

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак**

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ  
ПЕРВИННОГО ЦИФРОВОГО  
ОБРОБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ**

**Монографія**

Вінниця

ВНТУ

2016

УДК 621.396

ББК 32.95

Б21

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 29.09.2016 р.)

Рецензенти:

**С. О. Кравчук**, доктор технічних наук, професор

**О. В. Осадчук**, доктор технічних наук, професор

**Бортник, Г. Г.**

Б21      Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів : монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 168 с.

ISBN 978-966-641-678-3

У монографії розглянуто методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів, що побудовані на базі методології цифрового оброблення високочастотних сигналів. Запропоновано низку нових методів аналого-цифрового перетворення радіосигналів та методів цифрового оброблення радіосигналів у частотній області. Наведено інженерні методики побудови та структури засобів первинного цифрового оброблення радіосигналів.

Книга розрахована на науковців, аспірантів, студентів та фахівців, які займаються проектуванням і розробленням радіотехнічних систем, а також систем цифрового оброблення сигналів.

**УДК 621.396**

**ББК 32.95**

ISBN 978-966-641-678-3

© Г. Бортник, М. Васильківський, В. Кичак, 2016

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
1 НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПЕРВИННОГО ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ.....	11
1.1 Аналіз особливостей модуляцій радіосигналів.....	11
1.2 Методи первинного цифрового оброблення РС.....	28
1.2.1 Аналого-цифрове перетворення РС.....	28
1.2.2 Цифрове оброблення РС у частотній області.....	34
1.3 Особливості пристроїв первинного цифрового оброблення радіосигналів.....	42
2 МЕТОДИ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ.....	46
2.1 Метод аналого-цифрового перетворення РС з коригування динамічних похибок у фазовій площині.....	46
2.1.1 Принципи коригування динамічних похибок АЦП у фазовій площині.....	46
2.1.2 Вибір та обґрунтування типу тестового сигналу .....	49
2.1.3 Особливості тестового сигналу АЦП у фазовій площині .....	52
2.1.4 Визначення динамічних похибок АЦП при його калібруванні.....	53
2.1.5 Визначення крутості вихідного сигналу аналого-цифрового перетворювача.....	57
2.1.6 Аналіз динамічних параметрів АЦП при фазо-площинному коригуванні результатів аналого-цифрового перетворення РС.....	59
2.1.7 Аналіз ефективності пристроїв аналого-цифрового перетворення РС з коригуванням динамічних похибок.....	68
2.2 Статистичний метод коригування похибок лінійності АЦП при перетворенні радіосигналів.....	71
2.2.1 Принципи коригування похибок лінійності АЦП при перетворенні РС.....	71
2.2.2 Оцінювання похибки лінійності АЦП при перетворенні РС на базі спотворення функції розподілу.....	73
2.2.3 Аналіз статистичних характеристик тестових сигналів АЦП.....	77
2.2.4 Аналіз граничної роздільної здатності АЦП при статистичному коригуванні.....	81

2.3 Метод дискретизації радіосигналів.....	88
3 МЕТОДИ ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ У ЧАСТОТНІЙ ОБЛАСТІ .....	94
3.1 Цифровий метод спектрального оцінювання радіосигналів.....	94
3.1.1 Періодограмно-корелограмне оцінювання спектральної густини потужності РС.....	94
3.1.2 Вагові віконні функції.....	98
3.1.3 Аналіз ефективності цифрового методу спектрального оцінювання РС.....	106
3.2 Цифровий спектральний аналіз радіосигналів на базі взаємних спектральних перетворень.....	113
3.3 Метод цифрового спектрального аналізу вузькосмугових радіосигналів.....	129
4 ЗАСОБИ ПЕРВИННОГО ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ.....	134
4.1 Інженерна методика побудови пристроїв аналого-цифрового перетворення РС.....	134
4.2 Пристрій аналого-цифрового перетворення радіосигналів з фазо-площинним коригуванням динамічних похибок .....	142
4.3 Інженерна методика побудови пристроїв первинного цифрового оброблення радіосигналів.....	145
4.4 Пристрій первинного цифрового оброблення РС.....	151
4.5 Апаратно-програмний засіб первинного цифрового оброблення РС.....	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	159

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АМ	–	амплітудна модуляція
АМн	–	амплітудна маніпуляція
АЦП	–	аналого-цифровий перетворювач
АЦТ	–	аналого-цифровий тракт
БЗП	–	буферний запам'ятовувальний пристрій
БК	–	блок керування
ВІС	–	велика інтегральна схема
ВСВ	–	взаємні спектральні відображення
ГТІ	–	генератор тактових імпульсів
ДПУ	–	дискретне перетворення Уолша
ДПФ	–	дискретне перетворення Фур'є
ІМС	–	інтегральні мікросхеми
ОЗП	–	оперативний запам'ятовувальний пристрій
ОМР	–	одиниця молодшого розряду
ПЗП	–	постійний запам'ятовувальний пристрій
ПК	–	персональний комп'ютер
ПЛМ	–	програмована логічна матриця
ППЦОРС	–	пристрій первинного цифрового оброблення радіосигналів
РС	–	радіосигнали
СГП	–	спектральна густина потужності
СП	–	спектр потужності
ТАЦП	–	тракт аналого-цифрового перетворення
ТБ	–	телебачення
ТКЗ	–	таблиця коригувальних значень
ХП	–	характеристика перетворення
ЧМ	–	частотна модуляція
ЧМн	–	частотна маніпуляція
ФМ	–	фазова модуляція
ФМн	–	фазова маніпуляція
ЦАП	–	цифроаналоговий перетворювач
ЦОС	–	цифрова обробка сигналів
ШПУ	–	швидке перетворення Уолша
ШПФ	–	швидке перетворення Фур'є

## ВСТУП

Засоби первинного оброблення радіосигналів (РС) широко використовуються для розв'язання задач в найрізноманітніших галузях, а саме: керування використанням радіочастотного спектра, контроль завантаженості радіоефіру та ін. На їх основі організовано технічну базу з протидії несанкціонованому зчитуванню інформації, а також спеціальних досліджень побічних електромагнітних випромінювань та наведень.

До переліку задач, що розв'язуються за допомогою засобів первинного оброблення РС, входять: аналіз ВЧ-сигналів і завад та ідентифікація джерел їх виникнення; вимірювання параметрів сигналів та завад для оцінювання їх значимості для користувача; вимірювання напруженості електромагнітного поля або густини потоку потужності; визначення територіального розміщення джерел радіосигналів та радіозавад.

