

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки та технологій  
Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

**ДОВІДКА**

**про відсутність плагіату у випускній кваліфікаційній роботі**

За результатами перевірки випускної кваліфікаційної роботи (ВКР) здобувача вищої освіти освітнього ступеня (ОС) «магістр»

Радзіховський Костянтин Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

на тему: Підвищення точності спектрального аналізу тягового струму при експлуатаційних випробуваннях нових типів електропоїздів (комплексна)

в роботі не виявлено порушень академічної доброчесності.

Керівник ВКР



(підпис)

Гаврилюк В. І.

(прізвище, ім'я, по батькові)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки та технологій

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

«ДО ЗАХИСТУ»  
Завідувач кафедри



Володимир ГАВРИЛЮК

(підпис)

2021 р. чудне « 16 »

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Спеціалізація «Автоматика та автоматизація на транспорті»

**Тема:** Підвищення точності спектрального аналізу тягового струму при експлуатаційних випробуваннях нових типів електропоїздів (комплексна)

**Theme:** Increasing the accuracy of spectral analysis of traction current during operational tests of new types of electric trains (complex)

Керівник дипломної роботи  проф. Володимир ГАВРИЛЮК

Студент групи АТ2021 (967М)  Костянтин РАДЗИХОВСЬКИЙ

Student АТ2021 (967М)  Kostiantyn RADZIKHOVSKYI

Дніпро  
2021

Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Спеціальність

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Спеціалізація

Автоматика та автоматизація на транспорті

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри АТ

Гаврилюк В.І.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття освітнього ступеню «магістр»

Радзіховський Костянтин Сергійович

(прізвище, ім'я та по батькові)

### 1. Тема роботи

Підвищення точності спектрального аналізу тягового струму при експлуатаційних випробуваннях нових типів електропоїздів (комплексна)

Затверджена наказом по університету № \_\_\_\_\_ від « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

2. Термін подання студентом закінченої роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Обсяг %	Кількість креслень
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		

Студент

Науковий керівник

## РЕФЕРАТ

**Відомості про об'єм пояснювальної записки:** 67 сторінок, 6 таблиць, 21 рисунок, 27 джерел літератури.

**Ключові слова:** електромагнітна сумісність; електрорухомий склад; системи сигналізації та зв'язку, рейкові кола, гармоніки тягового струму, спектральний аналіз, точність виміру.

**Об'єкт проектування:** Апаратно-програмний комплекс (АПК) для вимірювання гармонійних завад в тяговому струмі.

**Мета магістерської роботи:** Підвищення точності спектрального аналізу тягового струму при експлуатаційних випробуваннях нових типів електропоїздів.

У першому розділі було розглянуто норми електромагнітного впливу рухомого складу на рейкові кола, методи вимірювання електромагнітного впливу рухомого складу на рейкові кола, та питання забезпечення електромагнітної сумісності тягової мережі з рейковими колами і відомими видами джерел ЕМЗ.

У другому розділі виділені основні параметри і характеристики АЦП, точність і роздільна здатність АЦП. Також було розглянуто основу роботи АЦП і існуючі специфікації, основні електричні параметри.

В третьому розділі було розглянуто розробку методики вибору АЦП для забезпечення точності вимірювання параметрів гармонік в спектрі тягового струму.

**Галузь застосування:** Автоматика та автоматизація на залізничному транспорті.

**Висновок.** 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.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ. ПОСТАНОВКА МЕТИ ТА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	13
1.1 Норми електромагнітного впливу рухомого складу на рейкові кола.....	13
1.2 Методи вимірювання електромагнітного впливу рухомого складу на рейкові кола.....	21
1.3 Забезпечення електромагнітної сумісності тягової мережі з рейковими колами.....	24
1.4 Висновки за розділом, постановка мети та завдань дослідження.....	27
2. ПАРАМЕТРИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ АЦП. ТОЧНІСТЬ І РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ АЦП.....	29
2.1 Загальна характеристика АЦП.....	29
2.2 Паралельні АЦП.....	30
2.3 АЦП послідовного наближення.....	32
2.4 Сігма-дельта АЦП.....	34
2.5 Інтегруючі АЦП.....	35
2.6 Специфікація АЦП.....	36
2.7 Статична похибка.....	37
2.8 Ідеальна передатна характеристика АЦП.....	37
2.9 Адитивна похибка.....	39
2.10 Мультиплікативна похибка.....	40
2.11 Диференційна нелінійність.....	41
2.12 Інтегральна нелінійність.....	41

2.13	Похибка квантування.....	42
2.14	Динамічні характеристики.....	42
2.15	Відношення "сигнал/шум".....	43
2.16	Загальні гармонічні спотворення.....	45
2.17	Відношення "сигнал/шум і спотворення".....	46
2.18	Динамічний діапазон, вільний від гармонік.....	46
3.	РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИБОРУ АЦП ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАРМОНІК В СПЕКТРІ ТЯГОВОГО СТРУМУ.....	47
3.1	Загальна інформація про АЦП. Проблеми електромагнітної сумісності.....	47
3.2	Похибки АПК при вимірювання параметрів гармонік.....	50
3.3	Критерії вибору параметрів і характеристик АЦП.....	52
3.4	Результати моделювання.....	58
	ВИСНОВКИ.....	62
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	64

## ВСТУП

Електротяга впливає на всі види телесигналізації (ТС), оскільки тяговий струм протікає по рейкам. Тому існує небезпечний і заважаючий вплив на рейкові кола (РК) та кола ТС, залежно від таких факторів, як: тип систем ТС, їх довжина (власна та зближення із залізницею), параметрів, часу впливу струму, стану рейок, симетрії струмів в окремих рейках, а також способів захисту приймачів від завад.

На електрифікованих залізницях існує характерна або загальна модель проникнення завад до пристроїв ТС. Вона справедлива до всіх видів передачі.

Виділяють наступні елементи передачі:

- передавач інформації (наприклад, рейкове коло);
- об'єкт впливу (приймач);
- джерело завад (система тяги, ЕРС, ЛЕП та грозові розряди);
- середовище, в яке проникають завади, а також перехідні зони.

У двониткових РЦ несиметрія рейкової лінії для гармонік зворотного тягового струму враховується шляхом підключення каліброваного дроту між рейкою та одним кінцем додаткової обмотки дросель-трансформатора (ДП), що відповідає аварійному стану рейкових кіл.

Це є універсальним методом для електротяги змінного та постійного струму у ході аналізу роботи ЕПС, тягових підстанцій та інших джерел завад, включаючи ЛЕП. У даних ситуаціях виникає таке явище, як накладання, що ускладнює умови виміру. Крім режимів тяги, що встановилися, необхідно також дослідити й інші режими: пуску, аварійні та ін.

В основному рекомендується контролювати наступне:

у системах електротяги 3 кВ - частоту гармонійних складових струму при роботі перетворювача та його власну частоту, а також гармоніку 50 Гц та гармонійні складові (особливо 3, 6, 12), зумовлені роботою системи тягового електропостачання (СТЕ);

в системах змінного струму 25 кВ, 50 Гц - основну гармоніку частотою 50 Гц і гармонійні складові, що виникають під час роботи тиристорного перетворювача;

в обох системах електротяги - перехідні процеси, що охоплюють широкий спектр частот.

Під час випробувань повинні враховуватися такі режими:

ЕПС постійного струму - робота при різних частотах імпульсного перетворювача в залежності від швидкості та струмового навантаження, нормальна робота імпульсних перетворювачів та пошкодження (наприклад, відключення одного візка), наявність кількох локомотивів на ділянці живлення;

ЕПС змінного струму – повністю несиметричний тиристорний міст, нормальна робота в режимі тяги та наявність пошкоджень, перебування на ділянці живлення кількох локомотивів.

Повинні також враховуватись такі умови роботи рейкових кіл:

- підключення різних типів приймальних кінців РК;
- злам рейки та протікання тягового струму по одній рейці;
- повна симетрія двониткового РК.

У ході дослідження частотного спектра тягового струму необхідно враховувати вплив кількох електровозів на фідерній зоні. Також слід враховувати результуючу амплітуду основної частоти керування. Однак найчастіше є комбінація різних частот управління, а частоти гармонійних та інтерференційних складових зумовлені різницею між частотами пульсації на підстанції та ЕПС або тільки на ЕПС.

При дослідженнях щодо визначення параметрів завад у РК, проведених в Німеччині, дослідниками було запропоновано встановлювати на ЕПС потужні фільтр-пристрої, що знижують вплив гармонік на обладнання СЦБ та зв'язку у різних режимах роботи тягового засобу. У США для уніфікації методики вимірювання Асоціацією американських залізниць (AAR) був запропонований комплект вимірювальної апаратури. Він успішно прийнятий у дослідженнях та при різних умовах експлуатації. Аналогічні дослідження було у Франції, Голландії, Угорщині, Англії та інших країнах, де використовується електротяга. У ході досліджень було розроблено національні норми рівнів завад від ЕРС.

При оцінці електромагнітної сумісності (ЕМС) на різних ділянках залізниць, розглядаються такі види завад:

- гармоніки;
- інтергармоніки;
- коливання напруги;
- провали напруги та короткочасні перерви живлення;
- зміна частоти напруги живлення;
- складові тягового постійного та змінного струму;
- грозові розряди.

Найбільший вплив мають гармоніки тягового струму. Коли іде мова про підвищення ефективності електричної тяги слід враховувати вимоги раціональної побудови зворотної тягової мережі, ЕМС та завад, що впливають на апаратуру рейкових кіл і пристрої СЦБ.

Щодо ЕМС у цьому плані існують досить вагомні складності і завади в реалізації. Справді, для вирішення цих проблем розроблено лише деякі способи стосовно і лише для конкретних систем тягового електропостачання (наприклад, у метрополітенах). Найбільш важливим є визначення оптимальних електричних параметрів для пристроїв СЦБ

(апаратура рейкових кіл), що працюють в одній електричній системі, і забезпечення нормальної роботи з мінімальним взаємним впливом.

У реальних умовах вдале виконання вимог до ЕМС ускладнює дія завад різноманітних електричних систем (ЛЕП, ЕРС, різного електрообладнання та ін.).

На етапах розробки рейкових кіл СЦБ були враховані вплив тягового струму та його гармонік на апаратуру СЦБ і АЛС. Рівень впливу залежить від значення та роду тягового струму, гармонік та параметрів РК. Розмір руху поїздів, вид тягового струму та система живлення визначає навантаження контактної мережі, а система управління перетворювачами (на ТП та ЕРС) впливає на рівень гармонік.

Крім зазначених гармонійних (зосереджених) завад, існують також імпульсні завади тягового струму, до впливу яких схильні приймальні пристрої РЦ та АЛС. Електричні фільтри не впливають на захист від таких, оскільки у самому фільтрі виникають вільні коливання, що збігаються із частотою сигналу. Тому для досягнення ЕМС збільшують частоти сигнального струму та його рівень, використовують пристрої сповіщення сприйняття сигналу.

Подальше підвищення частоти сигнального струму знижує вплив імпульсних завад.

При впровадженні тональних РК, для захисту від завад тягового струму, були розроблені спеціальні вимоги які впливають на вибір частоти сигнального струму і схему побудови апаратури. Тому впровадження тональних РЦ є одним із найкращих методів у боротьбі із завадами, та мають багато експлуатаційних технічних і економічних переваг.

Переведення ЕПС на тиристорне регулювання також має ряд переваг, проте призводить до появи небажаних завад у діапазоні тональних частот. Наприклад, створення імпульсного живлення тягових двигунів зі

змінною шириною імпульсів при задаючій частоті 400 Гц, призводить до появи завад у широкому діапазоні тональних частот.

Усе вище перераховане вказує на необхідність ретельнішого дослідження усіх можливих видів завад, що виникають у засобах електричної тяги і які впливають на пристрої СЦБ і зв'язку. Це стосується і систем тягового електропостачання. При електротязі, в основі лежать адитивні завад, які поділяються на три групи: флуктуаційні, імпульсні та зосереджені.

Амплітуда завад зворотного тягового струму може змінюватись у часі. Режим руху поїздів і їх тип слугує основою для змінного характеру навантаження тягової підстанції. Якість напруги і струму, створюваних випрямлячами та ЛЕП також мають свій вплив. Також не слід забувати про можливість підживлення РЦ від джерел сусіднього (суміжного) РК.

На ТП постійного струму з випрямлячами (6 - і 12-пульсові схеми) застосовують фільтр-пристрої, що згладжують (СП) різних модифікацій (фільтри напруги). Для зменшення амплітуди гармонік і зменшення впливу на рівень постійної складової струму застосовують фільтри з використанням реактивних елементів. Однак при таких несправностях, як пробій конденсатора додаткові контури вимикаються запобіжником. При цьому в контактній мережі присутні всі гармоніки випрямленого струму.

