

П.Є. Михаліченко

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ ЇЇ РОБОТИ

У статті представлено гармонійний аналіз перехідних електричних величин в аварійному режимі короткого замикання тягової мережі системи електричної тяги постійного струму.

ВСТУП

Систему тягового електропостачання постійного струму досліджують від дня її заснування, але до недавнього ці дослідження, як правило, обмежувались аналізом лише усталених режимів її роботи. Перехідні, особливо аварійні, режими вивчали, наскільки це дозволяло, використовуючи аналітичний апарат математики, що стримувало врахування реальних умов роботи системи. Сьогодні, застосовуючи такі потужні системи комп'ютерної математики як MathCad, Maple, MATLAB, можливо аналізувати перехідні процеси більш докладно і глибше, зокрема, в аспекті визначення спектрального складу фідерних напруг та струмів, а також показників якості електроенергії, непродуктивних її втрати, задач електромагнітної сумісності, спрацьовування захисту, безпеки обслуговуючого персоналу тощо.

При розв'язанні майже усіх цих задач потрібно виконання гармонійного аналізу фідерних, у нашому випадку, перехідних напруг та струмів. Отримання перехідних електричних величин на сьогодні, як правило, здійснюють методами моделювання, найчастіше комп'ютерного. На нашу думку, отримані в такому випадку часові залежності перехідних напруг і струмів будуть далекими від істинних в силу нереальних умов експерименту. Потрібні натурні експерименти на діючих ділянках залізниць з наступною обробкою отриманих осцилограм напруг і струмів в елементах системи електричної тяги. Такий підхід досліджень і застосовано в цій роботі.

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДПОСИЛКИ МЕТОДУ

Часові залежності (осцилограми) імпульсів напруги і струмів, отриманих в аварійних режимах, є неперіодичними і довільної випадкової форми і тривалості і для їх гармонійного аналізу класичний Фур'є-аналіз неможливий. Тому розглянемо неперіодичну функцію-імпульс $a(t)$ як періодичну [1], у якій період T прямує до нескінченності ($T \rightarrow \infty$). У такому випадку можна застосувати пряме інтегральне перетворення Фур'є, для якого функція $a(t)$ має задовольняти таким умовам [2]: визначена на всій вісі $t \in (-\infty; +\infty)$ і неперервна на цій осі, за винятком лише скінченної кількості точок розриву не вище першого роду на будь-якому скінченному проміжку осі 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. Таким чином, 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 [3].

Згідно з цим методом, кожна реалізація функції $a(t)$ розглядається як детермінована несинусоїдна функція [4], не на інтервалі існування $[0, T]$, а періодично продовжену за межі цього інтервалу. Тобто, неперіодична функція $a(t)$ перетворюється в періодичну з періодом T (рис. 1), для якої справедливе розкладання в ряд Фур'є [5]. Період T реалізації $a(t)$ повинен бути прийнятий таким, при якому встигають проявитися всі найбільш можливі для практики властивості функції $a(t)$. Далі функцію $a(t)$ дискретизуємо на інтервали часу $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ (рис. 1), де N - загальна кількість інтервалів дискретизації $n = 0, 1, \dots, N$; тоді $\Delta t = T / N$.

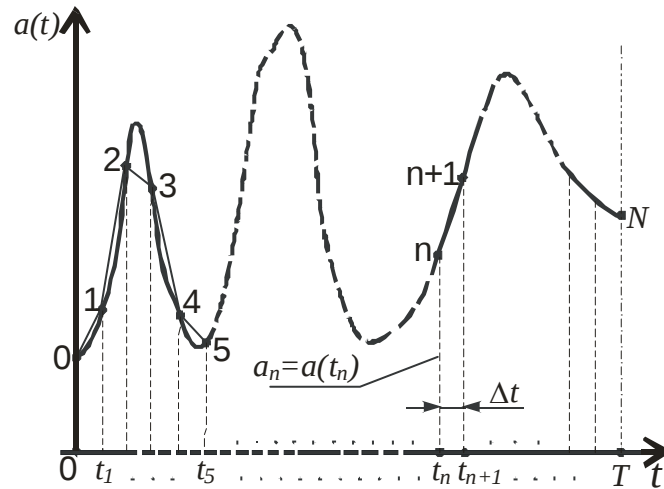


Рисунок 1

Інтервал дискретизації визначається за теоремою Котельникова [6]:

