

УДК 621.332.3:629.423

П. Є. Михаліченко – д.т.н. доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, miha_pavel@mail.ru

М. О. Костін – д.т.н. професор кафедри ЕТЕМ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

ГАРМОНІЙНИЙ СКЛАД ФІДЕРНИХ СТРУМІВ ПРИ АВАРІЙНИХ ВИМИКАННЯХ ШВИДКОДІЮЧИМИ ВИМИКАЧАМИ. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ

Роботи в аспекті визначення спектрального складу перехідних фідерних напруг та струмів, а також показників якості електроенергії і її втрати в аварійних режимах автору невідомі, окрім робіт самого автора [1–4]. Проте, наслідки досліджень таких режимів у цьому напрямку можуть бути дієвими, виходячи із багатьох задач, зокрема, втрат електроенергії, електромагнітної сумісності, спрацьовування захисту, безпеки обслуговуючого персоналу тощо.

Як відомо, напруги і струми в перехідних, особливо в аварійних режимах являють собою короточасні, тривалістю τ , поодинокі неперіодичні імпульси (рис. 1–4). Передній фронт зростання струму обумовлений видом аварійного режиму, а також типом та конструктивними особливостями діагностичних систем та комутаційного обладнання, що застосовуються у фідерних чарунках ТП. Спадаючий фронт струму КЗ визначається лише конструктивною особливістю дугогасної камери вимикача [5]. Таким чином, неперіодичні перехідні електричні величини є випадковими функціями часу, форма і параметри яких залежить від багатьох зовнішніх та внутрішніх факторів, що впливають на систему електричної тяги.

Визначення спектру, точніше спектральну функцію $F(j\omega)$, імпульсу перехідної величини (напруги чи струму), як неперіодичної функції $f(t)$ за весь термін часу T її існування за умови розглядання цієї функції, що $T \rightarrow \infty$; для цього використано пряме перетворення Фур'є [6]:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (1)$$

Згідно з (1) неперіодична $f(t)$ може бути представлена сумою нескінченно великої кількості нескінченно малих синусоїдних коливань нескінченно близьких за частотою [7]. Комплексна амплітуда кожного окремого коливання нескінченно мала і дорівнює:

$$dC = \frac{1}{n} \cdot F(j\omega) d\omega. \quad (2)$$

Частотний інтервал між двома сусідніми коливаннями також нескінченно малий і дорівнює $d\omega$, тобто має місце неперервна послідовність усіх частот (суцільний спектр). Тобто у випадку інтеграла Фур'є (1) сума не володіє істотною властивістю своїх доданків, що треба пам'ятати при спектральному розкладанні за Фур'є.

Для визначення частотного спектру за виразом (1) інтегрування здійснюється в нескінченних межах. Однак для знаходження нових певних ознак, на яких базувався б релейний захист тягового електропостачання (або з іншою метою), часто потрібно розглядати лише частину імпульсу перехідної величини, найчастіше початкову його частину (фронт) поточною тривалістю t . Тому для спектрального аналізу лише цієї частини імпульсу введемо поняття поточного спектра $F_t(j\omega)$ [8], для визначення якого інтегрування в (1) може бути виконано в межах від t_0 (початку процесу) до поточного моменту часу t існування імпульсу (рис. 5).