Пристрої діагностики та контролю не мають широкого застосування на даний час. Тому дію гармонік у тяговій мережі не можна вважати лімітованою у часі. А якщо брати до уваги особливості роботи деяких СП, то у сукупності з ЕПС та різними типами тягової мережі існує явище посилення рівня гармонік на низьких частотах (50 - 200 Гц).

Тому слід починати встановлення меж ефективності пристроїв згладжування, ТП і ЕПС, розробки способів контролю та діагностики. Головним на сьогодні, безсумнівно, залишається питання аналізу гармонійних складових у роботі з реальними схемами випрямлення.

У ході дослідження ефективності фільтрів було виявлено, що Г-подібні фільтри, що згладжують, можуть застосовуватися в якості фільтрів напруги і фільтрів струму. Так, якщо джерело гармонік є генератором пульсуючої напруги (наприклад, випрямляч), доцільно застосування фільтрів напруги, з'єднуючи джерело з боку індуктивного входу. Імпульсний перетворювач, встановлений на ЕПС, споживає пульсуючий струм. Для згладжування змінної складової цього струму застосовують фільтр струму, приєднуючи споживач струму до фільтра ємнісного входу.

Стає зрозуміло, що правильно застосовані фільтри значно полегшать, а у більшості випадків дозволять унеможливити вплив завад на рейкові кола. Безсумнівно, важливою умовою цього є розробка методики вимірювання.

Завада — це небажана електрична і (або) магнітна дія на ТС, яка може призвести до погіршення якості їх функціонування пристроїв. Виходячи з цього поняття потужної електромагнітної завади (ПЕМЗ) можна описати, як завади, при яких відбуваються незворотні відмови. Найчастіше такі завади зустрічаються на електрифікованих дорогах, а їх потужність може бути понад 5 - 7 Вт.

За формою завади поділяють на імпульсні та регулярні. Імпульсні - це поодинокі імпульси або послідовність, довільні за формою та різні за амплітудою, які з'являються у випадкові моменти часу. Причому, у послідовності імпульсів інтервали між ними більші за тривалість імпульсів (наприклад, режим к.з. контактної мережі на рейки або землю, відрив струмоприймача, проїзд ізолюючих вставок та ін.). Регулярні завади визначаються як гармонійні (наприклад, під час роботи перетворювачів рухомого складу).

На залізничному транспорті ПЕМЗ поділяються на природні та штучні. Завади штучного походження також можна поділити на

ненавмисні та організовані. І ті, й інші з'являються на мережі електрифікованих доріг. Однак, завадам від ЛЕП надають більше значення.

Тягова мережа електрифікованих доріг має несиметричність тягової мережі, що спричиняє виникнення ПЕМЗ. Слід зазначити, що найбільшу увагу на електрифікованому транспорті приділяють комутаційним, квазістаціонарним і стаціонарним перенапрам в діапазоні частот від 0,1 до 3,5 Гц. Амплітуда таких завад може бути до кількох ампер (особливо у тональному діапазоні).

Близькою за своїми завадами до ЛЕП є тягова мережа залізниць. Робота перетворювачів на ЕПС створює можливість отримання завад частотою від 0,1 до 150 Гц. Те саме виникає і при к.з. тягової мережі на рейки.

# **1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ. ПОСТАНОВКА МЕТИ ТА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ**

## **1.1. Норми електромагнітного впливу рухомого складу на рейкові кола**

Електромагнітною сумісністю (ЕМС) технічних засобів називається здатність їх функціонувати із заданою якістю в заданій електромагнітній обстановці та не створювати неприпустимих електромагнітних завад (ЕМП) іншим технічним засобам.

Залізниці, які є електрифікованими створюють електромагнітні завади [1]. Залізниці ще на початку електрифікації почали роботу над електромагнітною сумісністю пристроїв зв'язку та автоматики. Питання щодо електромагнітної сумісності досі актуальні і створюють безліч завад при роботі та проектуванні. Зазвичай це пов'язано з використанням асинхронного тягового приводу у електрорухомому складі, значне зростання швидкості руху поїздів, використання новітніх мікропроцесорних систем централізації, управління та контролю перевезеннями [1,12].

Існує необхідність вирішення проблем з ЕМС на залізниці у межах відкритого, та просторового доступного ринку залізничних перевезень Європи. Це слугує у подальшому безперешкодному руху поїздів через держкордони з використанням різних систем електропостачання залізниць, сигналізації та зв'язку.

Сучасний рухомий склад (РС), насамперед, перед початком експлуатації підлягає ретельній перевірці і випробуванням на ЕМС [1,13,14]. В Україні дослідження на ЕМС та випробування не так давно виконували у рамках технічних умов, що мали за основу такі нормативні документи: НБ ЖТ ЦТ 03-98 «Електропоїзди. Норми безпеки», НБ ЖТ ЦТ

04-98 «Електровози. Норми безпеки», а також стандарт ГОСТ 29205-91 на радіозавади індустріальні від електротранспорту. Останній стандарт був дозволений, коли його додали до переліку національних стандартів. Вони є доказом відповідності продукції до Технічних вимог регламенту ЕМС, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 29.08.2009 № 785.

Європейський Союз у 2004 році прийняв Директиву 2004/108/ЕС «Електромагнітна сумісність – Electromagnetic compatibility directive (EMC)». Вона визначає основні вимоги стосовно електромагнітної сумісності, які мають бути обов'язково виконані виробником, імпортером або дистриб'ютором. Також були прийняті європейські норми, що регламентують вимоги на ЕМС продукції. Натомість цій директиві 18 квітня 2014 року було запроваджено нову директиву на ЕМС 2014/30/EU.

Поєднання різних національних систем у єдиному стандарті є шляхом до успішної гармонізації і кооперації залізниць у всьому світі. Для розуміння, що таке "норми ЕМС" далі розглянемо деякі з міжнародних норм на ЕМС.

Євросоюз у 2006 році прийняв серію стандартів EN 50121, яка складається з п'яти частин. Вони спрямовані на забезпечення ЕМС продукції залізниць і відповідність вимогам Директиви з ЕМС. Перша частина стандарту (EN 50121-1:2006 Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 1: General) слугує загальним введенням у проблему, оглядає зміст та структуру всіх частин стандарту EN 50121, визначає критерії залізниць, щодо якості функціонування в цілому та розглядає досягнення ЕМС на інтерфейсі між поїздом та інфраструктурою залізниць.

Друга частина стандарту (EN 50121-2 Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world) розглядає взаємодію між довколишнім середовищем та апаратурою залізних доріг, гранично-допустимі значення емісії завад для

всієї системи залізниць, а також тягові підстанції, і методи вимірювання завад.

Частина 3 стандарту складається з двох підрозділів.

Підрозділ 3-1 (EN 50121-3-1 Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 3-1: Rolling stock – Train and complete vehicle) розглядає вимоги до завад та їх рівні для всіх типів поїздів, а також методи їх вимірювань.

Підрозділ 3-2 стандарту (EN 50121-3-2 Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 3-2: Rolling stock – Apparatus) визначає граничний рівень емісії завад, рівні та критерії завад для бортової апаратури поїздів на частоті 400 Гц, розміщення бортової апаратури. Вказано, що тести повинні визначатися конкретною апаратурою, конфігурацією, наявними портами, умовами функціонування.

Частина 4 стандарту (EN 50121-4 Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus) розглядає сигнальну і телекомунікаційну апаратуру, визначає норми емісії та рівні заводозахищеності, критерії якості функціонування апаратури, методи вимірювання завад.

Частина 5 стандарту (EN 50121-5 Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 5: Emission and immunity of fixed power supply installations and apparatus) розглядає питання ЕМС, і стійкості до завад для електричних і електронних приладів і систем, призначених для використання в залізничних установках електропостачання. Вказані межі емісії та рівні заводостійкості для пристроїв, розташованих на тяговій підстанції та для лінійних пристроїв електропостачання [15].

В Україні при виконанні Директиви 2014/30/ЄС було прийнято національні стандарти, які ідентичні гармонізованому європейському стандарту EN 50121.

Аналогічні за змістом нормативні документи, що регламентують вимоги щодо ЕМС стосовно залізничного транспорту і залізниць в цілому, прийняті міжнародною електротехнічною комісією (МЕК) [16].

Однак ці стандарти не беруть до уваги вимоги щодо забезпечення ЕМС поїздів щодо національних систем і пристроїв сигналізації та зв'язку, які мають різну конструкцію, принцип дії, робочі частоти та інші параметри. Серед країн Європи існує більше ніж 27 різних систем і пристроїв сигналізації та зв'язку. Оскільки рухомий склад генерує електромагнітні завади, то вимоги до них повинні бути конкретизовані для кожної окремої країни і відповідати системам, які в цих країнах застосовуються. Випробування щодо ЕМС повинні бути проведені окремо в кожній з країн, оскільки системи відрізняються. А це збільшує вартість впровадження нових систем.

У стандарті CENELEC – EN 50238-1 розглянуто забезпечення сумісності рухомого складу та систем контролю положення поїзда, з урахуванням специфіки національних систем сигналізації.

Граничні значення струму завад від рухомого складу в рейкових колах для основних типів електропостачання, рейкових кіл, колійних датчиків, які застосовуються в країнах ЄС, розглянуті у CENELEC – CLC/TS 50238-2. Якщо деякі типи рейкових кіл не наведені у стандарті, необхідно використовувати національні правила та інструкції, які спрямовані на досягнення ЕМС.

Для пристроїв СЦБ, які аналогічні за конструкцією та принципом роботи українським системам вимоги до ЕМС викладені у ГОСТ Р 55176.3.1-2012 та у ГОСТ Р 55364-2012. Однак, він не є імплементованим в Україні.

На нових типах рухомого складу встановлений асинхронний тяговий привід і гармоніки цього двигуна, які надходять до мережі, лежать у межах частот роботи АЛС і рейкових кіл встановлених на Укрзалізниці.

Якщо ділянки колії проектувалися раніше для рухомого складу іншого типу, то можливі збої в роботі систем СЦБ, навіть при позитивному проходженні випробувань на іншій ділянці.

У процесі експлуатації на ділянках можуть перебувати декілька рухомих одиниць, а не одна, як при випробуваннях. Це значно ускладнює виміри та дослідження. Тому комп'ютерне моделювання для таких типів досліджень є єдиним правильним рішенням.

За вихідну інформацію приймають реальні значення завад, які вимірюються в процесі польових випробувань рухомого складу. Випробування нових типів рухомого складу на ЕМС із національними системами сигналізації та зв'язку необхідно проводити на основі національних стандартів та міжнародних імплементованих.

Розглянемо норми заважаючих впливів рухомого складу на пристрої СЦБ.

Заважаючий вплив рухомого складу та пасажирських вагонів з високовольтним перетворювачем на рейкові кола та пристрої СЦБ оцінюють за величиною гармонійних складових струму електрорухомого складу та вагона з високовольтним перетворювачем. Допустимі значення гармонійних складових струму електрорухомого складу наведено в табл.1.1, а вагона з високовольтним перетворювачем – в табл. 1.2. Максимально допустиме значення гармонік струму електрорухомого складу (табл. 1.1), що діє, розраховано відразу для всіх гармонік одночасно, присутніх в заданій смузі з тривалістю більше 0,3 с.

Вимірювання величини гармонік тягового струму ЕПС проводять у всіх експлуатаційних режимах роботи рухомого складу, які передбачені технічною документацією, а високовольтного перетворювача пасажирського вагона – на стоянці, а також у всіх експлуатаційних режимах, передбачених технічною документацією.

Допустимі діючі значення струму гармонік, створюваних ЕПС

Система ЕНП	Полоса частот, Гц	Номинальна частота, Гц	Допустимий струм , А
3 кВ, пост. ток	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
25 кВ, 50 Гц	15-21	25	4,1
	21-29		1,0
	29-35		4,1
	65-85	75	4,1
3 кВ пост. ток и 25 кВ 50 Гц	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

Допустимі значення струму гармонік, створюваних електрообладнанням вагона

Частота сигнального струму, Гц	Полоса частот, Гц	Допустимий рівень завад, мА
25	19-21	240
	21-29	60
	29-31	240
50	42-46	100
	46-54	24
	54-58	100
175	167-184	40
420	408-432	50
480	468-492	50
580	568-592	50
720	708-732	50
780	768-792	50

Гранично допустима напруженість поля електромагнітних завад, створюваних залізничним рухомим складом на стоянці та режимі руху в діапазоні частот 0,15 МГц–1 ГГц відповідно до ДСТУ EN 50121, представлені графіками на рис. 1.1, 1.2.