Основними функціями засобів первинного оброблення РС в процесі оцінювання ефективності пристроїв захисту інформації в контрольованих зонах (приміщеннях) відомчих і комерційних установ є постійне або періодичне спостереження за ефіром в широкому діапазоні частот; оперативне виявлення, аналіз та локалізація потенційних або спеціально організованих радіоканалів витоку інформації.

Засоби первинного оброблення РС відносяться до апаратури зчитування інформації. Ці засоби отримали широке використання в різних галузях та розвивались тими ж темпами, що і системи передачі інформації по радіоканалах [1–3]. Підвищений попит на таке обладнання в даний час зумовлений низкою причин, що пов'язані з прогресивним розвитком засобів радіозв'язку та з економічними і політичними змінами, які відбулися в нашій країні та світі.

До 1992 року розподіл радіочастотного діапазону, виділення та регламент використання нових частот достатньо ефективно контролювались відповідними державними службами, в тому числі службами безпеки різного рівня, причому одночасно діяли жорсткі обмеження на ввезення та використання нових засобів радіозв'язку. В цих умовах задачі покращення характеристик засобів первинного оброблення РС розв'язувались за рахунок існуючих або нових вітчизняних засобів, а заміна обладнання здійснювалась у плановому порядку [4, 5].

Після політичних і економічних змін в державі почалося значне ускладнення засобів первинного оброблення РС при розв'язанні задач радіоконтролю та технічного захисту інформації.

Скорочення масових замовлень на розроблення та виробництво засобів первинного оброблення РС великим підприємствам, викликало фактичний відтік провідних спеціалістів і, як наслідок, різке зменшення вкладу цих компаній у постачання сучасного обладнання. Це зумовило зниження випуску якісного вітчизняного обладнання, відставання в номенклатурі продукції, параметрах та функціональних можливостях цього обладнання. Водночас у розвинутих закордонних країнах продовжується розвиток засобів радіомоніторингу, як і раніше, зростаючими темпами, тому що висока ефективність радіоелектронних засобів для передачі інформації при постійному зниженні собівартості стимулює швидкі темпи поширення цих засобів [6–8].

Ускладнення радіоелектронної обстановки в Україні пов'язані з такими чинниками:

- збільшенням кількості штатних телевізійних і радіомовних передавачів, введенням та подальшою модернізацією систем мобільного зв'язку й інтенсифікацією їх використання;
- перевантаженням деяких ділянок радіочастотного діапазону (наприклад, піддіапазонів 40, 100, 400, 800 та 2450 МГц), що зумовлено необхідністю вибору найкращих умов поширення радіохвиль та відсутністю необхідності ліцензування і т. і.;
- постійним підвищенням верхньої межі робочого діапазону радіоелектронних засобів (до 18...60 ГГц), що пов'язане з бурхливим розвитком сучасних технологій;
- використанням різних типів радіосигналів – вузькосмугових з фіксованим розподілом частот або з динамічним частотно-часовим розподілом сигналів та широкосмугових з кодовим розподілом абонентів;
- загальною тенденцією підвищення потужності радіопередавачів для збільшення дальності їх дії, що еквівалентно збільшенню кількості діючих радіоелектронних засобів в точці розміщення засобів первинного оброблення РС, що призводить до підвищення рівня завад на основній частоті та на її гармоніках;
- постійним збільшенням чутливості радіоприймальних пристроїв, що призводить до необхідності відповідного підвищення чутливос-

ті приймачів РС, яка необхідна для достовірного аналізу радіоелектронної обстановки.

Крім того, збільшення числа неліцензованих джерел радіовипромінювання з різними рівнями потужності та великою (за рівнем і спектром) кількістю паразитних випромінювань, які не відповідають допустимим нормам та міжнародним стандартам в містах та промислових центрах України, вимагає підсилення контролю зі сторони відповідних служб за їх кількістю, параметрами і територіальним розміщенням.

Певна лібералізація використання радіочастотного спектра протягом останніх десяти – п'ятнадцяти років в нашій країні стала причиною появи великої кількості неконтрольованих пристроїв негласного зчитування інформації та неліцензованих засобів її передачі. З часом були прийняті відповідні законодавчі акти, але їх використання має низьку ефективність. В результаті, на даний час випускаються не тільки узаконені засоби зчитування інформації, виробництво та постачання яких контролюється компетентними органами, але і неконтрольовані засоби з самими екзотичними типами модуляції, які представляють серйозну загрозу економічній безпеці держави.

Особливістю теперішнього періоду є також різке збільшення об'єму використання оргтехніки та електронної техніки побутового і промислового призначення, які мають побічні електромагнітні випромінювання та можуть бути каналами витоку інформації, наприклад, за рахунок мікрофонного ефекту, наявних в них ВЧ-генераторів, кореляції параметрів випромінювання моніторів та комп'ютерів з оброблюваними даними.

Крім того, необхідно відмітити низку чинників, що пов'язані з ускладненням радіоелектронної обстановки на захищених (контрольованих) об'єктах, а саме:

- використання великої кількості радіоелектронних засобів в обмеженому просторі, що призводить до ускладнень при визначенні побічних джерел радіовипромінювання;
- значне збільшення швидкості передачі інформації та збільшення скритності і завадостійкості за рахунок використання надлишковості в ряді радіоелектронних засобів, до переліку яких відносяться в першу чергу пристрої, що використовуються у вимірювальних та інформа-



ційних радіосистемах державних і комерційних структур, широкомугові системи з динамічною частотно-часовою структурою і т. і.;

- нерівномірний часовий розподіл роботи радіоелектронних засобів, що призводить до додаткового ускладнення радіоелектронної обстановки в моменти найбільшої інтенсивності роботи радіосистем.

Проблема підвищення ефективності засобів первинного оброблення РС полягає в тому, що в зв'язку із збільшенням кількості міжнародних контактів та лібералізації ринку радіозасобів збільшилися загрози від закордонних спецслужб, що здійснюють збір відомостей про промислові та економічні секрети українських підприємств і ведуть тотальний контроль за науковими і технічними розробками в галузі передових технологій. Тому, особливо важливими є радіоелектронні засоби, які легко можуть бути використані для скритої передачі інформації. Подібна техніка таємного викрадення інформації орієнтована на отримання та передачу по радіоканалах різних повідомлень, а саме: акустичних та розмовних сигналів, телефонних і телефаксних сигналів, випромінювань від комп'ютерів та моніторів, інших інформаційних сигналів, які модулюють радіохвилі різними способами.

