

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.

ГАРМОНІЙНИЙ СКЛАД ФІДЕРНИХ СТРУМІВ ПРИ АВАРІЙНИХ ВИМИКАННЯХ ШВИДКОДІЮЧИМИ ВИМИКАЧАМИ. РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВИХ РОЗРАХУНКІВ

Виконаємо гармонійний аналіз перехідних електричних величин, представлених на рис. 1–4. В статті автора минулого номера даного видання Враховуючи вимоги міжнародного стандарту IEEE 519-1992, згідно якого для визначення інтегрального показника гармонійного складу струму необхідно враховувати 49 гармонік [1], 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. 1 представлено дискретні спектри амплітуди і фази такого струму при короткому замиканні, який був вимкнений ШВ типу ВАБ-43 [2]. При цьому слід зазначити що по вісі абсцис відкладені номери гармонік $\kappa = 1 \dots 50$.

У табл. 1, 2, 3 представлені спектрограми відповідно перехідних струму $i(t)$, напруги $u_n(t)$ фідера, а також напруги дуги $u_d(t)$ в камері ШВ при аварійному режимі короткого замикання її роботи [3-5]. В цих таблицях: K_Φ – коефіцієнт форми; K_A – коефіцієнт амплітуди; $K_{СП}$ – коефіцієнт спотворення; K_Γ – коефіцієнт гармонік; $\delta^{[0]}$ – вагова частка нульової гармоніки; $\delta^{[1]}$ – вагова частка основної гармоніки; $\delta^{[k \geq 2]}$ – вагова частка вищих гармонік.

Правильність використання виразу

$$W_i = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty F_i^2(\omega) d\omega$$

для визначення коефіцієнтів ряду

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

підтверджуємо його відповідністю до розкладеної реалізації $a(t)$. Побудуємо на одному графіку (рис. 2) осцилограму (крива 1) напруги на затискачах тягової підстанції та відтворену за рядом функцію (крива 2), що містить $\kappa = 15$ гармонійних складових:

$$u_{\text{тн}}(t) = 2972,9 + 1021,7 \sin(\omega_1 t + 144,2^\circ) + \dots + 25,04 \sin(15\omega_1 t + 75,5^\circ) \text{ В,}$$

де $\omega_1 = 2\pi f_1$ – кутова частота основної гармоніки.

У роботі [6] 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 роботи [6], 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_Γ , які дають змогу оцінити наскільки досліджуваний сигнал відрізняється від гармонійного. Крім того, 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 Harmonik Distortion) [1]:

