

УДК 621.317

В. І. ГАВРИЛЮК – д.ф.-м.н., проф., зав. кафедри «Автоматика та телекомунікації»,  
Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка  
В. Лазаряна, vl.havryliuk@gmail.com, ORCID 0000-0001-9954-4478.

В. В. МЕЛЕШКО – АТ «Укрзалізниця», soyuz\_at@gmail.com, ORCID 0000-0001-6833-964.

## ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТЯГОВОГО СТРУМУ

### 1. Вступ

В роботі розглядається проблема забезпечення точності вимірювання параметрів електромагнітних завад в рейковій лінії від електрорухомого складу. Достовірність визначення параметрів завад є визначальним для забезпечення безпеки руху поїздів, оскільки завади від тягового струму (ТС) здатні викликати збої і відмови в системах управління рухом поїздів [1, 2].

Апаратно-програмний комплекс для вимірювання електричних завад в рейковій лінії складається з вхідного перетворювача тягового струму в напругу, анталайзінгового фільтру, аналого-цифрового перетворювача (АЦП) і комп'ютера, що реалізує короткочасне Фур'є перетворення [3]. Проблема забезпечення необхідної точності вимірювального апаратно-програмного комплексу (АПК) має комплексний характер і її вирішення потребує проведення досліджень і аналізу з урахуванням впливу параметрів всіх елементів комплексу в їх взаємозв'язку. В [3] проведено дослідження і отримано висновки по раціональному вибору параметрів апаратної частини комплексу для забезпечення необхідної точності вимірювання. Дана робота є продовженням [3] і досліджує точність визначення завад з використанням короткочасного перетворення Фур'є (КЧПФ). Для зменшення розтікання спектру при проведенні КЧПФ використовують віконні функції [4-6]. Стандартного підходу для вибору віконної функції немає, оскільки кожна конкретна задача потребує відповідної до її специфіки віконної функції.

Обмеження у виборі віконних функцій пов'язане з рівнем бічних пелюстків в частотній області, що призводить до зменшення вимірних значень струму гармонік і в деяких випадках може навіть приховати слабкі гармоніки на тлі сильних гармонік [4, 6-9]. Для підвищення точності спектрального аналізу тягового струму, необхідне провадити вибір віконної функції з урахуванням специфіки тягового струму.

Тяговий струм має значний динамічний діапазон (до 70..80 дБ) і частотний діапазон що простирається від одиниць до десятків кілогерц, а також супроводжується значними перепадами струму, комутаційними короткочасними сплесками струму.

Внаслідок нестаціонарності тягового струму для спектрального аналізу необхідно використовувати КЧПФ [6]. КЧПФ відповідно до принципу невизначеності не дозволяє одночасно збільшувати роздільну здатність у частотній і часовій області [4, 6-9]. Тому при виборі раціональних параметрів КЧПФ необхідно знаходити компроміс між точністю визначення роздільної здатності КЧПФ у часовій і частотній області.

### 2. Мета роботи

Метою роботи є дослідження впливу параметрів КЧПФ на точність та роздільну здатність спектрального аналізу тягового струму та формулювання пропозицій по забезпеченню необхідної точності вимірювань.

### 3. Нормативні вимоги до параметрів тягового струму

Динамічний діапазон тягового струму (ТС) визначається як відношення СКЗ найбільшої гармоніки до СКЗ найменшої гармоніки, частота якої визначена нормативною документацією

$$D = 20 \log_{10} \left( \frac{I_o}{I_{\min}} \right), (dB).$$

де  $I_o$  і  $I_{\min}$  СКЗ, відповідно, основної гармоніки (з максимальною амплітудою) і гармоніки з мінімальною амплітудою.

Оскільки у деяких випадках амплітуду гармонік зручно визначати окремо для інтервалів, які визначені нормативною документацією, динамічний діапазон був розрахований окремо для кожного з інтервалів, визначених нормативами [10]. Для тягового струму з частотою 50 Гц і діючим значенням 200 А динамічний діапазон дорівнює 46 дБ для частотного інтервалу 21-29 Гц, 55 дБ для інтервалів частот ТРЦ-3 (408–432, 468–492, 568–592, 708–732, 768–792 Гц) і 60 дБ для інтервалів частот ТРЦ-4 (4462–4538, 4962–5038, 5462–5538 Гц).

При збільшенні тягового струму значення динамічного діапазону, розраховані по відношенню до максимально допустимих значень гармонік, будуть більшими.

Крім вимог щодо динамічного діапазону, спектральний аналіз ТС має забезпечувати необхідну роздільну здатність у частотній та часовій області.

У частотній області роздільна здатність визначається нормативами [10]. У часовій області роздільна здатність має бути не менше 0.3 с [10].

### 4. Вимоги до спектрального аналізу тягового струму

Дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) дискретної функції (послідовності відліків  $x(n)$ ) визначається як [6]

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp \left( -j \frac{2\pi kn}{N} \right)$$

де  $N$  число відліків функції  $x(n)$ .

Короткочасне перетворення Фур'є (КЧПФ) визначається як [11]

$$X_m(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) w(n-mR) e^{-j\omega n}$$

де  $w(n)$  є віконною функцією довжиною  $M$ ,  $X_m(\omega)$  – образ функції  $x(n)$  у частотній області, отриманий швидким перетворенням Фур'є добутку функції  $x(n)$  і віконної функції  $w(n)$ , центрованої у моменті часу  $mR$ ; де  $R$  є довжиною стрибка (зсуву) вікна.

За останні кілька десятиліть були запропоновані різні типи віконних функцій. Правильний вибір типу віконної функції та її параметрів залежить від конкретної задачі.

#### 4.1. Параметри віконних функцій

Віконні функції використовують для зменшення розмивання спектру при виконанні перетворення Фур'є.

До основних параметрів віконної функції, які необхідно враховувати при її виборі, відносять [4, 6-9]: максимальний рівень бічних пелюстків по відношенню до головного  $\gamma_{\max}$ , ROR - швидкість зменшення бічних пелюстків з частотою;  $\Delta F_0$  - нормована ширина головного пелюстка АЧХ на нульовому рівні;  $\Delta F_{3dB}$  - нормована ширина головного пелюстка АЧХ на рівні -3 дБ;  $\Delta F_{6dB}$  - нормована ширина головного пелюстка АЧХ на рівні -6 дБ; ENBW - еквівалентна ширина полоси шуму;  $\beta$  - коефіцієнт послаблення ШПФ. Параметри деяких віконних функцій наведено у табл. 1.

Для спектрального аналізу тягового струму необхідне значення динамічного діапазону віконної функції не менше ніж 84 дБ, висока точність і роздільна здатність за амплітудою, частотою (яка визначається межами частотних інтервалів в нормативній документації, наприклад, 19..21, 21..29, 29..31 Гц), роздільна здатність у часі (що визначається тривалістю діє гармонічної

завали з визначеними у нормативах частотами на рівні не більше 0.3 с).

Динамічний діапазон віконної функції визначається як відношення амплітуди головного пелюстка до амплітуди першого бічного пелюстка в частотній області. Це значення має бути більшим, ніж динамічний діапазон тягового струму.

Параметри деяких віконних функцій наведено у табл. 1.

З функцій, що наведені у табл.1 необхідне значення динамічного діапазону має віконна функція Блекмана-Харріса.

Функції Ханна і Хаммінга можуть бути використані для спектрального аналізу тягового струму при обмежених його значеннях.

Кожна віконна функція спотворює амплітудне значення і енергію гармонійних складових тягового струму. Для компенсації впливу віконної функції на результати аналізу необхідно використовувати коефіцієнти корекції. Їх значення визначаються типом вікна (табл. 1).

#### 4.2. Роздільна здатність КЧПФ за частотою і часом

Тривалість відрізка дискретної функції з числом відліків  $N$  визначається як

$$\Delta t = N / SR,$$

де  $SR$  є частотою вибірки.

Виходячи з властивостей ШПФ можна записати

$$\Delta f = SR / N_{Bin} = SR / N.$$

Таким чином  $\Delta f \Delta t$  має обмежене значення, і одночасне збільшення роздільної здатності перетворення Фур'є за частотою і часом не можливо, оскільки ці параметри є взаємно суперечливими, а саме, підвищення роздільної здатності у часовій області веде до зменшення її у частотній області і навпаки. Тому завдання прийняттого значення роздільної здатності потребує компромісу між ними.

Для короткочасного перетворення Фур'є (КЧПФ) з віконною функцією  $w(t)$  роздільна здатність ШПФ у часі  $\Delta t$  визначається як [12]

$$\Delta t^2 = \frac{\int t^2 |w(t)|^2 dt}{\int |w(t)|^2 dt}.$$

Аналогічно, роздільна здатність ШПФ за частотою  $\Delta f$  визначається як [12]

$$\Delta f^2 = \frac{\int f^2 |W(f)|^2 df}{\int |W(f)|^2 df},$$

де  $W(f)$  – образ віконної функції  $w(t)$  у частотній області.