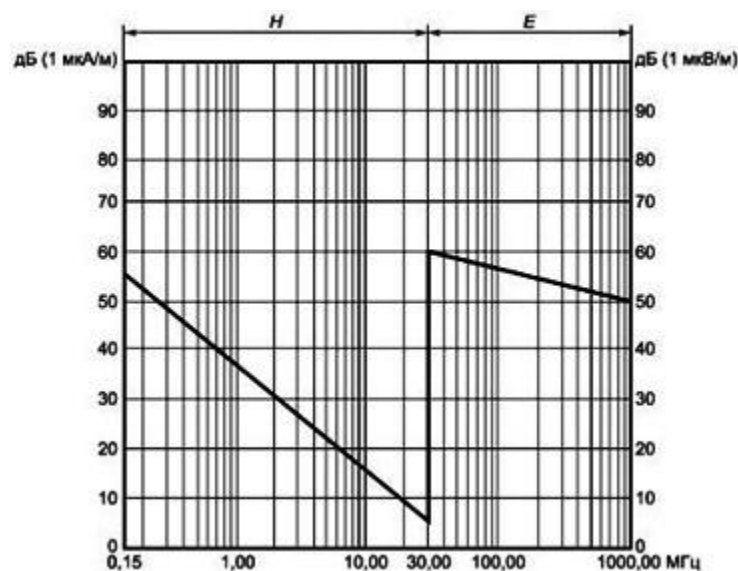


Рис. 1.1. Гранично допустимі квазіпікові значення напруженості поля завад, створюваних рухомим складом на стоянці

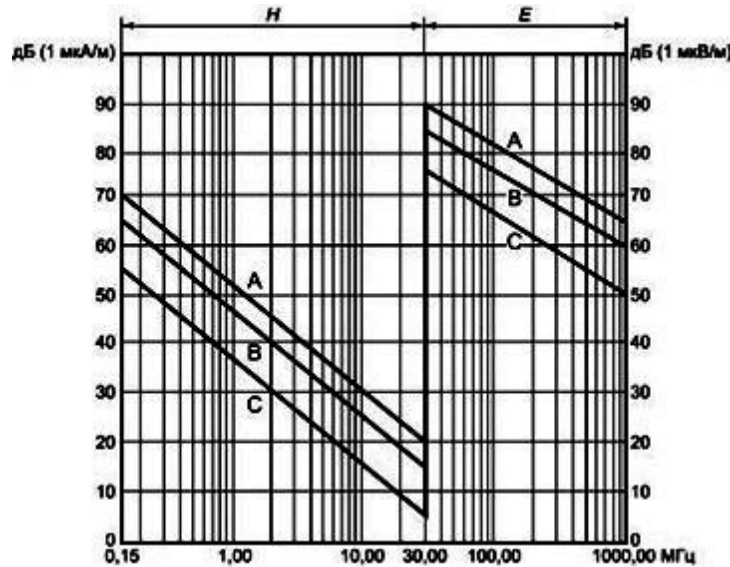


Рис. 1.2. Гранично допустимі пікові значення напруженості поля завад, створюваних ПС в режимі руху під час живлення змінним струмом 25 кВ (А); постійним струмом 3 кВ (В); для автономної тяги (С)

Формули для граничної напруженості поля ЕМП (в дБ), створюваних ПС на стоянці, мають наступний вигляд:

— для частот від 0,15 МГц до 30 МГц

$$H = 55 - 21.73 \lg \left( \frac{f}{0.15} \right); \quad (1.1)$$

— для частот від 30 МГц до 1 ГГц

$$E = 60 - 6.57 \lg \left( \frac{f}{30} \right), \quad (1.2)$$

де  $f$  - Частота вимірювань, МГц.

Формули для допустимих значень напруженості поля завад, створюваних рухомим складом у русі, наведені у табл. 1. Мітки у першій колонці таблиці відповідають роду тягового струму електропостачання ЕПС або автономній тязі, аналогічно міткам на рис. 1.2.

Формули для напруженості поля завад, створюваних рухомих складом у русі

Мітка	Значення напруженості для частот	
	(0.15...30) МГц	(30...1000) МГц
A	$H_1 = 70 - 21.73 \lg\left(\frac{f}{0.15}\right)$	$E_1 = 90 - 16.42 \lg\left(\frac{f}{30}\right)$
B	$H_2 = 65 - 21.73 \lg\left(\frac{f}{0.15}\right)$	$E_1 = 85 - 16.42 \lg\left(\frac{f}{30}\right)$
C	$H_3 = 55 - 21.73 \lg\left(\frac{f}{0.15}\right)$	$E_1 = 75 - 16.42 \lg\left(\frac{f}{30}\right)$

## 1.2 Методи вимірювання електромагнітного впливу рухомого складу на рейкові кола

Метод виміру гармонійних складових струму.

При випробуваннях вимірюють гармонійні складові  $I_f$  струму електровоза або електропоїзда основної складності в режимах роботи електрообладнання, що квазі встановилися, при консольному електропостачанні рухомого складу від однієї тягової підстанції на двоколійній ділянці [4].

При електротязі змінного струму вимірювання проводять під час роботи електровоза або електропоїзда на консолі довжиною 25 км (допускається імітація консольного електропостачання на ділянці довжиною 25 км шляхом включення до контуру тягового електропостачання відповідного реактансу).

При електротязі постійного струму на підстанції включають дволанковий семиконтурний фільтр з індуктивністю реакторів

відсмоктування 10 мГн та вільною ємністю понад 200 мкФ. Вимірювання на постійному струмі проводять під час роботи електровоза або електропоїзда на консолі понад 1,5 км з відповідним приведенням рівнів складових струму електровоза або електропоїзда до плеча завдовжки 25 км.

Вимірювання величини гармонік тягового струму проводять шляхом вимірювань рівнів гармонійних збурень у зазначених у таблиці 1.4 смугах частот струму електровоза або електропоїзда у всіх експлуатаційних режимах роботи електрообладнання рухомого складу, передбачених технічною документацією [4].

Гармонічні складові струму електровоза або електропоїзда визначають динамічному спектральному аналізу струму електровоза або електропоїзда, результатом якого є дискретний спектр усереднених (за час 300 мс) значущих гармонійних складових струму електровоза або електропоїзда в смузі частот 50-3450 Гц.

За виміряними складовими  $I_f$ , струму електровоза або електропоїзда розраховують психофотометричне значення напруги, що заважає  $U_{ш}$ .

Таблиця 1.4

Допустимі значення гармонічних складових струму електровозу або електропоїзду

Система електропостачання елекстровоза/ електропоїзда	Полоса частот гармонічних складових струму електропоїзда, Гц	Центральна частота полоси (номінальна частота сигнального струму пристрою СЦБ АЛС), Гц	Діюче значення гармонічних складових струму електровоза/ електропоїзда у полосі частот, А не більше
Система 3 кВ постійного струму	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
Система 25 кВ змінного струму 50 Гц	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
Системи 3 кВ постійного струму і 25 кВ змінного струму 50 Гц	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

### **1.3 Забезпечення електромагнітної сумісності тягової мережі з рейковими колами**

У відповідності до визначення Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) під електромагнітною сумісністю (ЕМС) розуміється здатність електротехнічного обладнання (приладу, апарата, пристрою) задовільно працювати із заданою якістю в певному електромагнітному середовищі і не створювати неприпустимого електромагнітного впливу на оточуюче середовище, а також на будь-яке інше технічне обладнання. Технічний регламент з ЕМС обладнання в Україні затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 29.08.2009, № 785. До потужних джерел електромагнітних завад відносять електрифіковані залізниці. Ці завади поділяються на внутрішні і зовнішні. До зовнішніх відносять лінії електропередач, системи зовнішнього електропостачання до тягових підстанцій, радіозв'язок, а також джерела які мають природне походження (електричні розряди, блискавка) та ін. Серед внутрішніх джерел існують електро- та радіотехнічне обладнання. Але найбільшим джерелом завад все ж таки є системи і пристрої тягового електропостачання, а саме: тягові підстанції, тягова мережа а також електрорухомий склад. Рейкові кола чутливі до електромагнітного впливу від тягового електропостачання, також чутливі до цього впливу повітряні і кабельні лінії телеуправління і телекомунікації, радіозв'язок [10].

ЕМС можна розуміти у достатньо широкому сенсі. При аналізі ЕМС для залізничного транспорту розглядається такі види впливу:

- кондуктивний вплив на рейкові кола (від 0 до 104 Гц) та на металеві оболонки кабелю, трубопроводи і інші металеві конструкції, що з'єднані з рейками безпосередньо або через провідність землі;
- індуктивний вплив на повітряні та кабельні лінії зв'язку (в діапазоні частот від 50 до 3450 Гц);

- електромагнітний вплив через радіо завади на частотах технологічного радіозв'язку і передачі даних в діапазоні частот від 30 кГц до 1 ГГц;

- електростатичний вплив.

Розглянемо детальніше вплив від тягової підстанції на рейкові кола.

На рівень ЕМЗ (електромагнітних завад) на шинах 10 кВ підстанції та в живильних колах апаратури РЦ впливають:

- амплітуди та фази гармонік мережі живлення 110 кВ порядків 5,7,11,13;
- тип перетворювального агрегату тягової підстанції;
- величина тягового струму;
- потужність мережі живлення 110 кВ (меншою мірою).

На рівень ЕМЗ у сигнальних колах апаратури РЦ найбільше впливають:

- режим роботи та тип електрорухомого складу;
- величина тягового струму;
- тип перетворювального агрегату тягової підстанції.

Умови, що створюють найгіршу електромагнітну обстановку в живильному та сигнальному колах апаратури РЦ, наступні:

- наявність в мережі живлення 110 кВ гармонік порядків  $u=5,7,11,13$ , якщо при цьому напрямок чергування фаз гармонік 5 і 11 - позитивний, а гармонік 7 і 13 - негативний,
- наявність двох і більше одиниць електрорухомого складу в режимі тяги в межах однієї електричної секції;
- наявність асиметрії опорів рейкових ниток.

Електрорухомий склад є джерелом завад при роботі в тяговому режимі на частотах сигнального струму РК, зокрема, електропоїздом ЕД4 створюється небезпечна завада на частоті 25 Гц, що перевищує

допустимий рівень в 1,5-2 рази за звичайних умов і в 2-2,5 рази за найгірших умов електромагнітної обстановки.

Після аналізу даних джерел ЕМЗ через живильні та сигнальні ланцюги апаратури РЦ, в загальному розумінні рекомендовані наступні заходи:

**Технічні рішення** стосуються забезпечення високої завадостійкості колійних приймачів рейкових кіл шляхом використання захисних фільтрів на вході колійних приймачів, що запобігають проходженню на вхід колійного приймача гармонійних завад з частотами, які відрізняються від частот сигнального струму, а також високою селективністю колійних приймачів, в яких вихідний сигнал, що характеризує стан рейкового кола, формується за двома селективними признаками а саме: за несучою частотою сигналу і частотою його модуляції (ТРК), або за частотою і фазою сигналу (ФЧРК), або за частотою сигналу і кодовими комбінаціями (кодові РК). При відповідності селективних ознак вимогам, рішення про стан рейкового кола формується в колійному приймачі за третім параметром. а саме, за рівнем сигнального струму на вході приймача [10].

Встановлювати в ланцюг шин тягових підстанцій трифазні фільтри для зменшення гармоній порядків 5,7,11,13.

Для тяги змінного струму частоту сигнального струму рейкових кіл вибирають відмінною від частоти 50 Гц та частот кратних 50 Гц, а саме  $(50 \cdot n)$  Гц, де  $n = 6, 12$ , що можуть виникнути в тяговій мережі постійного струму внаслідок роботи випрямлячів на тягових підстанціях і не недостатньої фільтрації випрямленого струму.

**Організаційні засоби** здійснення попередньої оцінки ЕМП на стадії проектування рейкових кіл та ділянок електропостачання, а також при проведенні дослідження на ЕМС перспективного рухомого складу (включаючи ЕПС з тиристорно-імпульсними перетворювачами та асинхронним приводом). Також організаційні засоби регламентовані

галузевими інструкціями, що передбачають обов'язкове випробування нових систем сигналізації та зв'язку і нових типів рухомого складу на електромагнітну сумісність перед вводом їх в експлуатацію, а також періодичним планово-попереджувальним обслуговуванням систем сигналізації, централізації, блокування (СЦБ) [10].

Збої АЛСН можуть виникати внаслідок намагніченості рейок, застарілої або неправильно відрегульованої апаратури, внаслідок намагнічення дросель-трансформаторів тяговим струмом.

З початком вводу в експлуатацію високошвидкісних поїздів нових типів з асинхронним тяговим приводом і електронними перетворювачами електричної енергії виникли додаткові і вагомі проблеми з ЕМС на Укрзалізниці. На початку третього тисячоліття в Україні були введені в експлуатацію такі локомотиви, типу ДС-3. Особливо ця проблема стосується таких електропоїздів, як "Хюндай" і "Шкода".

