

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, Н. О. Пунченко

**МЕТОДИ ТА ПРИСТРОЇ ОЦІНЮВАННЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ІМПУЛЬСНО-КОДОВИХ
МОДУЛЯТОРІВ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2014

УДК 681.335
ББК 32.965
Б21

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 27.02.2014 р.)

Рецензенти:

О. В. Осадчук, доктор технічних наук, професор

О. М. Шинкарук, доктор технічних наук, професор

Бортник, Г. Г.

Б21 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.

ISBN 978-966-641-581-6

У монографії розглянуто методи та засоби оцінювання характеристик імпульсно-кодових модуляторів (ІКМ) широкосмугових сигналів, побудованих на базі методології цифрового оброблення сигналів. Запропоновано низку оригінальних рішень як на рівні структур та алгоритмів функціонування, так і на рівні функціональних електричних схем.

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

УДК 681.335
ББК 32.965

ISBN 978-966-641-581-6 © Г. Бортник, В. Кичак, Н. Пунченко, 2014

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ІКМ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ.....	10
1.1 Характеристики ІКМ	10
1.2 Методи оцінювання характеристик ІКМ широкосмугових сигналів	17
1.3 Особливості побудови пристроїв оцінювання характеристик ІКМ.....	31
РОЗДІЛ 2 СТАТИСТИЧНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІКМ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ	37
2.1 Вибір та обґрунтування тестового сигналу ІКМ	37
2.2 Спектральні властивості ПТІВТ.....	41
2.3 Статистичні властивості ПВС з трикутною формою імпульсу....	52
2.4 Характеристика перетворення ІКМ на базі псевдовипадкового ТС з трикутною формою імпульсу	57
2.5 Похибки визначення ХП на базі ПТІВТ.....	63
2.6 Продуктивність методу оцінювання ХП ІКМ	65
РОЗДІЛ 3 МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІКМ НА БАЗІ ВЗАЄМНИХ СПЕКТРАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ	69
3.1 Обґрунтування методу дослідження динамічних властивостей ІКМ.....	69
3.2 Спектральний аналіз вихідного сигналу ІКМ на базі ШПФ.....	72
3.3 Спектральний аналіз вихідного сигналу ІКМ на базі взаємних спектральних перетворень з використанням дискретних базисів....	77
3.4 Оцінювання динамічних характеристик ІКМ широкосмугових сигналів	86
3.5 Модифікований метод ідентифікації моделі ІКМ широкосмугових сигналів	91
3.6 Аналіз ефективності спектрального методу оцінювання ДХ ІКМ.....	96

РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ОЦІНЮВАННЯ	
ХАРАКТЕРИСТИК ІКМ	106
4.1 Інженерна методика побудови засобів оцінювання характеристик ІКМ широкосмугових сигналів	106
4.2 Пристрій оцінювання характеристики перетворення ІКМ широкосмугових сигналів.....	113
4.3 Автоматизований пристрій оцінювання динамічних характеристик ІКМ широкосмугових сигналів.....	115
4.4 Аналіз параметрів пристроїв оцінювання характеристик ІКМ широкосмугових сигналів	127
ЛІТЕРАТУРА.....	133
Додаток А Зовнішній вигляд макета пристрою оцінювання характеристик перетворення ІКМ широкосмугових сигналів.....	145
Додаток Б Зовнішній вигляд макета пристрою оцінювання динамічних характеристик ІКМ широкосмугових сигналів	146

