УДК 621.316.99 **doi: 10.20998/2224-0349.2021.01.11**

В. І. НІЖЕВСЬКИЙ, С. К. БЕРЕЗКА, О. М. ФЕДОСЕЄНКО, І. В. НІЖЕВСЬКИЙ

КОРЕКТУВАННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ АМПЛІТУДИ ІМПУЛЬСУ СТРУМУ ВЗДОВЖ ПРОТЯЖНОГО ЗАЗЕМЛЮВАЧА

Обґрунтовано вдосконалений метод вимірювання амплітуди імпульсу струму при його протіканні від початку до кінця протяжного горизонтального заземлювача за допомогою феромагнітних реєстраторів. При обґрунтуванні використано два існуючих методи вимірювань амплітуди імпульсу при високій напрузі – метод магнітозапису та метод з використанням шунта. Відзначено, що у ряді випадків виникає необхідність визначати зниження амплітуди імпульсу при його протіканні по протяжному об'єкту. Це призвело до необхідності розробки методу, що дозволяє виконувати такі вимірювання. В якості прикладу досліджений протяжний горизонтальний заземлювач при стіканні з нього імпульсу струму блискавки. На основі експериментальних досліджень в натуральних умовах запропоновано скоригований метод вимірювання амплітуди імпульсу струму вздовж протяжного заземлювача. Запропонований метод має похибку вимірювань, яка не перевищує 10 %, і дозволяє проводити одночасно вимірювання амплітуди сили струму в заданих точках об'єкта, які можуть обчислюватися десятками і навіть сотнями. Цей метод реалізується простою конструкцією і має доступну вартість виготовлення. Результати виконаних експериментів дозволяють рекомендувати скоригований метод вимірювання до практичного використання на діючих електроустановках. Застосування феромагнітних реєстраторів для реєстрації та вимірювання струму блискавки на ділянках складних заземлюючих пристроїв актуально з практичних причин, які полягають у можливості вимірювання в процесі тривалого очікування і тривалому збереженні результатів вимірювання, не передбачає необхідність додаткових джерел живлення і забезпечує можливість синхронного вимірювання у різних точках заземлювального пристрою. Важливою особливістю методу є безпека для технічного обладнання та персоналу.

Ключові слова: метод вимірювання, визначення, зниження амплітуди, імпульс струму, висока напруга, протяжний заземлювач.

В. И. НИЖЕВСКИЙ, С. К. БЕРЕЗКА, Е. Н. ФЕДОСЕЕНКО, И. В. НИЖЕВСКИЙ

КОРРЕКТИРОВКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ИМПУЛЬСА ТОКА ПО ДЛИНЕ ПРОТЯЖЕННОГО ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ

Обоснован усовершенствованный метод измерения амплитуды импульсу тока по мере его протекания от начала к концу протяженного горизонтального заземляющего устройства с помощью ферромагнитных регистраторов. При обосновании использовано два существующих метода измерений амплитуды импульса при высоких напряжениях – метод магнитозаписи и метод с использованием шунта. Отмечено, что в ряде случаев возникает необходимость определять снижение амплитуды импульса при его протекании по протяженному объекту. Это приводит к необходимости разработки метода, позволяющего выполнять такие измерения. В качестве примера исследован протяженный горизонтальный заземлитель при стекании с него импульса тока молнии. На основе экспериментальных исследований в натуральных условиях предложен усовершенствованный метод измерения снижения амплитуды импульса силы тока молнии вдоль протяженного заземлителя. Предложенный метод имеет погрешность измерений, не превышающую 10 %, и позволяет проводить одновременно измерения амплитуды силы тока в заданных точках объекта, которые могут исчисляться десятками и даже сотнями. Этот метод реализуется простой конструкцией и имеет доступную стоимость изготовления. Результаты выполненных экспериментов позволяют рекомендовать скорректированный метод измерения к практическому использованию на действующих электроустановках. Применение ферромагнитных регистраторов для регистрации и измерения тока молнии на участках сложных заземляющих устройств актуально по практическим причинам, которые заключаются в возможности измерения в процессе длительного ожидания и длительном сохранении результатов измерения, не предусматривает необходимость дополнительных источников питания и обеспечивает возможность синхронного измерения в различных точках заземляющего устройства. Важной особенностью метода является безопасность для технического оборудования и персонала.

Ключевые слова: метод измерения, определение, снижение амплитуды, импульс тока, высокое напряжение, протяженный заземлитель.