$$\Delta t < \frac{0,5}{f_{\max}}, \quad (1)$$

де $f_{\max}$ - максимальна частота досліджуваної функції $a(t)$

Величина обернена періоду T є частотою основної гармоніки

$$f^{(1)} = \frac{1}{T}. \quad (2)$$

Максимальну частоту обмеженого спектру, на якій буде розкладено досліджувану функцію $a(t)$ визначаємо як:

$$f_{\max} = \kappa f^{(1)}, \quad (3)$$

де κ - номер гармоніки дискретного спектру.

Враховуючи вимоги міжнародного стандарту IEEE 519-1981, згідно якого для визначення інтегрального показника гармонійного складу струму необхідно враховувати 49 гармонік [7], приймаємо $\kappa = 50$. Підставивши (3) в (1) та врахувавши те, що перехідний процес навіть при близькому короткому замиканні не може тривати менше 0,02 с, отримаємо $\Delta t = 0,2$ мс.

Далі можливі два шляхи розкладання функції $a(t)$ в ряд: застосуванням кусково-сталої або кусково-лінійної (ламана лінія 0, 1, ..., 5 на рис. 1) апроксимацією цієї $a(t)$. Хоча і більш громіздке, але із застосуванням сучасного потужного програмного забезпечення комп'ютерної алгебри, перевагу надамо кусково-лінійній апроксимації оскільки вона більш плавно описує розкладену функцію. Застосовуючи цю апроксимацію для розкладання функції $a(t)$ в ряд, необхідно в межах кожного з інтервалів дискретизації Δt апроксимувати функцію певною лінійною залежністю. Розіб'ємо відоме значення виразу для знаходження комплексної амплітуди κ -ої гармоніки [5].

$$\underline{C}^{(\kappa)} = \frac{2}{T} \int_0^T a(t) e^{-j\kappa\omega t} dt. \quad (4)$$

Тоді для будь-якого інтервалу визначимо цю пряму, яка проходить через дві точки з координатами $(t_n, a(t_n))$ і $(t_{n+1}, a(t_{n+1}))$, де $a(t_n)$ - значення функції в моменти взяття відліку $t_n = n\Delta t$, а $t_{n+1} = t_n + \Delta t = (n+1)\Delta t$. Наприклад, для інтервалу часу $[t_n, t_{n+1}]$, тобто, в межах точок n і $n+1$ (рис. 1) це рівняння буде мати вигляд

$$\frac{a(t) - a(t_n)}{a(t_{n+1}) - a(t_n)} = \frac{t - t_n}{t_{n+1} - t_n},$$

звідки функцію $a(t)$ на цьому інтервалі опишемо прямою

$$a(t) = \frac{t - t_n}{t_{n+1} - t_n} (a(t_{n+1}) - a(t_n)) + a(t_n), \quad \text{при } t \in [t_n, t_{n+1}]. \quad (5)$$

Функція (5) буде дійсною для кожного з інтервалів дискретизації Δt окремо і тільки у межах цього інтервалу.

Підставляючи вираз (5) у формулу (4), отримаємо

$$\underline{C}^{(k)} = \frac{2}{T} \int_0^T \left\{ \frac{t-t_n}{t_{n+1}-t_n} [a(t_{n+1})-a(t_n)] + a(t_n) \right\} e^{-jk\omega t} dt. \quad (6)$$

Далі розкладаємо інтеграл (6) на суму інтегралів:

$$\begin{aligned} \underline{C}^{(k)} &= \frac{2}{T} \left[\int_0^{t_1} a(t_0) e^{-jk\omega t} dt + \int_{t_1}^{t_2} a(t_1) e^{-jk\omega t} dt + \dots \right] = \left[\dots + \int_{t_n}^{t_{n+1}} a(t_n) e^{-jk\omega t} dt + \dots + \int_{t_{N-1}}^T a(t_{N-1}) e^{-jk\omega t} dt \right] = \\ &= \frac{2}{T} \sum_{n=0}^N \int_{t_n}^{t_{n+1}} a(t_n) e^{-jk\omega t} dt. \end{aligned} \quad (7)$$

