

*Т.М. Міщенко, Д.О. Босий, канд-ти техн. наук*

*(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна)*

## **ГАРМОНІЙНИЙ АНАЛІЗ ПЕРВИННИХ НАПРУГИ ТА СТРУМУ НОВИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ЗМІННОГО СТРУМУ**

Загальновідомо, що найважливішим, виходячи з ряду факторів, є рівень гармонійних складових в напрузі та струмі в точках приєднання електричного навантаження. У системі електричної тяги таким навантаженням є електрорухомий склад (ЕРС), зокрема, електровози. Тому виконаємо гармонійний аналіз для первинних (вхідних відносно до ЕРС) напруги  $u(t)$  і струму  $i(t)$  нових електровозів змінного струму: ДС 3 та 2ЕЛ5к.

Вибір для зазначених досліджень цих електровозів обумовлений не лише їх новизною, але й наступним.

Згідно з думкою авторів роботи [1], подальший розвиток електровозобудування України має здійснюватися на основі принципу "гибкого екіпажа". І це можливе на базі чотиривісного електровоза ДС 3. Причому можливо отримання двох модифікацій двосистемного електровоза подвійного живлення 25 кВ, 50 Гц/3 кВ потужністю 4800 кВт: вантажо - пасажирського на основі асинхронних тягових двигунів (АТД) на максимальну швидкість 140 км/год і пасажирсько-швидкісного (також на основі АТД) на максимальну швидкість 200 км/год.

Автори роботи [2] також вважають, що електротяговий привід перспективних електровозів (Росія) повинен будуватися на базі безколекторних тягових двигунів (ТЕД), найімовірніше, на основі АТД, регулювання режиму роботи яких здійснюється за допомогою статичних перетворювачів частоти і кількості фаз, які складаються із імпульсного регулятора та чотирикватратного перетворювача, від яких живиться автономний інвертор напруги із широтно-імпульсною модуляцією. Кожен такий тяговий перетворювач живить два АТД. Таке схемотехнічне рішення і закладено якраз в електровозі ДС 3.

В електровозі 2ЕС5К тяговий привід дещо інший: кожна його секція обладнано двома тиристорними перетворювачами, кожен з яких живить по два колекторні двигуни (постійного струму), для регулювання напруги на яких застосоване зонне регулювання. Цей електровоз цікавий (з позиції поставленої задачі) не лише сучасним виконанням, але й тим, що тиристорні перетворювачі використовують на діючих здавна електровозах ВЛ80С.

Необхідні для вирішення поставленого в цій роботі завдання числові експериментальні дані запозичено з роботи [3].