#### **1.4 Висновки за розділом, постановка мети та завдань дослідження**

З проведеного літературного огляду можна зробити такі висновки.

Електрофіковані залізниці є джерелом потужних електромагнітних завад, що впливають на системи сигналізації та зв'язку.

Вплив може бути такий, що заважає оперативній роботі на транспорті або небезпечний, що може привести до аварійної ситуації.

Для запобігання цьому необхідно проводити випробування пристроїв, що відповідають за безпеку руху поїздів на електромагнітну сумісність.

При цьому стає важлива комплексна проблема забезпечення точності вимірювання електромагнітних завад.

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).

У першому розділі було розглянуто норми електромагнітного впливу рухомого складу на рейкові кола, методи вимірювання електромагнітного впливу рухомого складу на рейкові кола, та питання у забезпеченні електромагнітної сумісності тягової мережі з рейковими колами і відомими видами джерел ЕМЗ. Саме у знайдені та усунені ЕМЗ полягає сучасне завдання дослідників та робітників залізниць. Завчасне урахування існуючих і можливих джерел ЕМЗ на стадії проектування систем та пристроїв залізниці і рухомого складу допоможе значно спростити вирішення питання ЕМЗ. Наступною кроком є спрощення та вдосконалення методів знаходження і виявлення ЕМЗ. Зазвичай для цього завдання використовують АЦП.

Для досягнення поставленої мети в роботі проаналізовано критерії вибору параметрів АЦП 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.

## 2. ПАРАМЕТРИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ АЦП. ТОЧНІСТЬ І РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ АЦП

### 2.1 Загальна характеристика АЦП

Серед вимірювального та тестового обладнання аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) є одним із найважливіших електронних пристроїв. АЦП перетворює напругу (аналоговий сигнал) у код, над яким мікропроцесор і програмне забезпечення виконують певні дії. Навіть при роботі тільки з цифровими сигналами, дуже часто використовується АЦП як компонент осцилографа, для дослідження аналогових характеристик [7].

Серед декількох типів архітектур АЦП, які є основними, існує безліч варіацій. Для кожного типу вимірювального обладнання можуть використовуватись абсолютно різні типи АЦП. У цифровому осцилографі не потрібна висока роздільна здатність, хоча використовується висока частота дискретизації. При використанні цифрових мультиметрів потрібна більша роздільна здатність, але можна знехтувати швидкістю вимірювання. Системи збору даних для загального призначення за цими параметрами займають проміжне місце між осцилографами та цифровими мультиметрами. Для такого типу обладнання застосовуються АЦП послідовного наближення чи сигма-дельта АЦП. Також слід згадати паралельні АЦП зі швидкісною обробкою аналогових сигналів, і інтегруючі АЦП з високими роздільними здатністю і стійкістю до завад.

На рис.2.1. показані можливості основних архітектур АЦП залежно від роздільної здатності та частоти дискретизації.

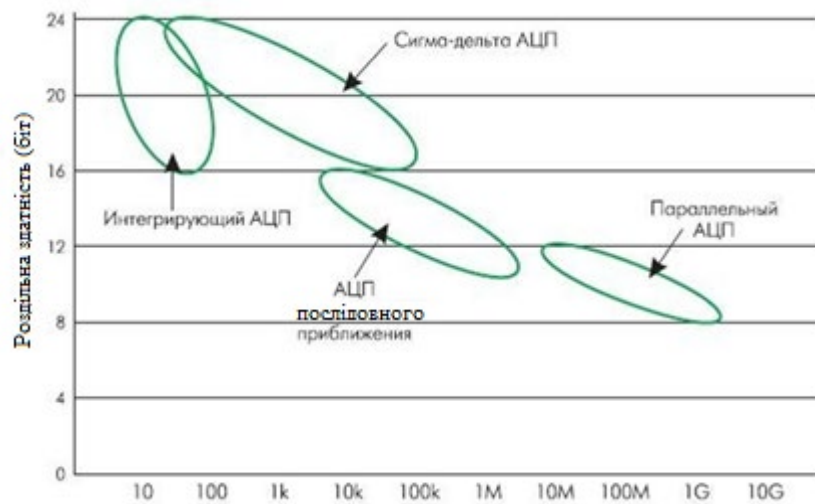


Рис. 2.1. Типи АЦП – роздільна здатність залежно від частоти дискретизації

## 2.2 Паралельні АЦП

Для високої швидкості обробки сигналів у осцилографах та інших вимірювальних пристроях застосовують паралельні АЦП. Швидкість може досягати 5Г ( $5 \times 10^9$ ) відліків/сек для стандартних пристроїв і 20Г відліків /сек для оригінальних розробок. У стандартній збірці паралельні АЦП мають роздільну здатність до 8 розрядів, але можуть бути і 10-ти розрядні версії.

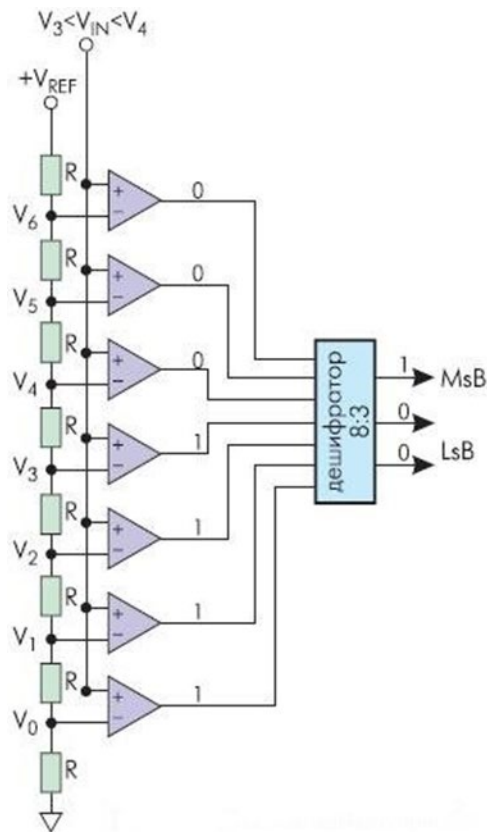


Рис. 2.2. АЦП паралельного перетворення

На рис. 2.2 показана блок-схема 3-х розрядного паралельного АЦП. У даному масиві компараторів, кожен порівнює вхідну напругу з індивідуальною опорною напругою. Опорна напруга для кожного з компараторів формується на вбудованому резистивному прецизійному дільнику. Початок значення опорної напруги дорівнює половині молодшого значущого розряду (LSB), і збільшуються при переході до кожного наступного компаратора з кроком, рівним  $V_{REF} / 2^3$ . В результаті для 3-х розрядного АЦП потрібно  $2^3 - 1$  або сім компараторів. А, наприклад, для 8-розрядного паралельного АЦП потрібно вже 255 (или  $(2^8 - 1)$ ) компараторів.

Зі збільшенням вхідної напруги компаратори послідовно встановлюють свої виходи в логічну одиницю замість логічного нуля, починаючи з компаратора, який відповідає за молодший розряд [7]. На рис. 2.2 вхідна напруга знаходиться в інтервалі між  $V_3$  і  $V_4$ , 4 нижні

компаратори мають на виході "1", верхні три компаратора - "0". Дешифратор перетворює  $(2^3-1)$  - розрядне цифрове слово з виходів компараторів у двійковий 3-х розрядний код.

Паралельні АЦП – мають деякі недоліки. Цей вид АЦП споживає значну кількість енергії, тому що використовується велика кількість компараторів, що не дозволяє використовувати їх у пристроях з батарейним живленням.

### 2.3 АЦП послідовного наближення

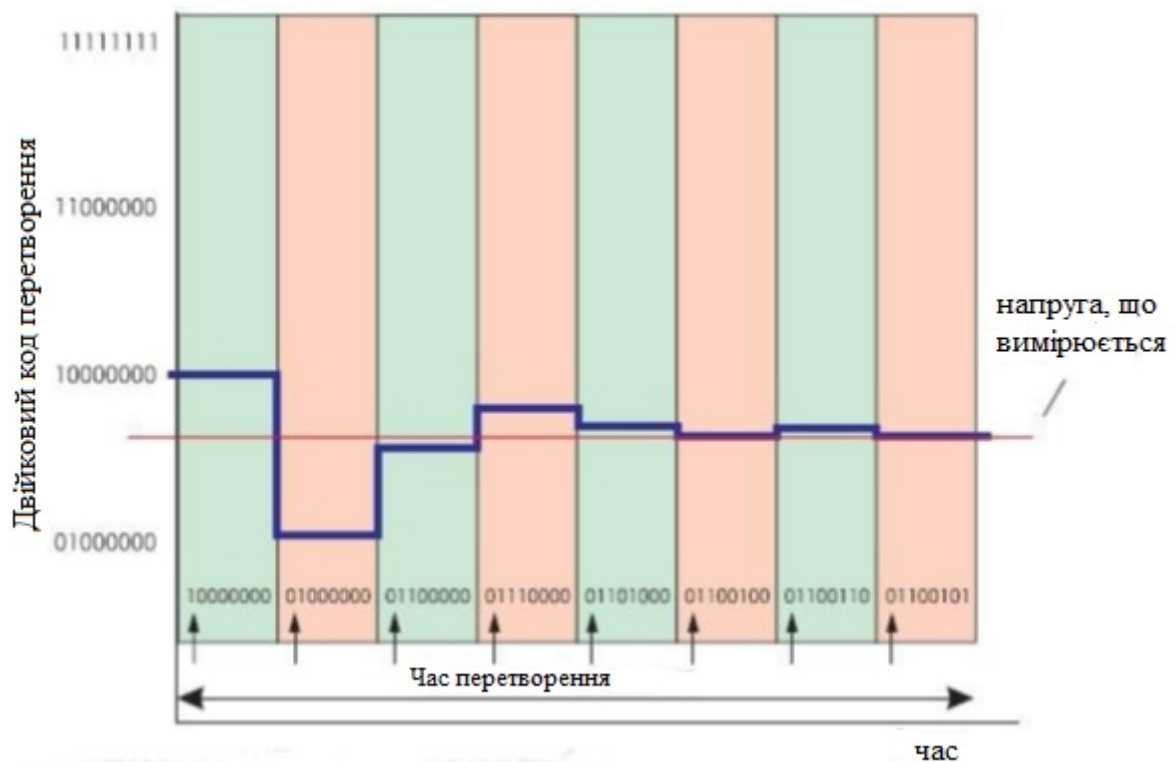
Для роздільної здатності 12, 14 або 16 розрядів і невисокої швидкості перетворення, при низькому енергоспоживанні і ціні, застосовують АЦП послідовного наближення. Використовується у системах збору даних. Такі АЦП дозволяють вимірювати напругу з точністю до 16 розрядів із частотою дискретизації від 100К ( $1 \times 10^3$ ) до 1М ( $1 \times 10^6$ ) відліків/сек.

Основою АЦП послідовного наближення є спеціальний регістр. На початку циклу перетворення всі виходи цього регістру встановлюються в логічний 0, крім першого (старшого) розряду. На виході внутрішнього цифроаналогового перетворювача (ЦАП) значення сигналу дорівнює половині вхідного діапазону АЦП. А вихід компаратора перемикається в стан, що визначає різницю між сигналом на виході ЦАП і вхідною напругою, що вимірюється.



Рис. 2.3. АЦП послідовного наближення

Наприклад, для 8-розрядного АЦП послідовного наближення (рис. 2.4) виходи регістру при цьому встановлюються в "10000000". Якщо вхідна напруга менше половини вхідного діапазону АЦП, тоді вихід компаратора набуде значення логічного 0. Це дає регістру послідовного наближення команду переключити свої виходи в стан "01000000", що відповідно призведе до зміни вихідної напруги з ЦАП, що подається на компаратор. Якщо при цьому вихід компаратора, як і раніше, залишався б у "0", то виходи регістру переключилися б у стан "00100000". Але на такті перетворення вихідна напруга ЦАП менше, ніж вхідна напруга (рис. 2.4), і компаратор переключається в стан логічної 1. Це наказує регістру послідовного наближення зберегти "1" у другому розряді і подати "1" на третій розряд. Описаний алгоритм роботи знову повторюється до останнього розряду. Таким чином, АЦП послідовного наближення потрібен один внутрішній такт перетворення для кожного розряду або N тактів для N-розрядного перетворення [7].



## Рис. 2.4. Перетворення на АЦП послідовних наближень

У роботі АЦП послідовного наближення є особливість з перехідними процесами у внутрішньому ЦАП. Напряга на виході ЦАП кожного з  $N$  внутрішніх тактів перетворення має встановлюватися за однаковий проміжок часу. Але цей проміжок у перших тактах значно більший, ніж у останніх. Тому час перетворення 16-розрядного АЦП послідовного наближення більш ніж у два рази перевищує час перетворення 8-розрядного АЦП даного типу.

