ліній електропересилання та підстанцій тим вища, чим менша кількість аварійних відключень через грози за певний період часу. Інтенсивність грозових пошкоджень визначається частотою грозових впливів і здатністю об'єкта протистояти кожному удару блискавки.

Заземлювальним пристроєм (ЗП) називається конструкція з електропровідних матеріалів, яка служить для відводу струму в землю. Основна функція, яку виконує ЗП опори повітряної лінії електропересилання — це відведення в землю струму блискавки, тобто зменшення можливості (ймовірності) зворотних перекриттів під час удару блискавки в опору або грозозахисний трос

На відміну від звичайних перекриттів, викликаних зволоженням або забрудненням ізоляції, струм блискавки може викликати на опорі електричний потенціал, набагато більший потенціалу фазного проводу, і, таким чином, перекриття відбувається в зворотному напрямку. Разом з тим чим менший опір ЗП, тим менша можливість зворотного перекриття.

Метою роботи є аналіз впливу зміни опорів заземлення на надійність та ефективність грозозахисту ЛЕП.

Для дослідження впливу зміни опорів заземлення на надійність грозозахисту проведено серію математичних симуляцій для однієї з ЛЕП Західної електро-енергетичної системи НЕК «Укренерго» для визначених опор. Результати подано у вигляді кривих небезпечних параметрів, а також у вигляді числових характеристик розрахованих в абсолютних та відносних одиницях

Результати дослідження

На ЛЕП підлягають заземленню: опори, які мають грозозахисний трос або інші пристрої грозозахисту; залізобетонні та сталеві опори ЛЕП напругою 0,4...35 кВ; опори, на яких встановлені силові або вимірювальні трансформатори, роз'єднувачі та інші апарати; сталеві та залізобетонні опори ЛЕП 110–500 кВ без пристроїв захисту від блискавки, якщо це необхідно за умов забезпечення надійної роботи релейного захисту та автоматики [1].

Зменшення опору заземлення опор ЛЕП з тросом є одним з основних засобів зменшення ймовірності імпульсного перекриття ізоляції за удару блискавки в трос чи опору.

У тих випадках, коли не вдається виконати низький опір заземлення опор, тросовий захист може виявитись малоефективним, оскільки більшість ударів блискавки в трос чи опору будуть приз-

водити до перекриття ізоляції.

Для ефективного відведення струму блискавки в землю і запобігання зворотним перекриттям ізоляції опори лінії забезпечуються відповідними заземлювачами, що знижують імпульсний опір заземлення кожної опори до значень менших 10...20 Ом. Вищі значення опору заземлення опор допускаються лише для ліній, розташованих в районах з високим питомим опором ґрунту ($\rho > 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). У ґрунтах з $\rho > 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ бажано застосовувати ефективні глибинні заземлювачі або, в крайньому випадку, багатопроменеві заземлювачі довжиною 20–30 м [5].

На сьогодні з метою зниження опору, в місцях з високим питомим опором ґрунту ρ , застосовують різні методи штучного зниження його (рис. 1).