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП	–	аналого-цифровий перетворювач
АЧХ	–	амплітудно-частотна характеристика
ВІС	–	велика інтегральна схема
ВСП	–	взаємні спектральні перетворення
ГСС	–	генератор синусоїдальних сигналів
ДЕФ	–	дискретні експоненціальні функції
ДПФ	–	дискретне перетворення Фур'є
ДХ	–	динамічна характеристика
ЕОМ	–	електронно-обчислювальна машина
ІКМ	–	імпульсно-кодовий модулятор
ІМС	–	інтегральна мікросхема
ІХ	–	імпульсна характеристика
МСЕ	–	Міжнародний союз електрозв'язку
ОЗП	–	оперативний запам'ятовувальний пристрій
ОМР	–	одиниця молодшого розряду
ПВС	–	псевдовипадковий сигнал
ПК	–	персональний комп'ютер
ПТІВТ	–	послідовність трикутних імпульсів випадкової тривалості
СП	–	спектр потужності
ТС	–	тестовий сигнал
ХП	–	характеристика перетворення
ЦАП	–	цифроаналоговий перетворювач
ЦАС	–	цифровий аналізатор сигналів
ЦСА	–	цифровий спектральний аналіз
ЦОС	–	цифрова обробка сигналів
ЦПС	–	цифровий процесор сигналів
ЦСЗ	–	цифрова система зв'язку
ЧХ	–	частотна характеристика
ШПУ	–	швидке перетворення Уолша
ШПХ	–	швидке перетворення Хаара
ШПФ	–	швидке перетворення Фур'є

ВСТУП

Підвищення ефективності радіотехнічних і телекомунікаційних засобів у сучасних умовах неможливе без використання в задачах перетворення неперервних сигналів імпульсно-кодових модуляторів (ІКМ). Застосування методології цифрового оброблення сигналів (ЦОС) у радіотехнічних пристроях і засобах телекомунікацій приводить до використання їх в умовах роботи з широкосмуговими сигналами, а саме: телевізійними, сигналами проміжної частоти засобів мобільного зв'язку та цифрових радіорелейних і радіолокаційних систем, груповими сигналами аналогових багатоканальних систем передачі [1–10]. Ефективність оброблення широкосмугових сигналів безпосередньо залежить від властивостей ІКМ, що використовуються. Це обумовлює особливу актуальність розробки засобів, які забезпечують повноту дослідження характеристик ІКМ широкосмугових сигналів.

Специфікою ІКМ є нелінійний вид функції перетворення, який проявляється як в статичному, так і в динамічному режимах функціонування. Крім того, процесу імпульсно-кодової модуляції притаманний стохастичний характер, обумовлений внутрішніми флуктуаційними та шумовими властивостями ІКМ при виконанні операцій дискретизації та квантування. Якщо проблеми аналізу поведінки ІКМ в статичному режимі функціонування достатньо добре вивчені та відповідна методологія добре відома широкому колу спеціалістів, то проблеми визначення динамічних характеристик (ДХ) з урахуванням нелінійних і стохастичних властивостей продовжують інтенсивно досліджуватись.

Радіотехнічні засоби та цифрові системи зв'язку (ЦСЗ), до складу яких входять ІКМ, потребують високого ступеня автоматизації контролю характеристик як при їх виготовленні, так і в процесі технічного обслуговування. Відсутність ефективних методів для визначення характеристик ІКМ широкосмугових сигналів призводить до значних часових затрат в процесі виготовлення та експлуатації апаратури, стримуючи цим можливість удосконалення радіотехнічних і телекомунікаційних засобів.

Досвід експлуатації радіотехнічних і телекомунікаційних засобів з ІКМ в теперішній час дозволяє стверджувати, що повна відмова від визначення характеристик ІКМ, в процесі їх технічної експлуатації, не дозволяє забезпечити необхідну якість функціонування цієї апаратури. З іншого боку, на основі набутого досвіду неможливо з достатньою точністю визначити потрібний об'єм і періодичність цих процедур, які дозволяють звести до мінімуму витрати на технічне обслуговування систем з ІКМ без зниження ефективності та якості їх функці-

онування. Для вирішення цієї проблеми на даному етапі експлуатації радіотехнічної та телекомунікаційної апаратури з ІКМ необхідно проведення досліджень стабільності основних параметрів і характеристик ІКМ з використанням для цієї мети автоматизованих засобів, які враховують специфічні властивості ІКМ широкопasmових сигналів. Такі дослідження необхідні й для більш обґрунтованого нормування якісних показників каналів з ІКМ, а також можуть бути основою для підвищення надійності апаратури, яка випускається. Таким чином, для виготовлення та технічного обслуговування радіотехнічних і телекомунікаційних пристроїв з ІКМ потрібні методи та засоби визначення характеристик, які враховують специфічні властивості ІКМ широкопasmових сигналів і характеризуються високим ступенем адекватності результатів аналізу.

