

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НЕОДНОРІДНОСТІ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

М.В. Гребченко*, докт. техн. наук, **М.Ф. Сопель****, докт. техн. наук, **О.В. Сподинський*****

* НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна,
e-mail: grebchenko.mykola@iik.kpi.ua.

** Мале приватне підприємство «АНГЕР»,
вул. Гарматна, 2, Київ, 03067, Україна.

*** Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

Досліджено режими обриву однієї лінії ділянок мережі, що мають паралельні лінії, в електричних розподільних мережах електропостачання споживачів електричного транспорту постійного струму. Проведено аналіз експериментальних даних, результати якого вказують на наявність залежності значення змінної складової у випростованому струмі від відстані до пошкодженої ділянки. Проведено математичне моделювання режиму обриву однієї з ділянок лінії в мережі з послідовним з'єднанням трьох ділянок, кожна з яких має паралельні лінії. Отримані результати математичного моделювання режимів роботи мережі постійного струму з неоднорідністю різних ділянок також вказують на можливість використання шостої гармоніки струму для визначення виникнення неоднорідності й ділянки з цією неоднорідністю. Задля зниження впливу зміни навантаження під час визначення неоднорідної ділянки запропоновано додатково контролювати вхідний опір мережі на частоті 300 Гц. Встановлено, що у цих режимах найбільше змінюється кут опору. Запропоновано метод визначення виникнення локального пошкодження лінії постійного струму й відстані до місця пошкодження, що заснований на контролі значення струму лінії та вхідного опору лінії на частоті 300 Гц. Бібл. 7, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: обрив лінії, експеримент, моделювання, визначення відстані.

Одним із заходів забезпечення надійності електропостачання споживачів електричного транспорту є виконання лінії електропередавання на двоколійних ділянках окремими лініями, тобто кожна колія має свою лінію, а між собою ці лінії включаються паралельно. Таким чином, мережа живлення вздовж колії може мати декілька неоднорідних ділянок з паралельним з'єднанням ліній. Зазвичай лінії кожної колії отримують живлення від окремого джерела живлення. Така схема забезпечує надійне живлення лінії кожної колії навіть у разі обриву однієї паралельної лінії з однієї сторони. Але у разі такого пошкодження зникає частина неоднорідності мережі і виникає перевантаження паралельної лінії, що залишилася у роботі.

Відомий метод виявлення обриву проводу лінії або ділянки тягової мережі, у якому контролюють наявність струму від спеціального джерела оперативного струму непромислової частоти, що проходить скрізь справний провід і спеціально встановлену в кінці ділянки ємність. У разі виникнення обриву проходження струму припиняється [1]. Недоліками методу є необхідність встановлення додаткового обладнання, а також те, що може знадобитися додаткове налаштування у мережах складної конфігурації.

Метод визначення місця розташування пошкодження [2] заснований на оцінці часів приходу хвиль, що біжать, викликаних пошкодженням і поширюються вздовж лінії від точки порушення до точки вимірювання, розташованої на одному кінці лінії, і порівнянні вимірюного часу з базою даних еталонних схем хвиль, що біжать. Метод є складним і більше орієнтований на визначення коротких замикань.

Разом із розвитком методів визначення параметрів пошкоджень проводиться робота, що дає можливість знижувати кількість відмов мережі, у тому числі й обриви проводів на підставі діагностування [3].

Мета роботи – розробка методу визначення виникнення локального пошкодження лінії постійного струму й відстані до цього місця пошкодження на підставі вимірювання параметрів режиму реальної електричної мережі.

© Гребченко М.В., Сопель М.Ф., Сподинський О.В., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-0055-9042>; ** <https://orcid.org/0000-0002-3438-5848>;

*** <https://orcid.org/0009-0002-3947-2534>

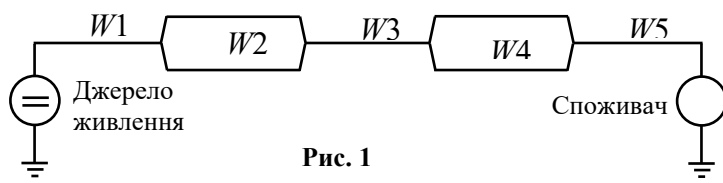


Рис. 1

На рис. 1 наведено один із варіантів спрощеної схеми мережі живлення споживачів електричного транспорту з ділянками переходу однієї колії в дві колії [4]. Лінії $W1$, $W3$ та $W5$ є лініями одноколіїних ділянок, а лінії $W2$ та $W4$ – лініями двоколій-

них ділянок транспорту.