### 2.4 Сігма-дельта АЦП

Для більшості випадків, роздільна здатність є значно більш важливою складовою вимірювань, ніж швидкість перетворення. У сигма-дельта АЦП роздільна здатність до 24 розрядів, але низька швидкість перетворення. У 16 розрядної сигма-дельта АЦП частота дискретизації до 100К відліків/сек, а у 24 розрядної ця частота падає до 1К відліків/сек. Сигма-дельта АЦП використовується для вимірювання тиску, температури, ваги тощо [7].

Сигма-дельта АЦП належить до класу інтегруючих АЦП. У ньому частота проходження вибірок істотно перевищує частоту появи відліків на виході АЦП (частоту дискретизації). Ця частота проходження вибірок називається частотою передискретизації. Так, сигма-дельта АЦП зі швидкістю перетворення 100К відліків/сек, у якому використовується частота передискретизації в 128 разів більше, буде проводити вибірку значень вхідного аналогового сигналу із частотою 12.8М відліків/сек.

Блок-схема сигма-дельта АЦП першого порядку наведено на рис. 2.5.

Аналоговий сигнал подається на інтегратор, виходи якого приєднані до компаратора, який у свою чергу приєднаний до 1-розрядного ЦАП у петлі зворотного зв'язку. Шляхом серії послідовних ітерацій інтегратор, компаратор, ЦАП та суматор дають потік послідовних бітів, в якому міститься інформація про величину вхідної напруги.

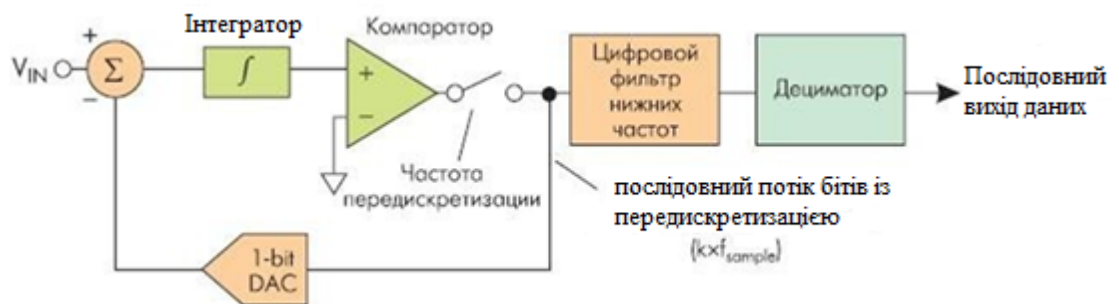


Рис. 2.5. Сігма-дельта АЦП

Цифрова послідовність подається на фільтр нижніх частот для усунення частот вище частоти Котельникова. Далі дециматор проріджує дані. Дециматор залишатиме 1 біт з кожних отриманих 128 у вихідній цифровій послідовності.

Час встановлення ФНЧ є фактором, який необхідно враховувати при стрибкоподібній зміні вхідного сигналу. При перемиканні входів мультиплексора або зміні меж вимірювання необхідно почекати, доки пройдуть декілька відліків АЦП, і лише потім зчитувати дані.

Внутрішні вузли сигма-дельта АЦП можуть бути виконані інтегральним способом на площі кремнієвого одного кристала. Це помітно знижує вартість АЦП та підвищує стабільність його роботи АЦП.

## 2.5 Інтегруючі АЦП

У цифрових мультиметрах використовують АЦП двотактного інтегрування, завдяки їх високим роздільною здатністю і завадозахищеності.

На рисунку 2.6 показано принцип роботи АЦП двотактного інтегрування. Вхідний сигнал заряджає конденсатор протягом фіксованого періоду часу, який зазвичай становить один період частоти мережі живлення (50 або 60Гц) або кратен йому [7]. При інтегруванні вхідного сигналу протягом проміжку часу такої тривалості високочастотні завади пригнічуються. Одночасно унеможлиблюється вплив нестабільності напруги мережного джерела живлення на точність перетворення. Це тому, що значення інтеграла від синусоїдального сигналу дорівнює нулю, якщо інтегрування здійснюється в часовому інтервалі, кратному періоду зміни синусоїди.

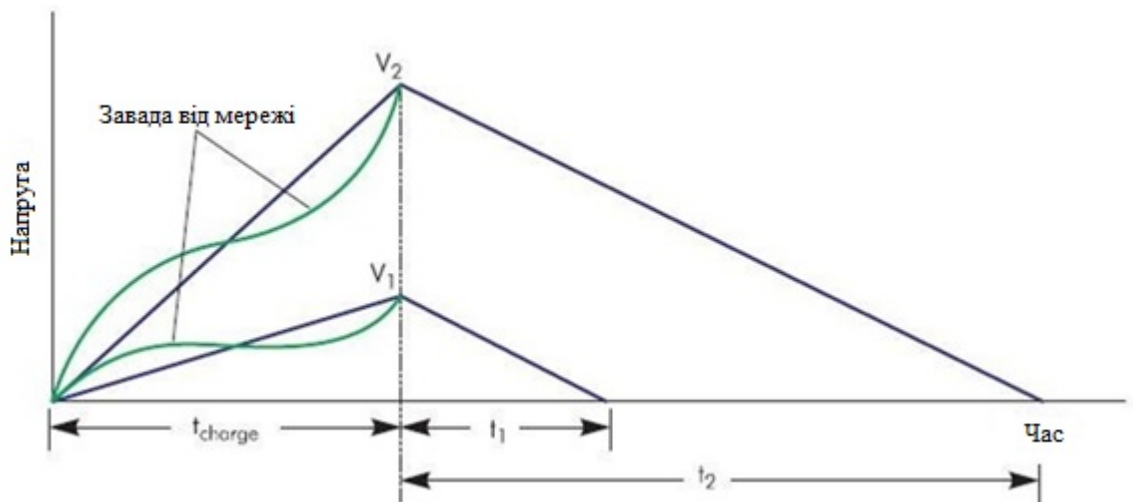


Рис. 2.6. Інтегруючий АЦП. Зеленим кольором показана завада від мережі (1 період)

## 2.6 Специфікація АЦП

Для вдалого вибору АЦП, дуже важливо правильно розуміти дані технічної документації.

Найчастіше плутаними параметрами є роздільна здатність і точність. Роздільна здатність АЦП – це на скільки сегментів може бути поділений вхідний діапазон вимірюваного аналогового сигналу. Точність характеризує сумарне відхилення результату перетворення від свого ідеального значення для даної вхідної напруги. Тобто роздільна здатність характеризує потенційні можливості АЦП, а сукупність точнісних параметрів визначає реалізованість такої потенційної можливості [7].

АЦП перетворює вхідний аналоговий сигнал у вихідний цифровий код. Але процес перетворення не ідеальний: на нього впливають безліч факторів. Тому цифровий код на виході АЦП визначається похибкою. Є також похибки, що дає сам перетворювач. Похибки поділяють на: статичні та динамічні.

## **2.7 Статична похибка**

Зазвичай, за допомогою АЦП вимірюють низькочастотний сигнал, що повільно змінюється (наприклад, від датчика температури, тиску, від тензодатчика і т.п.), коли вхідна напруга пропорційна щодо постійної фізичної величини. Основним параметром при цьому є статична похибка виміру. У специфікації АЦП цей тип похибки включає адитивну похибку (Offset), мультиплікативну похибку (Full-Scale), диференційну нелінійність (DNL), інтегральну нелінійність (INL) та похибку квантування. Ці п'ять характеристик дозволяють описати статичну похибку АЦП.

## **2.8 Ідеальна передатна характеристика АЦП**

Передатна характеристика АЦП – це функція залежності коду на виході АЦП від напруги на його вході. Такий графік є кусково-лінійною функцією з  $2N$  "ступенів", де  $N$  - розрядність АЦП [7]. Кожен

горизонтальний відрізок цієї функції відповідає одному із значень вихідного коду АЦП (див. рис. 2.7). Ідеальна передатна характеристика буде прямою лінією, що проходить через початок координат.

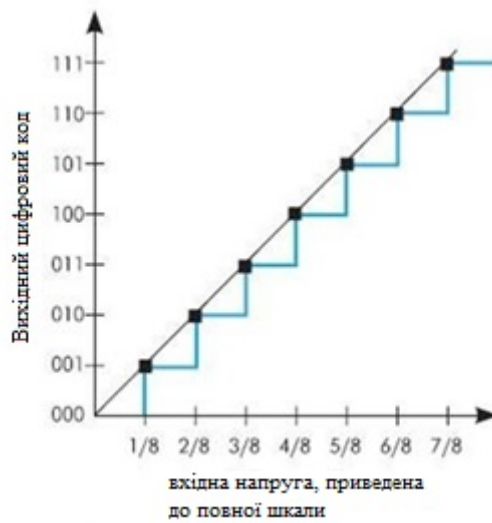


Рис. 2.7. Ідеальна передатна характеристика 3-х розрядного АЦП

Рис. 2.7 ілюструє ідеальну передатну характеристику для 3-х розрядного АЦП із контрольними точками на межах переходу коду. Вихідний код набуває найменшого значення (000b) при значенні вхідного сигналу від 0 до 1/8 повної шкали (максимальне значення коду цього АЦП). Також слід зазначити, що АЦП досягне значення коду повної шкали (111b) при 7/8 повної шкали, а не при значенні повної шкали. Т.о. перехід у максимальне значення на виході відбувається не при напрузі повної шкали, а при значенні, меншому на найменший розряд (LSB), ніж вхідна напруга повної шкали. Передатна характеристика може бути реалізована зі зміщенням  $-1/2$  LSB. Це досягається зміщенням передавальної характеристики вліво, що зміщує похибку квантування з діапазону  $-1...0$  LSB діапазон  $-1/2 ... +1/2$  LSB.

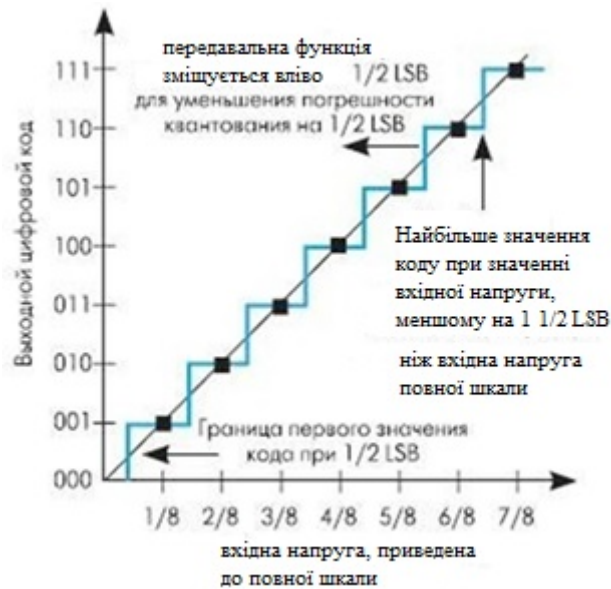


Рис. 2.8. Передатна характеристика 3-х розрядного АЦП зі зміщенням на  $-1/2\text{LSB}$

Ідеальної передавальної характеристики не існує, оскільки присутній технологічний розкид параметрів під час виготовлення інтегральних мікросхем. Відхилення від ідеальної передавальної характеристики є статична похибка АЦП та наводиться вона у технічній документації.

## 2.9 Адитивна похибка

Ідеальна передатна характеристика АЦП перетинає початок координат, а перший перехід коду відбувається при досягненні значення  $\text{LSB}$  [7]. Адитивна похибка (похибка усунення) може бути визначена як зміщення всієї передавальної характеристики вліво або вправо щодо осі вхідної напруги, як показано на рис.2.9. Таким чином, визначення адитивної похибки АЦП навмисно включено зміщення  $1/2\text{LSB}$ .



Рис. 2.9. Адитивна похибка (Offset Error)

## 2.10 Мультиплікативна похибка

Мультиплікативна похибка це різниця між ідеальною і реальною передатними характеристиками в точці максимального вихідного значення за умови нульової адитивної похибки. Це проявляється як зміна нахилу передавальної функції, що ілюструє рис. 2.10.



Рис. 2.10. Мультиплікативна похибка (Full-Scale Error)

## 2.11 Диференційна нелінійність

При ідеальній передавальній характеристиці АЦП ширина кожної "сходинки" має бути однаковою. Різниця в довжині горизонтальних відрізків цієї шматково-лінійної функції з  $2N$  "ступенів" є диференційною нелінійністю (DNL).

Розмір найменшого значущого розряду в АЦП становить  $V_{ref}/2N$ , де  $V_{ref}$  - опорна напруга,  $N$  - роздільна здатність АЦП. Різниця напруг між кожним кодовим переходом повинна дорівнювати величині LSB [7]. Відхилення цієї різниці від LSB визначаються як диференційна нелінійність. На малюнку це показано як нерівні проміжки між кроками коду або як розмитість меж переходів на передавальній характеристиці АЦП.