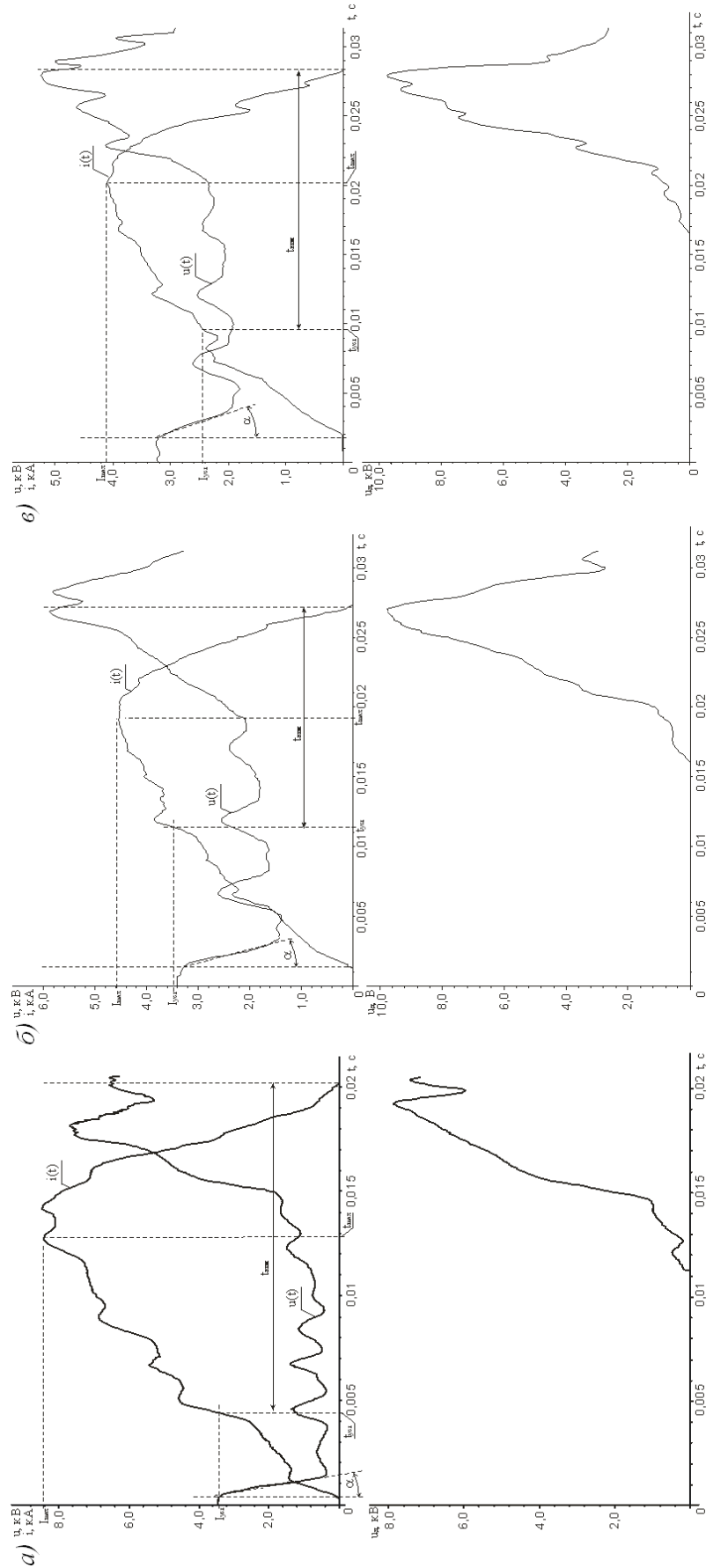


Рис. 1. Осцилограми зміни перехідних електричних величин під час вимикання ШВ 2×ВБ-43, на ТП Воскобійня (ЕЧЕ-82), ділянка Воскобійня (ЕЧЕ-82) – Платина (ЕЧЕ-41) при:

а) близькому КЗ, $l = 0,5$ км, струм уставки $I_y = 3500$ А; б) середньому КЗ, $l = 3,3$ км, $I_y = 3500$ А; в) дальньому КЗ, $l = 8,5$ км, $I_y = 2550$ А