В схемі мережі (рис. 1) споживач умовно розташований у кінці лінії, а також не вказані інші можливі джерела живлення мережі. Встановлено, що випростована напруга тягових підстанцій міського електричного транспорту має дві складові: постійну та змінну [5].

Обрив одного проводу або лінії на одній із послідовно з'єднаних ділянок мережі (рис. 1) не перериває електропостачання споживача але знижує якісні показники режиму, а також виникає перевантаження пошкодженої ділянки. Таким чином виникає проблема пошуку місця обриву лінії.

На трифазних повітряних та кабельних лініях, а також на комп'ютерних та телекомунікаційних мережах задля визначення неоднорідності у мережі (у тому числі й обриви) використовують рефлектометри [6]. Налаштування та використання рефлектометрів є складним процесом й вимагає багато часу для забезпечення точності визначення відстані.

Враховуючи те, що в мережі випростованого постійного струму присутня у струмі та напрузі ліній незначна змінна складова частотою 300 Гц (шоста гармоніка), авторами було прийнято рішення про використання цієї складової для моніторингу стану мережі.

Експериментальні дослідження обриву ліній на різних ділянках проведено в реальній мережі електропостачання споживачів електричного транспорту. На рис. 2 наведено результати реєстрації зміни постійного струму та напруги мережі у разі виникнення неоднорідності (обрив паралельної лінії) і її усунення.

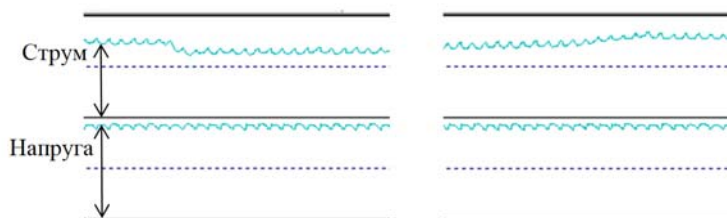


Рис. 2

У разі виникнення дефекту лінії (неоднорідність) змінюються індуктивний опір та ємнісна провідність ділянки з дефектом. Зміна цих параметрів обумовлює зміну значення 6-ї гармоніки у струмі лінії. Але, якщо дефект створений розмиканням тільки з одного боку, то ємнісна провідність не змінюється, а шлях проходження ємнісного струму буде залежати від того з якого кінця лінії виник обрив.

Під час проведення досліджень в умовах діючої мережі постійного струму створювалася неоднорідність за рахунок обриву проводу певної довжини. В цих режимах реєструвалися струм та напруга фази у разі появи або зникнення обриву. На жаль, причина зміни навантаження лінії у різних дослідках, а також наявність додаткового живлення вздовж лінії не ідентифікувалися. Для зниження впливу цих факторів на результати досліджень визначалися відносні значення струмів та напруг.

У табл. 1 наведено результати аналізу експериментальних даних дослідів обриву паралельних ліній на різній відстані від початку лінії, які показують зростання амплітуди струму частотою 300 Гц у залежності від відстані до пошкодженої ділянки.

Таблиця 1

Час проведення досліджу	Струм лінії до виникнення дефекту, кА	Відстань до дефекту на лінії, км	Відношення значення струму шостої гармоніки до значення нульової гармоніки, %		
			Без дефекту	З дефектом	Зміна через виникнення дефекту
10:26:14	0,415	2	2,964	3,418	0,454
12:30:08	0,1354	10	1,625	2,208	0,583
15:25:18	0,1082	18	8,78	14,979	6,199

Результати табл. 1 у вигляді залежності значення струму шостої гармоніки I_6 по відношенню до значення нульової гармоніки I_0 від відстані до місця пошкодження наведено на рис. 3.