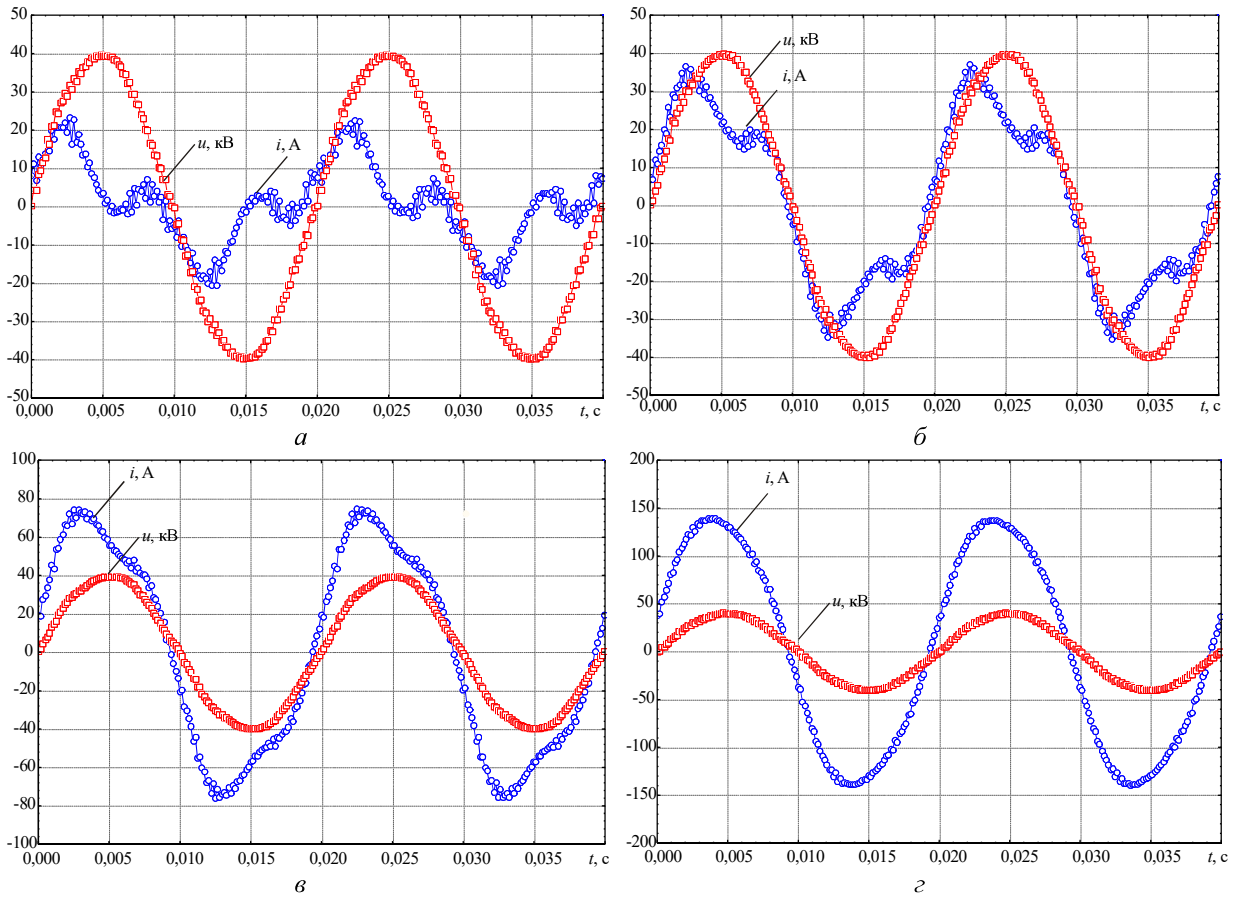
### **Візуальний аналіз осцилограм**

На рис.1 і 2 наведені осцилограми (два періоди) вхідних напруги  $u(t)$  і струмів  $i(t)$  відповідно електровозів ДС3 та 2ЕС5К.