Таблиця 1

Параметри деяких віконних функцій

Назва вікна	$\gamma_{max}$ , дБ	ROR (дБ/октава)	$\Delta F_0$	$\Delta F_{3dB}$	$\Delta F_{6dB}$	ENBW	$\beta$ , дБ
Прямокутне (rectangle)	-13	-6	2	0,88	1.21	1	0
Барлетта (Bartlett)	-26,5	-12	4	1,3	1.78	1.33	6.02
Ханна (Hann)	-31,5	-18	4	1,44	2.00	1.5	6.02
Хаммінга (Hamming)	-42	-6	4	1,3	1.81	1.36	6.02
Блекмана (Blackman)	-58	-18	6	1,7	2.3	1.73	7.54
Блекмана — Харріса (4-term Blackman-Harris)	-92		8	1,9	2.72	2.0	8,91
З плоскою верхівкою (Flat top window)	-44		10	2,04	3.56	5.76	0

Частотна роздільна здатність  $\Delta f_w$  для конкретної віконної функції залежить, в першу чергу, від ширини основного пелюстка віконної функції  $B_w$

$$\Delta f_w = B_w SR / N_w,$$

де  $B_w$  ширина головного пелюстка віконної функції з числом відліків  $N_w$ .

Дві гармоніки можуть бути розділені у спектрі, якщо різниця їх частот  $\Delta f$  є більшою ніж роздільна здатність віконного ШПФ у частотній області  $\Delta f_w$  ( $\Delta f > \Delta f_w$ ).

### 5. Результати моделювання

Оцінку точності визначення середньоквадратичних значень струму, діапазонів частот і тривалості гармонік ТС було проведено з використанням ШПФ з чотирма вікнами високої та середньої роздільної здатності.

Прямокутне вікно (або рівномірне вікно), яке має одиничне амплітудне значення по всій довжині часової залежності вікна, було обрано для порівняння з результатами інших вікон. Головний пелюсток прямокутного вікна є вузьким, тому вікно може використовуватися для спектрального аналізу ТС з високою роздільною здатністю у частотному діапазоні, але бічні пелюстки мають велику амплітуду в порівнянні до основного вікна і зменшуються з частотою дуже повільно. Перший бічний пелюсток нижча основного лише на 13 дБ, а інші бічні пелюстки спадають приблизно на 6 дБ на октаву [4-6]. Помилки визначення амплітуди сигналу може бути до 36 %.

Віконну функцію Ханна (або Ханнінга) часто використовують для аналізу функцій із заздалегідь невідомими параметрами, оскільки вона має помірну роздільну здатність за амплітудою та у часовій і частотній області. Найвищий бічний пелюсток віконної функції Ханна на 32 дБ нижче від основного пелюстка. Решта бічних пелюсток спадає приблизно як 6 дБ/октава. Відносна

похибка визначення амплітуди спектру з використанням ШПФ з віконною функцією Ханна досягає 16 %.

Вікно Хаммінга має найнижчий можливий рівень бічного пелюстка серед усіх вікон на основі трьохчленних функцій Діріхле. Найвищий бічний пелюсток на 42 дБ нижча від основного. Швидкість зменшення решти бічних пелюсток складає приблизно як 6 дБ/октава.

Вікно Блекмана використовує п'ятичленну функцію Діріхле, тим самим ще більше знижуючи рівень бічного пелюстка. Вікно Блекмана забезпечує хороше ослаблення бокового пелюстка на рівні 58 дБ, бічні пелюстки зменшуються приблизно як 18 дБ на октаву. Тому вікно Блекмана слід вибирати, якщо сигнал містить значні завади поблизу частот, що вимірюються. З іншого боку, ширина головного пелюстка у вікна Блекмана є більшою, ніж у вікна Хаммінга, тому, якщо спектральна роздільна здатність є вирішальною, найкращим вибором було б вікно Хаммінга.

Для оцінки точності визначення середньоквадратичних значень струму, діапазонів частот і тривалості гармонік ТС з використанням ШПФ з чотирма розглянутими віконними функціями використовували синтезований тестовий сигнал з параметрами, аналогічними реальному тяговому струму, що був виміряний при випробуваннях електрорухомого складу на електромагнітну сумісність з рейковими колами. В тестовому сигналі СКЗ струму гармонійних завад з частотами, що можуть впливати на роботу рейкових кіл, прийняті на рівні максимально допустимих відповідно до умов забезпечення безпечного функціонування РК. Використання тестового сигналу з заданими параметрами гармонійних завад дає змогу оцінити точність спектрального аналізу тягового струму за допомогою віконного ШПФ. СКЗ струму тестового сигналу було 200 А, частота основної гармоніки 50 Гц. Частота дискретизації струму була вибрана на такому рівні, щоби частота Найквіста

була більшою за максимальну частоту в спектрі сигналу Частота дискретизації взята як  $F_s = 5 \cdot f_{\max} = 27500$  Гц, Довжина вікна була взята 32768 відліків, з урахуванням вимоги нормативу, відповідно до якого максимально допустима тривалість завади в тяговому струмі з наднормованим рівнем має бути не більше ніж 0.3 с [14]. Для обраних параметрів розрахункова здатність ШПФ дорівнює 0.27 Гц для прямокутного вікна, 0.54 Гц для вікон Ханна і Хаммінга і 0.81 Гц для вікна Блекмана.

Для зручності порівняння результатів моделювання значення тягового струму прийняли за одиницю, і параметри всіх гармонік перерахували у відносних до тягового струму одиницях.

Параметри визначених за результатами досліджень гармонік представлені в таблиці 2 (стовпчики 1, 2).

Спектри синтезованого сигналу, отримані в результаті віконного ШПФ з довжиною вікна 0,3 с, наведені на рис. 1. Отримані значення СКЗ та частоти гармонік позначені на рисунку. Спектральні піки є розмитими внаслідок розтікання спектру. Мінімальна роздільна здатність спектрів за частотою отримана для прямокутного вікна, а максимальна – для вікна Блекмана, оскільки останній має найнижчий рівень бокового пелюстка –58 дБ.

Значення відносних похибок визначення частоти і струму гармонійних завад методом віконного ШПФ наведені у табл. 2. Роздільна здатність гармонік збільшується і, відповідно, відносна похибка визначення частоти зменшується зі збільшенням частоти. Тип вікон, що використовувалися впливає на роздільну здатність гармонік ТС за частотою незначно. Значення похибки визначення СКЗ струму гармонічних завад є вищими для прямокутного вікна і зменшу-

ється у ряду вікон: прямокутне, Ханна, Хаммінга, Блекмана, але навіть для останнього - точність для деяких частот є не задовільною для практичного застосування. Високі значення похибки пояснюються розмиванням полос та гребінцевими спотвореннями спектру.

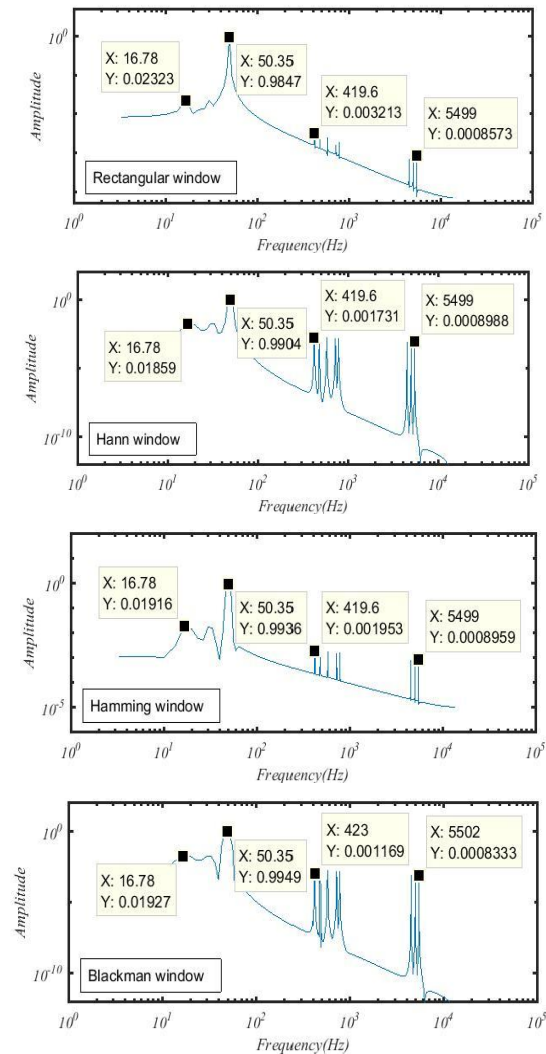


Рис. 1. Спектри сигналу для вікон: прямокутне, Ханна, Хаммінга, Блекмана довжиною 0.3 с.