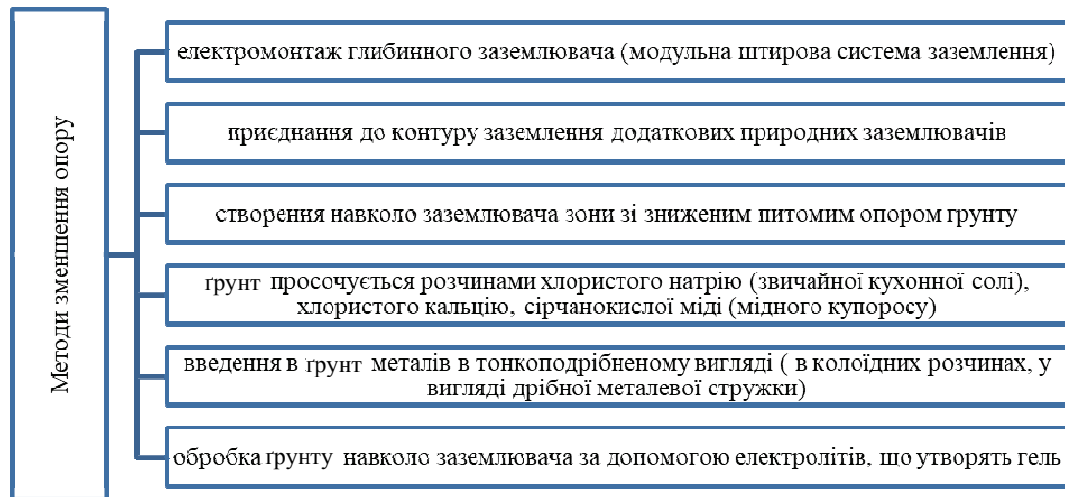


Рис. 1. Методи зменшення опору ЗП ЛЕП

Для зменшення опору заземлювальних пристроїв, необхідно виконати монтаж додаткових заземлювачів. Найшвидшим і конструктивним рішенням є монтаж глибинного заземлювача (модульна штирова система заземлення). Додатковим способом зменшення опору розтікання струму заземлювальних пристроїв є приєднання до контуру заземлення додаткових природних заземлювачів, наприклад: металеві стовпи паркану; металеві конструкції будівлі, що мають зіткнення з землею; металеві труби водопроводів, які прокладені в землі, тощо [1].

Загальний опір заземлення залежить, від опору прилеглих до заземлювачів шарів ґрунту. Тому можна домогтися зниження опору заземлення зниженням питомого опору ґрунту лише в невеликій зоні навколо заземлювача.

Для створення навколо заземлювача зони зі зниженим питомим опором в ґрунті робиться виїмка (котлован) радіусом 1,5...2,0 м і глибиною, що дорівнює довжині стрижня, який забивають. Після заповнення виїмки ґрунтом встановлюється заземлювач і ґрунт втрамбується.

В якості ґрунту-заповнювача може бути застосований будь-який ґрунт, що має питомий опір в 5...10 разів менший, ніж питомий опір основного ґрунту. Наприклад, якщо заземлення влаштовується в піщаному або кам'янистому (граніт) ґрунті, то наповнювачами можуть бути, глина, торф, чорнозем, суглинок, шлак тощо. Таким способом досягається зниження опору заземлення в середньому в 2,5...3 рази [4], [6].

Досвід показав, що максимальне зменшення опору заземлення хімічним методом досягається за використання електролітів, деревного вугілля і коксового дріб'язку. Перший спосіб полягає в тому, що навколо заземлювачів ґрунт просочується розчинами хлористого натрію (звичайної кухонної солі), хлористого кальцію, сірчанокислої міді (мідного купоросу) тощо. Варто зазначити, що цим способом можна домогтися порівняно великого зниження величини опору заземлення, однак на нетривалий термін, після чого потрібно знову просочувати ґрунт електролітом [7], [8].

Ефективним і дешевим способом зниження опору заземлення є обробка ґрунту кухонною сіллю. Дія останньої зводиться не тільки до зниження питомого опору ґрунту, але і до зниження температури його замерзання.

Існують різні способи укладання солі поблизу заземлювача. В [4] зазначено укладання близько трубчастого заземлювача солі шарами. Сіль може також укладатися на всю глибину біля трубчастого заземлювача або на невеликій відстані від нього. Останній спосіб зручніший тому, що корозія заземлювача в цьому випадку буде мінімальною.

Кількість солі, необхідної для обробки заземлення, залежить від довжини електрода: від 1,5 до 10 кг на 1 м заземлювача.

Іноді сіллю заповнюється простір всередині заземлювача, виконаного у вигляді порожнистої труби з отворами, через які розчин солі виходить в навколишній ґрунт.