На підставі отриманих результатів встановлено, що амплітуда струму I_{300} залежить від режиму (з дефектом чи без нього) й від відстані до місця виникнення дефекту (в проведених дослідках

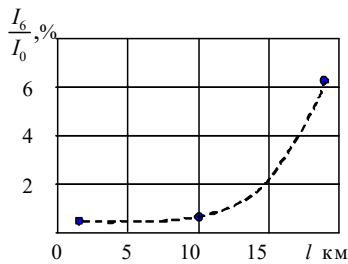


Рис. 3

створювався однаковий дефект). Характерна особливість зміни значення струму I_{300} полягає у тому, що, не зважаючи на зменшення загального струму у разі виникнення дефекту, значення цього струму збільшується.

Попередні розрахунки вказують на залежність не тільки амплітуди, але й наявність залежності кута між струмом і напругою шостої гармоніки від режиму (з дефектом чи без дефекту).

Математичне моделювання дає змогу провести аналіз зміни параметрів режиму мережі незалежно від режиму роботи навантаження та розташування джерел живлення мережі.

Математичне моделювання режимів роботи мережі постійного струму з неоднорідністю різних ділянок проведено за допомогою моделі з послідовно включеними трьома лініями.

Задля проведення досліджень на підставі методу накладання [7] створена окрема схема тільки для змінного струму частотою 300 Гц (рис. 4). Кожна лінія представлена П-подібною схемою заміщення. Активні опори ізоляції не враховувалися. Задано різні довжини ліній: перша 2 км, друга – 4 км, третя – 6 км. Моделювання обривів ліній виконувалося шляхом зміни параметрів пошкодженої лінії.

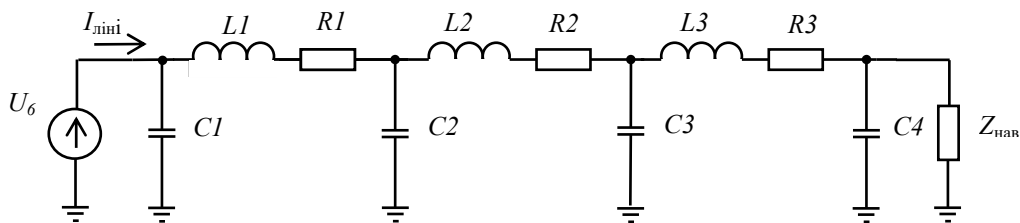


Рис. 4

У трьох дослідах визначені наступні зміни розрахункового опору мережі за результатами вимірювання струмів та напруг шостої гармоніки (табл. 2). Вхідний опір мережі із сторони джерела живлення визначався за формулою

$$Z_{\text{роз}} = \frac{U_6}{I_6} = \frac{U(\text{кВ}) \cdot U_6(\text{в.о.})}{I(\text{кА}) \cdot I_6(\text{в.о.})}$$

Таблиця 2

Режим мережі	6-та гармоніка струму лінії			Вхідний опір мережі із сторони джерела живлення		
	Комплексне значення, А	Модуль,	Кут, град.	Комплексне значення, Ом	Модуль, Ом	Кут, град.
Нормальний робочий	9,518 - j1,493	9,634	- 8,92	10,247+j1,527	10,360	8,47
Обрив одного проводу на 1-й ділянці (2 км)	9,116 - j2,159	9,368	- 13,33	10,380+j2,378	10,649	12,91
Обрив одного проводу на 2-й ділянці (4 км)	9,325 - j1,841	9,505	- 11,17	10,314+j1,956	10,498	10,74
Обрив одного проводу на 3-й ділянці (6 км)	9,390 - j1,731	9,548	- 10,01	10,293+j1,817	10,452	10,01

У процесі проведення моделювання враховувалися наступні залежності. У разі обриву одного провідника ділянки відбувається зростання струму у 2 рази в проводі, що залишився в роботі. Збільшення струму приведе до зростання температури робочого провідника й його активного опору. Зростання опору ділянки, на якій виник обрив одного проводу, оцінювалося за відомою формулою

$$r_{\theta} = r_{20} [1 + \alpha_{\theta} (\theta - 20^{\circ})]$$

У разі зміни температури проводу через його нагрів, наприклад, від 76⁰С градусів до 245⁰С опір проводу збільшиться в 1,54 рази. Тобто опір збільшиться миттєво у два рази через обрив паралельного провідника, а далі поступово з нагрівом зросте ще в 1,54 рази.