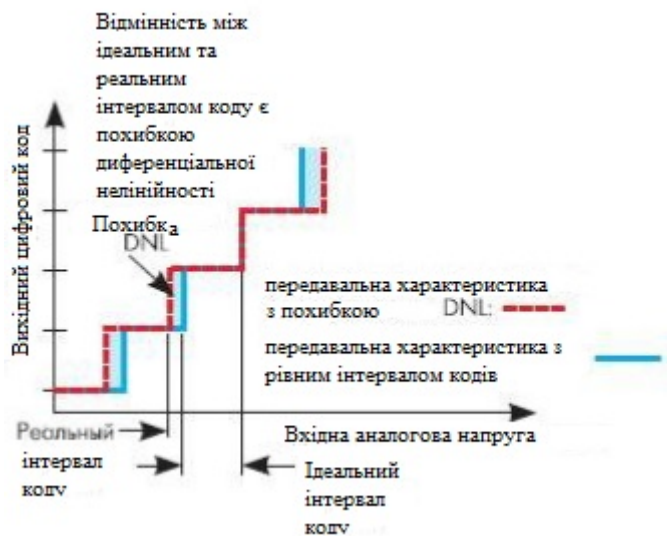


Рис. 2.11. Диференційна нелінійність (DNL)

## 2.12 Інтегральна нелінійність

Інтегральна нелінійність (INL) – це відхилення лінійної функції передавальної характеристики АЦП від прямої лінії, як показано на рис. 2.12. Зазвичай передатна функція з інтегральною нелінійністю апроксимується прямою лінією методом найменших квадратів. Часто

апроксимуюча пряма просто з'єднують найменше і найбільше значення. Інтегральну нелінійність визначають порівнянням напруг кодових переходів. Якщо переходи відбуватимуться при значеннях вхідної напруги, точно кратних LSB, це ідеальне АЦП. У реальному перетворювачі завжди існує похибка. Різниця між "ідеальними" рівнями напруги, при яких відбувається кодовий перехід, та їх реальними значеннями виражається в одиницях LSB і називається інтегральною нелінійністю.

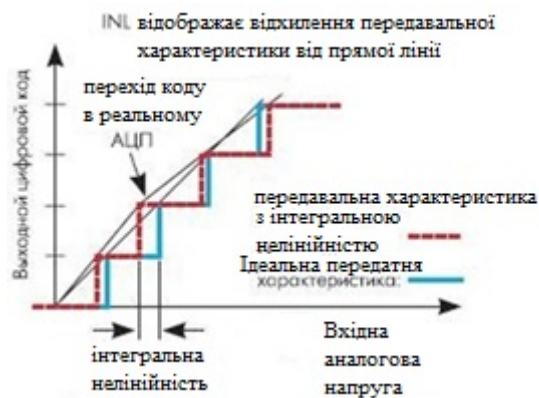


Рис. 2.12. Інтегральна нелінійність (INL)

### 2.13 Похибка квантування

Найбільш істотною похибкою - є похибка квантування. Похибка квантування - це похибка, викликана значенням кроку квантування і визначається як величини найменшого розряду (LSB) [7]. Вона не може бути виключена в аналого-цифрових перетвореннях, так як є невід'ємною частиною процесу перетворення, визначається роздільною здатністю АЦП і не змінюється від АЦП до АЦП з рівною роздільною здатністю.

### 2.14 Динамічні характеристики

Динамічні характеристики АЦП визначають за допомогою спектрального аналізу за результатами виконання швидкого перетворення Фур'є (БПФ) над масивом вихідних значень АЦП, відповідних деякому вхідному тестовому сигналу.

На рис. 2.13 представлений частотний спектр сигналу, що вимірюється. Нульова гармоніка це основна частота вхідного сигналу. Решта це шум з гармонічними спотвореннями, тепловий шум, шум  $1/f$  і шум квантування. Складові шуму можуть потрапляти на вхід АЦП, а можуть генеруватись і самим АЦП. Гармонічні спотворення, наприклад, можуть бути присутні у вимірюваному сигналі та одночасно генеруватися АЦП у процесі перетворення.

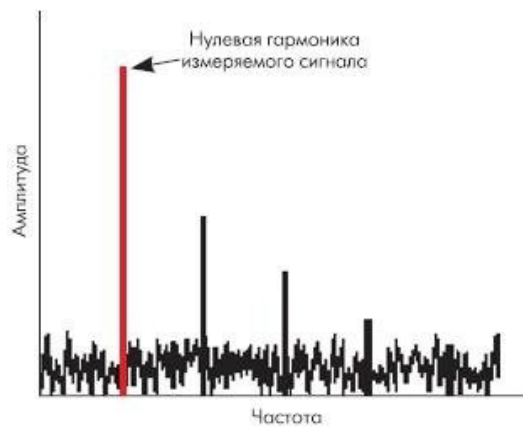


Рис. 2.13. Результат виконання БПФ над вихідними даними АЦП

## 2.15 Відношення "сигнал/шум"

Відношення "сигнал/шум" (SNR) - це відношення середньоквадратичного значення величини вхідного сигналу до середньоквадратичного значення величини шуму (за винятком гармонічних спотворень), виражене в децибелах:

$$\text{SNR(dB)} = 20 \log [ V_{\text{signal(rms)}} / V_{\text{noise(rms)}} ] \quad (2.1)$$

Це значення дозволяє визначити частку шуму в сигналі, що вимірюється по відношенню до корисного сигналу.

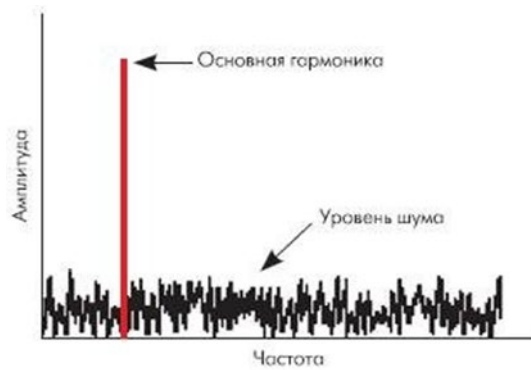


Рис. 2.14. SNR - Відношення "сигнал/шум"

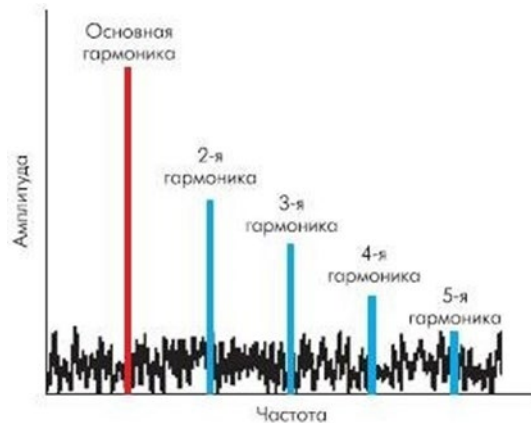


Рис. 2.15. БПФ відображає гармонічні спотворення

Шум, що вимірюється при розрахунку SNR, не містить гармонійних спотворень. Але цей шум включає шум квантування. Саме шум квантування може обмежувати можливості перетворювача теоретично кращим значенням відношення сигнал/шум, яке визначається як:

$$\text{SNR}(\text{db}) = 6.02 N + 1.76, \quad (2.2)$$

де  $N$  – роздільна здатність АЦП.

Спектр шуму квантування АЦП стандартних архітектур має рівномірний розподіл за частотою. Через це величина цього шуму не може бути зменшена шляхом збільшення часу перетворення та подальшого усереднення результатів. При використанні АЦП з більшою розрядністю, шум квантування може бути знижений [7].

У сигма-дельта АЦП спектр шуму квантування розподілений за частотою нерівномірно – він зміщений у бік високих частот. Тому, при збільшенні часу вимірювання, накопичуючи і потім усереднюючи отриману вибірку (фільтр нижніх частот), можна отримати результат вимірювань з більш високою точністю.

Також існують інші джерела шуму АЦП, а саме: тепловий шум, шум складової  $1/f$  і джиттер опорної частоти.

## 2.16 Загальні гармонічні спотворення

Нелінійність результатів перетворення даних призводить до появи гармонійних спотворень ("викидів" у спектрі частот на парних та непарних гармоніках вимірюваного сигналу) (рис. 2.15).

Ці спотворення визначають, як загальні гармонічні спотворення (THD). Вони визначаються як:

$$\text{THD} = 20 \log \left[ \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \right] \quad (2.3)$$

Величина гармонійних спотворень зменшується на високих частотах до точки, де амплітуда гармонік стає менше, ніж рівень шуму. Таким чином, якщо ми аналізуємо внесок гармонійних спотворень у результати перетворення, це можна робити або у всьому спектрі частот, обмежуючи при цьому амплітуду гармонік рівнем шуму, або обмежуючи

смугу частот для аналізу. Наприклад, якщо нашій системі стоїть ФНЧ, то високі частоти нам просто нецікаві і високочастотні гармоніки не підлягають обліку.

## 2.17 Відношення "сигнал/шум и спотворення"

Саме відношення "сигнал/шум і спотворення" (SiNAD) визначає шумові властивості АЦП. SiNAD враховує величину як шуму, так і гармонійних спотворень стосовно корисного сигналу. SiNAD розраховується за такою формулою:

$$\text{SiNAD} = 20 \log \left[ \frac{V_1}{\sqrt{V_2^2 + \dots + V_n^2 + V_{\text{noise}}^2}} \right] \quad (2.4)$$

## 2.18 Динамічний діапазон, вільний від гармонік

Динамічний діапазон, який є вільним від гармонік, визначається як різниця між величиною вимірюваного сигналу і найбільшим піком спотворень (див. рис.2.16). Цей динамічний діапазон позначається як SFDR і обмежений максимальною амплітудою гармоніки паразитних викидів на виході АЦП у його робочих частотах.

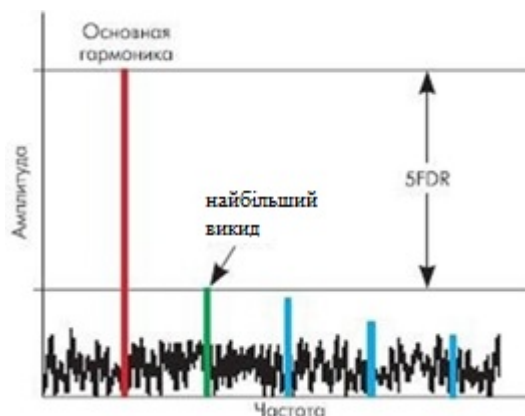


Рис. 2.16. Динамічний діапазон, вільний від гармонік

### **3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИБОРУ АЦП ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАРМОНІК В СПЕКТРІ ТЯГОВОГО СТРУМУ**

#### **3.1 Загальна інформація про АЦП. Проблеми електромагнітної сумісності**

Завдяки впровадженню сучасного швидкісного руху поїздів, проблема електромагнітної сумісності (ЕМС) набула максимальної актуальності [20-22]. Як вже було зазначено, рухомий склад є одним із головних джерел електромагнітних завад на електрифікованих залізницях. Будь які нові типи рухомого складу повинні пройти випробування на ЕМС із системами СЦБ до вводу їх в постійну експлуатацію [24,25]. Випробування в процесі експлуатації рухомого складу є невідомою частиною досліджень. Максимальні значення електромагнітних завад від електрорухомого складу наведені в різних стандартах та представлені в табл. 3.1. Середньоквадратичні значення (СКЗ) електромагнітних завад у тяговому струмі (ТС) в діапазонах частот вимірюються за допомогою фільтрації тягового струму паралельними фільтрами на заданій полосі пропускання або з використанням швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [23]. Тяговий струм за своєю природою не є періодичним, тому для аналізу спектру використовують короткочасне перетворення Фур'є.

Таблиця 3.1.

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

Електромагнітні завади в лініях сигналізації та зв'язку здатні спричинити дуже небезпечні збої та помилки в роботі систем централізованого управління рухом поїздів. Тому до точності вимірювання електричних завад пред'являються суворі вимоги [26]. За нормативами, тривалість завад з частотами не повинна перевищувати 0,3 с.

Апаратно-програмний комплекс (АПК) для вимірювання гармонійних завад в тяговому струмі складається з: первинного безконтактного перетворювача тягового струму у напругу (П), пристрою

узгодження (УП), аналогового антиалайзінгового фільтру (АФ), аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) і програмного комплексу (ноутбук), який виконує швидке перетворення Фур'є з представленням спектру ТС у табличному або графічному вигляді (рис. 3.1). В якості первинного перетворювача використовується котушка Роговського або датчик струму за основою роботи якого лежить ефект Холла. Частота зрізу НЧ антиалайзінгового фільтру вибирається з урахуванням частоти Найквіста.