Служби інформаційної безпеки приватних та державних компаній не можуть бути байдужими до проблеми можливого викрадення інформації та змушені вживати заходи у відповідь шляхом використання радіосистем ефективною протидії цим загрозам. Поява проблеми захисту інформації на контрольованих об'єктах на новому рівні продемонструвало значне наукове та технічне відставання України в розвитку засобів первинного оброблення РС, яка зможе протистояти загрозам при проведенні контролю стану радіоефіру, визначенні та локалізації потенційно небезпечних джерел радіовипромінювання, виявленні електромагнітних випромінювань та наводок, що можуть призвести до витоку важливої інформації. По суті, технічний та методологічний рівень засобів первинного оброблення РС повинен відповідати останнім досягненням в галузі передачі інформації, інакше Україна може програти цю інформаційну боротьбу.

Наведена аргументація підтверджує своєчасність та актуальність поставленої науково-практичної задачі, розв'язання якої потребує створення теоретичних засад та практичних положень для побудови засобів первинного оброблення РС, розвитку методів оброблення та

перетворення РС, які базуються на теорії цифрової обробки сигналів (ЦОС).

Вказані чинники стимулюють розвиток вітчизняних засобів первинного цифрового оброблення РС, частковим результатом якого стане створення спеціалістами українських компаній систем контролю параметрів РС, які об'єднанні сукупністю задач, єдністю підходу до побудови, універсальністю та багатофункціональністю.

У першому розділі виконано аналіз напрямків розвитку методів і засобів первинного цифрового оброблення радіосигналів. Здійснено аналіз особливостей модуляцій радіосигналів та методів первинного цифрового оброблення РС. Проведено аналіз методів аналого-цифрового перетворення РС, а також проаналізовано особливості пристроїв первинного цифрового оброблення радіосигналів .

У другому розділі наведено методи аналого-цифрового перетворення радіосигналів. Виконано теоретичне обґрунтування принципів коригування динамічних похибок АЦП у фазовій площині. Здійснено вибір та обґрунтування типу тестового сигналу АЦП. Проведено визначення крутості вихідного сигналу аналого-цифрового перетворювача. Виконано аналіз ефективності пристроїв аналого-цифрового перетворення РС з коригуванням динамічних похибок.

У третьому розділі розроблено методи цифрового оброблення радіосигналів у частотній області, а саме: цифровий метод спектрального оцінювання радіосигналів, метод цифрового спектрального аналізу радіосигналів на базі взаємних спектральних перетворень та метод цифрового спектрального аналізу вузькосмугових радіосигналів.

В четвертому розділі розглянуто інженерні методики побудови засобів первинного оброблення РС та синтезовано структури пристроїв первинного цифрового оброблення РС.

# 1 НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПЕРВИННОГО ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ

## 1.1 Аналіз особливостей модуляцій радіосигналів

Радіосигнали можуть використовувати як модульовальні декілька інформаційних сигналів, що передаються одним каналом зв'язку, а саме: багатоканальний при частотному ущільненні каналів; цифровий груповий при часовому ущільненні; груповий на основі вхідних сигналів на підносійних частотах.

Промодульованими можуть бути: аналогові сигнали з трьома змінними параметрами (амплітудою, частотою та фазою) або періодична послідовність прямокутних імпульсів також з трьома змінними параметрами (амплітудою, тривалістю та частотою повторення імпульсів).

Залежно від типу носійного сигналу та параметрів модульовального сигналу можна запропонувати таку класифікацію видів модуляції (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Класифікація типів модуляції

	Аналогова	Імпульсна	Цифрова
Модульовальний сигнал	Аналоговий	Аналоговий або дискретний	Дискретний
Носійний сигнал	Аналоговий	Дискретний	Аналоговий
Тип модуляції	АМ (амплітудна модуляція)	АІМ (амплітудно-імпульсна модуляція)	АМн (амплітудно-маніпульована носійна)
	ЧМ (частотна модуляція)	ШІМ (широтно-імпульсна модуляція)	ЧМн (частотно-маніпульована носійна)
	ФМ (фазова модуляція)	ФІМ (фазо-імпульсна модуляція)	ФМн (фазо-маніпульована носійна)
			Комбінована

При передачі дискретних сигналів замість терміну «модуляція» необхідно використовувати термін «маніпуляція» (Keying або Shift

Keying). Комбінована маніпуляція полягає в одночасній зміні декількох параметрів носійного сигналу (найчастіше – амплітуди та фази).

Амплітудна модуляція (АМ) полягає в зміні амплітуди носійної пропорційно значенню модулювального сигналу (модуляція частоти та фази в реальних пристроях при цьому розглядається тільки як паразитна). У випадку гармонічного модулювального сигналу аналітичний вираз для АМ сигналу  $U(t)$  має вигляд [9]

$$U(t) = A_0 [1 + k \cos(\Omega t + \psi)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.1)$$

де  $A_0$ ,  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $\varphi_0$  – відповідно амплітуда, кутова частота та початкова фаза носійного сигналу;  $k = A_m/A_0$  – коефіцієнт пропорційності між модулювальним сигналом та варіаціями амплітуди АМ сигналу або коефіцієнт модуляції;  $A_m$ ,  $\Omega = 2\pi F$ ,  $\psi$  – амплітуда, кутова частота та початкова фаза модулювального сигналу.

Вираз (1.1) можна перетворити до наступного спрощеного вигляду (початкові фази скорочено)

$$U(t) = A_0 \left[ \cos \omega_0 t + \frac{k}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{k}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t \right]. \quad (1.2)$$

Ця форма запису показує, що в спектрі модульованого сигналу окрім носійної є дві бічні складові з амплітудою, пропорційною коефіцієнту модуляції та частотами, які знаходяться на відстані, що дорівнює частоті модуляції  $\Omega = 2\pi F$  вище та нижче носійного сигналу (рис. 1.1). Ширину спектра простого АМ сигналу можна визначити за формулою [9]

$$\Delta f = 2F. \quad (1.3)$$

При складному низькочастотному модулювальному сигналі спектр модульованого сигналу буде мати окрім носійної дві бічні смуги (верхню та нижню), які є спектром модулювального сигналу, що перенесений в область носійних частот. Для визначення повної ширини спе-

ктра АМ сигналу необхідно в (1.3) підставити максимальну частоту спектра модульовального сигналу.