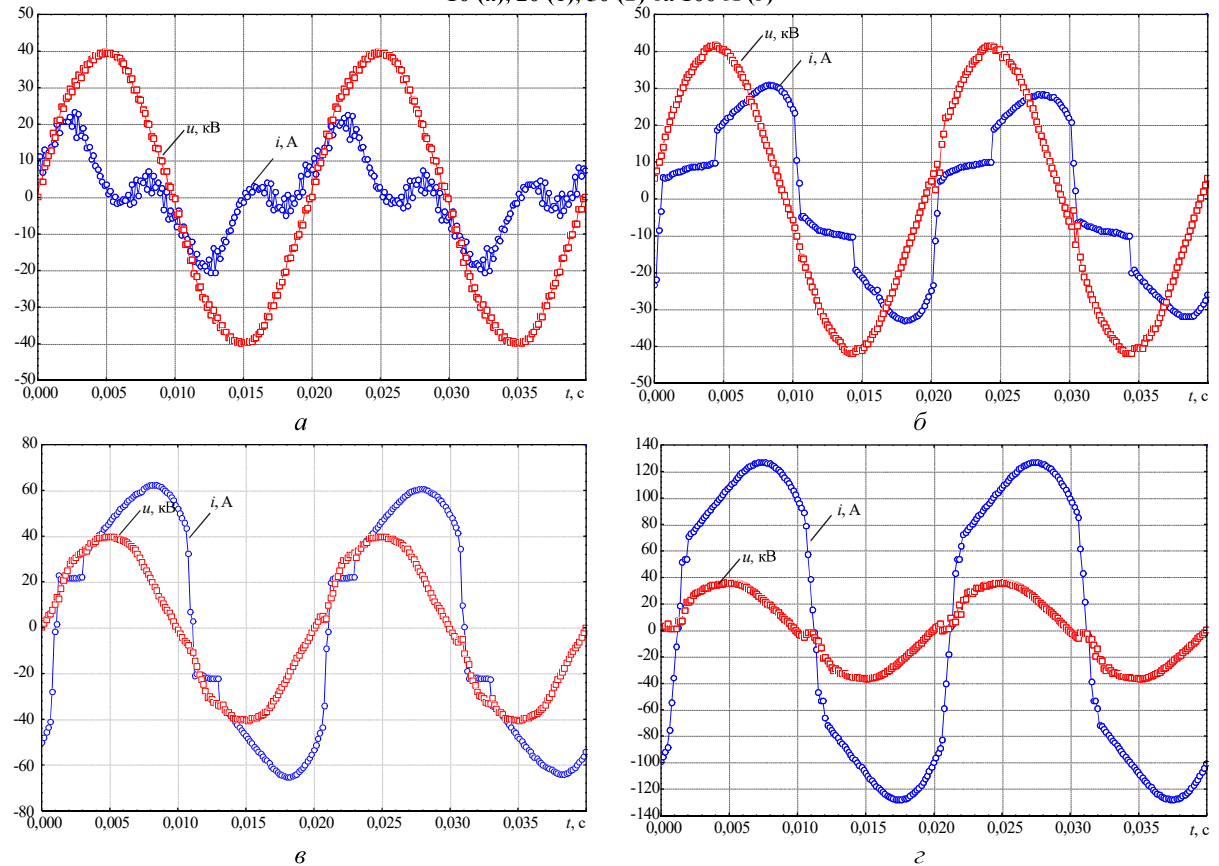
Як впливає із візуального аналізу цих рисунків, унаслідок того, що тягові підстанції, що живлять фідерні зони із зазначеними електровозами, є достатньо потужними джерелами електроенергії, тому синусоїдна форма вхідної напруги не спотворюється. Причому це спостерігається для обох електровозів і при різному навантаженні: в межах діючого значення струму від 10 до 100 А.

Інша річ, що істотно, відбувається з формою тягового електровозного струму: вона помітно спотворюється внаслідок того, що силові кола електровозів містять потужні нелінійні реактивні елементи. Тому у подальшому проаналізуємо гармонійний склад та інші величини лише тягового струму. Це не зовсім відповідає нормам діючого в Україні ГОСТ 13109-97, в якому нормуються показники якості електроенергії, виходячи із форми і значень лише напруги, а струму цей стандарт не торкається. Однак міжнародні стандарти якості електроенергії (наприклад ІЕЕЕ 519-1992) обмежують не лише гармонійний склад напруги живлення, але й струму, що споживається. При цьому, згідно з міжнародним стандартом ІЕЕЕ 519-1981, основним фактором оцінки струму є інтегральний показник гармонійного складу струму, (%), [4], який визначається за формулою:

## Електропостачання та електроустаткування



**Рис. 1. Осцилограми напруги та струму електровоза ДСЗ при діючому значенні струму навантаження: 10 (а), 20 (б), 50 (в) та 100 А (г)**



**Рис. 2. Осцилограми напруги та струму електровоза 2EC5K при діючому значенні струму навантаження: 10 (а), 20 (б), 50 (в) та 100 А (г)**

$$I_{\text{TНD}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{49} I_n^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

