

Ю.С. Бондаренко

(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТОТИ МОДУЛЯЦІЇ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ НА ГАРМОНІЙНИЙ СКЛАД СТРУМУ СИСТЕМИ

На сьогоднішній день діяльність людини у будь-яких сферах пов'язана з використанням сучасних пристроїв або систем, що їх об'єднують. До цього класу належать і різноманітні електричні та електромеханічні системи, що знаходять своє застосування у різних галузях промисловості. Чим складніша система, тим більш широким є спектр завдань, які вона виконує, і тим більше сукупних елементів входить до її складу.

Одним з представників систем такого класу є сучасні електричні та електромеханічні системи. Наявність у їх складі електричних та електромеханічних перетворювачів спричиняє появу різноманітних перешкод електромагнітного характеру, що впливають на нормальне функціонування суміжних комплексів та систем. Загалом такий вплив об'єднують поняттям електромагнітної сумісності.

Під електромагнітною сумісністю розуміється здатність електротехнічного обладнання працювати задовільно в електромагнітному середовищі, не здійснюючи недопустимого впливу на інше електротехнічне або не електротехнічне обладнання [1].

Однією з ключових особливостей розглянутих систем, що сприяє підвищеному електромагнітному впливу, є наявність у її складі елементів з нелінійними статичними характеристиками. До таких елементів відносяться різноманітні перетворювачі напруги та струму, робота яких призводить до появи в колах живлення гармонік струму та напруги, що є джерелами електромагнітного впливу на суміжні кола та системи в широкому діапазоні частот [2].

На сучасному етапі розвитку все більшого застосування у складі різноманітних електромеханічних систем, у тому числі на залізничному транспорті, набули асинхронні приводи. Здебільшого це пов'язано з використанням у його складі статичних перетворювачів частоти, що значно розширюють можливості приводу з погляду функціонування та контролю його параметрів.

В основі функціонування такого обладнання лежить застосування напівпровідних елементів (переважно IGBT-транзисторів), що мають нелінійні статичні характеристики, а отже є "генераторами" електромагнітних перешкод. Одним з ключових параметрів, що супроводжують функціонування таких перетворювачів, є так звана частота модуляції. Вона визначає періодичність ввімкнення силових модулів та чинить безпосередній вплив на спектр гармонік вхідного струму системи.

Метою даної роботи є визначення узагальненої картини спектра гармонік вхідного струму та їх можливий вплив на систему сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) електрифікованих залізниць з урахуванням частоти модуляції тягового перетворювача частоти.

Свого часу достатня кількість вчених присвячувала свої роботи подібному питанню [1, 3, 4]. Зокрема, у своїй роботі [4] автор відзначає важливість врахування частоти модуляції перетворювача з точки зору її безпосереднього впливу на спектр гармонік вхідного струму та показники електромагнітної сумісності.

Незважаючи на широкий об'єм досліджень більша частина робіт носить суто математичний характер, маючи в своїй основі виключно математичні моделі. Безумовно, використання математичного моделювання дозволяє провести повноцінне дослідження, але повністю врахувати всі особливості реального об'єкта з його використанням є неможливим.

З урахуванням останнього для дослідження впливу частоти модуляції на спектр гармонік вхідного струму було розроблено фізичну модель [5], що імітує роботу тягового асинхронного електропривода і призначена для дослідження впливу гармонік тягового струму на системи сигналізації, централізації та блокування залізниць. Очевидно, що фізичне моделювання теж не може гарантувати повної відповідності результатів, але у порівнянні з математичним є більш інформативним, адже дозволяє повноцінно відтворити перебігу процесів у часі [6].

Використання фізичної моделі дозволяє отримати загальні осцилограми зміни струму системи за різних значень частот модуляції перетворювача. Так, на рис. 1 наведено осцилограму, що характеризує поведінку струму при частоті модуляції 1 кГц.