Проінтегрувавши (7), перейдемо до безрозмірних інтервалів інтегрування після чого спростимо вираз, нарешті, отримаємо формулу для комплексної амплітуди при кусково-лінійній апроксимації реалізації $a(t)$ [8]:

$$\underline{C}^{(k)} = -\frac{1}{j\pi k} \sum_{n=1}^N e^{-j\frac{2\pi k}{N}n} \left\{ a_n \left(e^{-j\frac{2\pi k}{N}} - 1 \right) + (a_{n+1} - a_n) \left[(n+1) e^{-j\frac{2\pi k}{N}} - n - \left(e^{-j\frac{2\pi k}{N}} - 1 \right) \left(\frac{N}{j2\pi k} + n \right) \right] \right\} \quad (8)$$

Формула (8) визначає гармоніки у вигляді комплексної амплітуди $\underline{C}^{(k)}$ (тобто містить амплітуду та фазу), тоді для ряду Фур'є функції $a(t)$, що визначається [9]:

$$a(t) = A^{(0)} + \sum_{k=1}^s A_m^{(k)} \sin(k\omega t + \psi^{(k)}), \quad (9)$$

амплітуда k -ої гармоніки визначаємо як модуль комплексного числа $\underline{C}^{(k)}$

$$A_m^{(k)} = |\underline{C}^{(k)}|,$$

а початкова фаза гармоніки є аргумент цього комплексного числа:

$$\psi^{(k)} = \arg(\underline{C}^{(k)})$$

Викладений спосіб спектрального аналізу, дозволяє визначити амплітудно-частотну та фазо-частотну характеристики конкретної реалізації досліджуваних функцій $a(t)$.

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНИХ РОЗРАХУНКІВ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Автором разом зі співробітниками Дорожньої електротехнічної лабораторії ДП «Придніпровська Залізниця» на одній із діючих електрифікованих ділянок було проведено натурні дослідження аварійних режимів близького, середнього та дальнього КЗ тягової мережі. Виміри перехідних величин було виконано із застосуванням сучасних технічних засобів вимірювання, а саме, цифровим запам'ятовуючим осцилографом АСК-3106. На рис. 2 приведено осцилограми струму фідера $i_n(t)$, напруги на затискачах тягової підстанції $u_n(t)$, а також різниці потенціалів на затисках швидкодіючих вимикачів при горінні дуги. $u_d(t)$

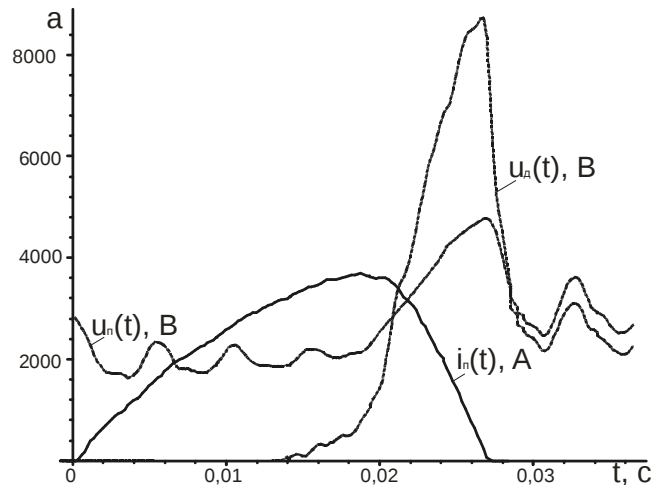


Рисунок 2

На рис. 3, 4 відповідно представлено амплітудночастотну та фазочастотну характеристики струму при близькому КЗ