V. NIZHEVSKY, S. BEREZKA, O. FEDOSEENKO, I. NIZHEVSKY

CORRECTION OF THE METHOD FOR MEASURING THE AMPLITUDES OF THE CURRENT OF THE IMPULSE ALONG THE LONG EARTH ELECTRODE

An improved method for measuring the amplitude reduction of the lightning current impulse as it flows from the beginning to the end of long horizontal earthing arrangement using ferromagnetic recorders has been substantiated. Two existing methods of pulse amplitude measurements at high voltages, the magnetic recording method and the method using a shunt, are used in justification. It is noted that in a number of cases it becomes necessary to determine the decrease in the pulse amplitude as it flows on a long object. This leads to the need to develop a method for performing such measurements. As an example, a long horizontal earth electrode was investigated when a lightning current pulse moves on it. Based on experimental studies in natural conditions, an improved method for measuring the decrease in the amplitude of the lightning current impulse along a long earth electrode is proposed. The proposed method has a measurement error not exceeding 10 %, and allows simultaneous measurements of the amplitude of the current strength at given points of the object, which can amount to tens or even hundreds. This method is implemented in a simple design and has an affordable manufacturing cost. The results of the experiments performed make it possible to recommend the corrected measurement method for practical use on existing electrical installations. The use of ferromagnetic recorders for recording and measuring the lightning current in areas of complex earthing arrangements is relevant for practical reasons, which include the possibility of measuring during a long wait and long-term storage of measurement results, does not require additional power sources and provides the possibility of synchronous measurements at various points of the grounding device. An important feature of the method is safety for technical equipment and personnel.

Keywords: measurement method, determination, amplitude reduction, current impulse, high voltage, long earth electrode.

© В. І. Ніжевський, С. К. Березка, О. М. Федосеєнко, І. В. Ніжевський, 2021

Вступ. Питанням вимірювання амплітуди сили струму (струми блискавки, струми короткого замикання, струми перевантаження і т.д.) короткочасних імпульсів, що призводять до перенапруг, присвячено багато наукових робіт [1–4]. Рішення пов'язаних з цим завдань як в нашій країні, так і за кордоном сформульовані та узагальнені в роботі [5], де викладені актуальні проблеми електромагнітної сумісності та блискавкозахисту. Показано, що перевищення нормованих рівнів перенапруг і перешкод є причиною зниження надійності електропостачання.

При вимірюванні амплітуди імпульсу сили струму великої величини застосовуються шунти, а також електромагнітні трансформатори струму. Разом з тим, вимірювання величини сили струму повинні забезпечувати необхідну точність. У ряді випадків необхідно проводити вимірювання амплітуди сили струму в різних точках об'єкта одночасно (синхронно). Останнє, особливо при високій напрузі, вимагає досить складних і громіздких схем, а також великої кількості приладів або осцилографічних станцій. Це характерно для вимірювання імпульсних струмів блискавок. Сьогодні також необхідно мати можливість вимірювання зниження амплітуди імпульсу сили струму блискавки методом магнітозапису, тобто за допомогою феромагнітних реєстраторів (ФР).

ФР застосовуються для вимірювання великих імпульсних струмів і особливо широко для реєстрації струмів блискавки. Вони прості за конструкцією і дешеві у виготовленні. Це дає можливість встановлювати їх на кожній магістралі складних заземлювальних пристроїв при вимірах.

Такі вимірювання проводилися авторами в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») на кафедрі «Передача електричної енергії», а також проводяться в даний час на лабораторній установці, створеній проф. Гуль В. І.

Огляд публікацій та постановка задачі. Застосування феритових виробів заводського виготовлення в якості ФР описано в роботі [6], де викладено основні результати досліджень різних феромагнітних матеріалів і виробів з них з точки зору використання як магнітореєстраторів імпульсних струмів.

В роботі [7] розглянуто вплив стабільності магнітних характеристик ФР на похибку вимірювань амплітуди імпульсу сили струму методом магнітозапису. Розглянуто також вплив дестабілізуючих факторів: температурних і механічних впливів, взаємовпливу ФР, зміни залишкової намагніченості в часі, а також розкиду характеристик регістраторів на похибку вимірювання великих величин струмів.

Комплект пристроїв для вимірювання пікових струмів з низькоомного шунта методом магнітозапису наводиться в роботі [8], де викладені основні рішення, прийняті при розробці вимірювача пікових струмів, що використовує метод магнітозапису, і приладів намагнічування-розмагнічування ФР.

Вимірювач залишкової намагніченості [8] складається (рис. 1) з багатовиткової котушки (1) на осерді (2) з магнітом'якого матеріалу, в зазорі якого з великою швидкістю обертається електродвигуном тримач (3) з ФР (4), а в ланцюг котушки включений діод і мікроамперметр (5), що вимірює значення випрямленого струму.