Апаратура контролю параметрів ІКМ випускається в багатьох країнах протягом тривалого часу і характеристики цієї апаратури визначені відповідними рекомендаціями. Однак розвиток спеціалізованих засобів визначення характеристик ІКМ для оцінювання якості функціонування цих модуляторів з широкопasmовими сигналами у значній мірі відстає від розвитку самих радіотехнічних і телекомунікаційних пристроїв та не задовольняє сучасні вимоги до продуктивності та адекватності процесу визначення характеристик ІКМ у широкій смузі робочих частот [11–15].

Вагомий внесок в розробку теоретичних і практичних питань дослідження характеристик ІКМ внесли наукові колективи під керівництвом У. Кестера, Д. Прокіса, Б. Скляра, В. К. Стеклова, А. Р. Шпігеля та ін. [16–25].

Всі перераховані роботи умовно можна поділити на дві групи, які використовують при вирішенні проблеми визначення характеристик ІКМ два принципово різних підходи: визначення окремих параметрів ІКМ та визначення характеристик ІКМ, які найбільш повно описують функціонування модулятора в динамічному режимі.

Перший підхід є найбільш розповсюдженим і поєднує групу методів, до якої відносяться статистичний, спектральний, сканувальний та інші. Популярність цього підходу можна пояснити його простотою, а також тим, що найчастіше він є безпосереднім розвитком ідей, добре розроблених при дослідженні ІКМ у статичному режимі. Проте поза увагою авторів робіт, що реалізують цей підхід дослідження ІКМ, залишаються питання, які пов'язані з обґрунтуванням достовірності отриманих оцінок характеристик модуляторів. Адже визначення окремих ДХ ІКМ найчастіше здійснюється на базі синусоїдальних тестових сигналах і тому є адекватними лише для них. Нелінійність досліджуваних перетворювачів призводить до порушення принципу су-

перпозиції, тому висновки про динамічні властивості ІКМ при роботі з гармонічно багатим сигналом за результатами досліджень на одночастотних сигналах є некоректними і можуть бути використані лише як грубі оцінки ДХ. Однак, цей аспект проблеми часто навіть не згадується. Ще однією проблемою при реалізації такого підходу в методологічному плані є відсутність безпосереднього зв'язку між характеристиками ІКМ, що визначались різними методами [26–28].

Ці теоретичні аспекти на практиці призводять до того, що кінцевий користувач ІКМ, виявляючи експериментальним шляхом розбіжності між паспортними даними та реальними результатами перетворення широкосмугових сигналів, змушений проводити додаткові дослідження, використовуючи при цьому як тестові впливи по можливості ближчі до реальних робочих сигналів ІКМ і визначаючи найбільш критичні для нього характеристики. Зрозуміла неефективність такого шляху, який потребує побудови великого числа нестандартних генераторів досліджуваних сигналів та їх атестації. Звідси видно як важливо для розвитку методів визначення характеристик ІКМ широкосмугових сигналів виконувати дослідження щодо адекватності результатів аналізу.

Другий підхід дослідження динамічних властивостей ІКМ отримав на практиці значно менше розповсюдження, що, в першу чергу, пов'язано з трудомісткістю його реалізації та нетривіальними математичними проблемами. Це пов'язано з тим, що методи динамічного контролю, які орієнтовані на визначення повних ДХ, навіть для лінійних об'єктів призводять до розв'язання так званих «некоректних» задач. Теорія розв'язання некоректних задач найповніше представлена в роботах [29–31]. Це зробило можливим використання некоректних моделей як надійного інструменту, який отримав достатньо широке застосування при розв'язанні багатьох прикладних задач. Проте в задачах оцінювання динамічних характеристик ІКМ цей підхід не отримав широкого застосування. Це обумовлено тим, що при розв'язанні некоректно поставлених задач, не містяться оцінки точності і тому залишається відкритим питання щодо можливості їх використання в задачах оцінювання ДХ ІКМ, де питання точності набувають пріоритетного значення [32, 33].