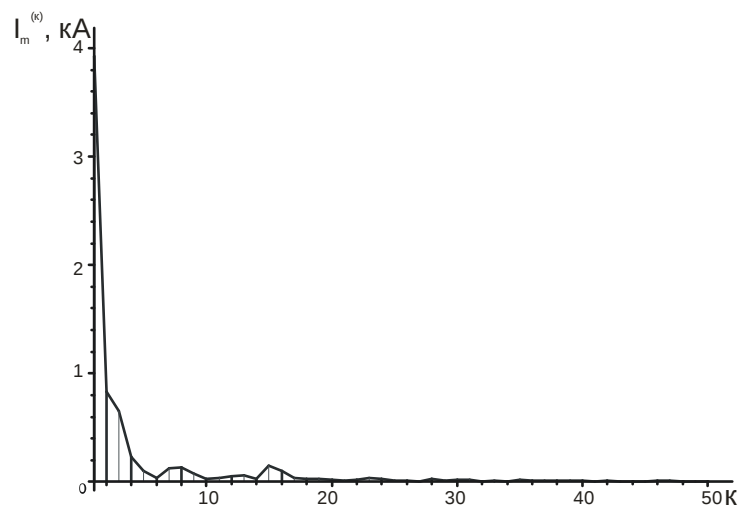


Рисунок 3.

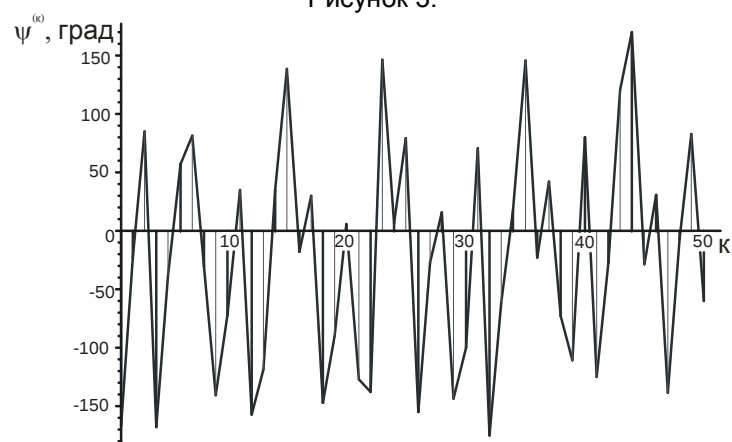


Рисунок 4.

В таблиці приведені дані спектрограм різних перехідних електричних величин в різних режимах роботи системи тягового електропостачання.

Таблиця

Вид КЗ		Ближнє			Середнє			Дальнє		
Частота основної гармоніки, Гц		33,6			33,6			25,1		
Перехідні електричні величини		$i_n(t)$, А	$u_n(t)$, В	$u_d(t)$, В	$i_n(t)$, А	$u_n(t)$, В	$u_d(t)$, В	$i_n(t)$, А	$u_n(t)$, В	$u_d(t)$, В
Амплітудний спектр за номерами гармонік	0	3084	2557,1	1971,9	2387	2941,2	2021,7	1548	2593,2	1866,2
	1	3927	2479,7	2878	222,5	1540,2	3430	1929	830,2	2895,3
	2	829,7	931,9	876,6	633,5	858,2	2177,5	350,5	446,2	1322,2
	3	651,5	983,8	489,2	179,7	285	1128,9	328,8	454,8	812,3
	4	230,7	284	580	101,8	124,2	548,1	111,8	169,7	887
	5	105,3	231,2	42,4	78,6	127,6	370,2	55,5	164,8	602,1
	6	34,3	52,9	380,4	100,8	423,2	358,3	47,9	265,6	284,3
	7	128,8	418,1	364,2	64,8	117,3	288,7	25,7	248,2	156,5
	8	130,7	170,7	187,4	8,5	45,4	187	3,5	62,7	222,5
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	49	5,3	29,2	26,7	3	42,8	28,8	0,4	25	15
	50	2,5	30,2	25,8	3,9	39,8	27	0,5	24,7	13,3
Частка енергії, %	$\delta^{[0]}$	53,2	60,5	42,6	67,8	83,2	30	54,7	91,1	36,2
	$\delta^{[1]}$	42,2	28,5	45,3	29,5	11,4	43,3	42,4	4,7	43,5
	$\delta^{[k \geq 2]}$	4,6	11	12,1	2,7	5,4	26,7	2,9	4,2	20,3