Оскільки сіль з часом вимивається, то термін дії обробки ґрунту обмежений і через 2—4 роки її доводиться повторювати. Ефективність обробки неоднакова і з плином часу змінюється. У перший рік, коли сіль ще не встигає розповсюдитися навколо заземлювача, опір знижується порівняно мало. Оптимальні умови настають на другому—третьому році і потім починають йти на спад. Стійкість обробки залежить від складу ґрунту, вологості, кількості опадів. [4]

До недоліків зазначених способів обробки ґрунтів відноситься необхідність відновлення просочення ґрунтів приблизно через 2—4 роки і можливість руйнування заземлювачів від хімічного впливу на них солей або соляних розчинів, внаслідок чого потрібна заміна їх новими заземлювачами.

Робилися спроби усунути ці недоліки. Так, в Німеччині, наприклад, був запропонований спосіб, за яким в ґрунт навколо заземлювача вводяться метали в тонкоподрібненому вигляді, як, наприклад, в колоїдних розчинах, або у вигляді дрібної металеві стружки. Якщо при цьому тонко подрібнені метали обрані так, щоб не могли виникати гальванічні пари з самим заземлювачами, то останній кородувати не буде [9].

Однак колоїди не стійкіші в ґрунті, ніж солі та соляні розчини. Вони поступово вимиваються з навколишніх до заземлювачів шарів ґрунту дощовою водою, внаслідок чого досягнуте зменшення опору заземлювача з плином часу пропадає. У США запропоновано спосіб затримання вимивання соляних розчинів з ґрунту шляхом змішування соляного розчину (наприклад, мідного купоросу) з нерозчинною у воді пластмасовою сумішшю і впорскування їх в ґрунт під великим тиском. Цей спосіб є дорогим і тривалість його дії не визначалася.

З інших способів штучного зниження опору заземлювачів, запропонованих в різних країнах, в першу чергу заслуговує на увагу шведський спосіб — обробка ґрунту навколо заземлювача за допомогою електролітів, що утворюють гель.

В результаті змішування концентрованого розчину сірчаної кислоти міді з еквівалентною кількістю концентрованого розчину солі лужного ціаністого заліза виходить нерозчинний у воді продукт реакції — з'єднання синильної кислоти і ціаніду заліза, яка за певних умов утворює однорідний електропровідний гідрогель [10].

Електричні і фізичні властивості гідрогелю не змінюються істотно скільки-завгодно від тривалого впливу води і є стійкими до коливань температури в межах від -60 до $+60$ °С. Однак він ефективний за зниження дуже високих опорів заземлювачів (близько 400...600 Ом) і малоефективний для величин опорів порядку 20...30 Ом.

Для дослідження впливу зміни опорів заземлення на надійність грозозахисту авторами проведено серію математичних симуляцій для однієї з ЛЕП Західної електро-енергетичної системи НЕК «Укренерго» для зазначених опор. Досліджувана ЛЕП напругою 330 кВ виконана опорами типу ПБ 330-7н, проводом марки АС-400/51 з ізоляторами ПС-70Д, та оснащена блискавкозахисною лінвою марки С-70. Для досліджуваної ЛЕП проводилась перевірка опору заземлення опор приладом MRU-105 №АС2828, результати якої показані на (рис. 2, 3).