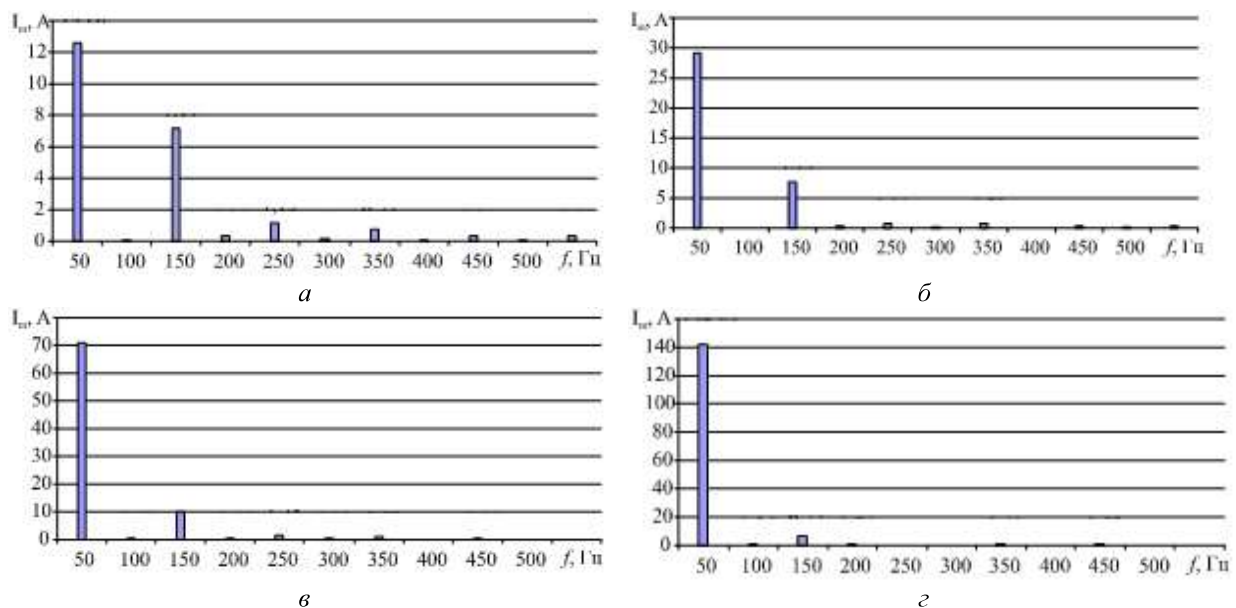
де  $I_n$ ,  $I_{(1)}$  – діючі значення вищих (включно до 49-ї) гармонік і першої гармоніки.

Як випливає з рис. 1 і 2, зі зменшенням тягового навантаження (тягового струму від 100 до 10 А) спостерігається збільшення ступеня спотворення синусоїди миттєвої величини струму; при  $I \approx 100$  А тяговий струм електровоза ДСЗ майже синусоїдний (рис. 1, г), а в електровоза 2ЕС5К – має місце, хоч і незначний, але відхід від синусоїди (рис. 2, з). Тому при однаковому навантаженні більші спотворення струму характерні для електровоза з тиристорним перетворювачем (2ЕС5К).

Крім того, тип електровоза, скоріше схематичне рішення його електротягового приводу, а також навантаження (значення  $I$ ) впливають на кут зсуву фаз  $\varphi$  між вхідними  $u(t)$  і  $i(t)$ . Цікаво, що в електровозі ДСЗ кут  $\varphi$  є від’ємним, тобто  $u(t)$  відстає від  $i(t)$  на 18, 12, 12 та 15° відповідно при  $I \approx 10; 20; 50; 100$  А. В електровозі 2ЕС5К, навпаки, кут  $\varphi$  додатний,  $u(t)$  випереджає  $i(t)$  на кут 42, 18, 18 та 27° відповідно зазначених вище величин  $I$ .

### Дискретний спектральний аналіз та енергетичні показники

Результати якісного візуального вищенаведеного аналізу осцилограм підтверджуються результатами числового гармонійного аналізу вхідних  $u(t)$  та  $i(t)$ . На рис. 3 зображені дискретні частотні спектри тягового струму електровоза ДСЗ, що відповідають осцилограмам на рис. 1, а на рис. 4 – спектри струму електровоза 2ЕС5К, що отримані для осцилограм на рис. 2.