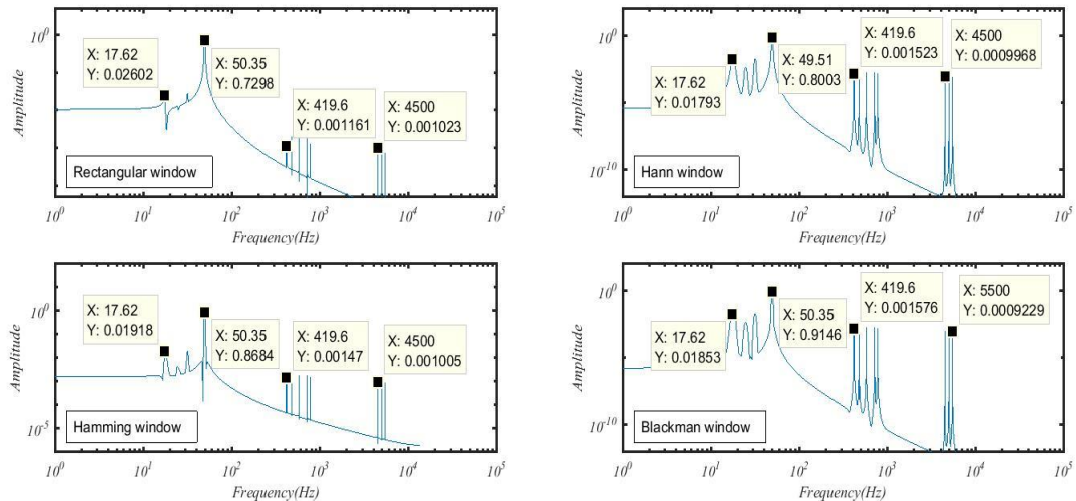


Рис. 2. Спектри сигналу для вікон: прямокутне, Ханна, Хаммінга, Блекмана довжиною 1 с.

Завдяки оберненій пропорційній залежності між роздільною здатністю у частотній та часовій області, збільшення роздільної здатності за частотою спостерігається для вікон більшої довжини. Відповідно до цього на другому етапі було проведено комп'ютерне дослідження точності віконного FFT для вікон довжиною 1 с.

Роздільна здатність визначення частоти гармонік ТС для вікон довжиною 1 с є кращою ніж для вікон 0.3 с (рис. 2), а відносна похибка визначення струму гармонік і частот є значно нижчою, ніж для вікон довжиною 0,3 с (табл. 2). Але навіть у цьому випадку точність деяких частот не відповідає вимогам для практичного застосування.

Таблиця 2

**Результати комп'ютерного дослідження**

f, Гц	I*10 <sup>3</sup> , відносні одиниці	Відносна похибка вимірювання струму і частоти									
		Довжина вікна 0.3 с					Довжина вікна 1.0 с				
		δf, %	δI, %				δf, %	δI, %			
			RW	HnW	HmW	BW		RW	HnW	HmW	BW
18	20.50	6.75	13.3	9.32	6.54	6.01	2.09	26.9	12.5	6.42	14.2
25	5.00	6.00	167	38.3	26.2	101.1	0.71	172.2	3.02	9.49	2.13
32	20.50	5.58	12.3	12.3	12.7	7.29	0.34	41.9	1.34	2.50	0.80
50	1000.00	0.71	1.53	0.96	0.64	0.51	0.97	27.0	19.9	13.2	8.54
420	1.75	0.09	83.6	1.08	11.6	0.61	0.09	34.5	12.9	15.9	9.95
480	1.75	0.01	76.3	0.25	11.5	0.03	0.01	15.0	0.39	2.29	0.06
580	1.75	0.12	45.3	3.41	3.42	2.43	0.02	8.59	0.97	0.82	0.51
720	1.75	0.22	10.4	14.3	15.5	12.7	0.01	8.94	0.59	1.22	0.22
780	1.75	0.15	10.6	8.08	5.95	6.10	0.06	25.4	20.1	12.9	8.45
4500	1.00	0.04	29.1	14.8	18.5	12.3	0.001	2.34	0.32	0.47	0.01
5000	1.00	0.03	21.2	12.8	13.8	14.0	0.003	4.24	2.34	2.23	1.59
5500	1.00	0.02	14.26	10.12	10.41	16.66	0.01	24.90	21.35	11.94	7.70

Позначення: RW – прямокутне вікно; HnW – вікно Ханна, HmW – вікно Хаммінга; BW – вікно Блекмана

Підсумовуючи можна сказати, що вибір віконної функції потребує завдання тривалості дії гармоніки.

Якщо точність амплітуди одного компонента важливіша за точне визначення частоти краще вибирати вікно з широким головним пелюстком. Якщо спектр сигналу є досить рівним або широкосмуговим, раціо-

нально використовувати прямокутне вікно. Вікно Ханна задовільняє потреби у 95% випадків. Вікно з плоскою верхівкою має хорошу амплітудну точність, але має незадовільну роздільну здатність у частотній області та велике розтікання спектру. Якісні характеристики деяких вікон, що розглядаються у роботі наведені у табл. 3.

Таблиця 3

**Якісні характеристики вікон**

Тип вікна	Точність визначення амплітуди	Точність визначення частоти	Розтікання спектру
Прямокутне	Погана	Найкраща	Значне
Ханна	Хороша	Хороша	Незначна
Хаммінга	Хороша	Хороша	Незначна
Блекмана	Хороша	Хороша	Найкраща
З плоскою верхівкою	Найкраща	Погана	Незначна

**6. Підвищення точності визначення параметрів завад**

Нормативні документи задають достатньо жорсткі вимоги до частотного розділення полос у спектрі. Так для інтервалів частот 19..21, 21..29 і 29..31 Гц нормативне значення максимально допустимих рівнів гармонійних завад є різними. Підвищення роздільної здатності близько розташованих спектральних полос можна частково досягти шляхом підвищення числа бінів ( $nfft$ ) швидкого перетворення Фур'є. Значення  $nfft$  визначає на яке число частотних полос поділяється вікно при проведенні спектрального аналізу. Додатковим бінам, що перевищують розмір вікна ШПФ приписують нульові амплітуди, тому збільшення  $nfft$  не приводить до появи додаткової інформації в спектрі. Але, підвищення числа полос збільшує, в певних межах, роздільну здатність за частотою.

Для дослідження впливу  $nfft$  на роздільну здатність в діапазоні частот поблизу 25 Гц проведено комп'ютерне дослідження з тестовим сигналом, що складається з двох синусоїдальних сигналів з частотами 21 і 25 Гц і однаковими амплітудними значеннями 1 А. Частоту вибірки взято як 475 Гц.

Для ШПФ використовували 2 типа віконної функції: прямокутну і Ханна (рис. 3). Результати дослідження підтверджують що при збільшенні  $nfft$  з 256 до 1024 при незмінних значеннях ширини вікна  $M = 256$  і частоти дискретизації  $SR = 475$  Гц роздільна здатність ШПФ збільшується.

Роздільну здатність КЧПФ у часовій області можна частково збільшити шляхом правильного вибору параметра стрибка (зсуву) вікна, в результаті чого збільшується число полос, на які поділяється сигнал у часовій області [6, 14]. Кількість сегментів  $k$ , на які поділяється дискретна послідовність  $x(n)$  довжиною  $N_x$  при КЧПФ визначається як

$$k = \frac{N_x - Nov}{N_w - Nov}$$

де  $N_w$  довжина вікна у відліках,  $Nov$  довжина перекриття вікон у відліках.

Спектр тестового сигналу довжиною 0.3 с, отриманий КЧПФ з вікном Ханна і перекриттям 50 % наведений на рис. 4.

**Висновок**

У роботі досліджено вплив параметрів КЧПФ на точність та роздільну здатність спектрального аналізу тягового струму.

На основі аналізу нормативних документів сформульовано вимоги до програмної частини комплексу. Спектральний аналіз має забезпечувати динамічний діапазон вимірювань на рівні не менше ніж динамічний діапазон тягового струму (84 дБ), мати необхідну точність визначення амплітуди і частотного інтервалу гармонійних завад для частот, визначених нормативами, а також розділяти в часі завади, тривалістю більше 0,3 с.

Оскільки тяговий струм є нестационарним в широкому значенні, для спектрального аналізу необхідно використовувати короткочасне перетворення Фур'є.

З літературного огляду зроблено висновок, що забезпечення необхідного динамічного діапазону і точності визначення амплітуди гармонік приводить до погіршення роздільної здатності у часовій і частотній області. Підвищення роздільної здатності у часі і частоті одночасно також не можливо в силу принципу невизначеності, згідно якому додаток похибок частоти і тривалості сигналу є обмеженим знизу.