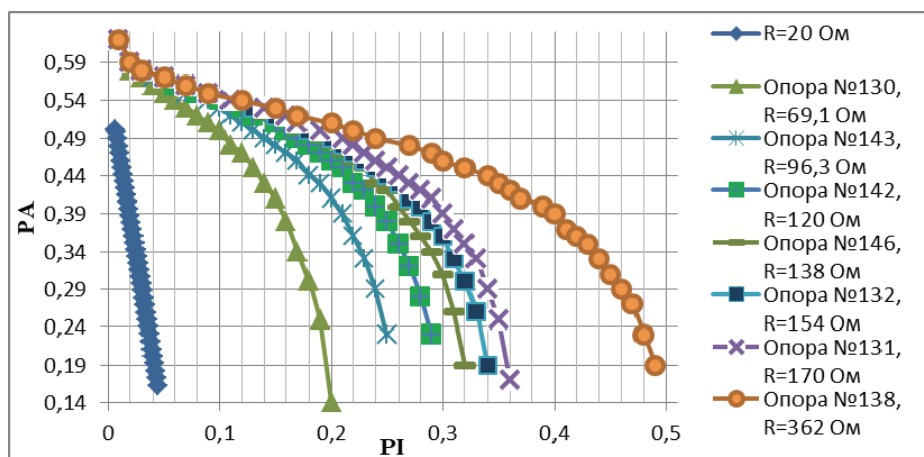


Рис. 2. Криві небезпечних параметрів у відносних координатах за удару блискавки в зазначені опори ЛЕП 330 кВ

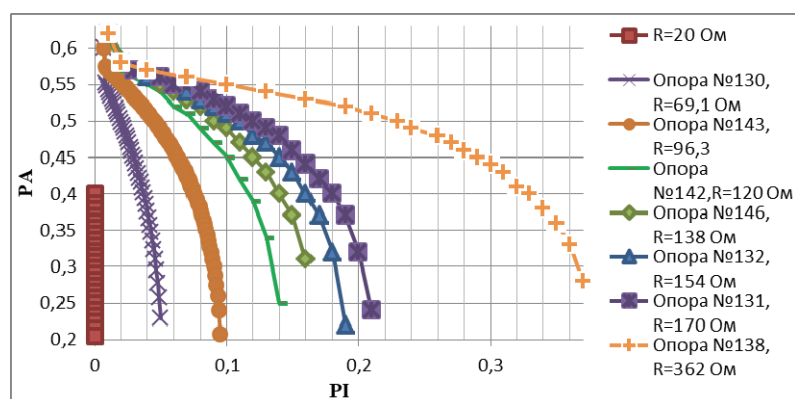


Рис. 3. Криві небезпечних параметрів у відносних координатах за удару блискавки в трос зазначених опор ЛЕП 330 кВ

Згідно з паспортом ЛЕП нормативний опір заземлення опори становить 20 Ом, оскільки питомий опір землі на місцевості проходження ЛЕП становить 500...1000 Ом/м. На рис. 2, 3 показані криві небезпечних параметрів у відносних координатах, побудованих за удару блискавки в опору та трос досліджуваної ЛЕП. Крива небезпечних параметрів в абсолютних одиницях показує, для яких поєднань амплітуди і тривалості фронту грозова хвиля буде в змозі викликати небезпечні перенапруги. Площа, обмежена осями та кривою небезпечних параметрів, побудованої у відносних одиницях, чисельно буде рівною ймовірності імпульсного розряду на ізоляції ЛЕП. Аналізуючи рис. 2 та 3, бачимо тенденцію збільшення ймовірності перекриття ізоляції зі збільшенням опору заземлення опори.

Чисельні значення цих площ, а також основні показники надійності грозозахисту, такі як: питомих число відключень ЛЕП за ударів блискавки в трос, опору, провід, а також сумарне питомих число грозових відключень і абсолютне число грозових відключень за рік зведені в табл. 1

