

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
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.

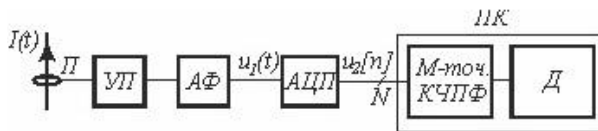


Рис. 1. Структурна схема АПК для спектрального аналізу тягового струму

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 δ_{total} , за умовою, що похибки від підсистем комплексу є незалежними між собою і носять випадковий характер, може бути визначена як СКЗ від відносних похибок δ_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 типа 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 ε_{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.

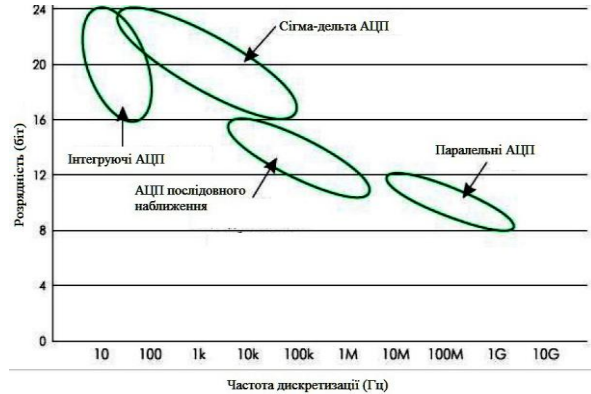


Рис. 2. Розподіл типів АЦП в залежності від розрядності і частоти дискретизації

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 ΔU_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

ΔU_f , значення похибки квантування $U_{LSB} / 2$ має бути не більше ніж ΔU_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 δ .

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).

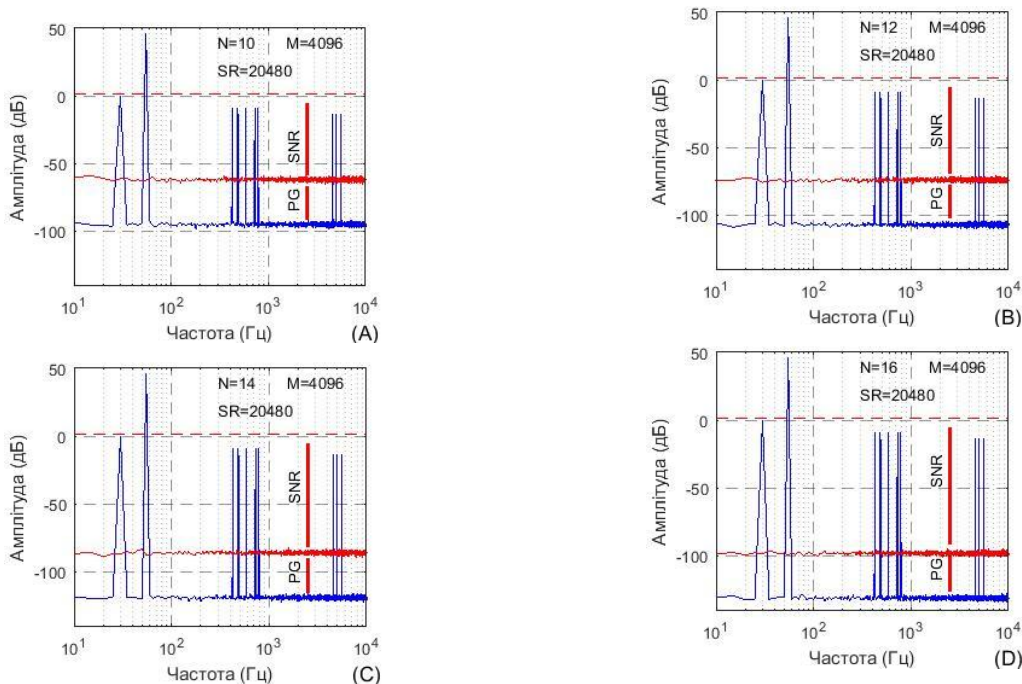


Рис. 3. Спектральний склад тестового струму при використанні АЦП розрядністю 10 (А), 12 (В), 14 (С) і 16 (D) біт.

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 $N = 16$.

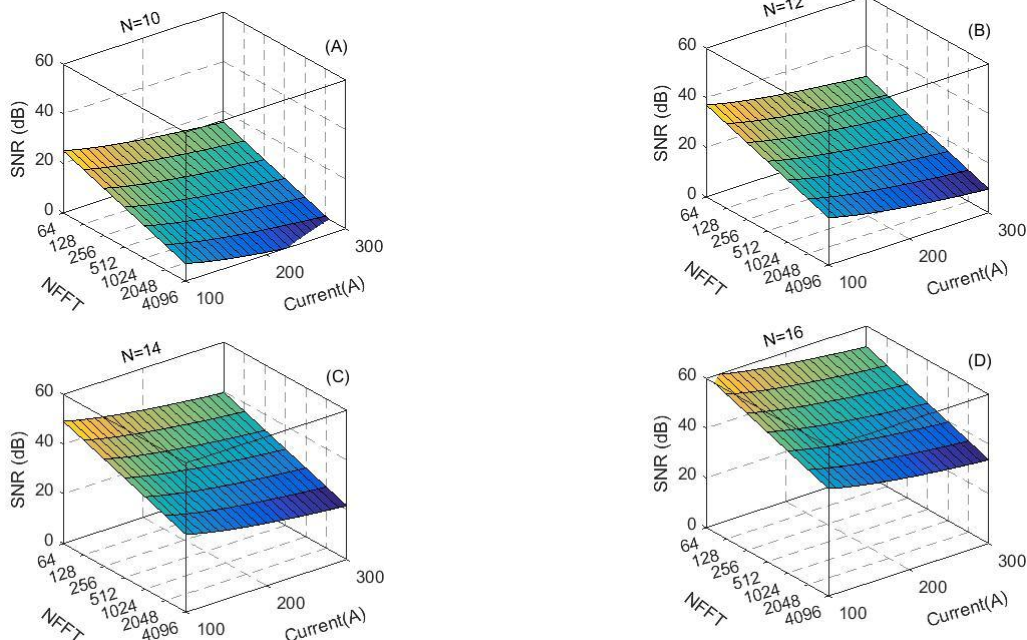


Рис. 4. Залежність відношення «сигнал-шум» від кількості точок при ШПФ і діючого значення тягового струму (при незмінних значеннях струму гармонійних завод) при використанні АЦП розрядністю 10 (A), 12 (B), 14 (C) і 16 (D) біт

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 заводів в тяговому струмі складається, у загальному вигляді, з первинного безконтактного перетворювача тягового струму у напругу, пристрою узгодження, аналогового антиаліазингового 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 заводів, антологічних реальному тяговому струму з максимально допустимі рівнями заводів. 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.