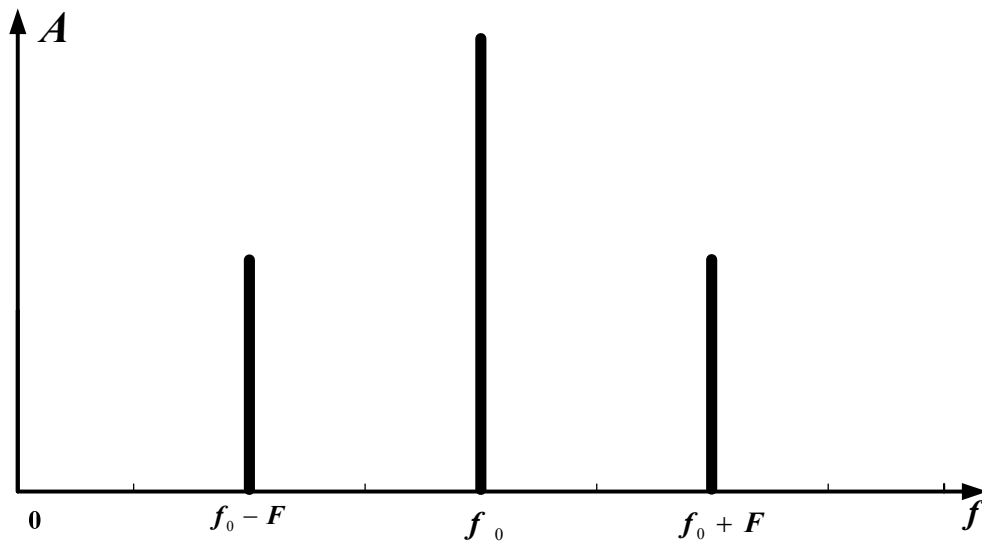


Рисунок 1.1 – Спектр АМ сигналу

Потужність АМ сигналу залежить від глибини модуляції. Потужність носійної частоти є постійною та пропорційна  $A_0^2/2$ . Потужність кожної бічної складової пропорційна квадрату її амплітуди, тобто значенню  $A_0^2 k^2/8$ .

При максимальній глибині модуляції ( $k = 1$ ) потужність АМ сигналу (дорівнює сумі потужностей всіх трьох складових) лише у півтора рази перевищує потужність немодульованого сигналу. На практиці, щоб зменшити ймовірність перемодуляції при пікових значеннях модульовальної функції, середнє значення коефіцієнта амплітудної модуляції не повинно перевищувати 0,5.

З метою збільшення ефективності використання передавача та економії смуги робочих частот модульованого сигналу можна передавати не весь спектр, а лише одну бічну смугу АМ сигналу. При цьому носійна та друга бічна подавляються. Таку модуляцію називають АМ з однією бічною смугою (ОБС). Слід відмітити, що це вже буде сигнал зі складною амплітудно-фазовою модуляцією.

Розрізняють такі різновиди амплітудної модуляції [10]:

- двосмугова АМ (Double Sideband – DSB);

- двосмугова АМ з подавленою носійною (Double Sideband Suppressed Carrier – DSBSC);
- односмугова АМ (Single Sideband);
- односмугова АМ з подавленою носійною (Single Sideband Suppressed Carrier – SSBSC) у варіантах нижньої та верхньої бічної смуги (Lower Sideband – LSB; Upper Sideband – USB);
- АМ з частково подавленою однією бічних смуг (Vestigial Sideband – VSB);
- АМ з двома незалежними бічними смугами (Independent Single Sideband – ISSB).

Іншим способом підвищення ефективності АМ є використання динамічної АМ (ДАМ), в якій потужність носійної регулюється залежно від амплітуди модулювального сигналу.

Різновиди амплітудної модуляції в основному знайшли використання в радіомовленні та телебаченні (ТБ). В діапазонах ДХ та СХ використовується двосмугова АМ, а в діапазонах КХ та УКХ – односмугова АМ. У діапазоні УКХ в системах ТБ для передачі сигналу зображення (складової яскравості) використовується АМ з частково подавленою однією бічною смугою, а для передачі кольорорізницевих сигналів в системах PAL та NTSC використовується різновид балансної модуляції – квадратурна АМ. Принцип АМ ОБС використовується при формуванні груп каналів у багатоканальних системах зв'язку з частотним ущільненням. Крім того, цей тип модуляції використовується в системах мобільного зв'язку.

Частотна модуляція (ЧМ) є частковим випадком кутової модуляції. При ЧМ змінним параметром є частота носійного сигналу, тобто в кожен момент часу її відхилення від номінального значення пропорційне значенню модулювального сигналу. У випадку гармонічного модулювального сигналу миттєву частоту можна визначити за формулою

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos(\Omega t + \psi), \quad (1.4)$$

де  $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$  – амплітуда відхилення носійної частоти від номіналу або девіація частоти.

Повна миттєва фаза пов'язана миттєвою частотою через інтеграл:

$$\Phi(t) = \int \omega(t) dt = \omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin(\Omega t + \psi) + \varphi_0. \quad (1.5)$$

Значення

$$m = \frac{\Delta\omega}{\Omega} \quad (1.6)$$

називається індексом частотної модуляції. Для складного модульованого сигналу в (1.6) використовується максимальна частота його спектра.

Аналітичний вираз для ЧМ сигналу можна записати у вигляді [9]

$$U(t) = A_0 \cos\{\omega_0 t + m \sin(\Omega t + \psi) + \varphi_0\}. \quad (1.7)$$

Спектр ЧМ сигналу при одночастотній модуляції можна отримати, перетворивши сигнал (1.7) у вигляд нескінченного тригонометричного ряду

$$U(t) = \left[ J_0(m) \cos \omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(m) \cos(\omega_0 + n\Omega)t + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_n(m) \cos(\omega_0 - n\Omega)t \right], \quad (1.8)$$

де  $J_n(x)$  – спеціальна функція Бесселя  $n$ -го порядку аргументу  $x$ .

При фіксованому аргументі функція Бесселя з ростом порядку зменшується за абсолютною величиною та при  $m > n$  має мале значення. Тому, на практиці обмежуються розглядом невеликого числа складових спектра.

Спектр ЧМ сигналу при модуляції гармонічним сигналом наведено на рис. 1.2.

Розрізняють широкосмугову  $m \gg 1$  ( $\Delta\omega \gg \Omega$ ) та вузькосмугову  $m \leq 1$  ( $\Delta\omega \leq \Omega$ ) частотні модуляції. У першому випадку, як правило, враховують складові з номерами  $n \leq m + 1$ . Це відповідає спектру ЧМ сигналу при гармонічній модуляції, в якому зосереджено 99 % енергії сигналу