Таблиця 1

**Результати розрахунків надійності грозозахисту для ЛЕП напругою 330 кВ,
з урахуванням опору заземлювального пристрою**

Опора	$n_{оп}$ (на 100 км. при 100 гроз. год.)	$n_{тр}$ (в рік)	$n_{тр}$ (на 100 км. при 100 гроз. год.)	n (на 100 км. при 100 гроз. год.)	N (на 100 км. при 100 гроз. год.)	$P_{оп}$	$P_{тр}$
($R = 20$ Ом)	0,27393	8,7449E-5	0,29486	0,56888	0,52109	0,077	0,0015
Опора № 130 ($R = 69,1$ Ом)	0,98922	0,010369	0,29486	1,3068	1,197	0,273	0,145
Опора № 143 ($R = 96,3$ Ом)	1,01	0,022743	0,29486	1,3152	1,2047	0,451	0,169
Опора № 142 ($R = 120$ Ом)	1,1583	0,02628	0,29486	1,4818	1,3574	0,528	0,186
Опора № 146 ($R = 138$ Ом)	1,4647	0,02862	0,29486	1,7858	1,6358	0,587	0,219
Опора № 132 ($R = 154$ Ом)	1,5524	0,04491	0,29486	1,8922	1,7333	0,605	0,271
Опора № 131 ($R = 170$ Ом)	1,7455	0,04644	0,29486	2,0868	1,9115	0,632	0,375
Опора № 138 ($R = 362$ Ом)	2,1332	0,07164	0,29486	2,4997	2,2897	0,894	0,651

Величина імпульсних опорів ЗП підстанцій та опор ліній електропередач є важливим фактором, що впливає на надійність захисту електроустановок. Під локальним імпульсним опором заземлення розуміється розрахункова величина, що дорівнює відношенню миттєвих значень імпульсної напруги на заземлювачі та імпульсного струму через нього. Імпульсний опір визначається за часів, що не перевищують перших одиниць мікросекунд, коли розтікання відбувається лише з ближньої зони заземлювального пристрою апарата і не охоплює всі заземлюючі пристрої електроустановки [3]. Враховуючи значення питомого опору ґрунту на місцевості проходження ЛЕП та конструкції ЗП,

вибираємо значення імпульсного коефіцієнта, яке становить 0,7. Результати розрахунків надійності грозозахисту ЛЕП з урахуванням імпульсного опору відображено у вигляді числових характеристик, розрахованих в абсолютних та відносних одиницях (табл. 2).

Таблиця 2

**Результати розрахунків надійності грозозахисту для опор ЛЕП напругою 330 кВ,
з урахуванням імпульсного опору заземлювального пристрою**

Опора № 130 ($R_{\text{имп}} = 48,37 \text{ Ом}$)	Удар в опору	PI	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,11	0,13
		PA	0,62	0,58	0,56	0,54	0,52	0,51	0,49	0,46	0,44	0,37	0,28
$A, \text{кА/мкс}$	5,975	6,809	7,248	7,702	8,174	8,417	8,917	9,707	10,26	12,42	15,91		
$I, \text{кА}$	115,1	97,8	87,66	80,47	74,89	70,34	66,48	63,14	60,19	55,18	51,00		
Удар у трос	PI	0,006	0,007	0,008	0,009	0,011	0,012	0,014	0,017	0,018	0,019	0,02	
	PA	0,501	0,491	0,478	0,465	0,437	0,422	0,39	0,332	0,307	0,278	0,241	
	$A, \text{кА/мкс}$	8,639	8,891	9,227	9,571	10,35	10,78	11,77	13,78	14,76	16,00	17,78	
$I, \text{кА}$	127,9	124	120,7	117,8	112,7	110,6	106,7	101,9	100,4	99,08	97,80		
Опора № 131 ($R_{\text{имп}} = 1190 \text{ Ом}$)	Удар в опору	PI	0,01	0,03	0,06	0,08	0,14	0,17	0,19	0,22	0,24	0,25	0,27
		PA	0,62	0,58	0,56	0,55	0,51	0,49	0,47	0,43	0,4	0,38	0,32
		$A, \text{кА/мкс}$	5,975	6,809	7,248	7,473	8,417	8,917	9,438	10,55	11,45	12,09	14,24
	$I, \text{кА}$	115,1	87,66	70,34	63,14	49,15	44,3	41,52	37,85	35,68	34,66	32,73	
Удар у трос	PI	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,11	0,12	0,13	
	PA	0,62	0,57	0,56	0,55	0,54	0,52	0,49	0,47	0,42	0,38	0,33	
	$A, \text{кА/мкс}$	5,975	7,026	7,248	7,473	7,702	8,174	8,917	9,437	10,84	12,09	13,86	
$I, \text{кА}$	115,1	97,8	87,66	80,47	74,89	70,34	63,14	60,19	55,18	53,01	51,01		
Опора № 138 ($R_{\text{имп}} = 253,40 \text{ Ом}$)	Удар в опору	PI	0,01	0,03	0,07	0,12	0,17	0,21	0,25	0,28	0,31	0,34	0,39
		PA	0,62	0,58	0,56	0,54	0,52	0,5	0,48	0,46	0,44	0,41	0,34
		$A, \text{кА/мкс}$	5,975	6,809	7,248	7,702	8,174	8,664	9,175	9,707	10,26	11,14	13,48
	$I, \text{кА}$	115,1	87,66	66,48	53,01	44,3	39,02	34,66	31,82	29,28	26,97	23,54	
Удар у трос	PI	0,01	0,04	0,09	0,13	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,28	
	PA	0,62	0,57	0,55	0,53	0,51	0,49	0,47	0,45	0,42	0,37	0,34	
	$A, \text{кА/мкс}$	5,975	7,026	7,473	7,936	8,417	8,917	9,438	9,981	10,84	12,42	13,48	
$I, \text{кА}$	115,1	80,47	60,2	51,01	44,3	41,52	39,02	36,74	34,65	32,73	31,82		