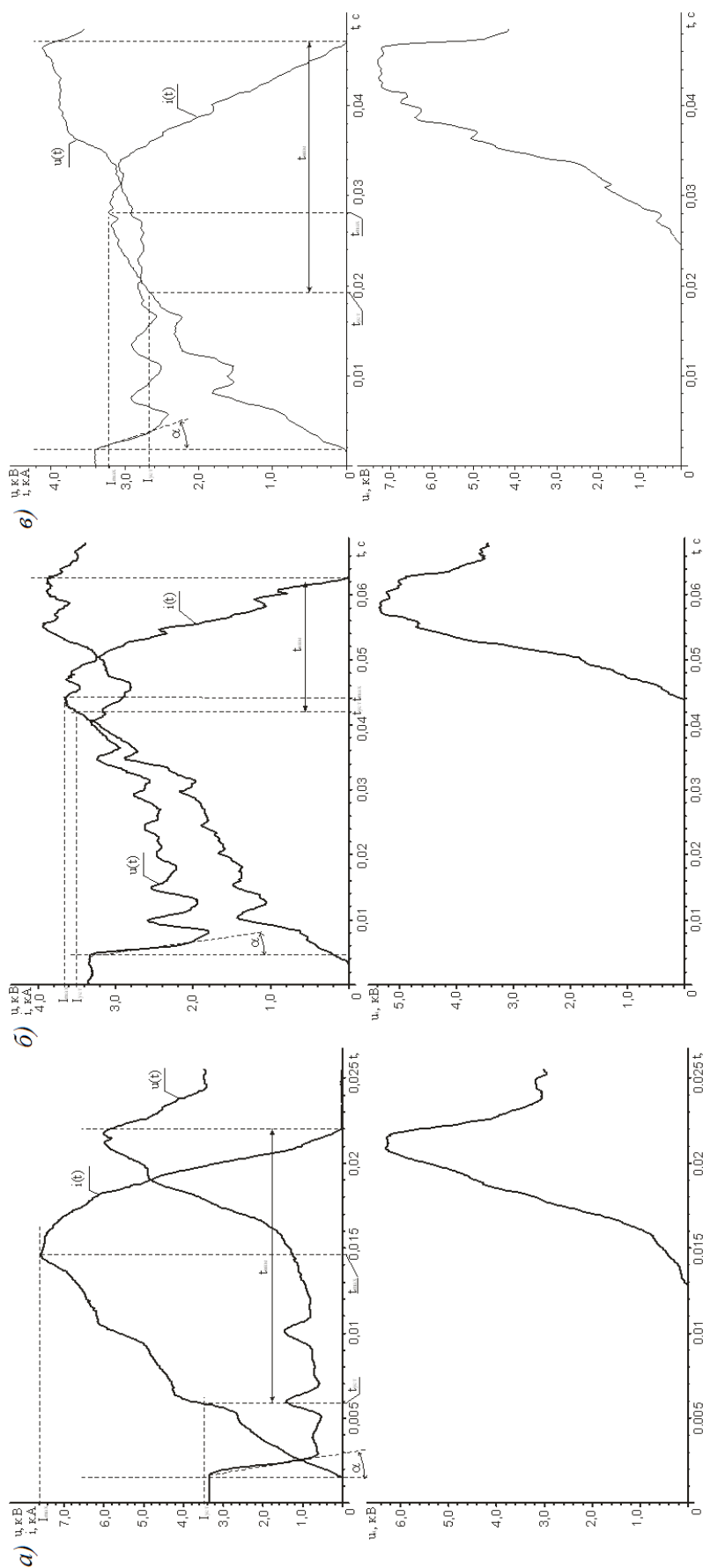


Рис. 2. Осцилограми перехідних електричних величин під час вимикання ШВ 2×ВАБ-49, на ТП Верхньодніпровськ (ЕЧЕ-11), ділянка Верхньодніпровськ (ЕЧЕ-11) – Верхівцеве (ЕЧЕ-10) при:

а) близькому КЗ, $l = 0,5$ км, $I_y = 3500$ А; б) середньому КЗ, $l = 5,4$ км, $I_y = 3500$ А; в) дальньому КЗ, $l = 17$ км, $I_y = 2700$ А