$$\Delta_f = 2(\Delta f + F) \approx 2\Delta f. \quad (1.9)$$

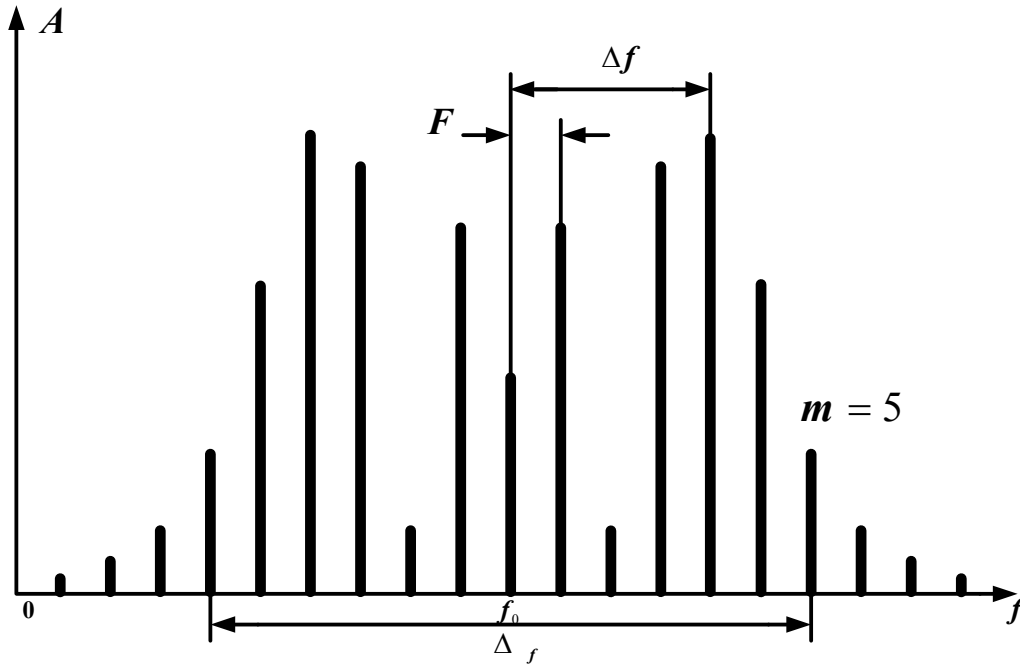


Рисунок 1.2 – Спектр ЧМ сигналу

При невеликих індексах ЧМ (від 1 до 2,5) необхідно використовувати формулу [9]

$$\Delta_f = 2F(1 + m + \sqrt{m}) \quad (1.10)$$

За межами смуги робочих частот амплітуда спектральних складових в 100 разів менша амплітуди немодульованої носійної.

При  $m \ll 1$  вираз (1.7) для ЧМ сигналу можна записати у вигляді

$$U(t) \approx A_0 \left[ \cos \omega_0 t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t - \frac{m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t \right], \quad (1.11)$$

тобто можна вважати, що в спектрі цього сигналу присутні лише носійна та дві віддалені від неї на частоту модуляції бічні компоненти. Але, на відміну від амплітудної модуляції, друга бічна складова має фазовий зсув на  $\pi$  радіан.

Оскільки, спектр ЧМ сигналу ширший, ніж при АМ, тому завадостійкість такої модуляції є вищою. Через свою широкосмуговість ЧМ сигнали в основному використовуються в діапазоні метрових та більш



коротких хвиль. Вузкосмугова ЧМ (Narrow Frequency Modulation – NFM) використовується в системах мобільного зв'язку, широкосмугова (Wide Frequency Modulation – WFM) в радіомовленні та ТБ. При стереофонічному радіомовленні, в модульовальному сигналі присутня модульована бічна складова. Крім того, ЧМ з  $m \approx 2$  широко використовувалась в системах радіорелейного та супутникового зв'язку, демодуляція носійної здійснювалась широкосмуговим груповим сигналом. В радіолокації ЧМ використовується як внутрішньоімпульсна у варіантах лінійної ЧМ, симетричної, зигзагоподібної та ін.

Фазова модуляція (ФМ) також є окремим випадком кутової модуляції. Розглянутий вище частотно-модульований сигнал є в той же час і фазомодульованим. Але при фазовій модуляції саме зміна фази, а не частоти, має збігатися із законом зміни модульовального коливання. У випадку синусоїдального модульовального коливання аналітичний вираз для ФМ сигналу буде мати вигляд [9]

$$U(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \Delta\varphi \sin(\Omega t + \psi) + \varphi_0] \quad (1.12)$$

де  $\Delta\varphi$  – амплітуда відхилення (девіація) частоти.

При здійсненні кутової модуляції з використанням гармонічного сигналу, відмінність частотної модуляції від фазової полягає лише в зміні миттєвої фази модульованого сигналу відносно закону зміни модульовальної напруги.

При порівнянні виразів (1.7) та (1.12) з'ясовано, що індекс частотної модуляції дорівнює амплітуді відхилення фази, визначеної в радіанах. Однак, при частотній модуляції індекс модуляції обернено пропорційний модульовальній частоті, а при фазовій – девіація фази фіксована та від частоти модуляції не залежить.

При однакових індексах модуляції спектр фазомодульованого гармонічного сигналу подібний до спектра частотномодульованого. При  $m \ll 1$  спектр ФМ сигналу буде мати носійну та дві бічні складові, що рознесені від носійного сигналу на значення частоти модуляції. Відмінність його спектра від спектра АМ сигналу полягає тільки в тому, що бічні складові зсунуті по фазі на  $90^\circ$ .

При великих індексах модуляції ширину спектра ФМ сигналу можна визначати за допомогою формул для ЧМ сигналів. Ширина спек-

тра в обох випадках визначається девіацією частоти. При збільшенні частоти модуляції в ЧМ сигналах ширина спектра буде залишатися постійною при меншій кількості спектральних складових, а для ФМ сигналів ширина спектра буде збільшуватися при незмінній кількості складових.

У випадку амплітудної маніпуляції (АМн), яка полягає в комутації носійної (On/Off Keying - ООК), вихідний сигнал є подібним послідовності радіоімпульсів. Прямокутна обвідна набуває двох значень, повторюючи двійковий модулювальний сигнал.

Слід зазначити, якщо амплітуда маніпульованого сигналу набуває лише ненульових значень, то це відповідає дворівневій маніпуляції ASK (Amplitude Shift Keying) або багаторівневій маніпуляції MASK (Multiple ASK).

Амплітудно-маніпульований сигнал на інтервалі  $T$  у загальному випадку можна відобразити множиною [10]

$$s_i(t) = A_i \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad 0 < t < T, \quad (1.13)$$

де  $A_i$  – амплітуда, яка може набувати  $M$  дискретних значень, тобто  $i = 1, 2, \dots, M$ .

Спектр амплітудної маніпуляції відповідає спектру послідовності двійкових сигналів, що перенесений на частоту носійної (рис. 1.3) та його ширина залежить від швидкості маніпуляції.

Слід зазначити, що сусідні значення амплітуди відповідають інформаційним модулювальним складовим, які відрізняються одним розрядом. Таке відображення називають кодом Грея. При демодуляції у випадку найбільш ймовірних помилок через відхилення на одну градацию від істинного значення амплітуди сигналу, в прийнятій інформаційній комбінації виникає помилка лише в одному біті.

