

ГАРМОНІЙНИЙ СКЛАД ФІДЕРНИХ СТРУМІВ ПРИ АВАРІЙНИХ ВИМИКАННЯХ ШВИДКОДІЮЧИМИ ВИМИКАЧАМИ РІЗНИХ ТИПІВ

Статтю представив д.т.н., проф. Костін М. О.

На тягових підстанціях електричної тяги постійної струму в якості основних захисних фідерних апаратів використовуються швидкодіючі вимикачі (ШВ) типу АБ-2/4, ВАБ-28 і ВАБ-43, які не задовольняють вимоги по якості й надійності роботи [1]. Тому Укрзалізниця у своїх планах [2] рекомендує службам електрифікації залізниць замінити існуючі ШВ на нові, зокрема на ШВ типу ВАБ-49 і ВАБ-206 (Росія); проходить також випробування вимикач типу VR-40-64S (фірми Sesheron). У зв'язку з необхідністю вдосконалювання захисту електротягових мереж постійного струму доцільно мати дані по порівняльній характеристиці зазначених ШВ за результатами їхніх випробувань в умовах роботи залізниць України. З наукових публікацій по даному питанню відома лише робота [3], у якій виконано порівняння фідерних вимикачів постійного струму 2xВАБ-49 й GE Rapid для умов роботи залізниць Росії.

Перехідні, особливо аварійні режими вивчалися, такими видатними вченими, як Пупинін В.М., Векслер М.Й., Кучма К.Г. тощо, поверхнево, використовуючи, наскільки це дозволяло, аналітичний апарат математики. Сьогодні, застосовуючи такі потужні системи комп'ютерної математики, як MathCad, Maple, MATLAB, можливо аналізувати вищезазначені процеси з різних сторін класичної електротехніки. Роботи в аспекті визначення спектрального складу фідерних напруг та струмів, а також показників якості електроенергії і не продуктивні її втрати автору невідомі.

Метою даної роботи є визначення гармонійного складу фідерних струмів в аварійних режимах роботи тягової мережі постійної напруги 3,3 кВ. Оскільки, наслідки досліджень аварійних режимів у цьому напрямку можуть бути дієвими, виходячи із багатьох задач, зокрема, втрати електро-

енергії, електромагнітної сумісності, спрацьовування захисту, безпеки обслуговуючого персоналу тощо.

Часові залежності напруги і струмів, отриманих в аварійних режимах, є неперіодичними, довільної випадкової форми і тривалості рис.1.

Для виконання спектрального аналізу, періодизуємо (з довільним періодом T) одиночний імпульс перехідної величини $a(t)$, отримавши періодичну послідовність таких імпульсів (рис.2). Тепер функцію $a(t)$ можна розглядати не на інтервалі $[0..T]$ її існування, а продовжену періодично поза ним. Для такої функції $a(t)$, перетвореної в періодичну, є чинним розкладання в ряд Фур'є [4]:

$$a(t) = A_{m(k)} + \sum_{k=1}^{\infty} A_{m(k)} \sin(\kappa \omega t + \psi_{a(k)}), \quad (1)$$

де $A_{m(k)}$, $\psi_{a(k)}$ – амплітуда і початкова фаза k -ої гармоніки ряду, які визначаються із комплексної амплітуди $\underline{A}_{m(k)} = A_{m(k)} e^{-j\psi_{a(k)}}$, що знаходиться за відомим виразом [5]:

$$\underline{A}_{m(k)} = \frac{2}{T} \int_0^T a(t) e^{-j\kappa \omega t} dt. \quad (2)$$

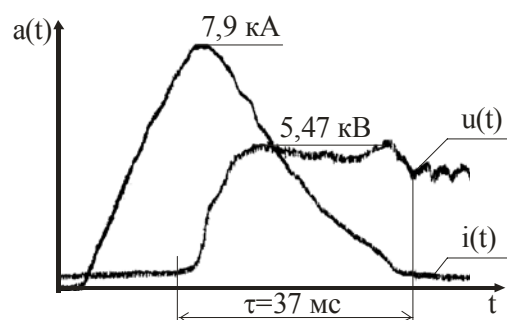


Рис.1. Осцилограми напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ при вимиканні швидкодіючим вимикачем типу АБ-2/4 тягових підстанцій короткого замикання в тяговій мережі.