Висновки

1. Надійність грозозахисту повітряних ліній електропередавання та підстанцій тим вища, чим менша кількість аварійних відключень через грози за певний період часу. Зменшення опору заземлення опор ЛЕП з тросом є одним з основних засобів зменшення ймовірності імпульсного перекриття ізоляції за удару блискавки в трос чи опору.

2. За збільшення опору заземлення опори від 20 Ом до 362 Ом ймовірність імпульсного розряду на ізоляції ЛЕП зростає з 7,7 % до 89,4 % під час удару блискавки в опору та з 0,15 % до 65,1 % під час удару блискавки в трос ЛЕП.

3. За збільшення імпульсного опору заземлення в 5,2 рази величина параметрів небезпечних перенапруг зростає в 3 рази під час удару в опору та 1,5 рази під час удару блискавки в трос ЛЕП.

4. Аналізуючи способи штучного зниження опору заземлювачів, необхідно виділити шведський спосіб — обробку ґрунту навколо заземлювача за допомогою електролітів, що утворюють гель — як найдовготриваліший та якісний спосіб.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Мінпаливенерго України, *Правила улаштування електроустановок*, перероб. і доп., в. 3. Київ, Україна, 2010, 736 с.
- [2] Міністерство палива та енергетики України, *Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів*, Х., Україна: Форт, 2012, 368 с.
- [3] А. В. Журахівський, І. В. Лішак, та Т. В. Бінкевич «Імпульсний опір заземлення опор повітряних ліній та його вплив на надійність грозозахисту», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 74-78, 2016.
- [4] Министерство связи СССР, Главное управление международной телефонной связи, *Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации заземлений в установках проводной связи и радиотрансляционных*. Москва, Россия: Связь, 1971. 79 с.

- [5] В. С. Собчук, Н. В. Собчук, та О. Б. Бурикін. *Перенапруги і блискавкозахист в електричних системах*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010. 145 с.
- [6] А. Н. Новикова и др. «Анализ результатов измерений сопротивления заземления опор ВЛ с тросом при модернизации заземляющих устройств», *Электрические станции*, № 9, 2007.
- [7] А. Н. Данилин, В. В. Колобов, В. Н. Селиванов, и П. И. Прокопчук, «Методика и результаты измерений локальных импульсных сопротивлений заземлителей оборудования подстанций» в *Сборник докладов 9-й Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности «ЭМС-2006»*, СПб., Россия: ВИТУ, 2006, с. 426-430.
- [8] А. Н. Данилин, Д. В. Куклин, и В. Н. Селиванов, «Исследование локальных импульсных сопротивлений протяженных подземных проводников», *Научно-технические ведомости СПбГПУ*, № 1(95), с. 250-254, 2010.
- [9] W. A. Chisholm, E. Petrache, and F. Bologna, «Comparison of low frequency resistance and lightning impulse impedance on transmission towers», in *X International Symposium on Lightning Protection*, 9-13 November 2009, Curitiba, Brazil, p. 329-334.
- [10] E. Petrache, W. A. Chisholm, and A. Phillips, «Evaluating the transient impedance of transmission line towers» in *IX International Symposium on Lightning Protection*, 26-30 November 2007, Foz do Iguaçu, Brazil.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.01.2018