У найпростішому випадку частотна маніпуляція (ЧМн) (Frequency Shift Keying – FSK) складається з двох частот, що відповідають значенню вихідного двійкового модулювального сигналу. При збільшенні кількості робочих частот відбувається перехід до  $M$ -значної частотної маніпуляції (Multiple FSK – MFSK), яка забезпечує підвищення швидкості передачі інформаційного сигналу.

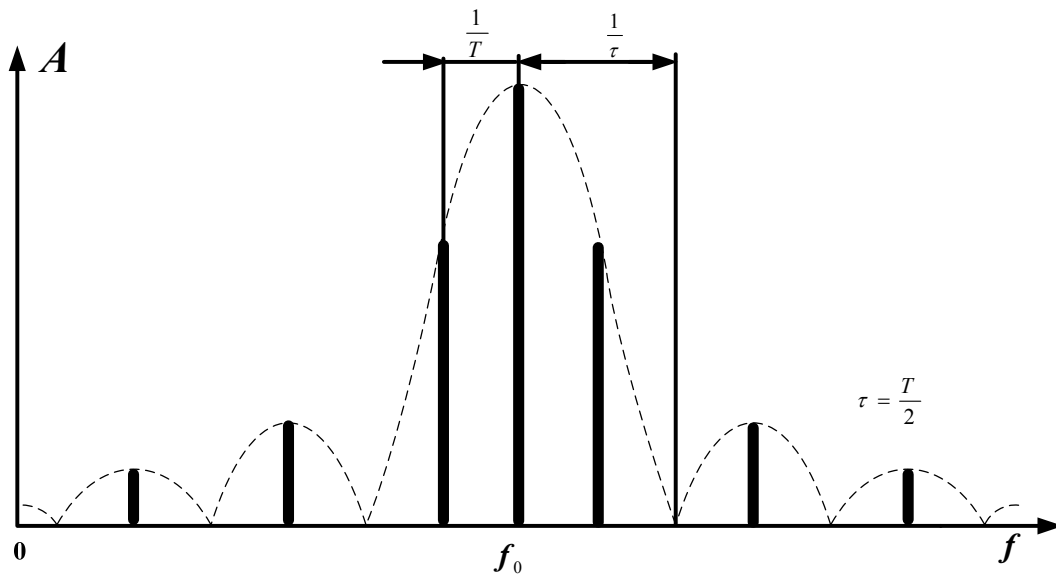


Рисунок 1.3 – Спектр АМн сигналу

Узагальнений аналітичний вираз для частотно-маніпульованого сигналу має вигляд [10]:

$$s_i(t) = A_0 \cos(\omega_i t + \varphi_{i0}), \quad 0 < t < T, \quad (1.14)$$

де  $\varphi_{i0}$  – початкова фаза  $i$ -ї частоти сигналу;  $i = 1, 2, \dots, M$  – номер робочої частоти ЧМн сигналу;  $A_0$  – амплітуда сигналу.

На практиці,  $M$  набуває значень степеня двійки (2, 4, 8, 16, ...).

За рахунок частотної фільтрації вихідного інформаційного сигналу здійснюється згладжування входних модулювальних імпульсів, що забезпечує зменшення ширини спектра ЧМн сигналу (рис. 1.4). Гаусова ЧМн (Gaussian FSK – GFSK), яка формується за рахунок використання фільтра з гаусовою амплітудно-частотною характеристикою широко використовується в стандарті безпроводної телефонії DECT.

Схеми з ЧМн поділяються на ортогональні та неортогональні. Складові множини сигналів ортогональної ЧМн повинні бути некорельованими протягом ( $T$ ) передачі символу. Мінімальну роздільну здатність за частотою при некогерентному детектуванні FSK сигналів, коли початкова фаза елементарних посилок може приймати будь-які значення, можна визначити згідно з виразом

$$f_i - f_{i+1} = \frac{1}{T}. \quad (1.15)$$

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Радзиевский В. Г. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех / В. Г. Радзиевский, П. А. Трифонов. – М. : Радиотехника, 2009. – 288 с.
2. Радзиевский В. Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки / В. Г. Радзиевский, А. А. Сирота. – М. : Радиотехника, 2004. – 432 с.
3. Радиоэлектронные системы : Основы построения и теория. Справочник / под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.
4. Рембовский А. М. Радиомониторинг – задачи, методы средства / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин. – М. : Телеком, 2010. – 624 с.
5. Куприянов А. И. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте / А. И. Куприянов, А. В. Сахаров. – М. : Вузовская книга, 2003. – 528 с.
6. Леньшин А. В. Бортовые системы и комплексы радиоэлектронного подавления / А. В. Леньшин. – Воронеж : Научная книга, 2014. – 590 с.
7. Цветнов В. В. Радиоэлектронная борьба: радиоразведка и радиопротиводействие / В. В. Цветнов, В. П. Демин, А. И. Куприянов. – М. : Изд-во МАИ, 1998. – 248 с.
8. Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн / под ред. А. И. Куприянова. – М. : Вузовская книга, 2009. – 360 с.
9. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков – 3-е изд. – М. : Высшая школа, 2000. – 462 с.
10. Волощук Ю. І. Сигнали та процеси у радіотехніці: підручник для студентів вищих навчальних закладів, том 2 / Волощук Ю.І. – Харків : Компанія СМІТ, 2003. – 444 с.
11. Бабак В. П. Обработка сигналов : підручник / В. П. Бабак, В. С. Хандецький, Е. Шрюфер. – К. : Либідь, 1996. – 392 с.
12. Мартиросов В. Е. Теория и техника приема дискретных сигналов ЦСПИ / В. Е. Мартиросов. – М. : Радиотехника, 2005. – 136 с.

13. Бортник Г. Г. Методи та засоби обробки високочастотних сигналів : монографія / Бортник Г. Г., Кичак В. М. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 132 с.

14. Бортник Г. Г. Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 128 с.

15. Крупельницький Л. В. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : монографія / Л. В. Крупельницький, О. Д. Азаров; під. заг. ред. О. Д. Азарова. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005 – 167 с.

16. Грушвицкий Р. И. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем / Р. И. Грушвицкий, А. Х. Мурсаев, В. Б. Смоллов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1989. – 160 с.

17. Lundin H. On external calibration of analog-to-digital converters. / Lundin H., Skoglund M., Handel P. // IEEE Workshop on Statistical Signal Processing: proceedings of the conference. – Singapore. 2001. – P. 377–380.

18. Lundin H. ADC post-correction using limited resolution correction values / H. Lundin , M. Skoglund , P. Handel // IMEKO 10<sup>th</sup> Workshop on ADC Modeling and Testing: proceedings of the conference. – Gdynia/Jurata, Poland, 2005. – V. 2. – P. 567–572.