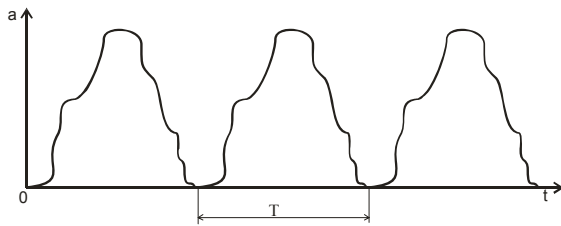


Рис. 2. Періодизація імпульс-функції $a(t)$

Для заданих графічно чи таблично перехідних функцій $a(t)$ необхідно знайти наближені аналітичні вирази, тобто здійснюють їх аналітичну апроксимацію або інтерполяцію. Особливістю цих математичних операцій є те, що апроксимуючі чи інтерполюючі функції $f(t)$ повинні найбільш точно відображати перехідні величини $a(t)$, інакше буде загублена важлива інформація, що призведе до неточних кінцевих результатів. Тому із усіх відомих у математиці критеріїв збіжності, збіжність в кожній точці

$$a(t) = \lim_{k \rightarrow \infty} f_k(t) \text{ в області } [0..T],$$

рівномірною збіжністю

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (\max |a(t) - f_k(t)|) = 0,$$

збіжністю у середньоквадратичному

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int |a(t) - f_k(t)|^2 dt = 0,$$

найбільш доцільним для апроксимації є перший, найбільш жорсткий, критерій. При виборі методу наближення складної за формою $a(t)$, перевагу треба віддавати апроксимації, оскільки інтерполяційний многочлен буде дуже високого порядку, що робить розрахунки недопустимо громіздкими.

Функція $a(t)$ має задовольняти таким умовам [6]: визначена на всій вісі $t \in (-\infty; +\infty)$ і неперервна на цій вісі, за винятком лише скінченної кількості точок розриву першого роду на будь-якому скінченному проміжку вісі t ; будь-який скінченний проміжок вісі t можна поділити на скінченну кількість проміжків, у кожному з яких функція монотонна (умова Діріхле); для перетворення Фур'є функція $a(t)$ має бути абсолютно інтегрованою:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |a(t)| dt = C.$$

Після апроксимації осцилограм поліномами m -го степеня дві перші умови виконуються, але не виконується третя умова, тобто поліном не є абсолютно інтегрованим.

З урахуванням вищезазначеного, класичний Фур'є-аналіз та пряме перетворення Фур'є застосовувати некоректно, що й обумовило рішення про використання дискретного перетворення Фур'є, яке останнім часом широко розповсюджене при цифровій обробці сигналів [7, 8].

Аналогові перехідні функції $a(t)$ шляхом дискретизації з певним інтервалом часу $\Delta t = T/N$ перетворюють в імпульси, які містять масиви N значень досліджуваної величини $a(t)$ (рис.3): $a_1 = a(t_1)$; $a_2 = a(t_2)$; ...; $a_N = a(t_N)$; $n = 1, 2, 3, \dots, N$.

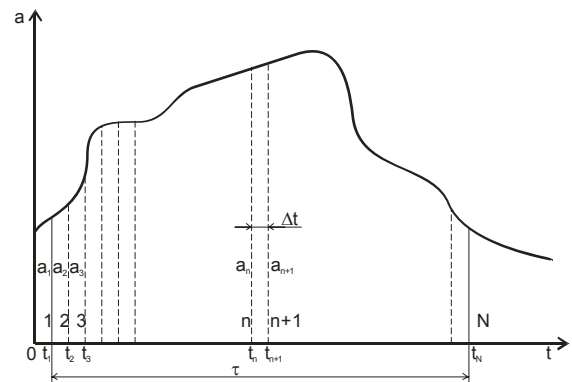


Рис. 3. Дискретизація неперервного імпульсу перехідної величини $a(t)$.