Дослідження проведено з використанням синтезованого струму, аналогічного за параметрами реальному тяговому струму і із значеннями гармонійних завад на рівні максимально допустимих, відповідно до нормативів. Використання синтезованого струму зі заздалегідь відомими параметрами дозволяє провести оцінку похибки спектрального аналізу. Частота дискретизації при моделюванні була взята на рівні 27500 Гц, що теоретично має забезпечити для віконної функції довжиною 0,3 с роздільну здатність за частотою 0,27 Гц для прямокутного вікна, 0,54 Гц для вікон Ханна та Хеммінга та 0,81 Гц для вікна Блекмана.

Результати дослідження показали, що відносна похибка струму гармонійних завад є вищою для прямокутного вікна і зменшується у ряду вікон: прямокутне, Ханна, Хеммінга, Блекмана, але навіть для останнього точність для деяких частот є не задо-

вільною для практичного застосування. Високі значення похибки пояснюються розмиванням полос та гребінцевими спотвореннями спектру.

При збільшенні довжини вікна (до 1 с) роздільна здатність у частотній області покращується, а відносна похибка визначення струму гармонік і частот є значно нижчою, ніж для вікон довжиною 0,3 с.

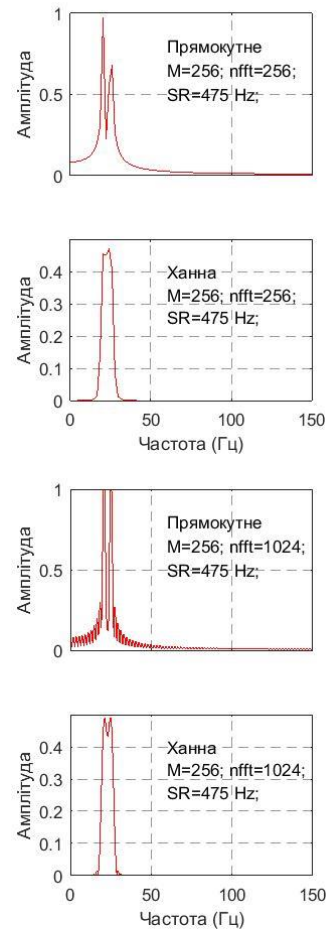


Рис. 3. Спектр тестового сигналу для прямокутного вікна і вікна Ханна при різних значеннях параметрів ШПФ.

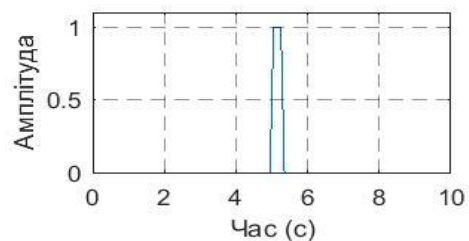


Рис. 4. Спектр тестового сигналу тривалістю 0.3 с.



Збільшення числа полос (бінів) в частотній області швидкого перетворення Фур'є при незмінних значеннях довжини вікна і частоти дискретизації приводить до збільшення роздільної здатності ШПФ для близько розташованих гармонік у тяговому струмі.

Роздільну здатність КЧПФ у часовій області можна частково збільшити шляхом правильного вибору параметра стрибка (зсуву) вікна, в результаті чого збільшується число полос, на які поділяється сигнал у часовій області.

### References

1. Ogunsola, A. Electromagnetic compatibility in railways. Analysis and management // A. Ogunsola, A. Mariscotti. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2013. – 528 p.
2. Гаврилюк, В. И. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи / В. И. Гаврилюк, В. И. Щека, В. В. Мелешко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – № 5(59). – С. 7–15.
3. Navryliuk V. I. Раціональний вибір параметрів апаратно-програмного комплексу для спектрального аналізу тягового струму / V. I. Navryliuk, V. V. Meleshko // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, 2019. - № 17. С. .
4. Harris, F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform // Proceedings of the IEEE. – 1978. – Т. 66. – №. 1. – P. 51-83.
5. Doerry A. W. Catalog of window taper functions for sidelobe control //Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA. – 2017. 2018 p.
6. Lyons, R. G. Understanding Digital Signal Processing. – Pearson Education India, 2011.
7. Allen, J. B., Rabiner, L. R. A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis // Proceedings of the IEEE. – 1977. – Т. 65. – №. 11. – С. 1558-1564.

8. Nisar, S. An efficient adaptive window size selection method for improving spectrogram visualization / S. Nisar, O. U. Khan, M. Tariq //Computational intelligence and neuroscience. – 2016. – Т. 2016.
9. Smith, S. Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists. – Elsevier, 2013.
10. Гаврилюк, В. И. Нормы и методы испытания подвижного состава на электромагнитную совместимость с системами сигнализации и связи / В. И. Гаврилюк // Электромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – № 12. С. 48-57.
11. J. B. Allen and L. R. Rabiner, "A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis," Proc. IEEE, vol. 65, pp. 1558-1564, Nov. 1977.]
12. Gao, R.X., Yan, R. Wavelets. Theory and applications for manufacturing. Springer 2011. XIV. 224 p.
13. Rioul O., Vetterli M. Wavelets and signal processing //IEEE signal processing magazine. – 1991. – Т. 8. – №. 4. – С. 14-38.
14. Lyons R. Windowing Functions Improve FFT Results-Flexible windowing functions let you adjust frequency and leakage effects //Test and Measurement World. – 1998. – Т. 18. – №. 10. – С. 53.

**Ключові слова:** спектральний аналіз, тяговий струм, коротке часове перетворення Фур'є, електромагнітна сумісність.

**Ключевые слова:** спектральный анализ, тяговый ток, кратковременное преобразование Фурье, электромагнитная совместимость.

**Keywords:** spectral analysis, traction current, short time Fourier transform, electromagnetic compatibility.

**Рецензенти:**  
проф., д.т.н., А. Б. Бойнік,  
проф., д.т.н., А. М. Муха.

Надійшла до редколегії 12.04.2019.  
Прийнята до друку 23.04.2019.

УДК 621.317

В. І. ГАВРИЛЮК – д.ф.-м.н., проф., зав. кафедри «Автоматика та телекомунікації»,  
 Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка

В. Лазаряна, vl.havryliuk@gmail.com, ORCID 0000-0001-9954-4478.

В. В. МЕЛЕШКО – АТ «Укрзалізниця», soyuz\_at@gmail.com, ORCID 0000-0001-6833-964.

**РАЦІОНАЛЬНИЙ ВИБІР ПАРАМЕТРІВ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО  
 КОМПЛЕКСУ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТЯГОВОГО  
 СТРУМУ**

**1. Вступ**

Проблема електромагнітної сумісності (ЕМС) між залізничними підсистемами привертає увагу завдяки широкому розповсюдженню останніми роками швидкісного руху поїздів [1-3]. Одним з головних джерел електромагнітних завад на електрифікованих залізницях є рухомий склад. Нові типи рухомого складу мають бути випробувані на ЕМС із системами сигналізації та зв'язку до вводу їх в постійну експлуатацію [4,5]. В процесі експлуатації рухомого складу також має періодично провадитися моніторинг електромагнітних завад у рейкових колах та у автоматичній локомотивній сигналізації відповідно до графіка технічного обслуговування [6-8]. Максимально допустимі значення електромагнітних завад від електричного обладнання рухомого складу наведені в стандартах і галузевих нормативних документах, публікаціях [4,5,9] і представлені в табл. 1. Методи вимірювання електромагнітних завад (ЕМЗ) в лініях сигналізації і зв'язку обговорені в [9, 10]. Середньоквадратичні значення (СКЗ) електромагнітних завад у тяговому струмі (ТС) в діапазонах частот, які визначені стандартами, можна виміряти, фільтруючи тяговий струм за допомогою банку паралельних фільтрів з відповідними полосами пропускання або використовуючи швидке перетворення Фур'є (ШПФ) [11]. Тяговий струм є неперіодичним у широкому сенсі слова, тому для спектрального аналізу правильним є використання короткочасного перетворення Фур'є.

Оскільки електромагнітні завади в лініях сигналізації та зв'язку здатні спричинити небезпечні збої в роботі систем управління рухом поїздів, до точності вимірювання рівня, частоти і тривалості електричних завад пред'являються суворі вимоги [14]. Тривалість завад з частотами, визначеними в нормативах не повинна перевищувати 0,3 с.