**Рис. 3. Дискретні частотні спектри струму електровоза ДСЗ при діючому значенні струму навантаження: 10 (а), 20 (б), 50 (в) та 100 А (г)**

Як випливає з цих рисунків, основний внесок в спотворення кривої струму обох електровозів роблять непарні гармоніки, особливо 3-тя, амплітуди яких різні для різних електровозів і різного електротягового навантаження. Зокрема, струм електровоза ДСЗ містить в основному гармоніки 1, 3, 5, 7 і 9 (рис. 3), значення коефіцієнта  $n$ -ї гармоніки складової  $K_{i(k)}$  яких, що визначаються (згідно з ГОСТ 13109-97) за формулою

$$\hat{E}_{i(k)} = \frac{I(k)}{I_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

наведені в табл. 1 при різних  $I$ .

## Електропостачання та електроустаткування

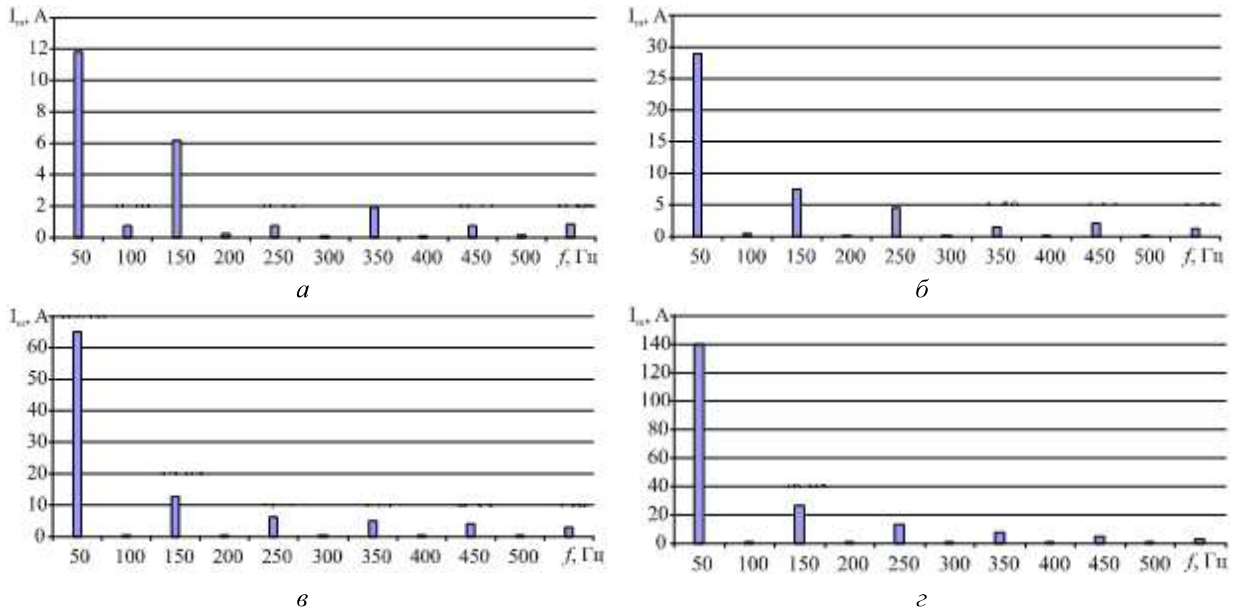


Рис. 4. Дискретні частотні спектри струму електровоза 2EC5K при діючому значенні струму навантаження: 10 (а), 20 (б), 50 (в) та 100 А (г)

Таблиця 1

Значення струму $I^2$ , А	Коефіцієнт $K_{i(k)}$ гармоні, %			
	3	5	7	9
10,44	57,07	9,0	5,79	2,86
21,79	26,55	2,79	2,69	1,28
50,7	14,28	2,02	1,17	0,79
100,2	4,72	0,31	0,48	0,40

Ряд Фур'є струму електровоза 2EC5K має повільніше загасаючі амплітуди (рис.4): основний внесок в його несинусоїдність робить більша кількість, ніж в ДСЗ, гармонік: з 1-ї по 13-ту (рис.4). Причому це характерно навіть при великому навантаженні ( $I^2 \approx 100$  А), рис.4, г, що також впливає із значень коефіцієнта  $K_{i(k)}$  (табл. 2).