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

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

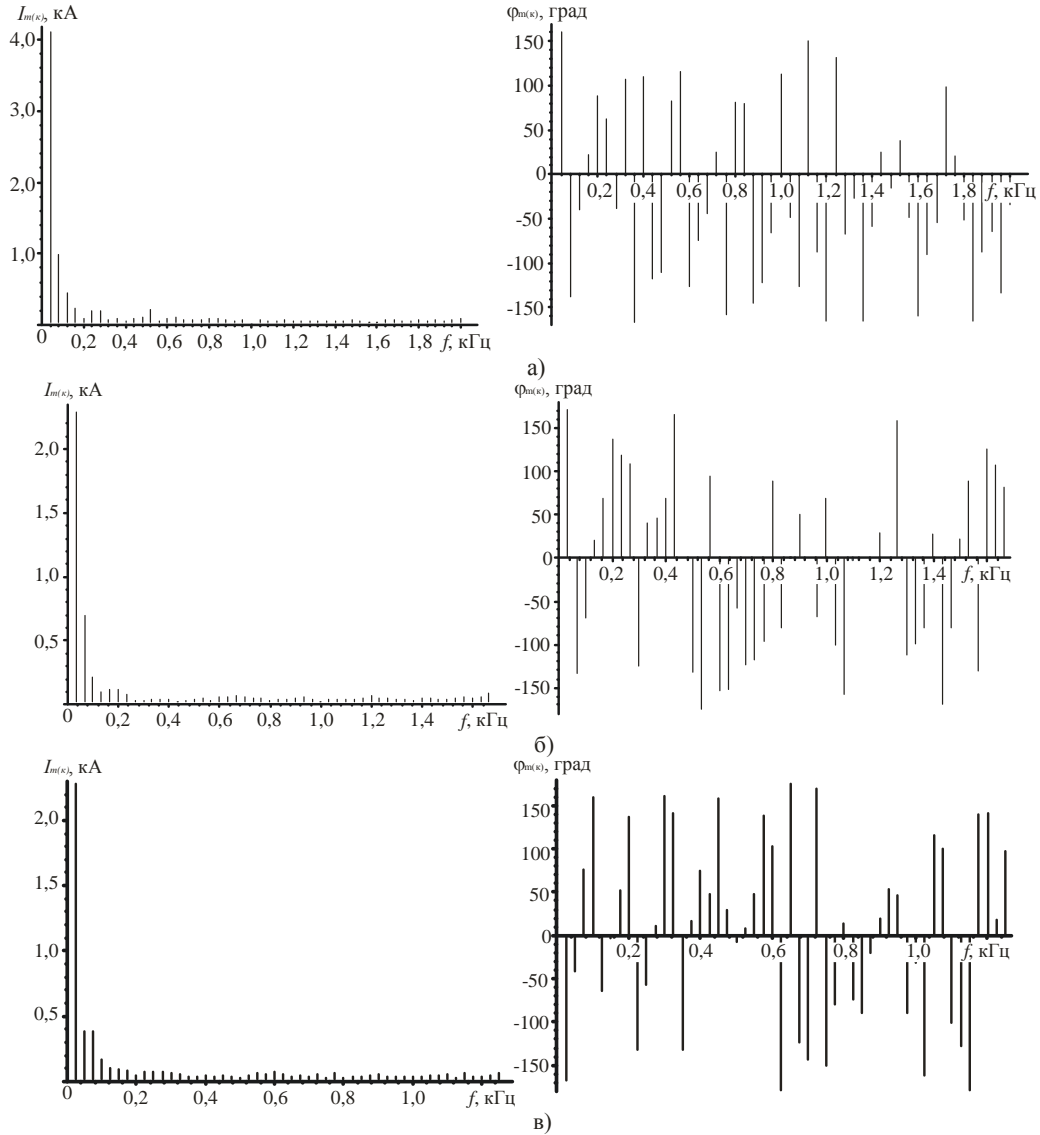


Рис. 1 Дискретні спектри амплітуди і фази струму короткого замикання при вимиканні його фідерним автоматом ВАБ-43:
 а) близьке КЗ; б) середнє КЗ; в) дальнє КЗ

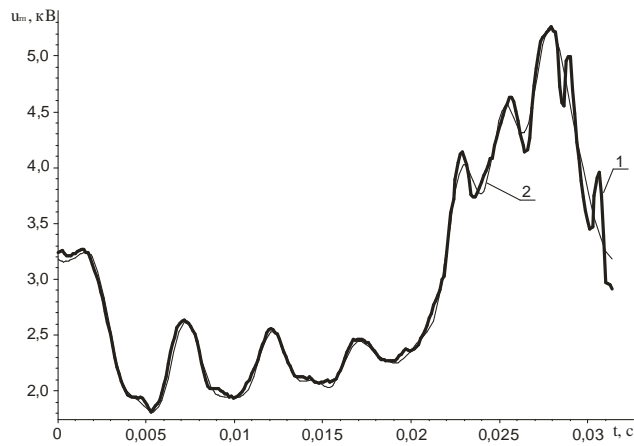


Рис. 2 Графіки зміни напруги та затискачах тягової підстанції при короткому замиканні:
 1 – експериментальна крива; 2 – відтворена за рядом

