

## МЕТОДИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВИПАДКОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ ТА СТРУМУ ФІДЕРА ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Запропоновано способи визначення спектрального складу випадкових функцій напруги та струму фідера тягової підстанції постійного струму. Отримано низькочастотні складові їх спектрів – інтергармоніки.

Предложены способы определения спектрального состава случайных функций напряжения и тока фидера тяговой подстанции постоянного тока. Получены низкочастотные составляющие их спектров – интергармоники.

The methods for determination of spectral composition of random functions of voltage and current of traction substation feeder are proposed. The low frequency components of their spectra (interharmonics) are obtained.

### Вступ

Сьогодні на Україні більше ніж 50 % електрифікованого залізничного транспорту електрифіковано за системою тяги постійного струму. Однак, як відомо, напруга і струм фідера тягової підстанції (ТП) не залишаються постійними, а коливаються в досить широких діапазонах. Одразу відзначимо, що коливання можна умовно розподілити на «швидкі» та «повільні». Швидкі коливання, що викликані вищими гармоніками, протікають в часі динамічно (відносно гармоніки основної частоти 50 Гц) і обумовлені застосуванням певного типу випрямляча, роботою тягових двигунів, неідеальністю фільтро-компенсуючого пристрою (ФКП) та рядом інших факторів. Ці коливання давно вивчаються і вирішенню питання про їх вплив і проблеми по їх усуненню написано багато праць [1 – 5]. В той же час, наряду з коливаннями вищих гармонік, існують більш повільні коливання, які обумовлені квазістатичною роботою енергосистеми, наявністю вимушених режимів в тяговій мережі (ТМ), графіком руху, технологічним режимом ведення та масою поїздів, планом і профілем колії тощо. Такі коливання напруг і струмів теж значно погіршують якість та сприяють виникненню додаткових втрат електроенергії, а тому вони мають бути належним чином вивчені і проаналізовані.

Певні дослідження в цій області вже проводилися [6 – 7], але вони торкалися аналізу напруги та тягового струму електрорухомого складу (ЕРС). Тому в цій роботі спробуємо доповнити їх та отримати результати для всієї ТМ постійного струму, тобто на фідерах ТП.

### Теоретичні передумови способів аналізу

Експериментальні дослідження показують, що напруга на фідері, на виході ТП і струм в тяговій мережі є випадковими функціями. А тому дослідження з аналізом необхідно виконувати не класичними методами, а із застосуванням математичного апарату теорії випадкових функцій, основним розділом якого є кореляційно-спектральна теорія випадкових функцій. За такого підходу гармонійний склад напруги та струму фідерів буде випадковим. Для розрахунку спектрального складу розглянемо застосування двох методів: спектрально-статистичного та кореляційно-спектрального.

Перший спосіб полягає в застосуванні класичного перетворення Фур'є безпосередньо до самого графіка напруги  $U(t)$  на фідері ТП та струму  $I(t)$  фідера. Важливою умовою його застосування є вибір такої довжини  $T_p$  реалізацій  $U(t)$  та  $I(t)$ , за якої основні ймовірнісні характеристики досліджуваних випадкових процесів не змінюються в часі, тобто за які встигають проявитися всі найбільш характерні їх властивості. Тоді кожен таку реалізацію  $U(t)$  та  $I(t)$  можна розглядати як детерміновану несинусоїдну функцію не на інтервалі існування  $[0; T_p]$ , а періодично продовжену за межі цього інтервалу. Тобто, потрібно перетворити неперіодичну функцію в періодичну з довільним періодом  $T_p$ , для якої буде справедливо розкладання в ряд Фур'є [8]. Проте, оскільки функції  $U(t)$  та  $I(t)$  неперіодичні несинусоїдні і бувають досить складної форми, тому безпосереднє застосування інтегральних формул

Фур'є для спектрального аналізу цих реалізацій практично ускладнене. Також можливо використовувати швидке перетворення Фур'є, але воно ускладнює спектральний аналіз тим, що потребує рівно  $2^m$  ( $m = 1, 2, \dots, n$ ) значень у реалізації випадкової функції. У зв'язку з цим необхідно використання дискретного перетворення Фур'є для отримання спектрального складу реалізацій напруги та струму.

Розглядуваний спосіб дозволяє визначити лише амплітудно-частотну та фазову характеристики деякого конкретного графіка, який є частковим випадком розглядуваної випадкової величини (напруги чи струму), однією з її реалізацій. Однак більшість графіків різкозмінних навантажень містять випадкову складову, яка ускладнює отримання коректних результатів по амплітудах і частотах дискретного спектру гармонік. Необхідно знати, які гармоніки в спектрі реалізації обумовлені переважно випадковими факторами, а які мають властивість стійко проявлятися у всіх реалізаціях, тобто у всьому випадковому процесі.