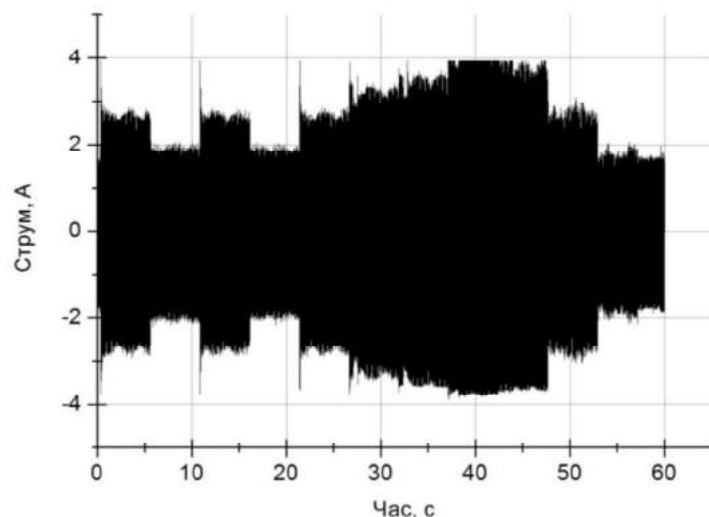


Рис.1. Узагальнена осцилограма зміни вхідного струму при частоті модуляції сигналу 1 кГц

Деталізація отриманої осцилограми дозволяє вказати на наявність змінної складової вхідного струму (рис. 2). Оскільки функція зміни струму має періодичний характер, то для подальшого аналізу можливим є застосування ряду Фур'є. Узагальнені результати проведеного аналізу Фур'є подані у вигляді рис. 3.

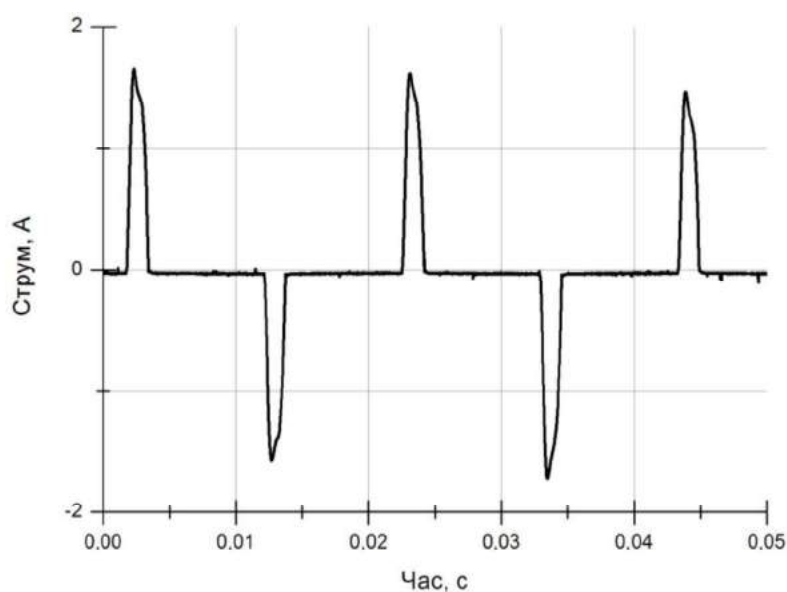


Рис. 2. Деталізація осцилограми струму перетворювача з частотою модуляції сигналу 1 кГц

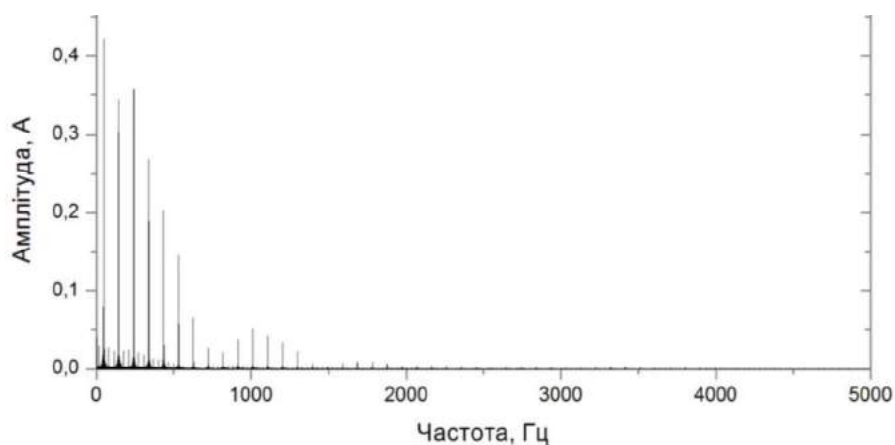


Рис. 3. Гармонійний склад сигналу струму системи з частотою модуляції сигналу 1 кГц