Для визначення Δt скористаємося теоремою Котельникова [9], згідно з якою будь-яка функція $a(t)$, з обмеженим спектром може бути без втрат інформації представлена своїми дискретними відліками a_1, a_2, \dots, a_N , (рис. 3), взятими з інтервалом Δt , який визначається за такою нерівністю:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_{\max}} = \frac{\pi}{\omega_{\max}},$$

де $\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$ - частота Найквіста (частота дискретизації)

Максимальну частоту обмеженого спектру, на який буде розкладено досліджувану функцію $a(t)$, визначаємо за формулою:

$$f_{\max} = \kappa f_{(1)},$$

де κ - номер гармоніки дискретного спектру;

$f_{(1)} = 1/T$ - частота основної гармоніки.

Тоді значення $a_n = a(n \cdot \Delta t)$ є відліками тепер вже періодичної (рис. 2) аналогової функції $a(t)$ у вигляді послідовності дельта-функції, «зваженої» відліками $a(n \cdot \Delta t)$ аналогової функції $a(t)$ (рис. 4) [10]:

$$a(t) = \sum_{n=1}^N a(n \cdot \Delta t) \delta(t - n \cdot \Delta t). \quad (3)$$

Підставивши (3) в (2), отримаємо

$$\underline{A}_{m(k)} = \frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=1}^N a(n \cdot \Delta t) \delta(t - n \cdot \Delta t) \cdot e^{-jk\omega t} dt. \quad (4)$$

Оскільки $a(n \cdot \Delta t)$ є константами, а функція $\delta(t - n \cdot \Delta t)$ дорівнює нулю при будь-якому t окрім $t = n \cdot \Delta t$, тоді (4) можна переписати у вигляді:

$$\underline{A}_{m(k)} = \frac{2}{T} \sum_{n=1}^N a(n \cdot \Delta t) \int_0^T \delta(n \cdot \Delta t) e^{-jk\omega t} dt. \quad (5)$$

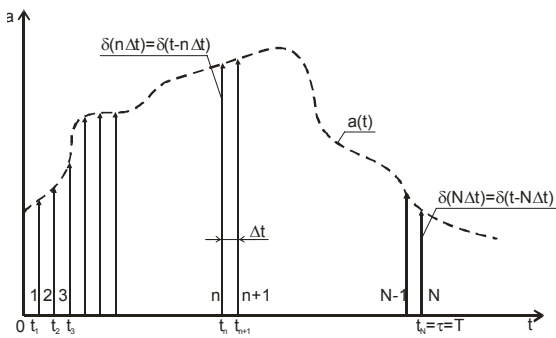


Рис. 4. Дискретизований імпульс-функція $a(t)$ у вигляді послідовності дельта-функцій.

Врахуємо фільтруючу властивість дельта-функції [8], яка полягає у тому, що якщо ця функція присутня під інтегралом у якості множника, то результат інтегрування буде дорівнювати значенню іншої підінтегральної функції (чи виразу) у тій точці (часу), де зосереджена дельта-функція, незалежно від меж інтегрування. Тоді вираз (5) прийме вигляд

$$\underline{A}_{m(k)} = \frac{2}{T} \sum_{n=1}^N a(n \cdot \Delta t) e^{-jk\omega \Delta t}. \quad (6)$$

В (6) спектр є дискретним з частотною відстанню між гармоніками, яка, згідно рис. 4, дорівнює

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{N \cdot \Delta t}. \quad (7)$$

З урахуванням (7) і того, що $a(n \cdot \Delta t)$ - це значення відліків і тому $a(n \cdot \Delta t) = a(n)$, вираз (6) можна записати у вигляді

$$\underline{A}_{m(k)} = \frac{2}{N \cdot \Delta t} \sum_{n=1}^N a(n) e^{-j \frac{2\pi n k}{N}}. \quad (8)$$

Отже, комплексна амплітуда дискретного ряду Фур'є представляє собою лінійну комбінацію відліків $a(n)$ дискретизованої функції $a(t)$.