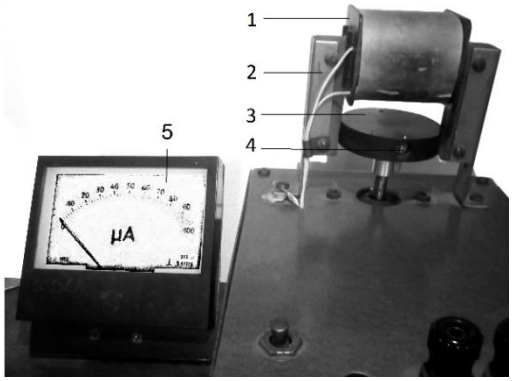


Рисунок 1 – Вимірювач залишкової намагніченості *Br*

В електроенергетичних системах [9] в період грозової активності можуть проводити вимірювання струмів блискавки, використовуючи намагніченість ФР, встановлених на опорах повітряної лінії електропередачі або системах заземлення.

У зв'язку з викладеним в роботі [10], необхідно підкреслити, що результати досліджень розподілу імпульсного струму вздовж променевих заземлювачів отримані розрахунковим шляхом на моделях, а при моделюванні не враховується ряд факторів, які проявляються лише на реальному заземлювачі при стіканні імпульсних струмів блискавки. Це призводить до істотної розбіжності модельних і натурних результатів, яка може досягати навіть сотень відсотків. Роботу [10] слід продовжити в напрямку досліджень зниження амплітуди імпульсу сили струму блискавки уздовж променевих заземлювачів.

В роботі [11] наведені результати досліджень моделювання рівномірності розподілу імпульсного струму в заземлювальному пристрої опори у вигляді горизонтальних променевих заземлювачів (електродів). При дослідженні одного променевого електрода встановлено, що переважна частина імпульсного струму розтікається від кінця електрода і мінімальний індекс опору розтікання має місце при рівномірному розподілі струму. Розрахунковим шляхом на моделі досліджено розподіл імпульсного струму в 6-електродному заземлювачі. Горизонтальна складова струму розтікається в основному від частин електрода найближчих до точки інжекції струму і до кінця електрода заземлювача з 4 променів.

Сучасні портативні пристрої дозволяють проводити вимірювання амплітуди імпульсу, забезпечують високу точність, мають автономне живлення та недорогі. Однак, вони не дозволяють проводити вимірювання при великому числі точок одночасного вимірювання та необхідного для цього персоналу. Крім того, неможливо практично провести вимір в процесі тривалого очікування розряду

блискавки в об'єкт і тривалого збереження результатів вимірювань.

Актуальність роботи. У ряді випадків виникає необхідність визначати зниження амплітуди імпульсу сили струму блискавки уздовж протяжних об'єктів (заземлювачі великої протяжності, силові кабелі і кабелі зв'язку, трубопроводи тощо) шляхом вимірювань. Однак, існуючими методами (наприклад, застосовуючи шунти) вимірювати зниження амплітуди імпульсу в протяжному об'єкті неможливо. Тому розробка таких методів натурних вимірювань на сьогодні є актуальною і важливою науково-технічною задачею. З цією метою в НТУ «ХПІ» були виконані експериментальні дослідження, які дозволили реалізувати можливості таких вимірювань в натуральних умовах польової лабораторії «Струми в землі».

Мета статті. Метою роботи є обґрунтувати удосконалений метод вимірювання зниження амплітуди імпульсу сили струму блискавки в міру його пробігу від початку до кінця протяжного горизонтального заземлювача за допомогою ФР.

Експериментальне обґрунтування вдосконаленого методу вимірювання зниження амплітуди імпульсу на прикладі натурного об'єкта. Поставлена мета досягнута шляхом використання двох існуючих методів вимірювання амплітуди імпульсу сили струму блискавки при високій напрузі.

Характеристика досліджуваного об'єкта. В якості досліджуваного об'єкта використаний протяжний горизонтальний заземлювач круглого перетину діаметром d = 16 мм і довжиною l = 100 м, прокладений на глибині 0,5 м в землі з еквівалентним питомим опором ρ = 80 Ом·м.

Горизонтальний протяжний заземлювач має 5 точок доступу: одну на початку, три через кожні 10 м та останню через 50 м від початку. У місцях доступу в розтин заземлювача встановлені безіндукційні шунти і подільники напруги, з яких сигнал надходить на вхід відповідного осцилографа (рис. 2), та/або тримачі ФР (рис. 3) залежно від методу вимірювання.