Електропостачання та електроустаткування

Подальший аналіз спектра гармонійних складових здійснюємо шляхом деталізації діапазонів отриманих частот (рис. 3) та порівняння значень амплітуд відповідних вищих гармонік з нормативними. Допустимі значення амплітуд струму перешкод визначаються відповідними нормативними документами. При цьому, в практиці оцінки впливу перешкод на системи СЦБ залізниць України користуються нормами залізниць Російської Федерації [7], що пояснюється відсутністю у переліку України відповідних документів. У загальному вигляді перелік робочих частот сигнальних кіл СЦБ та допустимі значення струму перешкод наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Допустимі рівні гармонійних складових мережевого струму електрорухомого складу						
Частота сигнального струму, Гц	Допустимі параметри струму електровоза					
	Смуга частот, Гц	при безперервній дії (більше 0,3 с)		при імпульсній дії		
		Допустимий рівень перешкод $A_{\text{эфф}}$	Характер впливу	Допустимий рівень перешкод $A_{\text{эфф}}$	Тривалість імпульсу, с	Період проходження, с
25	19-31			11,6	Менше 0,3	0,3...0,9
	19-31			26,6	Менше 0,3	Більше 0,9
	21-29	1,0	Небезпечне			
	19-21	11,6	Що заважає			
	29-31	11,6	Що заважає			
50	40-60			5,0	Менше 0,1	1,0...6,0
	40-60			9,6	Менше 0,1	Більше 6,0
	46-54	1,3	Небезпечне			
	40-46	5,0	Що заважає			
	54-60	5,0	Що заважає			
175	167-184	0,4	Що заважає	0,4	Менше 0,25	Менше 0,25
	145-167	40,0		3,3	Менше 0,25	Більше 0,25
	184-205	40,0				
Діапазон ТРЦ-3						
420	408-432	0,3	Що заважає	0,3 1,2	Менше 0,2 Менше 0,2	0,25...1,5 Більше 1,5
480	468-492					
580	568-592					
720	708-732					
780	768-792					
Діапазон ТРЦ-4						
4545	4508- 4583	0,18	Що заважає	0,18 0,8	Менше 0,2 Менше 0,2	0,25...1,5 Більше 1,5
5000	4963- 5038					
5555	5518- 5593					

Як приклад визначимо гармонійний розподіл вхідного струму для частот сигнального струму діапазона 25 Гц. Отримані результати розподілу з визначенням амплітуд кожної з гармонік, подані у вигляді рис. 4.

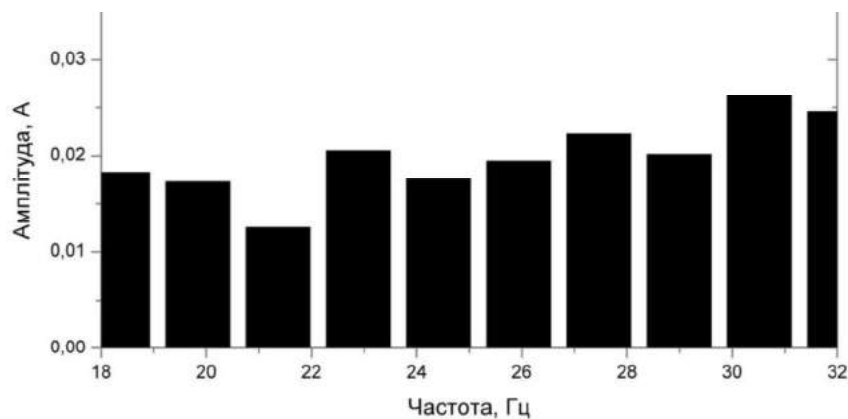


Рис. 4. Гармонійний розподіл діапазону частот сигнального струму частотою 25 Гц

Електропостачання та електроустаткування

Очевидно, що отриманий діапазон значень амплітуд складових загального спектра струму є дещо заниженим, що обумовлено відповідними особливостями моделювання. Для отримання адекватних значень амплітуд скористаємося відповідним масштабним коефіцієнтом, значення якого в першому наближенні визначимо як

$$m_i = \frac{I_{\text{EPC}}}{I_{\text{mod}}}, \quad (1)$$

де I_{EPC} – номінальний струм електрорухомого складу; I_{mod} – номінальний струм фізичної моделі.