У зв'язку з цим розглянемо спосіб отримання спектру випадкового процесу за його кореляційною функцією, тобто другим, кореляційно-спектральним, методом.

Кореляційна функція, яка є однією з важливіших характеристик випадкового процесу, характеризує його внутрішню структуру. Вона дозволяє робити висновок про ступінь залежності між значеннями напруги чи струму в різні моменти часу роботи системи тягового електропостачання (ТЕП). Відомо, що оцінку кореляційної функції випадкового процесу, наприклад для струму, визначають за виразом [9]:

$$K_I(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \sum_{t=0}^{T-\tau} [I(t) - m_I][I(t+\tau) - m_I], \quad (1)$$

де  $T$  – період, на якому задана реалізація випадкової функції напруги (струму);

$I(t)$ ,  $I(t+\tau)$  – відповідно значення випадкової функції в моменти часу  $t$  та  $(t+\tau)$ ;

$m_I$  – математичне очікування випадкового процесу.

Виразом (1) рекомендовано користуватися при  $\tau < T/5$ , оскільки за великих значень  $\tau$  похибка оцінки кореляційної функції зростає [10].

Відомо [1, 9, 10], що кореляційні функції стохастичних напруг і струмів різкозмінних навантажень часто є незгасаючими зі збільшенням  $\tau$ , що, в свою чергу, свідчить про неергодичність випадкового процесу. Однією з най-

більш імовірних причин неергодичності стаціонарного випадкового процесу є наявність в ньому періодичних складових. Незагасаюча частина кореляційної функції (так званий «хвіст» кореляційної функції) містить в собі ті ж частоти, що і сам випадковий процес [10]. У зв'язку з цим для аналізу спектрального складу періодичних складових напруги та струму фідера доцільно застосовувати перетворення Фур'є не до самого випадкового процесу, а до «хвоста» його кореляційної функції. Це забезпечить фільтрацію періодичних складових від ергодичного випадкового процесу, який буде описаний за допомогою одного з аналітичних виразів кореляційних функцій:

$$K(\tau) = D e^{-\alpha|\tau|}; \quad (2)$$

$$K(\tau) = D e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau; \quad (3)$$

$$K(\tau) = D e^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \cdot \sin \omega_0 |\tau| \right), \quad (4)$$

де  $D$  – дисперсія випадкового процесу;  
 $\alpha$  – коефіцієнт загасання кореляційної функції;  
 $\omega_0$  – власна частота кореляційної функції.

Представимо напругу (або струм) фідера у вигляді суми випадкового процесу  $I'(t)$  із загасаючою кореляційною функцією, що описується одним із виразів (2) – (4), та низькочастотних періодичних коливань:

$$I(t) = I'(t) + \sum_{k=1}^n I_m^{(k)} \sin(k\omega t + \psi^{(k)}), \quad (5)$$

де  $I_m^{(k)}$  – постійна амплітуда  $k$ -тої періодичної складової випадкового процесу зміни струму фідера;

$k\omega$  – частоти періодичних складових;

$\psi^{(k)}$  – початкові фази.

Таким чином можна виділити із неергодичного випадкового процесу  $I(t)$  ергодичну складову  $I'(t)$  та визначити, які ж періодичні коливання (по амплітудах та частотах) входять до спектру випадкової функції. Якщо інтервал реєстрацій  $T$  випадкового процесу набагато більше за період найменшої з низькочастотних складових, то вираз (1) можна переписати у вигляді:

$$K_I(\tau) = K_I'(\tau) + \sum_{k=1}^n \frac{I_m^{(k)2}}{2} \cos(k\omega\tau), \quad (6)$$

де  $K'_i(\tau)$  – будь-яка з кореляційних функцій вигляду (2) – (4).

Таким чином, якщо у випадковому процесі напруги (чи струму) фідера присутні синусоїдні складові, то «хвіст» кореляційної функції буде складатися з косинусоїд тих самих частот, а амплітуди яких дорівнюватимуть половині квадрату амплітуд синусоїдних складових напруги (чи струму) фідера. А, отже, другий доданок в (6) є поправкою на періодичність в ергодичному випадковому процесі  $I'(t)$  із загасаючою кореляційною функцією  $K'_i(\tau)$ .

### Результати та аналіз чисельних розрахунків

Для оцінки частотного складу було записано та оброблено 10 добових реалізацій напруги та 29 добових реалізацій струму фідера на деяких ТП Придніпровської залізниці. В якості прикладу, на рис. 1 приведено часові залежності однієї реалізації напруги та однієї реалізації струму фідера, а на рис. 2 – нормовані кореляційні функції, що побудовані за множиною всіх реалізацій цих випадкових процесів.