Точка доступу являє собою вириту на глибину 0,6 м квадратний колодязь розміром 0,5×0,5 м^2, в якому встановлюється шунт і/або тримач ФР.

Існуючий метод вимірювання за допомогою осцилографічних станцій. Даний метод полягає у вимірюванні амплітуди імпульсу сили струму блискавки в заданих точках заземлювача по його довжині за допомогою осцилографічних станцій (рис. 2).

Так, наприклад, після подачі імпульсу сили струму з величиною амплітуди I = 28,7 кА від генератора імпульсних напруг в початок заземлювача на екрані осцилографа в кожній точці доступу фіксується осцилограма імпульсу сили струму і оцінюється його амплітуда. Результати таких вимірів зведені в табл. 1.

Застосування осцилографічних станцій в таких вимірах пов'язано з цілим рядом проблем: необхідно мати кілька осцилографів з пам'яттю; осцилографи повинні бути ізольовані від землі на сотні кВ; необхідна синхронізація осцилографів; живлення осцилографів має бути від акумуляторів; необхідно мати безіндукційні шунти, які розраховані на імпульсні струми для досліджуваного діапазону. Такий підхід дуже трудомісткий і дорогий, але забезпечує досить високу точність вимірювань.

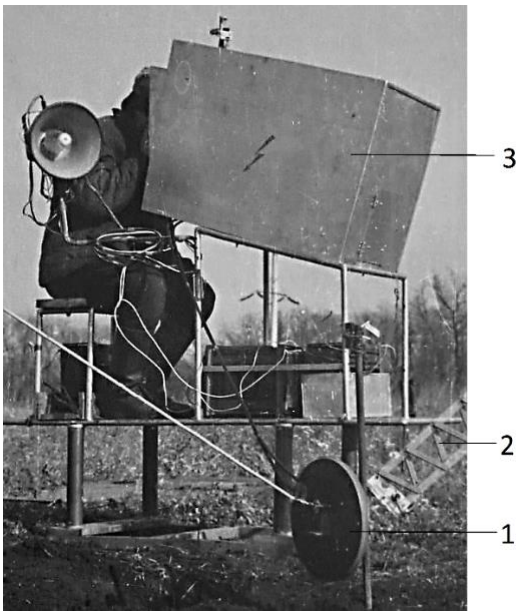
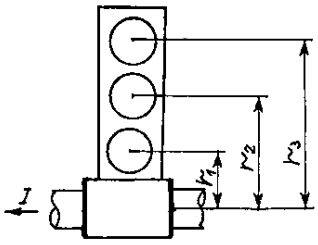


Рисунок 2 – Осцилографічна станція:
1 – безіндукційний шунт;
2 – подільник напруги;
3 – осцилограф



а)

б)

Рисунок 3 – Тримач (*а*) і феромагнітні реєстратори (*б*)

Таблиця 1 – Результати натурних вимірювань

Точка доступу	1	2	3	4	5
Відстань від початку заземлювача до точки доступу, м	0	10	20	30	50
Амплітуда імпульсу сили струму по осцилограмі, кА	28,7	11,48	6,9	4,3	2,3

Можливо також використовувати в спрощеному варіанті дві осцилографічні станції, проте в цьому випадку необхідно подавати на початок протяжного заземлювача один і той же імпульс сили струму при кожному переміщенні другої станції в чергову точку доступу. Такий підхід дозволяє вимірювати максимальну величину амплітуди імпульсу сили струму в кожній точці доступу. Однак при цьому знижується точність вимірювання, пов'язана з можливою нестабільністю вихідного імпульсу.

Вдосконалений метод вимірювання за допомогою ФР. Пропонований метод вимірювання заснований на застосуванні ФР в тих же точках доступу, як і в попередньому методі. Спосіб розташування трьох ФР описаний в роботі [4] (рис. 4) і полягає в наступному.

У місцях доступу на заземлювачі встановлені пластмасові тримачі з трьома гніздами для ФР (1), розташованими, як показано на рис. 4, уздовж силових ліній (2) магнітного поля вимірюваного струму I блискавки в заземлювачі (3) на зростаючих від осі заземлювача відстанях r^1, r^2 та r^3 відповідно (рис. 3 *а*). Це дозволяє розширити межі вимірювання методом магнітозапису і зменшити похибку вимірювання, використовуючи близьку до середини лінійного діапазону ділянку градуйованої кривої ФР.