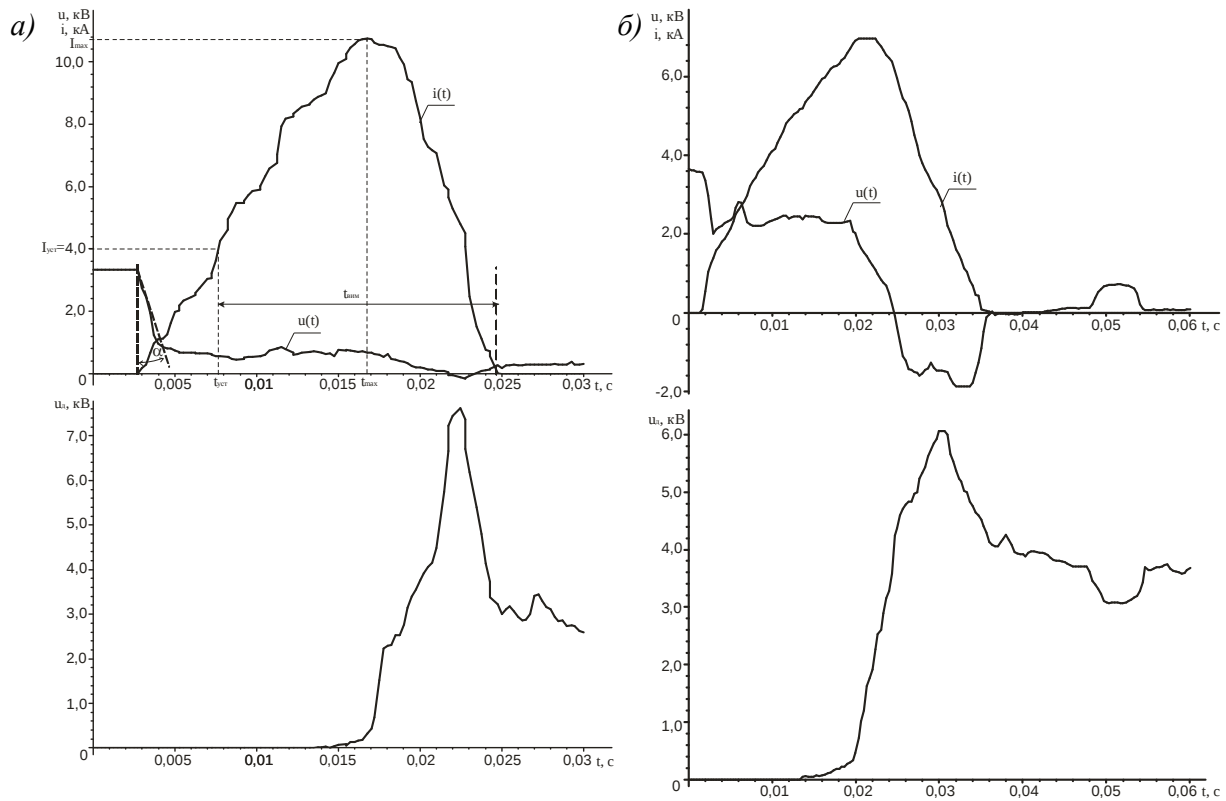


Рис. 3. Осцилограми перехідних електричних величин під час вимикання ШВ ВАБ 206, на ТП Горіаїнове (ЕЧЕ-14), ділянка Горіаїнове (ЕЧЕ-14)– Сухачівка (ЕЧЕ-13) при:
а) близькому КЗ, $l = 0,5$ км, $I_y = 4000$ А; б) дальньому КЗ, $l = 8,5$ км, $I_y = 4000$ А