Звідси надзвичайно актуальною є задача з'ясування меж можливостей використання цього підходу при динамічних дослідженнях ІКМ. У свою чергу існує проблема продуктивності оцінювання ДХ ІКМ внаслідок великого обсягу обчислень, що може слугувати серйозною перешкодою при дослідженні модуляторів широкосмугових сигналів.

Таким чином, створення методів оцінювання характеристик ІКМ широкосмугових сигналів з урахуванням адекватності процесів функціонування перетворювачів з реальними вхідними сигналами, а також розробка на їх основі ефективних засобів, що характеризується підвищеною продуктивністю є актуальною науковою задачею.

У першому розділі аналізуються основні параметри ІКМ та сучасний стан засобів і методів оцінювання характеристик ІКМ широкосмугових сигналів. Виконано пошук напрямків підвищення продуктивності та адекватності процесу оцінювання характеристик ІКМ широкосмугових сигналів, що забезпечує потреби в умовах виробництва та використання телекомунікаційних і радіотехнічних засобів.

У другому розділі наведено статистичний метод оцінювання характеристик перетворення ІКМ широкосмугових сигналів, що базується на використанні псевдовипадкового сигналу.

У третьому розділі запропоновано спектральний метод оцінювання динамічних характеристик ІКМ на базі взаємних спектральних перетворень, а також метод ідентифікації моделі ІКМ широкосмугових сигналів.

У четвертому розділі розглядається розробка інженерної методики побудови засобів оцінювання характеристик ІКМ та синтез структур пристроїв оцінювання характеристики перетворення та ДХ ІКМ. Наведено результати експериментального дослідження макетів пристроїв.

РОЗДІЛ 1

НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ІКМ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

У цьому розділі проведено аналіз методів та засобів оцінювання характеристик ІКМ широкосмугових сигналів.

Якість функціонування ІКМ найбільш повно характеризують ДХ та залежності динамічних параметрів від частоти. Оцінювання характеристик ІКМ в робочому діапазоні частот є одним з важливих моментів виробництва та використання ІКМ, що забезпечує високу ефективність функціонування телекомунікаційних і радіотехнічних засобів, невід'ємною складовою яких є ІКМ широкосмугових сигналів. Масовий характер таких процедур в умовах неперервного зростання швидкості оброблення інформації потребує підвищення продуктивності процесу оцінювання характеристик ІКМ широкосмугових сигналів.

Тому метою авторів є проведення в цьому розділі аналізу методів та засобів оцінювання характеристик ІКМ і пошук напрямків підвищення продуктивності та адекватності процесу оцінювання характеристик ІКМ широкосмугових сигналів, що забезпечує потреби в умовах виробництва та використання телекомунікаційних і радіотехнічних засобів.

1.1 Характеристики ІКМ

Систему передачі з ІКМ можна умовно розбити на три основні складові частини: індивідуальне обладнання, квантувач і цифровий груповий тракт. Слід зазначити, що характеристики ІКМ залежать від особливостей аналого-цифрового перетворювача (АЦП) і цифро-аналогового перетворювача (ЦАП), які є основою структури будь-якого модулятора. Лінійний тракт не впливає на характеристики квантувача і показники каналу, якщо ймовірність помилки в лінійному тракті відповідає заданим вимогам (менше 10^{-6}) [34].

Основні особливості ІКМ визначаються дискретизацією у часі, квантуванням за рівнем і кодуванням. Квантування за рівнем приводить до того, що амплітудна характеристика каналу багато в чому визначається характеристикою квантувача, яка має ступінчастий вигляд. Така характеристика є причиною появи специфічних нелінійних спо-

творень – шумів квантування. В результаті чого вводиться новий показник якості телекомунікаційних і радіотехнічних засобів – відношення сигнал-шум квантування (ВСШК). Окрім того, ІКМ є причиною наявності специфічних особливостей при визначенні таких традиційних показників якості каналу, як амплітудна характеристика (АХ), амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) і шуми незайнятого каналу.