Вплив зміни активного опору пошкодженої ділянки на загальний опір лінії з навантаженням $Z_{\text{МЕР}}$ залежить від того, в якій схемі заміщення проводиться аналіз. Схема заміщення постійного стру-

му складається тільки з активних опорів ділянок (рис. 4). Тому зміна опору пошкодженої ділянки (через обрив одного проводу опір ділянки зростає у 2 рази, а через підвищення температури – до 1,5 рази) спричиняє зростання загального активного опору мережі $R_{\text{МЕР}}$.

В схемі заміщення змінного струму значення індуктивного опору ділянок значно більші за значення активного опору цих ділянок. Тому зміна активного опору $R_{\text{МЕР}}$ мало впливає на загальний вхідний опір мережі

$$Z_{\text{МЕР}} = R_{\text{МЕР}} + jX_{\text{МЕР}}.$$

В схемі заміщення змінного струму мережі суттєво впливає на зміну загального опору мережі індуктивний опір ділянок. У разі обриву одного паралельного проводу ділянки індуктивний опір цієї ділянки зменшується майже в два рази.

Також в схемі заміщення змінного струму мережі суттєво впливає на зміну загального опору мережі ємнісна провідність ділянки по відношенню до землі. Але ємнісна провідність впливає на зміну загального опору мережі тільки у разі обриву проводу з двох сторін ділянки: на початку й у кінці. Якщо обрив проводу з однієї сторони, то обірваний провід залишається під напругою й через ємність проводу продовжує проходити доаварійний струм.

Таким чином, значення змінного струму лінії визначається активним, індуктивним і ємнісним опором мережі. Завдяки тому, що у конфігурації схеми заміщення є не тільки послідовно з'єднані елементи, а й поперечні елементи, параметри вектору струму лінії залежать від відстані і розмірів пошкодження проводів лінії.

Задля реалізації методу визначення виникнення локального пошкодження лінії постійного струму й відстані до цього місця пошкодження проведена апроксимація результатів (рис. 3). Зміна відношення значення струму шостої гармоніки до значення нульової гармоніки у залежності від відстані l до дефекту

$$I_6^* = 0,45 + 0,00025 \cdot l^{3,5}.$$

За наявності більшої кількості експериментальних даних можна підвищити точність цього співвідношення.

До основних операцій алгоритму визначення відстані до дефекту лінії відносяться визначення реального значення струму I_6^* й його порівняння із значенням апроксимованого струму. За результатами визначається відстань. Якщо довжина обриву проводу обумовлена конструктивними особливостями лінії (послідовно декілька ділянок однакової довжини), то її можна вважати у всіх випадках обриву відомою й однаковою. Якщо довжина обриву ділянки лінії невідома, то необхідно використовувати аналогічні залежності струму I_6^* від відстані для ділянок обриву з іншими довжинами.

Висновки.

1. На основі аналізу результатів експериментальних досліджень виявлена залежність значення змінної складової у випростованому струмі живлення від відстані до пошкодженої ділянки (неоднорідності) мережі постійного струму. Встановлено, що факт виникнення неоднорідності й ділянки з цією неоднорідністю визначається на підставі контролю шостої гармоніки струму лінії.

2. Експериментально встановлено, що залежність відношення значення струму шостої гармоніки до значення нульової гармоніки від відстані до дефекту має нелінійний характер (збільшується у разі збільшення відстані до дефекту).

3. Математичне моделювання режимів роботи мережі постійного струму з неоднорідністю різних ділянок вказує на доцільність використання струму шостої гармоніки струму для визначення виникнення неоднорідності й ділянки з цією неоднорідністю. Задля зниження впливу зміни навантаження під час визначення неоднорідної ділянки запропоновано додатково контролювати вхідний опір мережі на частоті 300 Гц. Встановлено, що у цих режимах найбільше змінюється кут опору ніж значення опору.

1. Шкрабец Ф. П., Остапчук А. В., Гребенюк А. Н. Защитное отключение при обрыве контактного провода в системе электроснабжения железнодорожного транспорта. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального горного университета Украины*. 2008. № 20. С. 76-77. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2008/16490>.

2. Burek A., Balcerek P., Bjorklund H., Rezmer J., Sikorski T. New single ended fault locator for HVDC lines. *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Palermo, Italy, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8493737>.