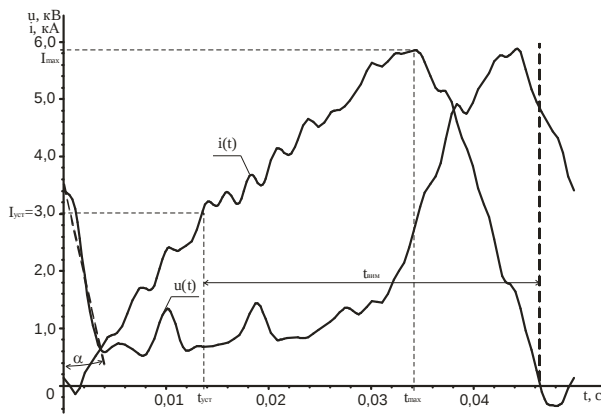


Рис. 4. Осцилограми перехідних електричних величин під час вимикання ШВ ВАБ-206, на ТП Нижньодніпровськ Вузол (ЕЧЕ-15), ділянка Нижньодніпровськ Вузол – Ілларіонове при близькому КЗ, $l = 2$ км, $I_y = 3000$ А

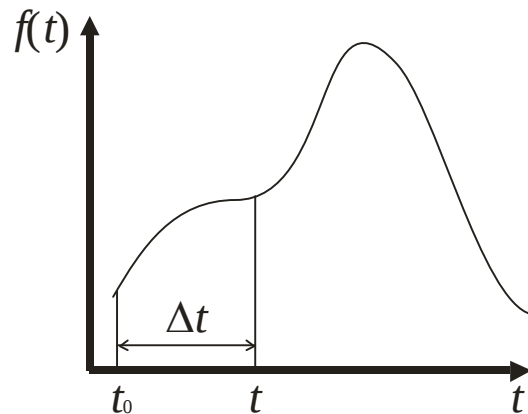


Рис. 5. Представлення ділянки неперіодичної функції, що підлягає спектральному аналізу

$$F_t(j\omega) = \int_{t_0}^t f(t) e^{-j\omega t} dt = \int_0^t f(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (3)$$

Спектр короткого відрізка імпульсу, за невеликий термін часу від його початку, однорідний, бо це спектр короткого імпульсу.

Уведення поняття поточного спектру значно розширює уявлення спектрального аналізу, бо воно перекидає місток між частотним і часовим описанням перехідного процесу. Для подальшого зближення частотної і часової точок зору розглянемо ще одне поняття: поняття миттєвого спектру, введеного Пейджем [9] для потужності (миттєвий спектр потужності) у вигляді:

$$\rho(\omega, t) = \frac{d}{dt} |F_t(j\omega)|^2, \quad (4)$$

де $F_t(j\omega)$ – поточний спектр.

Інтеграл від миттєвого спектру потужності по всій вісі частот дає миттєву потужність

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\omega} \rho(\omega, t) d\omega = \rho(t), \quad (5)$$

а інтеграл від $\rho(\omega, t)$ за часом дає квадрат модуля поточного спектру

$$\int_{-\omega}^{\omega} \rho(\omega, t) dt = |F_t(j\omega)|^2. \quad (6)$$

Однак з розрахунковою метою доцільно мати більш простіший вираз миттєвого спектру, який можна записати у вигляді (рис. 6) [10]:

$$F_t(j\omega, t) = \int_{t-T}^t f(\tau) e^{-j\omega \tau} d\tau. \quad (7)$$

Тобто, миттєвий спектр визначається як спектр відрізка імпульсу тривалістю T , що

безпосередньо передує даному моменту часу t . У виразі (7) ми маємо справу з «ковзним» інтегруванням: це коли інтервал інтегрування має постійну довжину, але переміщується по вісі часу; розташування ж інтервалу незмінне відносно поточного моменту t .