Починаючи з деякої швидкості зміни сигналу (тобто, при певній частотній складовій його спектра), у динамічному режимі погіршується роздільна здатність ІКМ і, відповідно, зменшується реальне число розрядів коду, які використовуються для представлення неперервного сигналу. Тому для оцінки спотворень, які вносяться ІКМ в телекомунікаційних і радіотехнічних засобах, необхідно знати не тільки статичні, але й динамічні характеристики. Відомо, що динамічні властивості цих засобів визначаються повними динамічними характеристиками (ДХ): передатною функцією, АЧХ, ФЧХ, імпульсною або перехідною характеристикою.

Повні ДХ лінійних аналогових засобів однозначно зв'язують між собою такі співвідношення [31]:

- перехідна функція

$$h(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau; \quad (1.1)$$

- імпульсна перехідна характеристика

$$g(t) = \frac{dh(t)}{dt}; \quad (1.2)$$

- комплексний коефіцієнт передачі

$$K(j\omega) = \int_0^{\infty} g(t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (1.3)$$

Звідки

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (1.4)$$

причому

$$K(j\omega) = A(j\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}.$$

При врахуванні впливу динамічних та інерційних властивостей ІКМ на похибку динамічних змін можна користуватися еквівалентною

схемою ІКМ, яка зображена на рис. 1.1, а, де АП – аналоговий перетворювач, який може розглядатися як лінійна інерційна динамічна ланка, а K_B – ідеальний безінерційний квантувач з рівноступеневою симетричною передатною характеристикою (рис. 1.1, б) [35]. На рис. 1.1, в зображено реальну характеристику перетворення (ХП).