Таблиця 1

**Максимально допустимі рівні (СКЗ)  
 гармонік тягового струму**

Тип електропостачання	Частотний інтервал, Гц	Частота, Гц	Максимальне СКЗ струму, А
DC, 3 kV	19-21	25	11,6
	21-29		1,0
	29-31		11,6
	40-46	50	5,0
	46-54		1,3
	54-60		5,0
	4507— 4583	4545	0.2
	5517— 5593	5555	0.2
AC 50 Hz, 25 kV	15-21	25	4,1
	21-29		1,0
	29-35		4,1
	65-85	75	4,1
	4462-4538	4500	0,2
	5462-5538	5500	0,2
DC, 3 kV and AC 50 Hz, 25 kV	167-184	175	0,4
	408-432	420	0,35
	468-492	480	0,35
	568-592	580	0,35
	708-732	720	0,35
	768-792	780	0,35
	4962-5038	5000	0,2

Апаратно-програмний комплекс (АПК) для вимірювання гармонійних завад в тяговому струмі складається, у загальному вигляді, з первинного безконтактного перетворювача тягового струму у напругу (П), пристрою узгодження (УП), аналогового антиалайзінгового фільтру (АФ), аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) і програмного комплексу (в нашому випадку ноутбука), який виконує швидке перетворення Фур'є з представленням спектру ТС у табличному або графічному вигляді (рис. 1). В якості первинного перетворювача використовується котушка Роговського або датчик струму на основі ефекту Холла. Частота зрізу НЧ антиалайзінгового фільтру вибирається з урахуванням частоти Найквіста.

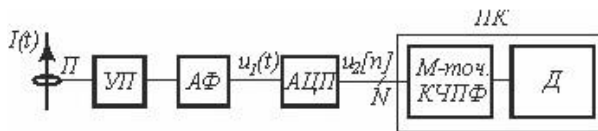


Рис. 1. Структурна схема АПК для спектрального аналізу тягового струму

Параметри і характеристики АПК мають задовольняти певним вимогам, що визначаються параметрами тягового струму, а також вимогами нормативних документів щодо точності визначення значення струму, частоти (частотних інтервалів) і тривалості гармонійних завад.

Технічні параметри і характеристики АЦП наведені у технічних специфікаціях виробника та описані у значній кількості робіт [12-15]. Слід зазначити, що параметри, що характеризують точність АЦП, можуть по різному трактуватися у технічних специфікаціях різних виробників.

АЦП є тільки одним ланцюгом у вимірювальному апаратно-програмному комплексі і вирішення проблеми раціонального вибору параметрів АПК потребує проведення досліджень і аналізу з урахуванням впливу параметрів всіх елементів комплексу в їх взаємозв'язку, а також з урахуванням вимог і обмежень, що накладають нормативні документи.

Програмна частина комплексу призначена для виконання спектрального аналізу з використанням короткочасне перетворення Фур'є (КЧПФ). Короткочасне перетворення Фур'є широко описано в літературі [11,16,17]. Вибір типу віконної функції, її параметрів, як і параметрів КЧПФ залежить від конкретного застосування. Задача вибору параметрів віконної функції і в цілому КЧПФ для спектрального аналізу тягового струму розглядається у іншій статті.

Детального аналізу щодо вибору параметрів апаратної і програмної частини вимірювального комплексу для забезпечення необхідної точності визначення параметрів гармонік тягового струму відповідно до галузевих вимог по забезпеченню електромагнітної сумісності тягового струму з пристроями сигналізації і зв'язку, зокрема з рейковими колами, в літературі не має.

В той же час раціональний вибір параметрів вимірювальної системи має базуватися на специфічних особливостях конкретної задачі.

## 2. Мета роботи

Метою роботи є наукове обґрунтування раціонального вибору параметрів і характеристик структурних елементів апаратно-програмного комплексу для вимірювання параметрів гармонік тягового струму за критеріями забезпечення необхідної точності і роздільної здатності амплітуди, частоти і тривалості гармонік, значення яких визначені вимогами по забезпеченню електромагнітної сумісності тягового струму з лініями сигналізації і зв'язку (зокрема рейковими колами).

Для досягнення поставленої мети в роботі проаналізовано критерії вибору параметрів АПК і вплив параметрів та характеристики АЦП на точність визначення параметрів гармонік. Точність і роздільна здатність у часовій і частотній області спектрального аналізу тягового струму на основі швидкого перетворення Фур'є розглянуто у другій частині роботи.

### 3. Похибки АПК при вимірювання параметрів гармонік

Загальна відносна похибка АПК  $\delta_{total}$ , за умовою, що похибки від підсистем комплексу є незалежними між собою і носять випадковий характер, може бути визначена як СКЗ від відносних похибок  $\delta_i$ , що виникають в окремих ланках пристрою

$$\delta_{total} = \sqrt{\sum_i \delta_i^2} \quad (1)$$

Питання оптимізації аналогового інтерфейсу інформаційно-вимірювальних систем достатньо повно проаналізовано у [18].

В даній статті розглянуто похибки, що виникають внаслідок аналогово-цифрового перетворення.

Основні інструментальні похибки АЦП достатньо повно розглянуто у багатьох публікаціях [12-15], і ці похибки обумовлені не ідеальністю статичних і динамічних параметрів перетворювача.

**Статичні параметри** обумовлюють чотири типи похибок, що виникають внаслідок зсуву нуля, зміни коефіцієнта підсилення, інтегральної та диференціальної не лінійності.

Похибка зсуву нуля обумовлена паралельним зміщенням реальної характеристики АЦП вздовж осі абсцис і визначається дійсним значенням вхідної напруги в точці характеристики перетворення з віссю, що відповідає номінальному нульовому значенню цієї напруги. Абсолютна та відносна приведена похибка зміщення нуля визначається як

$$\varepsilon_{OE} = U_{IN0,1} - \frac{U_{LSB}}{2}; \quad (2)$$

$$\delta_{FSR} = \frac{\varepsilon_{OE}}{U_{FSR}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Похибкою повної шкали є відносна різниця між реальним і ідеальним значеннями повної шкали  $\varepsilon_{FSR}$  при відсутності зсуву нуля, і відносна похибка повної шкали визначається як

$$\delta_{FSR} = \frac{\varepsilon_{FSR}}{U_{FSR}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Похибки повної шкали та зсуву нуля можуть бути зменшені підстроюванням аналогової частини схеми, або корекцією обчислювального алгоритму цифрової частини пристрою [12-15].

Похибка коефіцієнта перетворення АЦП є мультиплікативною похибкою і характеризується відхиленням реального коефіцієнта перетворення АЦП від номінального.

Не лінійність АЦП визначається як максимальне відхилення реальної характеристики залежності вихідного коду АЦП від вхідної напруги. Не лінійність зазвичай визначається у відносних одиницях, або у долях від молодшого значущого розряду LSB.

Диференціальна не лінійність АЦП в даній точці характеристики є різниця між значенням шага перетворення в даній точці і середнім значенням шага перетворення. В специфікаціях на АЦП значення диференціальної не лінійності надається у долях від молодшого значущого розряду LSB або процентах від повної шкали.

Похибки квантування є наслідком обмеженої розрядності АЦП. Цей недолік не може бути усунений для жодного типу аналого-цифрового перетворення.

Абсолютна величина помилки квантування кожного відліку знаходиться в межах від нуля до половини МЗР. Як правило, амплітуда вхідного сигналу значно більша, ніж МЗР. В цьому випадку помилка квантування не корельовано з сигналом і має рівномірний розподіл [12-15].

Сигнал похибки квантування від вхідного лінійного сигналу апроксимується сигналом пилкоподібної форми з максимальним розмахом  $q$ , і його середньоквадратичне значення дорівнює  $\frac{q}{\sqrt{12}}$

Апертурна похибка обумовлена нерівномірністю (флуктуацією) вибірки відліків внаслідок тремтіння фронту синхросигналу (clock jitter). Апертурна похибка відносно

невелика на низьких частотах, але на великих частотах вона може суттєво вплинути на результат. Апертурною похибкою можна знехтувати, якщо її значення менше в порівнянні з похибкою квантування.

#### 4. Критерії вибору параметрів і характеристик АЦП

##### 4.1. Забезпечення необхідної частоти дискретизації

При виборі АЦП керуються його параметрами, головними з яких для практичного застосування, є частота дискретизації, розрядність, роздільна здатність, діапазон вхідної напруги, похибки квантування, не лінійність, апертурна похибка (джитер) та інші. Необхідна частота дискретизації АЦП визначається його конкретним застосуванням, а саме частотою Найквіста сигналу, що досліджується, і не може бути, відповідно до теореми Котельнікова, меншою ніж двократна частота сигналу. Для тягового струму максимальна частота гармоніки, яку потрібно контролювати відповідно до нормативних документів, дорівнює 5555 Гц. Значеннями частоти дискретизації бажано вибирати з певним запасом на рівні 20...25 кГц.