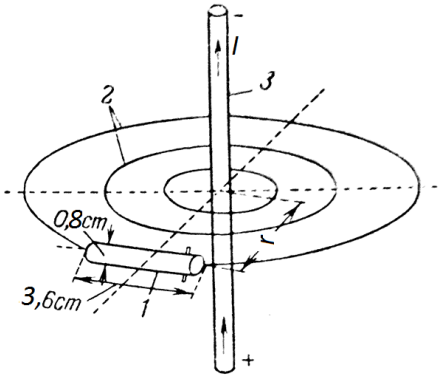


Рисунок 4 – Розташування ФР щодо заземлювача зі струмом блискавки [4]

Перед початком вимірювань зниження амплітуди імпульсу сили струму блискавки уздовж протяжного заземлювача необхідно виконати градуювання всіх ФР, тобто зняти для кожного з них градуювальну криву $Br = f(H)$, яка проходить через ряд експериментально отриманих точок. Для отримання кожної точки необхідно мати комплект пристроїв [8] і спеціальну схему, що складається з багатошарової котушки-соленоїда, підключеної до комутатора, амперметра і джерела живлення. У даному випадку соленоїд має довжину l = 167 мм, внутрішній діаметр 28 мм, зовнішній – 105 мм і число витків W = 6000.

- ***Розмагнічування ФР.*** Схема дозволяє виконувати розмагнічування ФР за допомогою підключення комутатором до соленоїда джерела змінного струму. Для розмагнічування реєстратор проштовхують через соленоїд, а потім плавно віддаляють від нього на відстань близько 40–50 см.
- ***Намагнічення ФР.*** За допомогою комутатора підключають до соленоїда джерело постійного струму і, плавно підвищуючи напругу, встановлюють необхідне значення струму в ланцюзі соленоїда після чого проштовхнують через нього ФР. Намагнічений струмом I ФР поміщають у вимірювач залишкової намагніченості [8] і визначають у відносних одиницях (число поділок по шкалі мікроамперметра) його залишкову намагніченість Br.

Переймаючись величиною сили струму I в ланцюзі описаного вище соленоїда, визначаємо залишкову намагніченість Br ФР і розраховуємо напруженість H магнітного поля в центрі соленоїда за формулою $H = 360I$, де H, А/см і I, А. Градуювання ФР виконується при напруженностях H, відповідних струму I = 0,1 А, і далі через 0,05 А аж до I = 1 А.

За експериментально отриманими даними для кожного ФР побудовані градуювальні криві, окремі з яких представлені в якості прикладу на рис. 5 і близькі до наведених в роботі [6].

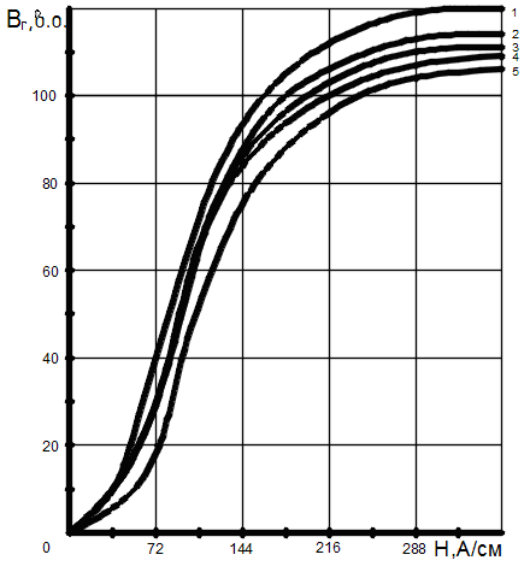


Рисунок 5 – Градуювальні криві Br= f (H) ФР типу 9ВЧ (криві 1-4) і 5ВЧ (крива 5)

Таким чином, зняття градуювальної кривої ФР, тобто встановлення зв'язку залишкової намагніченості і напруженості поля, проводиться на постійному струмі.

Попередньо розмагнічені ФР встановлюють у тримачах і подають імпульс струму на початок заземлювача. Після подачі імпульсу ФР витягуються з тримачів і кожен з них по черзі вводиться в магнітний ланцюг вимірювача залишкової намагніченості, відхилення стрілки якого (на число поділок α)

пропорційне залишковій намагніченості *Br*, тобто залишковій намагніченості у відносних одиницях.

Використовуючи отриману величину залишкової намагніченості *Br* ФР, за відповідною градуювальною кривою *Br* = *f* (*H*) знаходять максимальну напруженість *H* магнітного поля у місці установки кожного ФР.

Напруженість *H* магнітного поля, що впливає на ФР (рис. 3), встановлений у тримачі на відстані *r* від осі заземлювача круглого перетину, з достатньою точністю можна розрахувати на підставі закону повного струму (або Біо-Савара-Лапласа) за формулою:

$$H = I(2\pi r)^{-1}, \quad (1)$$

де *r* – відстань від центру ФР до осі заземлювача, см;

I – амплітуда імпульсу сили струму в заземлювачі у даній точці доступу, А.