Як базовий електрорухомий склад, подібно до якого створена фізична модель, вибраний магістральний електровоз серії ДСЗ – електровоз змінного струму з асинхронним тяговим приводом.

Прийнявши за номінальний струм струмоприймача електровозу [8] та з урахуванням параметрів моделі [5] визначимо масштабний коефіцієнт за такою формулою:

$$m_i = \frac{I_{\text{EPC}}}{I_{\text{mod}}} = \frac{500}{5,2} = 96,1. \quad (2)$$

Скориставшись визначеним коефіцієнтом та перерахувавши відповідні амплітуди гармонік струму для сигнального струму частотою 25 Гц отримаємо такі значення (табл.2):

Таблиця 2

Амплітуди гармонік струму для частоти сигнального струму частотою 25 Гц

Частота, Гц	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Амплітуда струму, А	1,8	1,7	1,4	1,4	2,1	1,9	2	2	2,3	2,2	1,9	2,6	2,4

Бачимо, що амплітуда струму діапазону частот 21–29 може перевищувати нормоване значення, тому за даної частоти модуляції перетворювач може вносити значні перешкоди у функціонування апаратури кіл СЦБ.

Аналогічним чином був проведений аналіз сигнального струму частотою 175, 420, 480, 580, 720, 780, 4545, 5000, та 5555 Гц. Узагальнені результати дослідження наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Аналіз ступеню впливу частоти модуляції на сигнальні частоти кіл СЦБ

Сигнальна частота, Гц	Ступінь впливу тягового струму									
	25	175	420	480	580	720	780	4545	5000	5555
Частота модуляції, кГц										
1	Небезпечна	Заважає	Заважає	–	–	Заважає	Заважає	–	–	–
2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3	–	–	–	Заважає	–	–	–	–	–	–
4	–	–	–	Заважає	–	–	–	–	–	–
5	–	–	–	Заважає	–	–	–	–	–	–
6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
7	–	–	–	Заважає	–	–	–	–	–	–
8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
9	–	–	–	Заважає	Заважає	–	–	–	–	–
10	–	–	–	–	–	–	–	Заважає	–	–
11	–	–	–	–	–	–	–	Заважає	–	–
12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
13	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
14	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
15	–	–	–	Заважає	–	–	–	–	–	–
16	–	–	–	–	–	–	Заважає	–	–	–

Електропостачання та електроустаткування

У результаті, проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

- зміна частоти модуляції тягового статичного перетворювача призводить до зміни спектрального складу тягового струму електрорухомого складу, а отже, до зміни характеру його впливу на кола СЦБ;
- найбільш небезпечними частотами модуляції перетворювача з точки зору генерованих ним перешкод є частоти діапазонів 3–5 та 9–11 кГц.
- у перспективі розвитку перетворювальної техніки найбезпечнішими частотами модуляції перетворювача з точки зору генерованих ним перешкод є частоти 12–13 та 6 кГц.

Список літератури

1. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость / М.П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
2. Справочник по электроснабжению железных дорог / под ред. К.Г. Марквардт. – М: Транспорт. 1980. –Т.1. – 256 с.
3. Бочарников Ю.В. Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения и аппаратуры рельсовых цепей при воздействии через питающие и сигнальные цепи: дис. канд. техн. наук / Ю.В. Бочарников. – М., 2008. – 176 с.
4. Литовченко В. В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4q-S-преобразователями / В.В. Литовченко // Электротехника. – 1993. – №5. – С.23–31 с.
5. Бондаренко Ю. С. Експериментальна установка для дослідження електромагнітної сумісності тягових статичних перетворювачів електрорухомого складу з системами електрифікованих залізниць / Ю.С. Бондаренко // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 31. – С.101–108 с.
6. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): 2-е изд. / В. А. Веников. – М.: Высш. шк., 1976. – 479 с.
7. Разгонов А. П. Оценка электромагнитной совместимости централизованного энергоснабжения пассажирских поездов и устройств СЦБ / А. П. Разгонов, В. Т. Вислогузов. // Транспорт: зб. наук. праць. – 2002. – №12. – С. 137–145.
8. Соколов Ю. Н. Электровоз ДСЗ. Устройство, управление, обслуживание: конспект [для лок. бригад] / Ю.Н. Соколов. – К.: КУЕТТ, 2011. – 299 с.

Рекомендовано до друку проф. Костіним М.О.