19. Маковий В. А. Расширение динамического диапазона реальных АЦП методами цифровой коррекции / В. А. Маковий // Радиотехника. – 1990. – № 6. – С. 24–27.

20. Lundin H. A criterion for optimizing bit-reduced post-correction of AD converters / H. Lundin , M. Skoglund , P. Handel // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. – 2004. – V. 1. – P. 1159–1166.

21. Lundin H. A framework for external dynamic compensation of AD converters / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // 7<sup>th</sup> European Workshop on ADC Modeling and Testing: proceedings of the conference. – Prague, Czech Republic, – 2002. — P. 135–138.

22. Информационные системы: Табличная обработка информации / Е. П. Балашов, В. Н. Негода, Д. В. Пузанков [и др.]; под ред. Е. П. Балашова и В. Б. Смолова. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1985. – 184 с.

23. Шахтарин Б. И. Методы спектрального оценивания случайных сигналов : учебное пособие / Б. И. Шахтарин, В. А. Ковригин. – М. : Гелиос АРВ, 2005. – 248 с.
24. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. / С. Л. Марпл-мл. – М. : Мир, 1990. – 584 с.
25. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Эммануил С. Айфичер, Барри У. Джервис – М. : Вильямс, 2004. – 992 с.
26. Бортник Г. Г. Цифровий метод спектрального оцінювання випадкових сигналів / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 2 – С. 108–114.
27. Раушер К. Основы спектрального анализа / К. Раушер, Ф. Йанссен, Р. Минихольд. – М. : Горячая линия телеком, 2006. – 224 с.
28. Гольденберг Л. М. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие для вузов / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. – М. : Радио и связь, 1990. – 256 с.
29. Лайонс Ричард. Цифровая обработка сигналов / Ричард Лайонс. – 2-е издание. – М. : Бином-Пресс, 2006. – 656 с.
30. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2003. – 604 с.
31. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников / С. Смит. – М. : Додэка XXI, 2008. – 720 с.
32. Лэй Э. Цифровая обработка сигналов для инженеров и технических специалистов. / Э. Лэй. – М. : Группа ИДТ, 2007. – 336 с.
33. Афонский А. А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. – М. : Солон-пресс, 2009. – 248 с.
34. Маковий В.А. Расчет аналого-цифрового тракта программно-определяемого радиосредства / В. А. Маковий // Теория и техника радиосвязи. – 2010. – № 2. – С. 65–73.
35. Гельман М. М. Системные аналого-цифровые преобразователи и процессоры сигналов / М. М. Гельман. – М. : Мир, 1999. – 559 с.

36. Динамические параметры аналого-цифровых преобразователей и методы их измерений / П. И. Руднев, Б. А. Хаджи, В. Ю. Чернышев, С. Н. Шилов // Радиотехника и электроника. – 1993. – № 10. – С. 1868–1876.

37. Брагин А. А. Основы метрологического обеспечения аналого-цифровых преобразователей электрических сигналов / А. А. Брагин, А. Л. Семенюк. – М. : Изд.-во стандартов, 1989. – 164 с.

38. Бортник Г. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням похибок на основі фазо-площинної матриці / Г. Бортник, С. Бортник, О. Стальченко // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПМРТП-2006): матеріали II Міжнар. науково-техніч. конф., Вінниця, 16–19 лист. 2006 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 53–54.

39. Бортник Г. Г. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням похибок на основі фазо-площинної матриці / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, О. В. Стальченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2007. – № 2. – С. 14–21.

40. Бортник Г. Г. Методи та засоби контролю динамічних параметрів аналого-цифрових перетворювачів / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, О. А. Семенюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1997. – № 2. – С. 19–28.

41. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов – М. : Радио и связь, 1982. – 624 с.

42. Кичак В. М. Дослідження тестових сигналів для контролю характеристик аналого-цифрових перетворювачів / В. М. Кичак, С. Г. Бортник, Н. О. Пунченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – № 1. – С. 80–84.

43. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестер. – М. : Техносфера, 2007. – 1016 с.

44. Bergman D. I. Dynamic error correction of a digitizer for time domain metrology // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements. – 2004. – V. 1. – P. 1384–1390.

45. Using an interpolation method for noise shaping in A/D converters / P. Daponte, R. Holcer, L. Horniak [et al.] // 7<sup>th</sup> European Workshop on

ADC Modeling and Testing: proceedings of the conference. – Prague, Czech Republic. – 2002. – P. 147–150.

46. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1989. – 656 с.

47. Бортник Г. Аналіз ефективності аналого-цифрового перетворення сигналів у радіотехнічних комплексах спеціального призначення / Г. Бортник, В. Костецький, О. Стальченко // Сучасні проблеми радіотехніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011) : матер. V міжнар. наук.-техн. конф. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 13, 14.

48. Бортник Г. Г. Аналіз ефективності аналого-цифрового перетворення сигналів у радіотехнічних комплексах / Г. Г. Бортник, М. Л. Мінов, О. В. Стальченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – № 2 (21). – С. 12–15.

49. Романов В. А. Параметры АЦП общего применения и быстродействующих АЦП / В. А. Романов // Электронные компоненты и системы. – 2001. – № 8. – С. 24, 25.

50. Микросхемы памяти, ЦАП и АЦП : справочник / О. Н. Лебедев, А.-Й. К. Марцинкявичюс, Э.-А. К. Багданскис [и др.]. – 2-е изд., стереотип. – М. : КУБК-а, 1996. – 384 с.

51. Никамин В. А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи: справочник / В. А. Никамин. – СПб. : КОРОНА принт ; М.: Альтекс-А, 2003. – 224 с.

52. Волович Г. И. Микросхемы АЦП и ЦАП: справочник / Г. И. Волович, В. Б. Ежов; отв. ред. Т. Е. Брод. – М. : Додэка-XXI, 2005. – 432 с.

53. Мерзлякин С. Сверхбыстродействующие АЦП: Особенности архитектуры / С. Мерзлякин // Электроника: НТБ. – 2008. – № 1. – С. 30–33.

54. Дорофеев П. Современные быстродействующие АЦП с большим динамическим диапазоном / П. Дорофеев, П. Руднев // Электроника: НТБ. – 2006. – № 4. – С. 23–25.

55. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / Уолт Кестер. – М. : Техносфера, 2010. – 328 с.



56. Загурский В. Я. Использование статистического метода контроля аналого-цифровых преобразователей для расчета динамических погрешностей в спектральной области / В. Я. Загурский, Н. Я. Семенова // Автоматика и вычислительная техника. – 1992. – № 6. – С. 38–44.