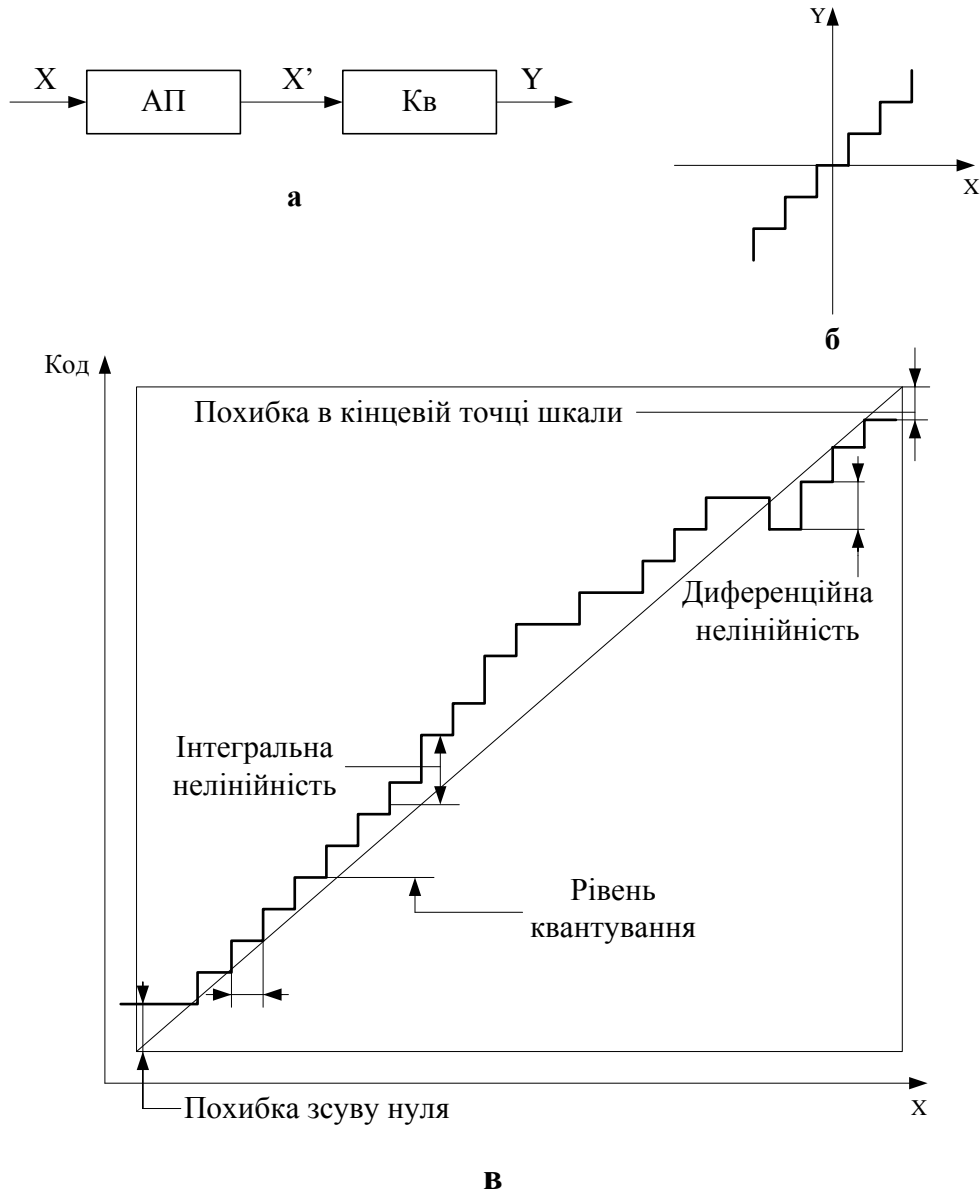


Рисунок 1.1 – Еквівалентна схема ІКМ (а), передатна характеристика квантувача (б) та реальна ХП (в)

В результаті перехідних процесів в колах ІКМ у кожному циклі перетворення виникає похибка встановлюваного сигналу, яка являє собою різницю між дійсним значенням u_i та реальним значенням напруги (струму) на опорному вході компаратора

$$\Delta u(i, T) = u_i - u_{it}, \quad (1.5)$$

де T – тривалість одного такту в циклі перетворення.

На динамічні властивості та роздільну здатність ІКМ впливає також внутрішній шум, підключений до його входу. Відношення сигнал/шум $S/N_{ш}$ ідеального n -розрядного ІКМ визначається шумом квантування, тобто [36]

$$S/N_{ш} = 1,76 + 6,02n. \quad (1.6)$$

З урахуванням зміни вхідного сигналу співвідношення сигнал/шум реального ІКМ буде визначатися за виразом [37]

$$S/N_{ш} = 6n - \Delta S/N_{ш}, \quad (1.7)$$

$$\text{де } \Delta S/N_{ш} = 10 \log_2 [1 + 12\varepsilon^2 / (u')^2]; \quad (1.8)$$

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{2^n - 1} \sum_{i=1}^{2^n} (u'_i - u'); \quad u' = \frac{1}{2^n} \sum_{i=1}^{2^n} u'_i,$$

де u' – напруга, еквівалентна відповідному вхідному коду; u'_i – напруга i -го кроку квантування реального ІКМ.

Середнє квадратичне значення шуму для заданої смуги частот дозволяє оцінити повний розмах гауссового шуму і його вплив на похибку перетворення.

До частинних ДХ відносять параметри повних ДХ, такі, як похибка датування відліку, час перетворення, час циклу кодування, частота перетворення та деякі інші.

На відміну від повних, частинні ДХ не дозволяють визначати динамічні похибки. Проте, використовуючи їх, можна орієнтовно зіставити властивості того чи іншого ІКМ з умовами використання і обрати ІКМ, який приблизно їх задовольняє. Разом з тим, частинні ДХ зручні для контролю ІКМ у процесі виробництва телекомунікаційних і радіотехнічних засобів.

У роботах [38, 39] аналізується комплекс частинних ДХ, рекомендованих для нормування динамічних властивостей швидкодійних ІКМ. Це – час перетворення, який визначено як $t_{np} = t_{ax} + t_y$, де t_y – час

циклу кодування; t_{ex} – час установлення (перехідні процеси) вхідних аналогових кіл.