Таблиця 2

Значення струму $I$ , А	Коефіцієнт $K_{i(k)}$ гармонік, %						
	3	5	7	9	11	13	15
10,1	52,45	6,15	16,5	6,56	7,29	7,41	1,9
21,18	26,2	15,7	5,16	7,49	4,6	3,28	4,03
47,48	19,7	9,85	8,0	6,65	4,7	2,86	2,17
101,78	19,2	9,77	5,68	3,46	2,0	1,13	0,62

Значення інтегрального показника  $I_{ТНД}$ , що обчислюється за формулою (1), особливо великі для малих навантажень ( $\sim 10$  і  $20$  А) і наведені в табл. 3.

Таблиця 1

Тип електровоза	Значення $I_{ТНД}$ , %, при $I$ , А			
	10,1...10,5	21,2...21,8	48...50,7	100...101,8
ДСЗ	58,9	27,2	14,2	5,0
2EC5K	58,2	33,1	26,5	22,8

Початкові значення перших гармонік струму при  $I^2 \approx 10; 20; 50^3 100$  А відповідно дорівнюють: 47,06; 13,96; 15,45 і 12,89° в електровозах ДСЗ та 58,23; 33,1; 25,47 і 22,8° – в електровозах 2EC5K.

Максимально допустимі значення коефіцієнта  $K_{i(k)}$  та інтегрального показника  $I_{ТНД}$  для систем і мереж з відношенням  $I_{\hat{e},\hat{c}}/I_{\hat{i}\hat{i}} < 20$  відповідно [4]:

- $K_{i(k)}$ : 4% при  $k \leq 11$  3 2% при  $11 < k \leq 17$  (де  $k$  – номер гармоніки);

—  $I_{\text{THD}}$ : 5% при відношенні  $I_{\hat{e},\hat{q}}/I_{\hat{i}\hat{i}} = 20...50$  відповідно маємо 7, 7 і 8%.

Порівнюючи ці відсотки зі значеннями табл. 1, 2 та 3 можна зробити висновок, що при низьких електричних навантаженнях фактичні значення коефіцієнта  $K_{i(k)}$  і показника  $I_{\text{THD}}$  суттєво перевищують максимально допустимі значення. Це відображається і в значеннях коефіцієнта потужності електровозів (особливо 2ЕС5К), які в межах  $I^2 \approx 10...100 \text{ А}$  складають 0,93...0,97 у електровозів ДСЗ і 0,69...0,86 – 2ЕС5К, що узгоджується з даними роботи [5].

### **Висновки**

Первинна (вхідна) напруга, на відміну від струму, досліджених електровозів змінного струму є синусоїдною, а в основному у спотворення струму вносять непарні гармоніки, особливо третя.

Кількість і величина амплітуд вищих гармонік в ряді Фур'є струму суттєво збільшується зі зменшенням електротягового навантаження електровоза.

Значення коефіцієнта  $k$ -ї гармонійної складової та інтегрального показника гармонійного складу струму при малих та середніх навантаженнях перевищують їх максимально допустимі значення.

### **Список літератури**

1. Хворост, Н.В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития [Текст] / Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко // Электротехника і електромеханіка. – 2003. – № 4. – С.104–114.
2. Сорин, Л.Н. Электровозы нового поколения и организация их разработки [Текст] / Л.Н. Сорин, В.П. Янов // Материалы II междунар. симпозиума "eltrans'2003". С. Пб., 2003. – С.115–122.
3. Босий, Д.О. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму [Текст] / Д.О. Босий, В.Г. Сиченко // Технічна електродинаміка: тем. Вип. – 2009. – Ч.3. – С.86–89.
4. Розанов, Ю.К. Современные методы улучшения качества электроэнергии [Текст] / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, // Электротехника. – 1998. – № 5. – С.10–17.
5. Міщенко, Т.М. Додаткові втрати електроенергії в тягових колах електровозів змінного струму [Текст] / Т.М. Міщенко // Энергосбережение на железнодорожном транспорте: материалы III междунар. науч.-практ. Конф. –Воловец, 2012. – С.53–55

*Рекомендовано до друку проф. Разумним Ю.Т.*