Користуючись графіком розподілу типів АЦП в залежності від розрядності і частоти дискретизації можна зробити висновок, що для забезпечення потрібної частоти дискретизації придатними є два типи АЦП: послідовного наближення і сігма-дельта АЦП (рис. 2). Їх розрядність, в залежності від частоти модуляції, лежить в межах 10-16 біт для послідовного типу АЦП і 16 до 20 біт для сігма-дельта АЦП. В роботі дослідження проведені для АЦП послідовного наближення з розрядністю 10-16 біт.

АЦП послідовного наближення перетворює аналоговий сигнал в цифровий за N кроків, де N - розрядність АЦП. На кожному кроці визначається по одному біту цифрового значення, починаючи від СЗР (старшого значущого розряду) і закінчуючи МЗР (молодшим значущим розрядом).

АЦП цього типу володіють одночасно високою швидкістю і хорошою роздільною здатністю. Однак при відсутності пристрою вибірки зберігання похибка може збільшитися.

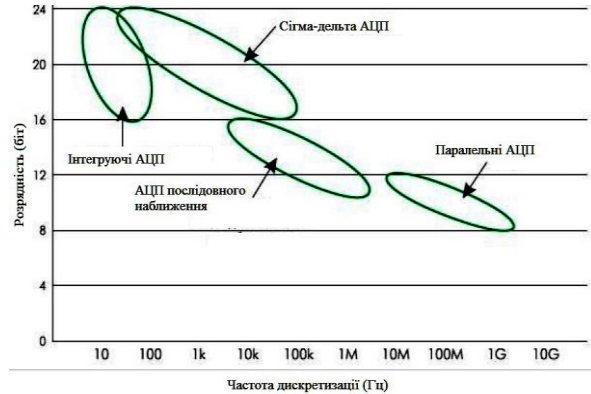


Рис. 2. Розподіл типів АЦП в залежності від розрядності і частоти дискретизації

##### 4.2. Забезпечення динамічного діапазону вимірювання

Динамічний діапазон тягового струму визначається як відношення середньоквадратичного значення (СКЗ) основної (найбільшої) гармоніки до СКЗ найменшої гармоніки. Динамічний діапазон тягового струму у децибелах, відповідно, дорівнює

$$DR_{TC} = 20 \lg \left( \frac{I_0}{I_{\min}} \right), (dB). \quad (5)$$

де  $I_0$  і  $I_{\min}$  є, відповідно, СКЗ струму найбільшої (основної) і найменшої гармоніки.

Найбільші значення динамічного діапазону мають місце для змінного тягового струму, тому в роботі розглядається саме змінний тяговий струм, хоча це не обмежує загальні висновки дослідження.

Максимально допустимі за умовами безпечного функціонування рейкових кіл рівні (СКЗ) гармонік тягового струму наведені у табл. 1.

Розраховані значення динамічного діапазону для максимально-допустимих рівнів гармонійних завад в інтервалах частот 21-29 Гц, 408-432, 468-492, 568-592, 708-732, 768-792 Гц (ТРЦ-3) і 4462-4538, 4962-5038,

5462-5538 (ТРЦ-4) (табл. 1) при значенні основної гармоніки тягового струму  $I_0 = 200$  А наведені у табл. 2.

Таблиця 2

**Значення динамічного діапазону для  
 максимально-допустимих рівнів  
 гармонійних завад**

Діапазони частот, Гц	21-29	Діапазони ТРЦ 3	Діапазони ТРЦ 4
$DR_{TC}$ , дБ	49.54	58.66	63,52

Значення динамічного діапазону АПК мають бути більшими, ніж розраховані у табл. 2 для забезпечення нормальної роботи вимірювального комплексу при можливих тимчасових комутаційних збільшеннях тягового струму, а також для врахування додаткових факторів, непередбачених розрахунковими формулами

$$DR_{АПК} \geq DR_N + D_0 + D_{ad} \quad (\text{дБ}), \quad (6)$$

де  $DR_{АПК}$  є динамічним діапазоном АПК,  $DR_N$  - динамічний діапазон тягового струму,  $D_0 = 20\lg(K_0)$  враховує можливі підвищення тягового струму в  $K_0$  раз, де

$$K_0 = I_{0\max} / I_0; \quad (7)$$

$D_{ad}$  враховує непередбачені при розрахунках фактори. На практиці рекомендовано брати це значення на рівні  $D_{ad} \approx (0,5..1)$  дБ [13].

Приймаючи, що вхідний перетворювач тягового струму П і антиалайзінговий фільтр АФ вимірювального комплексу (рис. 1), вибрані таким чином, що в межах від нульового до максимального значення тягового струму їх передаточна характеристика є лінійною, динамічний діапазон АПК визначається, головним чином, динамічним діапазоном АЦП.

Відповідно задача забезпечення необхідного динамічного діапазону АПК зводиться до задачі правильного вибору розрядності АЦП з урахуванням впливу ШПФ.

Роздільна здатність АЦП обумовлена теоретичним числом станів ( $2^N$ ) котрі АЦП може розрізняти, де  $N$  – розрядність (кількість біт) перетворювача. Роздільна здатність характеризує потенційні можливості АЦП з точки зору досяжної точності. Так, 12-розрядний АЦП має роздільну здатність  $1/4096$ , або  $0,0245\%$  від повної шкали, або  $72,2$  дБ. Роздільній здатності відповідає крок квантування або напруга молодшого значущого розряду (LSB), який для двійкових кодів перетворення дорівнює

$$U_{LSB} = \frac{U_{FSR}}{2^N}, \quad (8)$$

де  $U_{FSR}$  - напруга повної шкали АЦП. Похибка ідеального АЦП, обумовлена похибкою квантування, дорівнює  $U_{LSB} / 2$ .

Динамічний діапазон АЦП дорівнює відношенню найбільшого неспотвореного сигналу в каналі до мінімального сигналу, що можна розрізнити. Цей сигнал для більшості випадків дорівнює рівню, обумовленому шумом АЦП. Шум АЦП може бути різної природи, але найбільш значущим для ідеального перетворювача є шум квантування.

Відношення сигналу до шуму  $SNR$  визначається як відношення потужності сигналу до потужності шуму

$$SNR = 10\lg\left(\frac{U_{Signal}^2}{U_{Noise}^2}\right) \quad (\text{дБ}). \quad (9)$$

Шум квантування обумовлений зміною вихідної напруги АЦП у вигляді пилоподібної ламаної лінії, що має відхилення від вхідної в бік менших і більших значень з максимальною амплітудою  $U_{LSB}$ .

Середнє-квадратичне значення відхилення дорівнює  $U_{LSB} / \sqrt{12}$ . Відповідно, відношення сигналу до шуму, що обумовлений квантуванням АЦП, визначається як [13]

$$SNR = 6,02N + 1,76 \quad (\text{дБ}). \quad (10)$$

При використанні фільтру, що зменшує полосу частот вхідного сигналу до розміру  $BW$ , відношення сигналу до шуму збільшується

$$SNR = 6,02N + 1,76 + 10\lg \frac{F_s}{2BW} \text{ (дБ)}. \quad (11)$$

Для апаратно-програмного комплексу, в якому для спектрального аналізу тягового струму цифровий сигнал після  $N$ -розрядного АЦП піддається  $M$  точковому швидкому перетворенню Фур'є, відношення "сигнал-шум" дорівнює [12,13]

$$SNR = 6,02N + 1,76 + 10\lg \frac{M}{2} \text{ (дБ)}. \quad (12)$$

Максимальна вхідна напруга на вході АЦП, яка відповідає максимальному тяговому струму, має бути не більшою ніж напруга повної шкали  $U_{FSR}$ .

Значення динамічного діапазону АЦП згідно (6) має бути

$$DR_{АЦП} \geq DR_N + D_0 + D_{ad} \text{ (дБ)}. \quad (13)$$

АЦП має забезпечити перетворення напруги  $U_f$ , що відповідає мінімальній гармоніці з частотою  $f$ , яка регламентована нормативною документацією (табл. 1), з заданою абсолютною похибкою  $\Delta U_f$ . Відносна похибка вимірювання дорівнює

$$\delta_{АЦП-f} = \frac{\Delta U_f}{U_f}. \quad (14)$$

В якості  $U_f$  в (14) необхідно брати значення  $U_{Nf}$ , що відповідає максимально допустимому значенню струму гармоніки з частотою  $f$  (табл. 1).