У виразі (8) реальний масштаб часу фігурує лише у множнику $1/\Delta t$ перед оператором додавання. При аналізі дискретних послідовностей зазвичай оперують номерами відліків (1, 2, ..., N, рис. 3 і 4) та спектральних гармонік без прив'язки до дійсного масштабу часу і частоти [7]. Тому множник $1/\Delta t$ вилучимо із виразу (8), тобто будемо вважати частоту дискретизації рівною одиниці. І тоді остаточний вираз комплексної амплітуди «к»-ої гармоніки буде

$$\underline{A}_{m(k)} = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N a(n) e^{-j \frac{2\pi n k}{N}} = A_{m(k)} \cdot e^{j\psi_{a(k)}}, \quad (9)$$

який і є виразом дискретного перетворення Фур'є аналогової функції $a(t)$.

Таким чином, для отримання спектрального складу реалізації випадкової функції $a(t)$ після її квантування можна користуватися виразами (9).

Формула (9) визначає гармоніки у вигляді комплексної амплітуди $\underline{A}_{m(k)}$. Тоді для ряду Фур'є (1) функції $a(t)$ амплітуду k -ої гармоніки визначаємо як модуль комплексного числа

$$A_{m(k)} = |\underline{A}_{m(k)}|,$$

а початкова фаза, як аргумент цього комплексного числа:

$$\psi_{(k)} = \arg(\underline{A}_{m(k)}).$$

Викладений спосіб спектрального аналізу, дозволяє визначити дискретний спектр амплітуди та фази характеристики конкретної реалізації досліджуваних функцій $a(t)$.

Визначення перехідних електричних величин можливо методами математичного та фізичного моделювання, але жодна теоретична викладка чи розрахунок не може замінити реального експерименту, що виконується в умовах реальної експлуатації елементів СТЕП. Враховуючи вищезазначене, авторами на одній із діючих електрифікованих ділянок ДП «Придніпровська Залізниця» було проведено натурні експерименти по визначенню фідерного струму при близькому, середньому та да-

льньому коротких замиканнях. Виміри були виконані за допомогою цифрового запам'ятовуючого осцилографа АСК-3106. На рис. 5 приведено осцилограми струму фідера $i(t)$ при відключенні близького короткого замикання різними типами ШВ. Приведемо аналіз саме для близького КЗ, оскільки цей режим був найбільш подібний в натурних дослідженнях різних ШВ: відстань до місця КЗ складала не більше 0,5 км; уставки для ВАБ-43 і 49 складала 3500 А, для ВАБ-206 і SECHERON – 4000 А

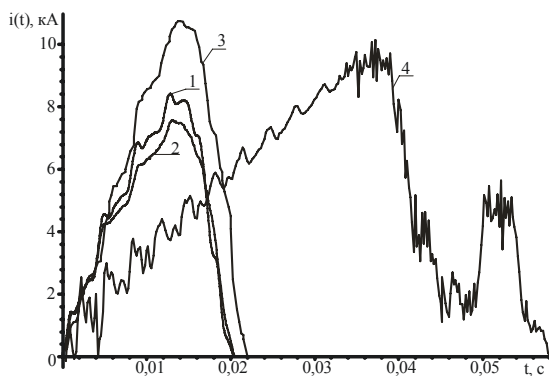


Рис. 5. Осцилограми струму близького короткого замикання для різних типів ШВ: 1–ВАБ-43; 2–ВАБ-49; 3–ВАБ-206; 4 – SECHERON.

Виконаємо гармонійний аналіз цих функцій. Враховуючи вимоги міжнародного стандарту IEEE 519-1981, згідно якого для визначення інтегрального показника гармонійного складу струму необхідно врахувати 49 гармонік [11], приймаємо $\kappa = 50$. Врахувавши те, що перехідний процес навіть при ближньому короткому замиканні не може тривати менше $T = 0,02$ с, отримаємо $\Delta t = 0,2$ мс.

З практичної точки зору, великий інтерес викликає спектральний склад струму, що протікає через фідерну чарунку. На рис. 6 представлено дискретний спектр амплітуди струму при короткому замиканні, який був вимкнений ШВ типу ВАБ-43.