Знаючи напруженість *H* і відстань *r* від осі ФР до осі електрода протяжного заземлювача, по якому протікав струм блискавки, знаходять величину останнього в кожній заданій точці доступу за формулою:

$$I = 2\pi r H. \quad (2)$$

Такий підхід справедливий в тому випадку, якщо залишкова індукція *Br* в центрі намагнічувальної котушки має таку ж величину *Br*, як і в точці установки ФР при струмі блискавки *I* в протяжному заземлювачі.

Це дозволяє вибрати відповідне місце установки ФР в кожному тримачі таким чином, щоб вимір амплітуди імпульсу сили струму виконувався якомога ближче до середини лінійної ділянки градуювальної кривої ФР.

Близький до заземлювача ФР (на відстані r^1) вимірює невеликі амплітуди імпульсу сили струму, а найбільш віддалений (на відстані r^3) – найбільші амплітуди імпульсу сили струму.

У разі, якщо в будь-якій точці доступу ФР увійшов у насичення необхідно збільшити відповідну йому відстань *r*. Якщо ФР практично не намагнітився, то необхідно зменшити відповідну йому відстань *r*, а потім знову подати імпульс струму в початок заземлювача. У підсумку, після розшифрування ФР, отримуємо величину амплітуди імпульсу сили струму *I*, який протікає по заземлювачу в кожній заданій точці доступу.

Так, наприклад, при введенні імпульсу сили струму з величиною амплітуди *I* = 28,7 кА но початок заземлювача, а потім вийманні з тримачів і обробки даних з ФР, отримуємо величини амплітуд в кожній точці доступу і зводимо їх в табл. 2.

Одночасне використання існуючого і вдосконаленого методів дозволяє порівняти отримані результати і оцінити похибку запропонованого методу вимірювань. Результати одночасного вимірювання величини амплітуди імпульсу сили струму методом магнітозапису і осцилографування на осцилографі з пам'яттю наведені в табл. 2 і 1 відповідно.

Таблиця 2 – Похибка вимірювань за допомогою ФР

Точка доступу	Відстань *r* до ФР, см	Залишкова намагніченість *Br*, поділів	Напруженість магнітного поля *H*, А/см	Амплітуда імпульсу сили струму *I*, кА	Похибка вимірювань, %
1	25	100	179,6	28,2	1,74
2	15	72	116,2	10,95	4,61
3	15	40	71	6,7	2,9
4	15	13	45,6	4,4	2,32
5	10	8	36,6	2,5	8,7

Порівняння наведених в табл. 1 і 2 величин амплітуд імпульсу сили струму в відповідних точках доступу, свідчить про похибки вимірювань вдосконаленим методом.

Похибка вимірювань розрахована щодо відповідних амплітуд сили струму, отриманих за допомогою осцилограм. Як випливає з табл. 2, точність вимірювання амплітуди імпульсу сили струму вдосконаленим методом досить висока, бо похибка не перевищує 8,7 %.

Різниця виміряних амплітуд імпульсу сили струму між попередньою і наступною точками доступу дає зниження амплітуди імпульсу на даній ділянці заземлювача.

Використовуючи отримані значення амплітуди імпульсу сили струму блискавки, наведені в табл. 2, шляхом математичної обробки отримуємо аналітичний вираз, що дозволяє розрахувати зниження амплітуди імпульсу сили струму блискавки при його протіканні по протяжному заземлювачу в залежності від відстані *x*:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-a\sqrt{x}}, \quad (3)$$

де I_0 – амплітуда імпульсу струму в точці введення, кА;

x – відстань по заземлювачу від точки введення імпульсу, м;

a – коефіцієнт, який залежить від питомого опору ґрунту ρ.

Математична обробка експериментальних даних для умов дослідів дає значення *a* = 0,33–0,5 м.

Використовуючи дані табл. 2, а також отримане значення коефіцієнта *a*, розраховуємо помилки визначення амплітуди за наведеним виразом порівняно з дослідними даними табл. 2. Результати розрахунків зводимо в табл. 3. Максимальна помилка в 9,3 % дозволяє вважати, що вираз описує отриману залежність з достатньою для інженерних цілей точністю.

Слід зазначити, що коефіцієнт *a* в загальному випадку залежить не тільки від питомого опору ґрунту. На амплітуду впливатимуть як конструктивні параметри заземлювального пристрою (тип, матеріал, площа перетину електрода заземлювача, глибина закладення заземлювальних пристроїв), так і реальна

геоелектрична структура ґрунту (а не тільки еквівалентна).