Побудуємо на одному графіку (рис 4.) осцилограму напруги на затискачах тягової підстанції (крива 1), та відтворену її функцію (крива 2) за рядом (9), що містить 50 гармонік:

$$u_n(t) = 2941,15 + 1540,3 \sin(\omega_1 t + 144,2^\circ) + 858,2 \sin(2\omega_1 t + 184,2^\circ) + \\ + 285 \sin(3\omega_1 t + 211,6^\circ) + \dots + 39,8 \sin(50\omega_1 t + 206,2^\circ), \text{ В.}$$

Як бачимо на рис. 4, має місце повне співпадання кривих.

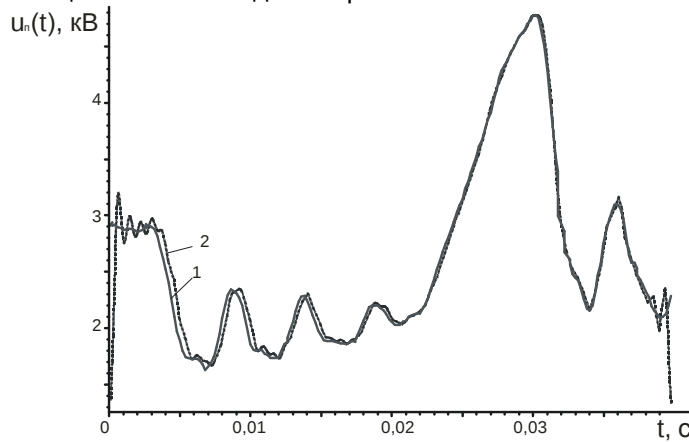


Рисунок 4.

Із даних таблиці випливає, що частота основної гармоніки фідерного струму при всіх видах короткого замикання складає $f^{(1)} = 25...35 \text{ Гц}$ і вона співпадає з частотами сигнального струму в лінії СЦБ та зв'язку. Окрім гармонійного складу за рівністю Парсеваля

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

було визначено енергію неперіодичних перехідних електричних величин, при різних коротких замиканнях, а також енергію нульових $W^{(0)}$ та перших $W^{(1)}$ гармонік. Крім того, за формулою [10]

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

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 гармонік в різних випадках досягають $\sim 96\%$. Частка вищих гармонік коливається в межах $4...20\%$, що залежить від форми сигналу. Якщо сигнал вертикально видовжений, як наприклад для $u_d(t)$ і має значення відмінні від 0 не на всьому періоді перехідної величини, то частка вищих гармонік збільшується. Крім того, з таблиці випливає, що для сигналів складної форми, як наприклад для $u_n(t)$, значення амплітуди першої гармоніки зменшується, а нульової та вищих збільшується.

Отже, впливом аварійних режимів в системі тягового електропостачання не можна нехтувати при оцінці електромагнітної сумісності пристроїв електричної тяги.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Костін М.О. Шейкіна О.Г. Теоретичні основи електротехніки – Д.: Видавництво ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна, 2007. – Т. 2. – 368 с.
2. Овчиніков П.П., Михайленко В.М. Вища математика – К.: Техніка, 2004. – Ч. 2. – 792 с.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
5. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. – М.: Наука, 1966. – т. III. – 656 с.
6. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Сов. радио, 1977. – 608 с.
7. Разанов Ю.К., Рябчицкий М.В. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор)// Электротехника. – 1998. – Вип. 3. – С. 10-17.
8. Саблин О.И. Повышение эффективности электропотребления электроподвижного состава постоянного тока: Дис. канд. техн. наук – Д.:2009. – 190 с.
9. Костін М.О. Шейкіна О.Г. Теоретичні основи електротехніки – Д.: Видавництво ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна, 2007. – Т. 1. – 368 с.
10. Гумен М.Б., Гуржій А.М., Співак В.М. Основи теорії електричних кіл. Аналіз лінійних електричних кіл частотна область – К.: Вища школа, 2004. – Кн. 2. – 358 с.