Слід зазначити що по вісі абсцис відкладені номери гармонік $\kappa = 1 \dots 50$. Нульова гармоніка є середньоарифметичним значенням неперервної функції $a(t)$ і як відомо з курсу ТОЕ [12]: визначається інтегралом виду $A_{(0)} = A_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt$. Для квантова-

ної функції інтеграл замінюємо кінцевою сумою:

$$A_{(0)} = A_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_n$$

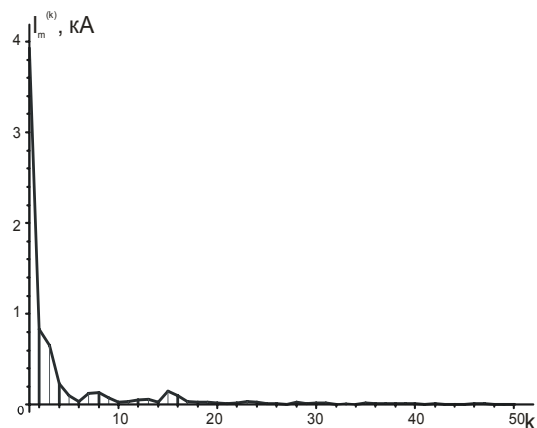


Рис. 6. Дискретний спектр амплітуди струму близького короткого замикання.

У таблиці 1 представлені спектрограми різних перехідних електричних величин системи тягового електропостачання постійного струму в аварійному режимі короткого замикання її роботи.

У роботі [13] зазначено, що відомі в класичній електротехніці, коефіцієнти, які характеризують форму кривих несинусоїдних електричних величин, можливо застосувати для визначення властивостей сигналів довільної форми. На думку авторів, це може бути прийнятним, якщо врахувати припущення, щодо періодизації неперіодичної функції перехідної електричної величини. Найпоширенішими коефіцієнтами є: форми K_ϕ ; амплітуди K_A ; спотворення $K_{СП}$; гармонік K_T , які дають змогу оцінити наскільки досліджуваний сигнал відрізняється від гармонійного.

Слід зазначити, що діюче значення A перехідних квантованих функцій були визначені як середньоквадратичні [14]:

$$A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_n^2}$$

На сьогодні, відповідно до міжнародних стандартів якості енергоспоживання, таких як IEC61000-3, IEEE 519-1992, TN 61000-3-2, основною величиною оцінки є інтегральний показник гармонічного складу електричної величини K_{THD} (Total Harmonic Distortion) [11]:

$$K_r = K_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{49} A_{(k)}}}{A_{(1)}}$$

де $A_{(1)}$, $A_{(k)}$ - дійсне значення відповідно першої та k -ої гармонійної складової.

Таблиця 1

Спектральний склад струму при різних видах короткого замикання тягової мережі постійного струму

ТИП ШВ	ВАБ-43	ВАБ-49	ВАБ-206	SECHERON	
Частота основної гармоніки, Гц	48,9	48,5	44,9	17,2	
Амплітудний спектр за номерами гармонік, А	0	4826,9	4520,4	5909,8	4823,8
	1	3454,2	3001,4	4754,5	3515,8
	2	1140,7	1157,8	1166,2	610,6
	3	362,6	357	318,2	952,1
	4	95,5	149	233,6	982,2
	5	227,7	254,4	279,7	594,3
	6	168,1	91,91	185,9	223,03
	7	70,77	27,78	193,5	220,9
	8	42,39	4,515	77,5	264,7

	49	1,163	2,68	15,52	10,53
50	2,073	1,58	11,91	11,12	
Коефіцієнти	K_ϕ	1,136	1,12	1,16	1,155
	K_A	1,537	1,495	1,566	1,819
	$K_{СП}$	0,445	0,419	0,49	0,446
	K_r	0,366	0,389	0,276	0,499
Частка енергії, %	$\delta^{[0]}$	77,5	79,8	74,2	74,9
	$\delta^{[1]}$	19,8	17,6	24	19,9
	$\delta^{[k \geq 2]}$	2,6	2,6	1,8	5,2

Результати розрахунків згаданих коефіцієнтів, для різних перехідних електричних величин приведені у таблиці 1.