Таблиця 1

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

Тип ШВ	Вид КЗ	Частота основної гармоніки, Гц	Амплітудний спектр за номерами гармонік, А										Коефіцієнти				Частка енергії, %		
			0	1	2	3	4	5	6	...	50	K_{Φ}	K_A	$K_{сп}$	$K_{Г}$	$\delta^{[0]}$	$\delta^{[1]}$	$\delta^{[k \neq 2]}$	
ВАБ-49 ВАБ-43	1	40,0	4026,8	4071,6	955,7	418,1	203,6	54,5	163,5	...	48	1,13	1,54	0,44	0,37	77,5	19,8	2,7	
	2	33,3	2441,2	2271	677	198,7	78,1	103,2	100,2	...	67,6	1,1	1,44	0,4	0,4	81,4	16	2,6	
	3	25,0	1838,6	2263,2	369,5	366,1	149,1	81,4	72,3	...	42,5	1,11	1,45	0,41	0,38	80,5	17	2,5	
	4	48,5	4520,4	3001,4	1057,8	357	149	254,4	91,9	...	1,58	1,12	1,5	0,42	0,39	79,7	17,6	2,7	
	5	16,6	1928,3	1356,1	644,8	151,6	84,8	38,8	20,2	...	3,9	1,14	1,66	0,43	0,49	76,5	18,9	4,6	
	6	22,9	2022,3	1332,6	367,5	124,1	44,8	55,4	41,9	...	0,5	1,11	1,43	0,41	0,3	80,9	17,5	1,6	
ВАБ-206 (Горяінове)	7	44,9	5909,8	4754,5	1166,2	318,2	233,6	279,7	186	...	11,9	1,16	1,57	0,49	0,28	74,2	24	1,8	
SECHERON	8	28,6	3938,4	3002,1	631	127	200,7	95,7	40	...	3,04	1,14	1,55	0,47	2,3	76,6	22,2	1,2	
	9	17,2	4823,8	3515,8	610,6	952,1	982,2	594,3	223	...	11,1	1,15	1,82	0,47	0,5	74,9	19,9	5,2	
ВАБ-206 (Н-Д Вузол)	10	16,7	2211,9	1075,4	529,3	310	201,8	138,3	96,5	...	11,6	1,08	1,39	0,32	0,63	85,9	10,2	3,9	
	11	20,1	3043,7	2517,4	928,8	212	34	83,5	6,11	...	7,75	1,17	1,67	0,5	0,39	73,4	25,1	1,5	

Таблиця 2

Спектральний склад напруги на затискачах тягової підстанції при різних видах короткого замикання тягової мережі

Тип ШВ	Вид КЗ	Частота ос- новної гар- моніки, Гц	Амплітудний спектр за номерами гармонік, В								Коефіцієнти				
			0	1	2	3	4	5	6	...	50	K_{Φ}	K_A	$K_{\text{СП}}$	K_{Γ}
ВАБ-49 ВАБ-43	1	40,0	2514,8	2679,7	908,6	257,3	429,9	167,8	390,5	...	27,2	1,41	2,59	0,56	0,78
	2	33,3	2946,8	1532,6	826,9	284,4	86,2	118,4	401,3	...	17,2	1,09	2,1	0,28	1,02
	3	25,0	2972,9	1021,7	347,6	436,8	212,6	175,3	274,5	...	20,3	1,06	1,8	0,25	0,91
	4	48,5	2059,5	1943,9	1219,1	601	380,7	359,4	184	...	15,6	1,31	2,25	0,51	0,78
	5	16,6	2907,5	607,2	346,7	297,3	48,9	106,6	107,1	...	4,26	1,02	1,39	0,14	0,87
	6	22,9	3121,6	631,2	354,7	150	96,4	85,3	92,1	...	4,63	1,02	1,31	0,14	0,69
ВАБ-206 (Горяїнове)	7	44,9	610,6	212,3	361,5	283,7	177,5	219,2	179,7	...	39,2	1,3	4,18	0,19	3,4
	8	28,6	1867,6	2153,1	897,3	293,8	382,7	305,4	230,2	...	33,8	1,07	1,79	0,76	0,55
ВАБ-206 (Н-Д Вузол)	11	20,1	2274,4	2213,1	1114,3	275,2	139,3	185,4	155,4	...	12,5	1,27	2,05	0,54	0,54