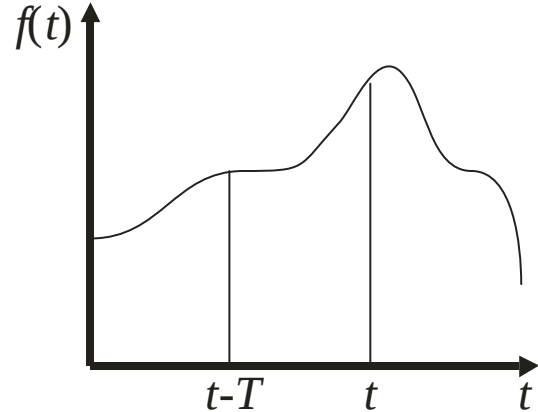


Рис. 6 Встановлення меж неперіодичної функції для встановлення миттєвого спектру

Як відомо, для розв'язання багатьох задач, зокрема електромагнітної сумісності, потрібен дискретний спектр перехідних величин, а в той час як поточний, так і миттєвий спектри є суцільними і отже мають усі частоти. Тому для використання цих спектрів будемо визначати діапазон частот цього суцільного спектру, в якому зосереджена значно переважна частина електроенергії W розглядуваної перехідної величини. Цей діапазон частот називають «ефективною шириною спектру» або просто – «шириною спектру», $\Delta\omega$, а інколи ще простіше – «спектром».

Як відомо, зв'язок між енергією неперіодичної електричної величини $f(t)$ та її спектром $F(j\omega)$ дається рівнянням теореми Рейлі (рівністю Парсеваля) [7]:

$$W = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} F^2(\omega) d\omega. \quad (8)$$

Або з урахуванням понять і формул (3) і (7) поточного і миттєвого спектрів можна записати відповідно як:

$$W_t = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} F_t^2(\omega) d\omega, \quad (9)$$

$$W_T = \frac{1}{\pi} \int_{t-T}^t F_T^2(\omega) d\omega. \quad (10)$$

При спектральному аналізі за допомогою поточного і миттєвого спектрів будемо виділяти в імпульсі досліджуваної перехідної величини певний інтервал Δt (мінімпульс) (рис. 5) з шириною спектру Δf , який і потрібен для розв'язування практичних задач. Між тривалістю Δt і шириною імпульсу $\Delta\omega$ існують різні співвідношення в залежності від форми мінімпульсу [8]: для прямокутного:

$$\Delta t \cdot \Delta f = 1, \quad (11)$$

для трикутного:

$$\Delta t \cdot \Delta f = 2. \quad (12)$$

Із виразів (11) і (12) при заданій тривалості Δt може бути знайдена ефективна ширина спектру. Особливо це стосується формули (11), оскільки тривалість Δt мінімпульсу мала і тому він може бути представлений як прямокутний мінімпульс.

З практичної точки зору також важливо знати, при якій найменшій тривалості Δt буде найменша ширина спектру Δf , тобто щоб добуток $\Delta t \cdot \Delta f$ мав найменше значення. В [8] мінімізація цього добутку дала таке співвідношення:

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{4\sqrt{3}\pi} = 0,046. \quad (13)$$

Отже, із виразів (11)-(13) випливає, що в загальному випадку добуток тривалості мінімпульсу і ширини спектру являє собою деяку сталу величину, яка залежить від форми імпульсу, а також його параметрів Δt і Δf .

Як відомо [11], фідерна напруга, напруга в тяговій мережі і на струмоприймачі ЕРС, параметри ТМ, а також, і особливо, тягове навантаження є випадковими процесами чи величинами. Тому і всі перехідні величини

$a(t)$, в аварійному чи експлуатаційному режимах, є також випадковими (рис. 7), в яких окремий імпульс є детермінованим. У зв'язку з цим розглянемо поняття поточного та миттєвого спектрів відносно випадкових імпульсів.