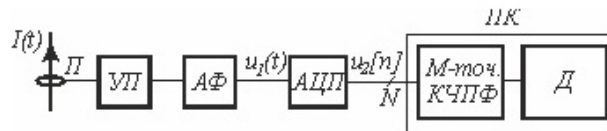


Рис. 3.1. Структурна схема АПК для спектрального аналізу тягового струму

Параметри і характеристики АПК мають задовольняти вимогам, щодо параметрів тягового струму, а також нормативним документам щодо точності визначення значення струму, частоти (частотних інтервалів) і тривалості гармонійних завад.

Параметри описання точності АЦП, можуть по різному розумітися і описуватись у технічних специфікаціях виробників.

АЦП це лише один з елементів всього апаратно-програмного комплексу для вимірів. І для раціонального вибору параметрів АПК необхідно враховувати параметри усіх елементів вимірювального комплексу і їх взаємозв'язок.

Програмна частина комплексу виконує спектральний аналіз короткочасним перетворенням Фур'є (КЧПФ). Для певних цілей обирають певний тип віконної функції, її параметри, і параметри КЧПФ.

Детальної інформації щодо вибору параметрів апаратної і програмної частини вимірювального комплексу для забезпечення необхідної точності і визначення параметрів гармонік тягового струму в літературі знайти досить важко.

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.

### **3.2 Похибки АПК при вимірювання параметрів гармонік**

Загальна відносна похибка АПК має у своєму складі похибки від підсистем комплексу. Вони є незалежними між собою і носять випадковий характер [26]. Беручи до уваги це, загальна відносна похибка може бути визначена, як СКЗ від відносних похибок, виникаючих в окремих ланках пристрою:

$$\delta_{total} = \sqrt{\sum_i \delta_i^2} \quad (3.1)$$

Статичні параметри описують чотири типи похибок. Вони можуть виникати внаслідок зсуву нуля, зміни коефіцієнта підсилення, інтегральної та диференціальної нелінійності.

Похибка зсуву нуля це процес, при яму існує паралельне зміщення реальної характеристики АЦП вздовж осі абсцис. Визначається вона як дійсне значення вхідної напруги в точці характеристики перетворення з віссю, що відповідає номінальному нульовому значенню цієї напруги.

Абсолютна та відносна приведена похибка зміщення нуля визначається як:

$$\varepsilon_{OE} = U_{IN0\_1} - \frac{U_{LSB}}{2}; \quad (3.2)$$

$$\delta_{FSR} = \frac{\varepsilon_{OE}}{U_{FSR}} \cdot 100\%. \quad (3.3)$$

Похибкою повної шкали є відносна різниця між реальним і ідеальним значеннями повної шкали при відсутності зсуву нуля, і відносна похибка повної шкали визначається як:

$$\delta_{FSR} = \frac{\varepsilon_{FSR}}{U_{FSR}} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

За допомогою налаштування аналогової частини схеми і корекції обчислювального алгоритму цифрової частини пристрою, похибки повної шкали та зсуву нуля можуть бути зменшені [26].

Похибка коефіцієнта перетворення характеризується відхиленням реального коефіцієнта перетворення АЦП від номінального. Ця похибка є мультиплікативною.

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

Диференціальна нелінійність АЦП у вибраній точці характеристики знаходиться, як різниця між значенням шагу перетворення в даній точці і середнім значенням шагу перетворення. В специфікаціях на АЦП значення диференціальної нелінійності надається у долях від молодшого значущого розряду LSB або процентах від повної шкали.

Похибки квантування існують, як наслідок обмеженої розрядності АЦП. Нажаль, цей недолік не може бути усунений для жодного типу аналого-цифрового перетворювання.

Абсолютна величина помилки квантування відліків знаходиться в межах від нуля до половини МЗР. Амплітуда сигналу на вході, у більшості випадках значно більша, ніж МЗР. В цьому випадку у помилці квантування рівномірний розподіл і вона некорельована з сигналом [26].

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

Зазвичай, апертурна похибка обумовлена нерівномірністю (флуктуацією) вибірки відліків внаслідок явища тремтіння фронту синхросигналу (clock jitter). На низьких частотах апертурна похибка має досить невеликі значення, але ця похибка на високих частотах може суттєво вплинути на результат вимірювань. Якщо апертурна похибка менше по значенню ніж похибка квантування, то її можна не брати до уваги.

### 3.3 Критерії вибору параметрів і характеристик АЦП

При виборі АЦП головним чином приділяється увага до його параметрів, головними з яких є частота дискретизації, розрядність, роздільна здатність, діапазон вхідної напруги, похибки квантування, не лінійність, апертурна похибка (джитер) та інші. Залежно від застосування вибирається необхідна частота дискретизації АЦП, а саме частота Найквіста сигналу, що досліджується, яка відповідно до теореми Котельнікова, і не може бути меншою ніж двократна частота сигналу. Для тягового струму за нормативними документами, максимальна частота гармоніки, яку необхідно контролювати, дорівнює 5555 Гц. Значення частоти дискретизації вибирається з певним запасом у межах 20...25 кГц.

Для забезпечення потрібної частоти дискретизації придатними є два типи АЦП: послідовного наближення і сігма-дельта АЦП. 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 даній роботі дослідження були проведені для АЦП послідовного наближення з розрядністю 10-16 біт.

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

У АЦП цього типу одночасно є як висока швидкість так і необхідна роздільна здатність. Хоча похибка може збільшуватись при відсутності пристрою вибірки зберігання.

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, дорівнює:

$$DR_{TC} = 20 \lg \left( \frac{I_o}{I_{\min}} \right), (dB). \quad (3.5)$$

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

Найбільшого значення динамічний діапазон має у змінному тяговому струму. Виходячи з цього в даній роботі буде розглядатися саме змінний тяговий струм, хоча це не є обмеженням для дослідження.

Максимально допустимі рівні (СКЗ) гармонік тягового струму за умовами безпечного функціонування рейкових кіл наведені у табл. 3.1.

Розраховані значення динамічного діапазону для максимально-допустимих рівнів гармонійних завад в інтервалах частот, які знаходяться у межах 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. 3.1) при значенні основної гармоніки тягового струму наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2.

Значення динамічного діапазону для максимально-допустимих рівнів гармонійних завад

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

Для забезпечення нормальної, безперебійної роботи вимірювального комплексу значення динамічного діапазону АПК мають бути більшими, ніж розраховані у табл. 3.2 при можливих тимчасових комутаційних збільшеннях тягового струму, а також для врахування додаткових факторів, непередбачених розрахунковими формулами:

$$DR_{АПК} \geq DR_N + D_0 + D_{ad} \quad (\text{дБ}), \quad (3.6)$$

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

$$K_0 = \frac{I_{0\max}}{I_0}; \quad (3.7)$$

$D_{ad}$  враховує непередбачені при розрахунках фактори. На практиці рекомендовано брати це значення на рівні  $D_{ad} \approx (0,5..1) \text{ дБ}$  [27].

Приймаючи до уваги те, що вхідний перетворювач тягового струму П і антиалайзінговий фільтр АФ вимірювального комплексу (рис. 3.1),

вибрані таким чином, що в межах від нульового до максимального значення тягового струму їх передаточна характеристика є лінійною, динамічний діапазон АПК визначається, динамічним діапазоном АЦП.

Забезпечення необхідного динамічного діапазону АПК виконується шляхом правильного вибору розрядності АЦП з урахуванням впливу ШПФ.

Роздільна здатність АЦП це теоретичне число станів ( $2^N$ ), які АЦП може розрізнити, де  $N$  – розрядність (кількість біт) перетворювача. Роздільна здатність АЦП характеризує потенційно досяжну точність вимірів. 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:

$$U_{LSB} = \frac{U_{FSR}}{2^N}, \quad (3.8)$$

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 частіше всього дорівнює рівню, який був обумовлений шумом АЦП. Шум АЦП буває різним, але найбільшу увагу приділяють шуму квантування.

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

$$SNR = 10 \lg \left( \frac{U_{Signal}^2}{U_{Noise}^2} \right) \text{ (дБ)}. \quad (3.9)$$

Шум квантування обумовлений зміною вихідної напруги АЦП у вигляді пилкоподібної 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 [27]

$$SNR = 6,02N + 1,76 \text{ (дБ)}. \quad (3.10)$$

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

$$SNR = 6,02N + 1,76 + 10 \lg \frac{F_s}{2BW} \text{ (дБ)}. \quad (3.11)$$

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 [27]

$$SNR = 6,02N + 1,76 + 10 \lg \frac{M}{2} \text{ (дБ)}. \quad (3.12)$$

Максимальна вхідна напруга як надходить на вход АЦП, рівна максимальному тяговому струму, має дорівнювати не більшою за значенням ніж напруга повної шкали  $U_{FSR}$ .

Значення динамічного діапазону АЦП згідно (3.6) має бути

$$DR_{АЦП} \geq DR_N + D_0 + D_{ad} \text{ (дБ)}. \quad (3.13)$$

АЦП має забезпечувати перетворення напруги  $U_f$ , яка дорівнює мінімальній гармоніці частотою  $f$ , яка регламентована нормативною документацією (табл. 3.1), з заданою абсолютною похибкою  $\Delta U_f$ . Відносна похибка вимірювання дорівнює

$$\delta_{\text{АЦП}_f} = \frac{\Delta U_f}{U_f}. \quad (3.14)$$

В якості  $U_f$  в (3.14) необхідно обирати значення  $U_{Nf}$ , яке дорівнює максимально допустимому значенню струму гармоніки з частотою  $f$  (табл. 3.1).

Беручи до уваги, що перетворювач струму і фільтр є лінійними в динамічному діапазоні, , відповідно до (3.7) можна записати

$$K_0 = \frac{U_{FSR}}{U_0} \quad (3.15)$$

Для вимірювання напруги, яка надходить на вхід АЦП з абсолютною похибкою  $\Delta U_f$ , значення похибки квантування  $U_{LSB}/2$  не може бути більше ніж  $\Delta U_f$ :

$$U_{LSB} / 2 \leq \Delta U_f. \quad (3.16)$$

Динамічний діапазон АЦП який задає необхідну точність має бути:

$$DR_{\text{АЦП}} = 201g \left( \frac{U_{FSR}}{U_{LSB}} \right) = 201g \left( \frac{U_{FSR}}{2 \Delta U_f} \right). \quad (3.17)$$

З урахуванням (3.14) - (3.17) рівняння (3.13) можна записати у вигляді:

$$DR_{\text{АЦП}} \geq DR_N + D_0 + D_\delta + D_{ad} \quad (\text{дБ}), \quad (3.18)$$

де

$$D_\delta = 201g \left( \frac{1}{2\delta} \right) \quad (3.19)$$

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

Для конкретної задачі необхідний динамічний діапазон АЦП визначається за формулою (3.18), з якої можна отримати розрядність

АЦП. Для визначеної розрядності  $N$  за формулою (3.12) можна знайти відношення "сигнал-шум" при  $M$ -точковому швидкому перетворенні Фур'є. Далі знаходимо ефективне число біт АЦП за формулою [27]:

$$ENOB = \frac{SNR - 1,76}{6,02} \quad (3.20)$$

### 3.4 Результати моделювання

Для дослідження впливу параметрів АЦП на його динамічні властивості було обрано модель, де використовується синтезований тестовий змінний струм з частотою 50 Гц. Значення діючої напруги цього струму було обрано пропорційним діючому значенню тягового струму, рівень якого складає 200 А. Відповідно до максимально-допустимих струму значень були обрані діючі значення гармонійних завад в складі тестового струму з частотами 25, 420, 480, 580, 720, 780, 4545, 5000 і 5555 Гц при виконанні умов безпечного функціонування пристроїв СЦБ (табл. 3.1).

Обрана тестова напруга в комп'ютерній моделі є аналогом напруги після перетворювача струму у вимірювальному апаратно-програмному комплексі. Коефіцієнт запасу АЦП для вхідної напруги  $K_0$  був обраний на рівні 0.9 від напруги повної шкали АЦП. Рівень 20480 Гц був обраний як рівень частоти дискретизації АЦП. Цифровий сигнал був оброблений швидким перетворенням Фур'є з використанням прямокутного вікна довжиною  $N_W = 4096$  відліків сигналу. Число точок  $M$  обраний також як 4096. Для того, щоб витримувалося умова когерентності для основної гармоніки спектру, були обрані параметри ШПФ, які зменшують розмивання спектру і підвищують точність визначення амплітуди гармонік.