Таблиця 3 – Похибка розрахунку по запропонованому виразу

Відстань *x* від початку заземлювача до точки доступу, м	**Амплітуда імпульсу сили струму, *I*, кА**		**Похибка розрахунку, δ,%**
	виміряна на ФР	**отримана за виразом**	
0	28,2	28,2	0
10	10,95	9,93	9,3
20	6,7	6,45	3,73
30	4,4	4,62	–5,0
50	2,5	2,73	–9,2

Таким чином, вимір зниження амплітуди імпульсу сили струму блискавки у разі його протікання по протяжним або складним заземлюючим пристроям у польових умовах, в тому числі з метою накопичення інформації та економії коштів і часу, необхідно проводити вдосконаленим методом, тобто з використанням ФР заводського виготовлення. Це тим більш актуально, чим більше число точок для вимірювання, які можуть обчислюватися десятками і навіть сотнями.

Висновки. На основі експериментальних досліджень в натуральних умовах обґрунтований і запропонований вдосконалений метод відрізняється тим, що з метою визначення зниження амплітуди імпульсу у міру його протікання по протяжному заземлювачу проводиться одночасний вимір амплітуди імпульсу сили струму в кожній заданій точці по довжині заземлювача одночасно. Результати вимірювань апроксимуються кривою. Послідовне зіставлення результатів вимірювань в заданих точках визначає величину зниження амплітуди імпульсу.

Результати виконаних експериментів по вимірюванню зниження амплітуди імпульсу сили струму блискавки вздовж протяжного горизонтального заземлювача дозволяють рекомендувати скоригований метод вимірювання до практичного використання. Це актуально з наступних причин: немає необхідності в джерелах живлення; можливість вимірювання в процесі тривалого очікування; тривале збереження результатів вимірювання; дуже велике число точок вимірювання одночасно; немає необхідності мати потужне високовольтне джерело (генератор імпульсної напруги); безпечно для техніки і персоналу

Похибка вимірювань зниження амплітуди імпульсу сили струму блискавки методом магнітозапису, як показали виконані дослідження, досить низька і не перевищує 8,7 %.

Список літератури

1. Istrate D., Blanc I., Fortune D. Study and development of a measurement set-up for high impulse currents *Conference on Precision electromagnetic Measurements*. 2012. P. 224–225. doi: 10.1109/CPEM.2012.6250883
2. Fan J., Long Z., Li W., Impulse Current Measurement Device Based on Uniform Spiral Magnetic Induction Module. *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. 2020. P. 3312–3318. doi: 10.1109/EI250167.2020.9346958
3. Nguyen T. X., Ely J. J., Szatkowski G. N., Mata C. T., Mata A. G., Snyder G. P. Lightning current measurement with fiber-optic sensor. *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2014. P. 1424–1431. doi: 10.1109/ICLP.2014.6973354
4. *Высоковольтное испытательное оборудование и измерение импульсных токов*. URL: https://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/vysokovoltnoe-ispytatelnoe-oborudovanie-i-izmereniya-41.html (дата звернення: 11.03.2021).
5. Дьяков А. Ф., Максимов Б. К., Борисов Р. К., Кужекин И. П., Темников А. Г., Жуков А. В. *Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетик : учебник для вузов*. Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. 541 с.
6. Гуль В. И., Измайлов О. И. Применение ферритовых изделий заводского изготовления в качестве феррорегистраторов. *Вестник Харьковского политехнического института*. 1974. № 87, вып. 3. С. 51–53.
7. Гуль В. И., Измайлов О. И., Клейман М. В. Влияние стабильности магнитных характеристик феррорегистраторовна погрешность измерений токов методом магнитозаписи. *Вестник Харьковского политехнического института*. 1978. № 143, Вып. 6. С. 42–44.
8. Гуль В. И., Измайлов О. И. Комплект устройств для измерения пиковых токов с низкоомного пункта методом магнитозаписи. *Вестник Харьковского политехнического института*. 1974. № 87, вып. 3. С. 47–51.
9. Соколовский А. О., Целебровский Ю. В., Шевченко С. С., Цилько В. А. Опыт комплексного мониторинга грозовой активности в электроэнергетической системе. *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2017. № 1. С. 53–64.
10. Smirnov V. P., Fortov V. E., Bykov Y. A. et al. Propagation of current pulses with an amplitude of up to 85 kA in soil over distances of several tens of meters. *Plasma Physics Report*. 2016. No. 42. P. 177–185. doi: 10.1134/S1063780X16020070
11. Shi-qiang Y., Xun L., Zhi-wei S., Wei-jing S., Li S. Simulation experiment on regularity of impulse current dispersal of tower grounding device. *Water Resources and Power*. 2016. Vol. 34, no. 7. P. 204–207.