З урахуванням прийнятого припущення, що перетворювач струму і фільтр є лінійними в динамічному діапазоні, що розглядається, відповідно до (7) можна записати

$$K_0 = \frac{U_{FSR}}{U_0} \quad (15)$$

Для забезпечення вимірювань напруги на вході АЦП з абсолютною похибкою

$\Delta U_f$ , значення похибки квантування  $U_{LSB} / 2$  має бути не більше ніж  $\Delta U_f$

$$U_{LSB} / 2 \leq \Delta U_f. \quad (16)$$

Відповідно динамічний діапазон АЦП для забезпечення необхідної точності має бути

$$DR_{АЦП} = 20\lg \left( \frac{U_{FSR}}{U_{LSB}} \right) = 20\lg \left( \frac{U_{FSR}}{2\Delta U_f} \right). \quad (17)$$

З урахуванням (14) - (17) рівняння (13) можна записати у вигляді

$$DR_{АЦП} \geq DR_N + D_0 + D_\delta + D_{ad} \text{ (дБ)}, \quad (18)$$

де

$$D_\delta = 20\lg \left( \frac{1}{2\delta} \right) \quad (19)$$

враховує вимогу забезпечення відносної похибки вимірювання не більше ніж  $\delta$ .

Відповідно до проведеного аналізу для конкретної задачі визначається необхідний динамічний діапазон АЦП за формулою (18), з якої визначається розрядність АЦП. Для визначеної розрядності  $N$  за формулою (12) розраховується відношення "сигнал-шум" при  $M$ -точковому швидкому перетворенні Фур'є. Після цього можна знайти ефективне число біт АЦП [13]

$$ENOB = \frac{SNR - 1,76}{6,02} \quad (20)$$

## 5. Результати моделювання

Дослідження впливу параметрів АЦП на його динамічні властивості було проведено на моделі з використанням синтезованого тестового змінного струму частотою 50 Гц. Діюче значення напруги тестового струму вибирали пропорційно діючому значенню тягового струму на рівні 200 А. Діючі значення гармонійних завад в складі тестового струму з частотами 25, 420, 480, 580, 720, 780, 4545, 5000 і 5555 Гц задавали відповідно до максимально-допустимих значень струму гармонійних завад за умо-

вами безпечного функціонування пристроїв залізничної сигналізації та зв'язку (табл. 1).

Тестова напруга в комп'ютерній моделі є аналогом напруги після перетворювача струму у вимірювальному апаратно-програмному комплексі. Коефіцієнт запасу АЦП по вхідній напрузі  $K_0$  брали на рівні 0.9 від напруги повної шкали АЦП. Частоту дискретизації АЦП прийняли на рівні 20480 Гц. Швидке перетворення Фур'є цифрового сигналу провадили з використанням прямокутного вікна довжиною  $N_w = 4096$  відліків сигналу. Число точок при швидкому перетворенні Фур'є  $M$  вибирали також як 4096. Для зменшення розмивання спектру і з метою підвищення точності визначення амплітуди гармонік параметри ШПФ вибирали таким чином, щоб витримувалося умова когерентності для основної гармоніки спектру.

В спектрі тестового струму для ідеального АЦП розрядністю 10, 12, 14, 16 біт (рис. 3) рівень шуму визначається шумом квантування, який є зменшеним на величину  $PG = 10 \lg \frac{M}{2}$ . Рівень шумів для АЦП при

збільшенні розрядності АЦП відповідно до ряду: 10, 12, 14, 16 біт зменшується зі значеннями (в дБ), що відповідають ряду -95,07; -107,11; -119,15; -131,19.

Наведені значення порогу шумів є достатніми для визначення наявності гармонійних завад з мінімальними значеннями, що зазначені нормативною документацією, але для забезпечення необхідної точності визначення значень гармонік рівні шумів для АЦП з розрядністю 10 і 12 біт є занадто високими.

В другому модельному експерименті досліджували залежність відношення сигналу до шуму ( $SNR$ ) від числа точок ШПФ ( $M = NFFT$ ) і значення тестового струму, за умови, що значення всіх гармонік залишаються на максимально допустимому рівні, визначеному у табл. 1. Оскільки гармоніки тестового тягового струму, що досліджується, менше на два порядки від основної гармоніки частотою 50 Гц, тестовий струм з різними значеннями сили струму реалізували змінюючи значення амплітуди основної гармоніки (50 Гц).

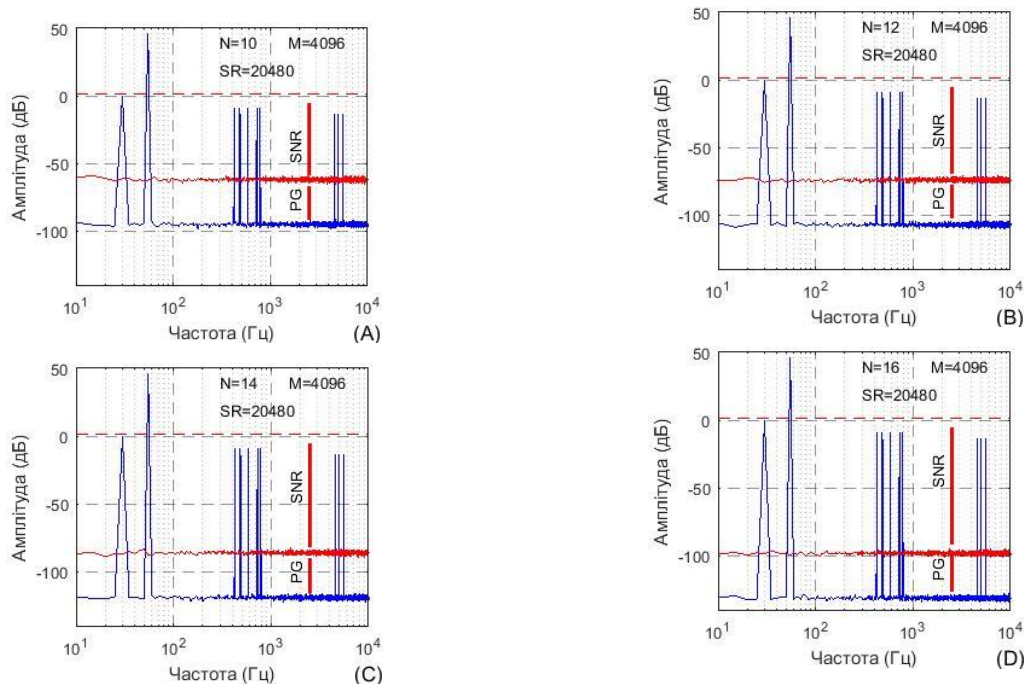


Рис. 3. Спектральний склад тестового струму при використанні АЦП розрядністю 10 (А), 12 (В), 14 (С) і 16 (D) біт.



Така процедура не вносить значної похибки в значення тестового струму, а головне не є принциповою і не впливає на висновки дослідження.

Число точок ШПФ при моделюванні вибирали такими, що відповідають ряду зі значеннями  $M = 2^m$ , де  $m = 6..12$ .

Діюче значення струму основної гармоніки змінювали в межах від 100 до 300 А з шагом 10 А (при незмінних значеннях інших гармонік).

Розраховані залежності відношення сигналу до шуму для найменших гармонік з частотами 4545, 5000 і 5555 Гц від кількості точок при ШПФ і діючого значення тестового струму (при незмінних значеннях струму гармонійних завод) для АЦП розрядністю 10, 12, 14 і 16 біт наведено на рис. 4.

Рівень відношення "сигнал-шум" ( $SNR$ ), розраховане для найменших гармонійних завод із СКЗ 0,2 А і частотами 4545, 5000, і 5555 Гц зменшується із збільшенням розрядності АЦП, силою тестового струму (при незмінних рівнях гармонійних завод)

та числа точок перетворення Фур'є  $NFFT$  від 64 до 4096 за рахунок збільшення  $PG = 10\log(M/2)$ .

З проведених досліджень видно, що відношення "сигнал-шум" для 10-ти розрядного АЦП менше ніж 21 дБ, а 12-ти розрядного АЦП менше ніж 42 дБ, що недостатньо для спектрального аналізу тягового струму. Значення  $SNR$  для 14 розрядного АЦП змінюється в межах 20..50 дБ, а 16 розрядного АЦП в межах 40..60 дБ в залежності від СКЗ тягового струму і числа точок перетворення Фур'є  $NFFT$ , що дає можливість провести раціональний вибір параметрів АПК для забезпечення необхідної точності вимірювання найменших гармонік.

Еквівалентне число біт АЦП  $ENOB$ , розраховане за (20) показує, що при  $NFFT = 4096$  значення еквівалентного числа біт АЦП досягає значень більших 7 для розрядності  $N = 14$  і 9 для розрядності  $N = 16$ .