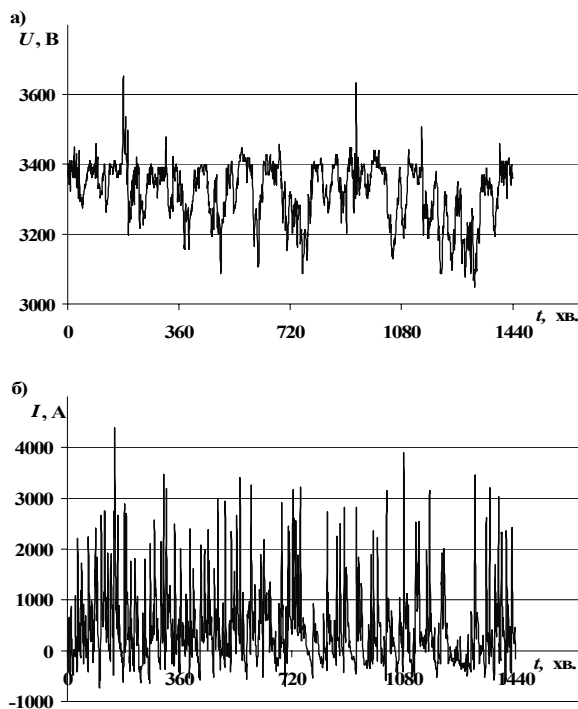


Рис. 1. Часові залежності напруги (а) та струму (б) фідера ТП

Вигляд кореляційних функцій свідчить про наявність у графіках випадкової зміни напруги та струму низькочастотних періодичних складових, які в промисловій електроенергетиці прийнято називати інтергармоніками.

На рис. 3 наведено спектри миттєвих графіків (а, в), а також, для порівняння з ними,

спектри, що розраховані за кореляційними функціями ( $\beta$ ,  $\zeta$ ) випадкових процесів відповідно напруги та струму фідера. Аналіз спектрів, що отриманий за цими методами, показує, що спектр «хвоста» кореляційної функції проріджений у порівнянні зі спектром безпосередньо миттєвого графіку, тобто, він вільний від випадкових коливань та містить в собі лише ті періодичні коливання, які присутні у самому випадковому процесі.

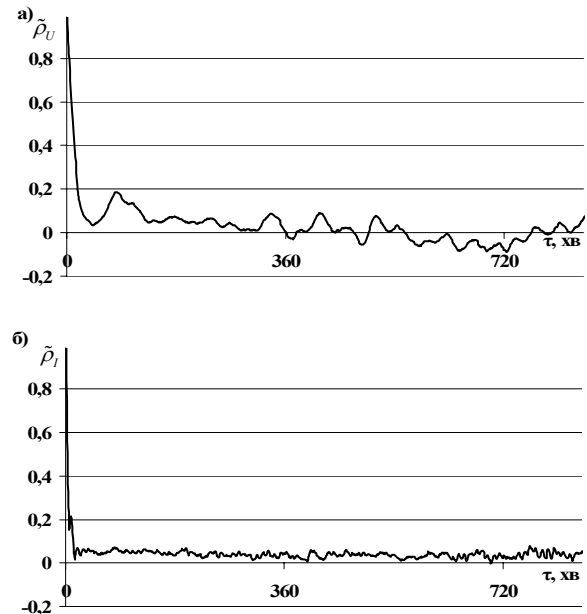


Рис. 2. Кореляційні функції напруги (а) та струму (б) фідера

Отже, як бачимо, і напруга, і тяговий струм в системі електричної тяги постійного струму зазнають значних коливань, а, як відомо [11], втрати активної енергії у складній електричній системі можна представити залежними від середніх величин діючих значень струмів навантаження, від дисперсії цих струмів (дисперсійна складова) та від моментів подібності графіків навантаження (кореляційна складова). Це свідчить про те, що чим більші коливання навантаження (дисперсійна складова), тим більші втрати активної енергії в системі [12]. Дійсно, за однієї й тієї ж середньої величини діючого значення струму миттєва величина діючого значення цього струму може бути різною. Відповідно при більших її коливаннях втрати активної потужності  $RI^2$  в ТМ також зростають. Тому, розглядаючи значення струму фідера у конкретній реалізації як випадкову величину, електричні втрати активної енергії від коливань струму будуть пропорційні дисперсії (відхиленням від середнього значення) даної випадкової величини.