3. Wojciechowski Jerzy, Syc Józef, Perzyński Tomasz, Łukasik Zbigniew Kazimierz Pulaski. Diagnostics of the 3 Kv DC Traction Power Network. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. No (4.3). Pp. 201-205. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19735>.
4. Павленко Т. П., Лукашова Н. П. Електропостачання транспорту. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 216 с.
5. Паянок О. А. Дослідження гармонічного складу напруг в контактній мережі постійного струму тягових підстанцій міста. *Енергетика та електротехніка. Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2008. № 1. С. 84-88.
6. Лежнюк П. Д., Кутіна М. В. Методи і засоби захисту від обриву проводу та пошук місця пошкодження в розподільній мережі зі складною топологією напругою 6–35 кВ. Вінниця: ВНТУ, 2014. 152 с.
7. Булашенко А.В. Теорія електричних та магнітних кіл: конспект лекцій у 5-ти частинах. Суми: СумДУ, 2010. Ч. 4. 181 с.

ANALYSIS OF THE RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE INHOMOGENITY OF THE DIRECT CURRENT NETWORK

N.V. Grebchenko*, M.F. Sopol**, O.V. Spodynskyi***

*National Technical University of Ukraine Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Beresteiskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: grebchenko.mykola@ill.kpi.ua, <https://orcid.org/0000-0003-0055-9042>.

**Private enterprise «ANIGER», Harmatna str., 2, Kyiv, 03056, Ukraine,

***Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Beresteiskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

The modes of breakage of one line of network sections with parallel lines in electrical distribution networks of power supply to consumers of direct current electric transport have been studied. An analysis of the experimental data was carried out, the results of which indicate the presence of a dependence of the value of the variable component in the rectified current on the distance to the damaged area. Mathematical modeling of the breakage mode of one of the line sections in the network with a serial connection of three sections, each of which has parallel lines, has been carried out. The obtained results of mathematical modeling of the modes of operation of a direct current network with heterogeneity of different sections also indicate the possibility of using the sixth harmonic of the current to determine the occurrence of heterogeneity and the section with this heterogeneity. To reduce the influence of load changes when determining an inhomogeneous section, it is proposed to control the input impedance of the network at a frequency of 300 Hz. It has been established that in these regimes the resistance angle changes the most. A method for determining the occurrence of local damage to a direct current line and the distance to this damage location is proposed, which is based on monitoring the value of the line current and the input resistance of the line at a frequency of 300 Hz. References 7, Figures 4, Tables 2.

Keywords: line break, experiment, simulation, distance determination.

1. Shkrabets F.P., Ostapchuk A.V., Grebenyuk A.N. Protective shutdown when a contact wire breaks in the power supply system of railway transport. *Science and progress of transport. Bulletin of the Dnepropetrovsk National Mining University of Ukraine*. 2008. No. 20. Pp. 76-77. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2008/16490>. (Rus)
2. Burek A., Balcerak P., Bjorklund H., Rezmer J., Sikorski T. New single ended fault locator for HVDC lines. IEEE International Conference on *Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. Palermo, Italy, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8493737>.
3. Wojciechowski Jerzy, Syc Józef, Perzyński Tomasz, Łukasik Zbigniew Kazimierz Pulaski. Diagnostics of the 3 Kv DC Traction Power Network. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. No (4.3). Pp. 201-205. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19735>.
4. Pavlenko T.P., Lukashova N.P. Power supply of transport, Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Kharkiv: Beketov NUUEKh, 2021. 216 p. (Ukr)
5. Payanok O.A. Study of the harmonic composition of voltages in the direct current catenary network of traction substations of the city. *Enerhetyka ta elektrotekhnika*. VPI. 2008. No 1. Pp. 84-88. (Ukr)
6. Lezhniuk P.D., Kutina M.V. Methods and means of protection against wire breakage and finding the place of damage in a distribution network with a complex topology of voltage 6–35 kV. Vinnytsia: VNTU, 2014. 152 p. (Ukr)
7. Bulashenko A.V. Theory of electric and magnetic circuits: a summary of lectures in 5 parts. Sumy: SumDU, 2010. Part 4. 181p. (Ukr)

Надійшла 05.01.2024
Остаточний варіант 27.02.2024