Таблиця 3

Спектральний склад напруги дуги в камері ШВ при різних видах короткого замикання тягової мережі постійного струму

Тип ШВ	Вид КЗ	Частота ос- новної гар- моніки, Гц	Амплітудний спектр за номерами гармонік, В										Коефіцієнти			
			0	1	2	3	4	5	6	...	50	K_{Φ}	K_A	$K_{СП}$	K_{Γ}	
ВАВ-49 ВАР-43	1	40,0	2087,4	3297,9	1946,9	730,7	152	426,6	361,9	...	41,1	1,88	2,47	0,65	0,83	
	2	33,3	2281,1	3654,6	2110,5	1030,4	531,2	271,3	196	...	104,6	1,94	2,74	0,63	0,93	
	3	25,0	2169,6	3255	1508,9	929,2	931,2	633,8	265,7	...	38	1,96	2,71	0,62	0,94	
	4	48,5	1350,7	2321,3	1494	800	468,4	412,3	396,6	...	33,7	1,88	2,48	0,64	0,85	
	5	16,6	1033,4	1876	1388,6	817,1	404,5	277,7	245,1	...	36,9	2,05	2,53	0,62	0,97	
	6	22,9	1980,6	3213,7	1743,8	812,3	441,4	530,7	467,7	...	42,6	1,72	2,14	0,67	0,7	
ВАВ-206 (Горішнє)	7	44,9	1462,9	2524	1603,3	780,5	505,1	401,1	198,5	...	40,1	1,84	2,83	0,66	0,78	
	8	28,6	2023,6	3027,5	1103,2	296,7	345,3	175	240,7	...	36,3	1,53	1,96	0,69	0,44	

Результати розрахунків зазначених коефіцієнтів для різних перехідних електричних величин приведені у табл. 1, із якої випливає, що частота основної гармоніки фідерного струму при всіх видах КЗ складає 15...50 Гц і вона співпадає з частотами сигнального струму в лінії СЦБ та зв'язку. До того ж, згідно рівняння Парсевала теореми Рейлі [7],

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

було визначено енергію 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 [6]

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

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 $\delta^{[k \geq 2]} = 1,5...6 \%$, яка залежить від форми імпульсу перехідної величини. Якщо імпульс вертикально видовжений, як наприклад для $u_d(t)$ і має значення відмінні від 0 не на всьому періоді перехідного процесу, то частка вищих гармонік збільшується. Крім того, з табл. 3.3 випливає, що для імпульсів складної форми, як наприклад для $u_n(t)$, значення амплітуди основної гармоніки зменшується, а нульової та вищих збільшується.

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

Бібліографічний список

1. Разанов, Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) [Текст] / Ю. К. Разанов, М. В. Рябчицкий // Электротехника. – 1998. – Вип. 3. – С. 10-17.
2. 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.
3. 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
4. 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.
5. 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.
6. Гумен, М. Б. Основи теорії електричних кіл. Аналіз лінійних електричних кіл частотна область [Текст] / М. Б. Гумен, А. М. Гуржій, В. М. Співак – К.: Вища школа, 2004. – Кн. 2. – 358 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.

Ключові слова: система тягового електропостачання, аварійний режим, гармонійний 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 Fourier transform, complex amplitude.

Рецензенти:
д.т.н., проф. М. О. Костін,
д.ф.-м.н., проф. В. І. Гаврилюк.

Надійшла до редколегії 21.04.2016.
Прийнята до друку 28.04.2016.