57. Lundin H. On the estimation of quantizer reconstruction levels / H. Lundin, M. Skoglund, P. Handel // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference: proceedings of the conference, Ottawa, Canada. – 2005. – Vol. 1. – P. 144–149.

58. Giaquinto N. Detection, digital correction and global effect of A/D converters nonlinearities / Giaquinto N., Savino M., Trotta A.; in Daponte P. and Michaeli L., editors // International Workshop on ADC Modelling, Slovak Republic, May 1996. – P. 122–127.

59. Carbone P. Statistical efficiency of the ADC sinewave histogram test / P. Carbone, E. Nunzi, D. Petri // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, 2002. – Vol. 1. – P. 849–852.

60. Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М. : Физматлит, 1963. – 1100 с.

61. Дьяконов В. П. Современные измерительные генераторы сигналов. / В. П. Дьяконов. – М. : Солон-пресс, 2011. – 378 с.

62. Lundin H. Analog-to-digital converter error correction using frequency selective tables / H. Lundin, T. Andersson, M. Skoglund, P. Handel // Radio Vetenskap och Communication (RVK): proceedings of the conference, Stockholm, Sweden. – June 2002. – P. 487–490.

63. De Vito L. Bayesian calibration of a look-up table used for ADC error correction / L. De Vito, H. Lundin, S. Rapuano // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference: proceedings of the conference, Ottawa, Canada. – May 2005. – Vol. 1. – P. 293–297.

64. Tsimbinos J. Improved error-table compensation of A/D converters / J. Tsimbinos, K. V. Lever // IEE Proceedings – Circuits, Devices and Systems. – December, 1997. – P. 343–349.

65. Hummels D. Performance improvement of all-digital wide-bandwidth receivers by linearization of ADCs and DACs / D. Hummels // Measurement. – January 2002. – P. 35–45.

66. McNeill J. “Split ADC” Architecture for Deterministic digital background Calibration of a 16-bit 1-MS/s ADC / John McNeill, Michael C.W. Coln, Brian J. Larivee // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2005. – Vol. 40, No. 12. – P. 2437–2445.

67. Бортник Г. Г. Аналого-цифровий перетворювач з коригуванням диференціальної нелінійності на основі гістограмного методу оцінювання параметрів / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, В. А. Челоян // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – Т. 2, № 2. – С. 140–142.

68. Бортник С. Г. Статистичний метод коригування нелінійності аналого-цифрових перетворювачів у динамічному режимі / С. Г. Бортник, В. М. Кичак, Н. О. Пунченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – № 2. – С. 90–93.

69. Маковий В. А. Нелинейные искажения и интермодуляционная избирательность в аналого-цифровых трактах ДКМВ диапазона / В. А. Маковий // Теория и техника радиосвязи. – 2012 – № 2. – С. 83–94.

70. Маковий В. А. Цифровая коррекция комбинаций в SDR радиостанциях / В. А. Маковий // Теория и техника радиосвязи. – 2012. – № 3. – С. 25–34.

71. Бортник Г. Г. Дискретизація вузькосмугових сигналів / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник, О. В. Стальченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – № 2. – С. 45–48.

72. Бортник Г.Г. Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах: монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 140 с.

73. Ахмед Н. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов : / Н. Ахмед, К.Р. Рао. – М. : Связь, 1980. – 248 с.

74. Бортник Г. Г. Методи та пристрої оцінювання характеристик імпульсно-кодових модуляторів широкосмугових сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, Н. О. Пунченко. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 147 с.

75. Jenq Y. Digital spectra of nonuniformly sampled signals: theories and applications / Y. Jenq // IEEE Trans. on Instrum. and Measurement. – 1990. – № 6. – P. 969–971.

76. Петровский А. А. Методы и микропроцессорные средства обработки широкополосных и быстропротекающих процессов в реальном времени / А. А. Петровский ; под ред. Г. В. Римского. – Минск : Наука и техника. – 1988. – 272 с.

77. Бортник Г. Г. Аналого-цифровий тракт комп'ютерних систем з цифровим обробленням високочастотних сигналів / Г. Г. Бортник, О. В. Стальченко, О. І. Паламарчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 2 – С. 74–78.

78. Бортник Г. Г. Пристрій аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. В. Стальченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 1 – С. 102–105.

79. Мячев А. А. Интерфейсы средств вычислительной техники: справочник / А. А. Мячев. – М. : Радио и связь, 1993. – 352 с.

80. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия / М. Гук. – СПб. : Питер, 2003. – 528 с.

81. Бортник Г. Г. Метод аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів з додатковим шумоподібним сигналом / Г. Г. Бортник, О. В. Стальченко, К. О. Боярський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 1 – С. 100–105.

82. Пат. на корисну модель 35500 Україна, МПК Н03М 1/12. Пристрій для аналого-цифрового перетворення / Бортник Г. Г., Бортник С. Г., Стальченко О. В. ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200804101 ; заявл. 01.04.2008 ; опубл. 25.09.2008, Бюл. № 18. – 6 с.

83. Патент на корисну модель 35545 Україна, МПК Н03М 1/18. Пристрій для аналого-цифрового перетворення / Бортник Г. Г., Пунченко Н. О., Стальченко О. В. ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200804869 ; заявл. 15.04.2008 ; опубл. 25.09.2008, Бюл. № 18. – 4 с.

84. Маковий В. А. Имитационное моделирование широкополосного аналого-цифрового тракта программно-определяемых радиоустройств / В. А. Маковий // Теория и техника радиосвязи. – 2011. – № 2. – С. 57–68.

85. Бортник Г. Цифровий панорамний аналізатор спектра / Г. Бортник, С. Бортник, В. Костецький // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПМРТП-2006) : матеріали другої Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 16-19 лист. 2006 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – С. 55–56.

86. Проектирование специализированных информационно-вычислительных систем / Ю. М. Смирнов, Г. Н. Воробьев, Е.С. Потапов, В. В. Сюезев; под ред. Ю. М. Смирнова. – М. : Высш. шк., 1984. – 359 с.

87. Лосев В. В. Микропроцессорные устройства обработки информации. Алгоритмы цифровой обработки / В. В. Лосев. – Минск : Высш.шк. – 1990. – 132 с.

88. Бортник Г. Г. Аналіз методів оцінювання джитера в телекомунікаційних мережах / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, М. Л. Мінов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007. – № 1 – С. 169–175.

*Наукове видання*

**Бортник Геннадій Григорович  
Васильківський Микола Володимирович  
Кичак Василь Мартинович**

## **МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПЕРВИННОГО ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготував М. Васильківський

Підписано до друку 30.11.2016 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. др. арк. 9,7.

Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2016-38

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-85-32.

**publish. vntu. edu. ua; email: kivc. vntu@gmail. com.**

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.

21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.