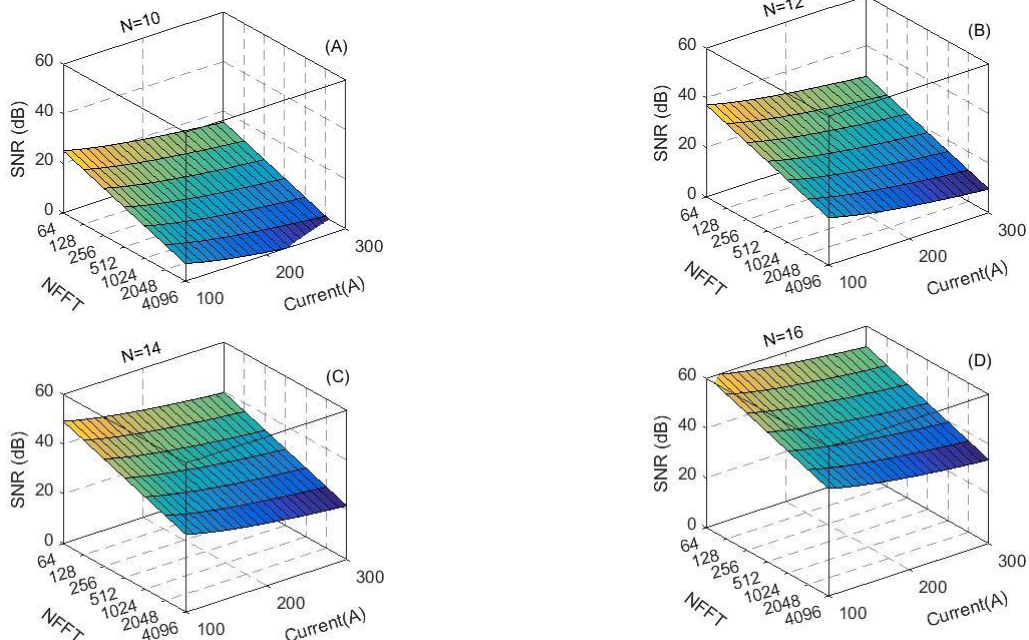


Рис. 4. Залежність відношення «сигнал-шум» від кількості точок при ШПФ і діючого значення тягового струму (при незмінних значеннях струму гармонійних завод) при використанні АЦП розрядністю 10 (А), 12 (В), 14 (С) і 16 (D) біт

## Висновок

В роботі проведено наукове обґрунтування раціонального вибору параметрів і характеристик структурних елементів апаратно-програмного комплексу для вимірювання параметрів гармонік тягового струму за критеріями забезпечення необхідної точності і роздільної здатності амплітуди, частоти і тривалості гармонік, значення яких визначені вимогами по забезпеченню електромагнітної сумісності тягового струму з лініями сигналізації і зв'язку (зокрема рейковими колами).

Апаратно-програмний комплекс (АПК) для вимірювання гармонійних завад в тяговому струмі складається, у загальному вигляді, з первинного безконтактного перетворювача тягового струму у напругу, пристрою узгодження, аналогового антиалайзінгового фільтру, аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) і програмного комплексу (в нашому випадку ноутбука), який виконує швидке перетворення Фур'є з представленням спектру тягового струму у табличному або графічному вигляді.

Для досягнення поставленої мети в роботі проаналізовано критерії вибору параметрів АПК і вплив параметрів та характеристики АЦП на точність визначення параметрів гармонік. Загальна відносна похибка АПК, за умовою, що похибки від підсистем комплексу є незалежними між собою і носять випадковий характер, може бути визначена як СКЗ від відносних похибок що виникають в окремих ланках пристрою.

В роботі розглянуто похибки, що виникають внаслідок аналогово-цифрового перетворення. Розглянуто критерії вибору параметрів і характеристик АЦП, зокрема для забезпечення необхідної частоти дискретизації і динамічного діапазону вимірювання. за умов забезпечення необхідної точності і роздільної здатності в часовій і частотній області відповідно до вимог галузевих нормативних документів по забезпеченню електромагнітної сумісності тягового струму з рейковими колами та іншими пристроями сигналізації та зв'язку на залізниці.

Дослідження впливу параметрів АЦП на його динамічні властивості було проведено на моделі з використанням синтезованого тестового змінного струму частотою 50 Гц з діючими значеннями струму гармонійних завад, антологічних реальному тяговому струму з максимально допустимі рівнями завад. Отримані в модельному експерименті значення порогу шумів для АЦП з розрядністю 10 і 12 біт є занадто великими для забезпечення необхідної точності визначення значень гармонік тягового струму.

Відношення "сигнал-шум" для 10-ти розрядного АЦП є меншим ніж 21 дБ, а для 12-ти розрядного АЦП менше ніж 42 дБ, що недостатньо для спектрального аналізу тягового струму. Значення для 14 розрядного АЦП змінюється в межах 20..50 дБ, а 16 розрядного АЦП в межах 40..60 дБ в залежності від СКЗ тягового струму і числа точок перетворення Фур'є, що дає можливість провести раціональний вибір параметрів АПК для забезпечення необхідної точності вимірювання найменших гармонік.

Еквівалентне число біт АЦП досягає значень більших 7 для розрядності АЦП 14 і 9 для розрядності АЦП 16 біт.

## Бібліографічний список

1. Zhi, Y. J. Electromagnetic environment around a high-speed railway using analytical technique / Y. J. Zhi, B. Zhang, K. Li, X. Y. Huang, Y. T. Fang, & W. P. Cao, //Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. – 2011. – V. 12. – No. 12. – P. 950-956.
2. Ogunsola, A. Electromagnetic compatibility in railways. Analysis and management // A. Ogunsola, A. Mariscotti. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2013. – 528 p.
3. Havryliuk V. I. Comparative analysis of experimental and calculation methods for determination of the traction current harmonics distribution in rails / V. I. Havryliuk, V. V. Meleshko // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, 2018. - № 16. С. 11-16.
4. Кравцов Ю. А. Электромагнитная совместимость рельсовых цепей и электроподвижного состава с асинхронным тяговым

- приводом //Автоматика на транспорті. – 2015. – Т. 1. – №. 1.
5. Гаврилюк, В. И. Нормы и методы испытания подвижного состава на электромагнитную совместимость с системами сигнализации и связи // Электромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – № 12. С. 48-57.
  6. Ефанов Д. В. Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты / Д. В. Ефанов Н. А. Богданов //Транспорт Урала. – 2013. – №. 1. – С. 36-42.
  7. Ghanizadeh A. J. Harmonic Disturbance Compensating and Monitoring in Electric Traction System / A. J. Ghanizadeh, S. H. Hossenian, G. B. Gharehpetian //Elect. Electro. Eng: An Int. J. – 2013. – Т. 2. – №. 3.
  8. Havryliuk V. Audio Frequency Track Circuits Monitoring Based on Wavelet Transform and Artificial Neural Network Classifier //2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – IEEE, 2019. – С. 491-496.
  9. Кравцов, Ю. А. Нормативы по электромагнитной совместимости подвижного состава и рельсовых цепей и методы их проверки. / Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов, А. А. Антонов, & М. Е. Бакин // Наука и техника транспорта/ - 2014. - № 2. - С. 65-71.
  10. Гаврилюк, В. И. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи / В. И. Гаврилюк, В. И. Щека, В. В. Мелешко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – № 5(59). – С. 7–15.
  11. Walden R. H. Analog-to-digital converter survey and analysis //IEEE Journal on selected areas in communications. – 1999. – Т. 17. – №. 4. – С. 539-550.
  12. Kester W. Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD+ N, and SFDR so you don't get lost in the noise floor //MT-003 Tutorial, www. analog. com/static/importedfiles/tutorials /MT-003. pdf. – 2009.
  13. Kester W. Mt-001: Taking the mystery out of the infamous formula, " snr= 6.02 n+ 1.76 db," and why you should care //REV. 0. – 2005. – С. 10-03.
  14. Lundberg K. H. Analog-to-digital converter testing //Massachusetts Institute of Technology. – 2002.
  15. Allen, J. B A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis / J. B. Allen, L. R. Rabiner// Proceedings of the IEEE. – 1977. – V. 65. – No. 11. – P. 1558-1564.
  16. Smith, S. Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists. – Elsevier, 2013.
  17. Квасников В. П. Оптимизация аналогового интерфейса информационно-измерительных систем для дистанционных измерений механических величин / В. П. Квасников, Д. П. Орнатский, А. И. Осмоловский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – №. 4 (11). – С. 31-37.

**Ключові слова:** спектральний аналіз, тяговий струм, аналогово-цифрове перетворення, електромагнітна сумісність.

**Ключевые слова:** спектральный анализ, тяговый ток, аналогово-цифровое преобразование, электромагнитная совместимость.

**Keywords:** spectral analysis, traction current, analog-to-digital transform, electromagnetic compatibility.

**Рецензенти:**  
проф., д.т.н., А. Б. Бойнік,  
проф., д.т.н., А. М. Муха.

Надійшла до редколегії 12.04.2019.  
Прийнята до друку 23.04.2019.