Рівень шуму у спектрі тестового струму (в ідеальному випадку) для АЦП розрядністю 10, 12, 14, 16 біт (рис. 3.2) визначається як шум квантування, який є зменшеним на величину  $PG = 10 \lg \frac{M}{2}$  Рівень шумів при збільшенні розрядності АЦП відповідного ряду: 10, 12, 14, 16 біт зменшується зі значеннями (в дБ), що відповідають ряду -95,07; -107,11; -119,15; -131,19.

Такі значення для порогу шумів є задовільними, і дозволяють визначати наявності гармонійних завад з мінімальними значеннями, що зазначені нормативною документацією. Але рівні шумів квантування АЦП з розрядністю 10 і 12 біт занадто високі для забезпечення необхідної точності визначення значень гармонік.

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. 3.1. Гармоніки тестового тягового струму були менші на два порядки в порівнянні з основною гармонікою частоти 50 Гц, тому тестовий струм з різними значеннями його сили був реалізован, змінюючи значення амплітуди основної гармоніки (50 Гц).

Ці дії не стали джерелом значних похибок в значенні тестового струму, а також не впливали на результат дослідження.

Число точок ШПФ у ході моделювання були обрані такими, що відповідають ряду зі значеннями  $M = 2^m$ , де  $m = 6..12$ .

У ході дослідження діюче значення струму основної гармоніки змінювали в межах від 100 до 300 А з шагом 10 А (при сталих значеннях інших гармонік).

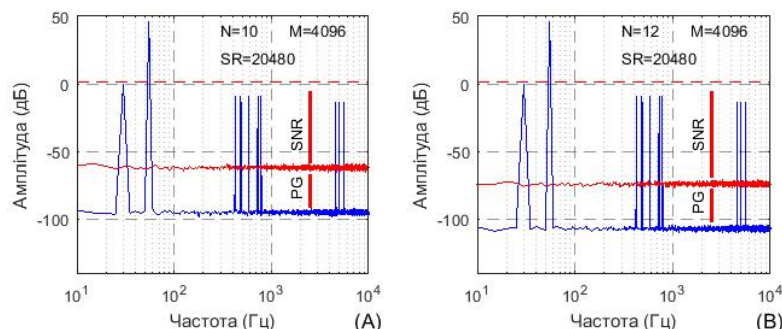
Розраховані залежності відношення сигналу до шуму для найменших гармонік з частотами 4545, 5000 і 5555 Гц від кількості точок

при ШПФ і діючого значення тестового струму (при незмінних значеннях струму гармонійних завад) для АЦП розрядністю 10, 12, 14 і 16 біт наведено на рис 3.3.

Рівень відношення "сигнал-шум" ( $SNR$ ), розраховане для найменших гармонійних завад із СКЗ 0,2 А і частотами 4545, 5000, і 5555 Гц зменшується із збільшенням розрядності АЦП, силою тестового струму (при незмінних рівнях гармонійних завад) та числа точок перетворення Фур'є  $NFFT$  від 64 до 4096 за рахунок збільшення  $PG = 10\log(M/2)$ .

У ході дослідження було виявлено, що відношення "сигнал-шум" для 10-ти розрядного АЦП менше ніж 21 дБ, а 12-ти розрядного АЦП менше ніж 42 дБ. Це не є достатнім 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  $NFFT$ . Це дає можливість провести раціональний вибір параметрів АПК і забезпечити необхідну точність 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  $N = 16$ .



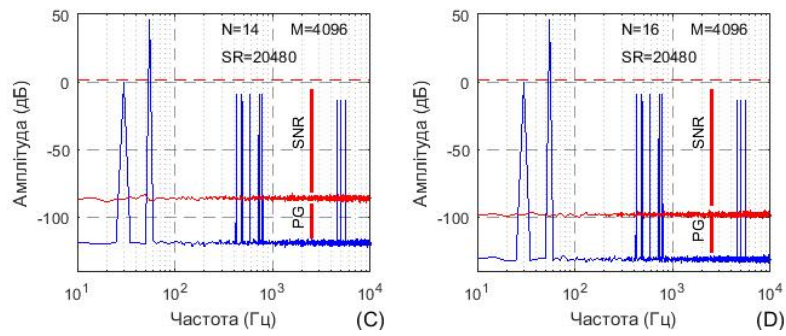


Рис. 3.2. Спектральний склад тестового струму при використанні АЦП розрядністю 10 (А), 12 (В), 14 (С) і 16 (D) біт.

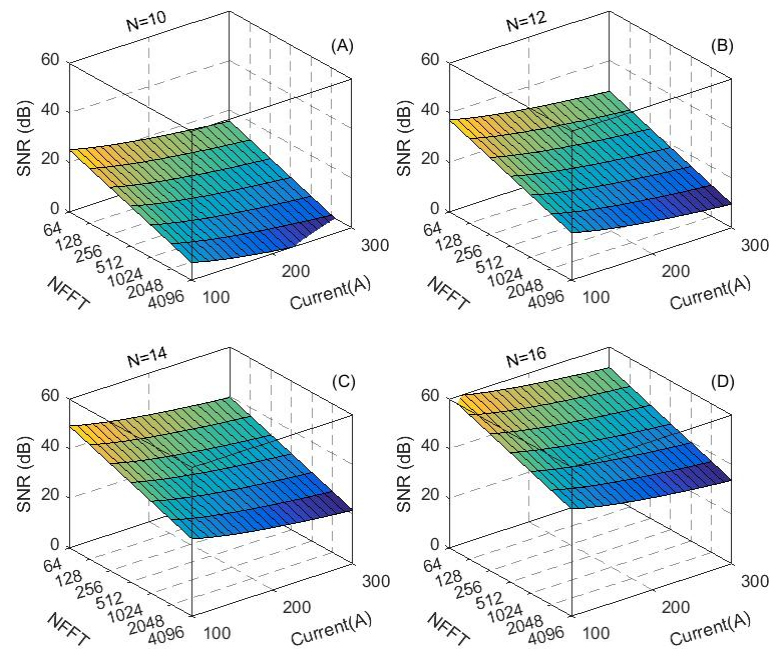


Рис. 3.3. Залежність відношення "сигнал-шум" від кількості точок при ШПФ і діючого значення тягового струму (при незмінних значеннях струму гармонійних завод) при використанні АЦП розрядністю 10 (А), 12 (В), 14 (С) і 16 (D) біт

## ВИСНОВКИ

У ході роботи було проведено наукове обґрунтування раціонального вибору параметрів АЦП і характеристик структурних елементів апаратно-програмного комплексу для вимірювання параметрів гармонік тягового струму за критеріями, які повинні забезпечувати необхідну точність і роздільну здатність амплітуди, частоти і тривалості гармонік. Значення цих параметрів визначені вимогами по забезпеченню ЕМС тягового струму з пристроями СЦБ, лініями сигналізації і зв'язку.

Апаратно-програмний комплекс (АПК) для даного дослідження складається з первинного безконтактного перетворювача тягового струму у напругу, пристрою узгодження, аналогового антиалайзінгового фільтру, аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) і програмного комплексу (ноутбук), який використовується для проведення швидкого перетворення Фур'є з представленням спектру тягового струму у табличному або графічному вигляді.

Для досягнення поставленої мети в роботі було проаналізовано вплив параметрів АЦП та його характеристик на точність визначення параметрів гармонік, а також критерії вибору параметрів АПК. Оскільки похибки від кодної підсистеми комплексу є незалежними між собою і носять випадковий характер, то загальна відносна похибка АПК може бути визначена як СКЗ від відносних похибок що виникають в окремих ланках пристрою.

В процесі дослідження було розглянуто похибки, які можуть виникати при аналогово-цифровому перетворенні. Було розглянуто критерії вибору параметрів АЦП і його характеристик для забезпечення необхідної частоти дискретизації, а також динамічного діапазону вимірювання. Вони повинні відповідати умовам забезпечення необхідної точності і роздільної здатності в часовій і частотній області галузевих

вимог і нормативних документів по забезпеченню електромагнітної сумісності тягового струму з пристроями СЦБ.

При дослідженні був використаний синтезований тестовий змінний струм частотою 50 Гц з діючими значеннями струму гармонійних завад, аналогічних реальному тяговому струму з максимально допустимими рівнями завад і досліджено вплив параметрів АЦП на його динамічні властивості. Для АЦП розрядністю 10 і 12 біт отримані значення порогу шумів є занадто великими і не забезпечують 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.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гаврилюк В. И., Щека В. И., Мелешко В. В. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи //Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2015. – №. 5 (59).
2. Гаврилюк В. и др. Нормы и методы испытания подвижного состава на электромагнитную совместимость с системами сигнализации и связи. – 2016.
3. Navryliuk V. Моделювання розповсюдження гармонійних завад від електрорухомого складу у несиметричній рейковій лінії //Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2018. – №. 16.
4. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3-1. Железнодорожный подвижной состав. Требования и методы испытаний. ГОСТ 33436.3-1-2015.
5. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3-2. Железнодорожный подвижной состав. Требования и методы испытаний. ГОСТ 33436.3-2-2015.
6. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3-1. Железнодорожный подвижной состав. Требования и методы испытаний. ГОСТ 55176.3.1-2012
7. Райс В. Как работают аналогово-цифровые преобразователи и что можно узнать из спецификации на АЦП //Компоненты и технологии. – 2005. – №. 47. – С. 116-121.

8. Основы цифровой обработки сигналов; лекции 11 сентября 2017г.; МФТИ
9. В. І. Гаврилюк, Мелешко В. В. Раціональний вибір параметрів апаратно-програмного комплексу для спектрального аналізу тягового струму. - 2017
10. Мелешко В. В. Підвищення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах експлуатації нових типів рухомого складу : дис. – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2021.
11. Гаврилюк В. И., Мелешко В. В. Обоснование уровней электромагнитного влияния тягового тока на рельсовые цепи // Электромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2017. – №. 14. – С. 21-28.
12. Bellan, D. Monitoring of Electromagnetic Environment Along High-Speed Railway Lines Based on Compressive Sensing / D. Bellan, S. A. Pignari // Progress In Electromagnetics Research C. – 2015. – Vol. 58. – P. 183–191.
13. Гаврилюк, В. І., Щека, В.І. Розробка мате-матичної моделі для дослідження електромагнітних завад від тягових перетворювачів з асинхронним двигуном / В. І. Гаврилюк, В. І. Щека // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 31. - С. 221–225.
14. Gavriilyuk, V. The modelling of electromagnetic influence of traction electrosupply system on railway circuits / V. Gavriilyuk, A. Zavgorodnij // Transport Systems Telematics. Politechnika Slanska. Zeszyty Naukowe. Gliwice (Poland). 2004. – NR – 1657. – P. 18–19.
15. Pignari, S. A. Measurement of rolling-stock radiated emissions according to standard EN 50121 / S. A. Pignari, D. Bellan, G. Spadacini // 17th

- Intern. Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Singapore. – 2006. – P. 250–255.
16. Fedeli, E. Fast and accurate measurement of radiated emissions of moving trains according to IEC 62236 / E. Fedeli, S. A. Pignari, G. Spadacini // Proc. 9th World Congress on Railway Research (WCRR 2011). – Lille, France. – 2011. – P. 1–8.
  17. Holmstrom, F. R. Rail transit EMI-EMC Elec-tromagnetic Compatibility / F. R. Holmstrom, D. Turner, E. Fernald // Magazine IEEE. – 2012. - Vol. 1. – Iss. 1. - P. 79–82.
  18. Place, C. Managing rolling stock EMC / C. Place, D. Hayes // Electromagnetic Compat-ibility in Railways. IET Seminar. – London. – 2009. – P. 1-8
  19. Rhee, E. Electromagnetic Compatibility Anal-ysis for the Railway Telecommunication Intrasubsystem / E. Rhee, K. Changjae // Intern. J. Of Software Engineering & Its Applications. – 2014. – Vol. 8, № 5. – P. 115–126.
  20. 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.
  21. Ogunsola, A. Electromagnetic compatibility in railways. Analysis and management // A. Ogunsola, A. Mariscotti. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2013. – 528 p.
  22. 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.

23. Walden R. H. Analog-to-digital converter survey and analysis //IEEE Journal on selected areas in communications. – 1999. – Т. 17. – №. 4. – С. 539-550.
24. Кравцов Ю. А. Электромагнитная совместимость рельсовых цепей и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом //Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – №. 1.
25. Гаврилюк, В. И. Нормы и методы испытания подвижного состава на электромагнитную совместимость с системами сигнализации и связи // Електромагнітна сумісність та безпека на залізнично-му транспорті. – 2016. – № 12. С. 48-57.
26. Lundberg K. H. Analog-to-digital converter testing //Massachusetts Institute of Technology. – 2002.
27. Kester W. Mt-001: Taking the mystery out of the infamous formula,"  $snr = 6.02 n + 1.76 \text{ db}$ ," and why you should care //REV. 0. – 2005. – С. 10-03.