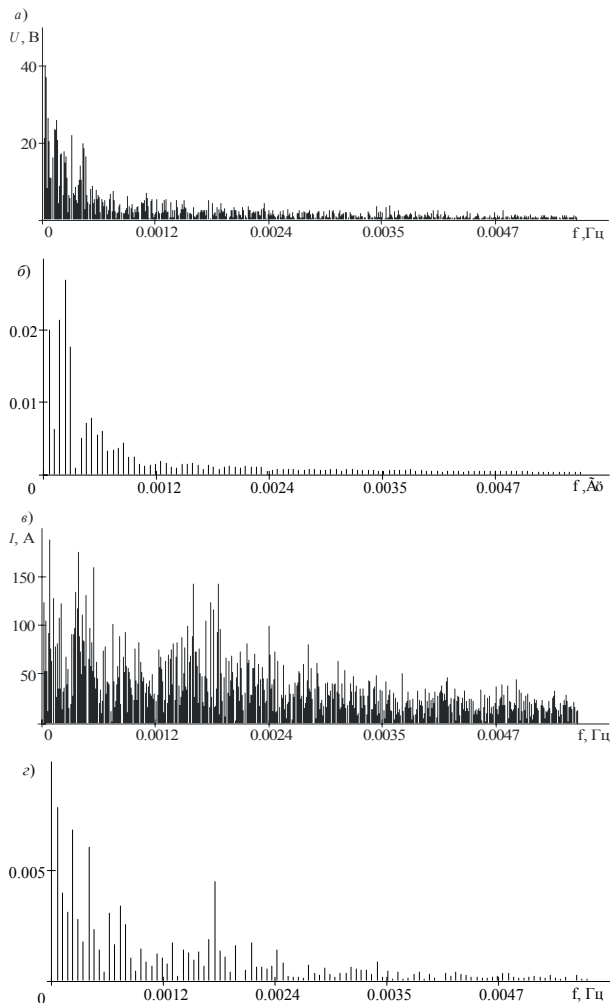


Рис. 3. Спектр напруги фідера: по одній реалізації (а) та по кореляційній функції (б); спектр струму фідера: по одній реалізації (в) та по кореляційній функції (г)

В результаті втрати енергії в активних опорах тягової мережі за проміжок часу, що розглядається, від постійної складової тягового струму є неминучі, а втрати від дисперсійної складової (коливальної) – це додаткові втрати, які необхідно, якщо не виключити зовсім, то максимально знизити. Тому при одному й тому ж струмі фідера втрати електроенергії в ТМ менші в тому випадку, коли фактичний струм фідера більш близький до середнього.

### Висновки

Таким чином, постає задача зменшення рівня втрат електроенергії в силових колах та лініях електричної тяги від низькочастотних коливань, що присутні в спектрі струму фідера ТП постійного струму. Для цього необхідно застосування ряду заходів, одним з яких є усунення

зі струму фідера інтергармонійних складових за допомогою різних технічних пристроїв.

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог [Текст] / Н. В. Панащенко [и др.] // *Залізн. трансп. України.* – 2007. – №4. – С. 76-78.
2. Сиченко, В. Г. Оцінка ефективності функціонування пасивних згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму [Текст] / В. Г. Сиченко, В. А. Зубенко // *Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна.* – 2008. – Вип. 25. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 63-68.
3. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / Б. С. Барковский [и др.]; под ред. М. Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.
4. Ягуп, К. В. Подавлення неканонічних гармонік вхідних струмів тягової підстанції [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / К. В. Ягуп. – Х., 2008. – 20 с.
5. Пекер, Б. Н. Компенсація низькочастотних пульсацій вихідної напруги 6-пульсних керованих випрямлячів [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б. Н. Пекер. – К., 2004. – 20 с.
6. Саблин, О. И. Спектральный анализ случайных функций тягового тока и напряжения на токоприемнике электроподвижного состава [Текст] / О. И. Саблин // *Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна.* – 2007. – Вип. 15. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 41-47.
7. Костин, Н. А. Интергармоники тягового тока и напряжения в системах электрического транспорта постоянного тока [Текст] / Н. А. Костин, О. И. Саблин, А. В. Петров // *Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств (збірн. праць).* – Маріуполь, 2008. – С. 51-54.
8. Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 4 т. – Т. 3. [Текст] / Г. М. Фихтенгольц. – М.: Наука, 1966. – 656 с.
9. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
10. Пугачев, В. С. Введение в теорию вероятностей [Текст] / В. С. Пугачев, – М.: Наука, 1968. – 368 с.
11. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем [Текст] / под. ред. В. Н. Казанцева. – М.: Энергия, 1983. – 368 с.
12. Крогерис, А. Ф. Оценка энергетических процессов по мгновенной мощности [Текст] / А. Ф. Крогерис, К. К. Рашевиц, Э. П. Трейманис // *Електричество.* – 1987. – № 7. – С. 31-35.

Надійшла до редколегії 29.04.2010.

Прийнята до друку 12.05.2010.