Із даних таблиці 1 випливає, що частота основної гармоніки фідерного струму при всіх видах КЗ складає $f_1 = 15...50$ Гц, і вона

співпадає з частотами сигнального струму в лінії СЦБ та зв'язку. До того ж, згідно рівняння Парсеваля теорема Рейлі [4]:

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} a^2(t) dt$$

було визначено енергію сигналів перехідних напруги та струму, при різних режимах роботи КЗ, а також енергію нульових $W_{(0)}$, та перших $W_{(1)}$ гармонійних складових. Крім того за формулою [13]:

$$\delta^{[k]} = \frac{W_{(k)}}{W} 100\%$$

встановлено вагові частини нульової $\delta^{[0]}$, першої $\delta^{[1]}$ та вищих $\delta^{[k \geq 2]}$ гармонік по відношенню до енергії перехідних величин. Сумарні потужності нульової та першої гармоніки в різних випадках досягає ~ 96%. Частка вищих гармонік коливається від $\delta^{[k \geq 2]} = 1,5...6\%$. Все це залежить від форми сигналу.

Отже, впливом аварійних режимів в СТЕП не можна нехтувати при оцінці електромагнітної сумісності тягової мережі постійного струму з лініями СЦБ та зв'язку, що проходить поряд, а також визначені енергетичних показників пристроїв електричної тяги.

На закінчення зазначимо, що цей порівняльний аналіз дає лише наближену оцінку ефективності роботи досліджених ШВ, тому що він виконаний: при різних відстанях місця к.з. від випробуваної підстанції; при різних струмах уставки; на різних фідерних ділянках, а отже, при різних тягових умовах (навантаженнях) тощо. Імовірно, для дотримання всіх умов випробування ШВ необхідно ці випробування провести методами моделювання, математичного або комп'ютерного (імітаційного), тому що натурні випробування, особливо з тяговим навантаженням, дуже важко виконати і, до речі, не дозволяються керівництвом енергоділянок залізниць.

Бібліографічний список

1. Михаліченко, П. Е. Характеристики видів і кількості вимикань швидкодіючої апаратури захисту фідерів 3,3 кВ тягових підстанцій постійного струму [Текст] / П. Е. Михаліченко, В. Г. Дзюман // Залізничний

транспорт України. – 2007. – № 5 – С. 90-92.

2. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання у 2008 році – К.: Укрзалізниця, 2009; у 2009 році – К.: Укрзалізниця, 2010.

3. Пупынин, В. Н. Сравнение фидерных выключателей постоянного тока 2×ВАБ-49-3200/3-Л и GERapid 4207 2×4 [Текст] / В. Н. Пупынин, С. Х. Дарчиев // Железные дороги мира. – 2006. – №5. – С. 64-71.

4. 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.

5. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей [Текст] / Г. В. Зевеке – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

6. Овчиніков, П. П. Вища математика [Текст] / П.П. Овчиніков, В.М. Михайленко – К.: Техніка, 2004. – Ч. 2. – 792 с.

7. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Б. Сергиенко – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

8. Марпл–мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст] / С. Л. Марпл–мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

9. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст]/ И. С. Гоноровский– М.: Сов. радио, 1977. – 608 с.

10. Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Том 3. [Текст] / Г. М. Фихтенгольц – М.: Наука, 1966. – 656 с.

11. Разанов, Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) [Текст]/ Ю. К. Разанов, М. В. Рябчицкий // Электротехника. – 1998. – Вып. 3. – С. 10-17.

12. Костін, М. О. Теоретичні основи електротехніки [Текст]/ М. О. Костін, О. Г. Шейкіна– Д.: Видавництво ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна, 2007. – Т. 1. – 368 с.

13. Гумен, М. Б. Основы теории электрических кил. Аналіз лінійних електричних кіл частотна область [Текст] / М. Б. Гумен, А. М. Гуржій, В. М. Співак – К.: Вища школа, 2004. – Кн. 2. – 358 с.

14. Саблин, О. И. Повышение эффективности электропотребления электроподвижного состава постоянного тока [Текст] / О. И. Саблин: Дис. канд. техн. наук – Д.:2009. – 190 с.

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

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

Keywords: system of traction supply, malfunction, harmonic analysis, discrete transformation Fur'e, complex amplitude.

Надійшла до редколегії 15.09.2011.

Прийнята до друку 16.09.2011.