References (transliterated)

1. Istrate D., Blanc I., Fortune D. Study and development of a measurement set-up for high impulse currents *Conference on Precision electromagnetic Measurements*. 2012, pp. 224–225. doi: 10.1109/CPEM.2012.6250883
2. Fan J., Long Z., Li W., Impulse Current Measurement Device Based on Uniform Spiral Magnetic Induction Module. *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2).* 2020, pp. 3312–3318. doi: 10.1109/EI250167.2020.9346958
3. Nguyen T. X., Ely J. J., Szatkowski G. N., Mata C. T., Mata A. G., Snyder G. P. Lightning current measurement with fiber-optic sensor. *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. 2014, pp. 1424–1431. doi: 10.1109/ICLP.2014.6973354
4. *Vysokovol'tnoe ispytatel'noe oborudovanie i izmerenie impul'snykh tokov* [High Voltage Test Equipment and Impulse Current Measurement]. Available at: https://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/vysokovoltnoe-ispytatelnoe-oborudovanie-i-izmereniya-41.html (accessed 11.03.2021).
5. Dyakov A. F., Maksimov B. K., Borisov R. K., Kuzhekin I. P., Temnikov A. G., Zhukov A. V. *Elektromagnitnaya sovmestimost' i molniezashchita v elektroenergetik: uchebnik dlya vuzov* [Electromagnetic Compatibility and Lightning Protection in the Electric Power Industry: Textbook for Universities]. *Moscow, MEI* Publ., 2016. 541 p.
6. Gul V. I., Izmaylov O. I. Primenenie ferritovykh izdeliy zavodskogo izgotovleniya v kachestve ferroregistratorov [The use of factory-made ferrite products as ferrite recorders]. *Bulletin of the Kharkiv Polytechnic Institute*. 1974, no. 87, iss. 3, pp. 51–53.
7. Gul V. I., Izmaylov O. I. Kleyman M. V. Vliyanie stabil'nosti magnitnykh kharakteristik ferroregistratorovna pogreshnost' izmereniy tokov metodom magnitozapisi [Influence of stability of magnetic characteristics of ferro recorders on the measurement error of magnetic recording currents]. *Bulletin of the Kharkiv Polytechnic Institute*. 1978, no. 143, iss. 6, pp. 42–44.

8. Gul V. I., Izmaylov O. I. Komplekt ustroystv dlya izmereniya pikovykh tokov s nizkoomnogo punkta metodom magnitozapisi [Kit for measuring peak currents from a low-impedance point using the magnet recording method]. *Bulletin of the Kharkiv Polytechnic Institute*. 1974, no. 87, iss. 3, pp. 47–51.
9. Sokolovskiy A. O., Tselebrovskiy Yu. V., Shevchenko S. S., Tsilko V. A. Opyt kompleksnogo monitoringa grozovoy aktivnosti v elektroenergeticheskoy sisteme [Experience in integrated monitoring of lightning activity in the electricity system]. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energetics*. 2017, no 1, pp. 53–64.
10. Smirnov V. P., Fortov V. E., Bykov Y. A. et al. Propagation of current pulses with an amplitude of up to 85 kA in soil over distances of several tens of meters. *Plasma Physics Report*. 2016, no. 42, pp. 177–185. doi: 10.1134/S1063780X16020070
11. Shi-qiang Y., Xun L., Zhi-wei S., Wei-jing S., Li S. Simulation experiment on regularity of impulse current dispersal of tower grounding device. *Water Resources and Power*. 2016, vol. 34, no. 7, pp. 204–207.

Надійшла (received) 20.03.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ніжевський Віктор Ілліч (Нижевский Виктор Ильич, Nizhevsky Viktor) – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8823-2628; e-mail: victornizhevski@gmail.com.

Березка Сергій Костянтинович (Березка Сергей Константинович, Berezka Sergey) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: serg.berezka@gmail.com.

Федосеєнко Олена Миколаївна (***Федосеенко Елена Николаевна, Fedoseenko Olena)*** – кандидат технічних наук, доцент кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3701-381X; e-mail: fedosejenko@gmail.com.

Ніжевський Ілля Вікторович (Нижевский Илья Викторович, Nizhevskiy Ilia) – кандидат технічних наук, головний конструктор, Українсько-литовське ТОВ НВП «Дельта-ВХ», м. Харків, Україна; e-mail: victornizhevski@gmail.com.