Журахівський Анатолій Валентинович — д-р. техн. наук, професор кафедри електроенергетики та систем управління;

Бінкевич Тарас Володимирович — аспірант кафедри електроенергетики та систем управління, e-mail: 0507019417@mail.ru .

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

A. V. Zhurakhivskyi¹
T. V. Binkevych¹

Improvement of Reliability and Efficiency of Lightning Protection of Overhead Transmission Lines by Reducing Grounding Resistance

¹Lviv Polytechnic National University

The analysis of methods of artificial reduction of grounding resistance, applied in places with a high specific resistivity of the ground, has been carried out. As a result of the analysis, the most effective and long-term method of artificial underestimation of soil resistance was determined. The main requirements for a grounding device are determined in accordance with the current regulatory documentation

The analysis of the influence on the change of grounding resistance on the reliability and efficiency of lightning protection of overhead transmission lines (OTL) has been carried out. A series of mathematical simulations for OTL supports with different ground resistance values was performed, as a result of which the curves of dangerous parameters were constructed, and numerical characteristics of the lightning protection reliability were calculated.

The impulse factor for calculating the impulse resistance of grounding was determined, as a result of which a series of mathematical simulations were carried out and indicators of the reliability of lightning protection in absolute and relative units were calculated.

The probability of occurrence of dangerous atmospheric overvoltages was calculated from the value resistance of the grounding when the lightning strikes conductor or the cable of the OTL.

As a result of the conducted studies, the regularities between the values of the ground resistance and the probability of the appearance of a impulsed discharge on the insulation of the transmission line, as well as, the regularities between the magnitude of the impulse resistance of grounding and the values of the parameters of dangerous overvoltages were determined. It has also been found that the reduction of the grounding resistance of tower of OTL with a cable is one of the main ways to reduce the probability of impulse overlap of insulation when a lightning strikes a cable or a resistance.

Keywords: overhead transmission line, impulse ground resistance, curve of dangerous parameters, probability of dangerous overvoltages, intensity of lightning damage.

Zhurakhivskyi Anatolii V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Power Engineering and Control Systems;
Binkevych Taras V. — Post-Graduate Student of the Chair of Power Engineering and Control Systems, e-mail: 0507019417@mail.ru

А. В. Жураховский¹
Т. В. Бинкевич¹

Повышение надежности и эффективности грозозащиты воздушных линий электропередачи путем снижения сопротивления заземляющих устройств

¹Национальный университет «Львовская политехника»

Проведен анализ влияния изменения сопротивлений заземления на надежность и эффективность грозозащиты воздушных линий электропередачи (ЛЭП). Выполнена серия математических симуляций для опор ЛЭП с разными значениями сопротивлений заземления, в результате чего построены кривые опасных параметров, а также рассчитаны числовые характеристики надежности грозозащиты. Рассчитаны вероятности появления опасных атмосферных перенапряжений от величины сопротивлений заземления опор при ударе молнии в опору или трос ЛЭП.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, импульсное сопротивление заземления, кривая опасных параметров, вероятность опасных перенапряжений, интенсивность грозовых повреждений.

Жураховський Анатолій Валентинович — доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики и систем управления;

Бинкевич Тарас Владимирович — аспирант кафедры электроэнергетики и систем управления, e-mail: 0507019417@mail.ru