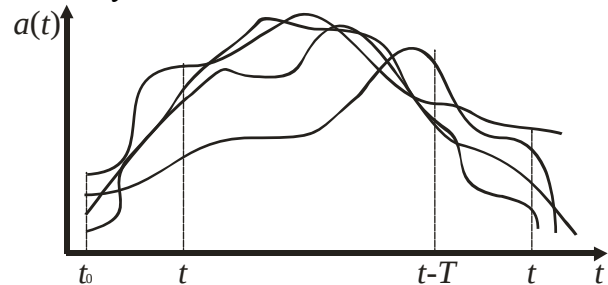


Рис. 7 Представлення неперіодичної стохастичної перехідної електричної величини

За аналогією з формулами (3) і (7) запишемо вираз поточного спектру однієї реалізації випадкової функції $a(t)$ (рис. 7)

$$F_T^{(1)}(j\omega) = \int_{t-T}^T a(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (14)$$

а миттєвого – у вигляді (рис. 7)

$$F_t^{(1)}(j\omega) = \int_0^t a(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (15)$$

Оскільки $a(t)$ – випадкова функція часу t , то і спектри $F_T^{(1)}(j\omega)$, $F_t^{(1)}(j\omega)$ будуть випадковими функціями змінної ω .

В продовженні статті, найближчим наступним номером, буде приведено гармонійний аналіз перехідних фідерних електричних велич, представлених на рис. 1–4.

Бібліографічний список

1. Михаліченко, П. Є. Спектральний аналіз перехідних електричних величин системи тягового електропостачання постійного струму в аварійних режимах її роботи [Текст] / П. Є. Михаліченко // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2011, – Вип. 3(25). – С. 47-53.

2. Костін, М. О. Гармонійний склад фідерних напруг та струмів при аварійних режимах тягової мережі [Текст] / М. О. Костін, П. Є. Михаліченко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи – 2011, – № 4. – С. 84-89
3. Михаліченко, П. Є. Гармонійний склад фідерних струмів при аварійних вимиканнях швидкодіючими вимикачами різних типів [Текст] / П. Є. Михаліченко // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті – 2011, – Вип. 2. – С. 27-32.
4. Костін, М. О. Гармонійний склад фідерних напруг та струмів при аварійних режимах тягової мережі [Текст] / М. О. Костін, П. Є. Михаліченко // Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика». – Кременчуг, 2011, – Вип. 1(1). – С. 164-165.
5. Пупынин, В. Н. Сравнение фидерных выключателей постоянного тока 2×ВAB-49-3200/3-Л и GERapid 4207 2×4 [Текст] / В. Н. Пупынин, С. Х. Дарчиев// Железные дороги мира. – 2006. – №5. – С. 64-71.
6. Основы теории цепей [Текст] / за ред. Зевеке Г. В.– М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
7. Костін, М. О. Теоретичні основи електротехніки [Текст]/ М. О. Костін, О. Г. Шейкіна – Д.: Видавництво ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна, 2007. – Т. 2. – 368 с.
8. Харкевич, А. А. Спектры и анализ [Текст] / А. А. Харкевич. – М.: Гос. изд. физ-мат. лит., 1962. – 236 с.
9. Page, C. H. Instantaneous power spectra [Текст] / C. H. Page. // J.Apple. phys – 1952. – P. 103-106.
10. Михаліченко, П. Є. Розвиток теорії спектрів та її адаптація до задач аналізу перехідних аварійних режимів роботи систем електричної тяги [Текст] / П. Є. Михаліченко, М. О. Костін // Вісник ДНУЗТ. – 2012. – Вип. 40. – С. 87-89.
11. Петров, А. В. Методи спектрального аналізу випадкових коливань напруги та струму фідера тягової підстанції постійного струму [Текст] / А. В. Петров // Вісник ДНУЗТ. – 2010. – Вип. 34. – С. 52-56.

Ключові слова: система тягового електропостачання, аварійний режим, гармонійний аналіз, дискретне перетворення Фур'є, комплексна амплітуда.

Ключевые слова: система тягового электропостачения, аварийный режим, гармонический анализ, дискретное преобразование Фурье, комплексная амплитуда.

Keywords: system of traction supply, malfunction, harmonic analysis, discrete transformation Fourier, complex amplitude.

Рецензенти:

д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабець,
д.т.н., проф. Муха А. М.

Надійшла до редколегії 28.09.2015.

Прийнята до друку 12.10.2015.