Важливою є характеристика невизначеності, яка називається похибкою датування відліку і яка повинна відраховуватись від моменту запуску ІКМ [35]. Похибку датування відліку t_a визначає час перетворення t_{np} і час затримки запуску t_3 . Час затримки запуску визначається затримкою сигналу запуску ІКМ відносно потрібного моменту часу (зокрема, при його формуванні програмним шляхом в ЦСЗ через протяжність каналу передачі цього сигналу). Похибка датування відліку (яка також називається апертурною невизначеністю) є випадковою величиною, яка характеризується математичним очікуванням t_m (його часто називають апертурним часом) і дисперсією.

На апертурний час ІКМ суттєво впливає непостійність часових затримок його елементів, зміни часових параметрів імпульсів запуску, які викликаються широкосмуговим шумом, наведеннями в колах сигналу запуску. Амплітудна похибка динамічних змін сигналу $u(t)$, яка називається апертурним часом, визначається виразом

$$\delta_{амп} = t_m \left(\frac{du}{dt} \right). \quad (1.9)$$

Зазвичай, наводять значення апертурної невизначеності при перетворенні сигналу синусоїдальної форми. Частота f цього сигналу, при якій амплітудна похибка $\delta_{амп}$ не перевищує $\frac{1}{2}$ одиниці молодшого розряду (ОМР), визначається за формулою: $f = \frac{1}{2} \pi \cdot t_a \cdot 2^{n-1}$. За відомим апертурним часом ІКМ можна оцінити ефективне число розрядів коду при максимальній швидкості наростання тестового сигналу. Для розрахунку максимальної апертурної похибки перетворюваного сигналу необхідно знати максимальне значення апертурного часу. Припустимо, що апертурна невизначеність має гауссову функцію розподілу на зразок білого шуму; тоді його математичному очікуванню t_m відповідає середньоквадратичне відхилення σ , а максимальне значення дорівнює 2σ , тобто $2t_m$. Якщо максимальна апертурна похибка $\Delta u_{ам}$ при

переході синусоїдального сигналу через нульове значення не повинна перевищувати $\frac{1}{2}$ ОМР, тобто, $\frac{1}{2} \text{ОМР} = \frac{2U_0}{2n+1}$, (де U_0 – амплітуда синусоїдального сигналу), то можна розрахувати граничну частоту вхідного синусоїдального сигналу за такими виразами:

$$u(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t); \quad (1.10)$$

$$\frac{du}{dt} = 2\pi \cdot f \cdot U_0 \cos(2\pi \cdot f \cdot t); \quad (1.11)$$

$$\left. \frac{du}{dt} \right|_{\text{макс}} = \frac{\Delta u_{\text{ан}}}{2t_{\text{м}}} = 2\pi U_0 f_{\text{макс}}; \quad f_{\text{макс}} = \frac{\Delta u_{\text{ан}}}{4\pi U_0 t_{\text{м}}}. \quad (1.12)$$

Вплив апертурної невизначеності на відношення сигнал/шум при синусоїдальній вхідній дії можна розрахувати таким чином. Для апертурної невизначеності, яка дорівнює t_a , можна записати:

$$\frac{\Delta u_{\text{ан}}}{t_a} = \frac{2\pi f U_0}{\sqrt{2}}, \quad (1.13)$$

або

$$\Delta u_{\text{ан}} = \frac{2\pi f U_0 t_a}{\sqrt{2}}. \quad (1.14)$$

Тоді відношення сигнал/шум визначається за виразом

$$S / N_{\text{ш}} = 20 \cdot \log \frac{U_0 \sqrt{2}}{\Delta u_{\text{ан}}} = 20 \log \frac{1}{2\pi \cdot f t_a}, \text{ (дБ)}. \quad (1.15)$$

На рис. 1.2 зображено діаграми залежностей відношення сигнал/шум ІКМ від частот вхідних синусоїдальних сигналів при різних t_a .

Разом з тим потрібний крок дискретизації сигналу визначає не тільки необхідну швидкість ІКМ, але і допустиму часову затримку для інших елементів телекомунікаційних і радіотехнічних засобів при передачі та обробці даних.

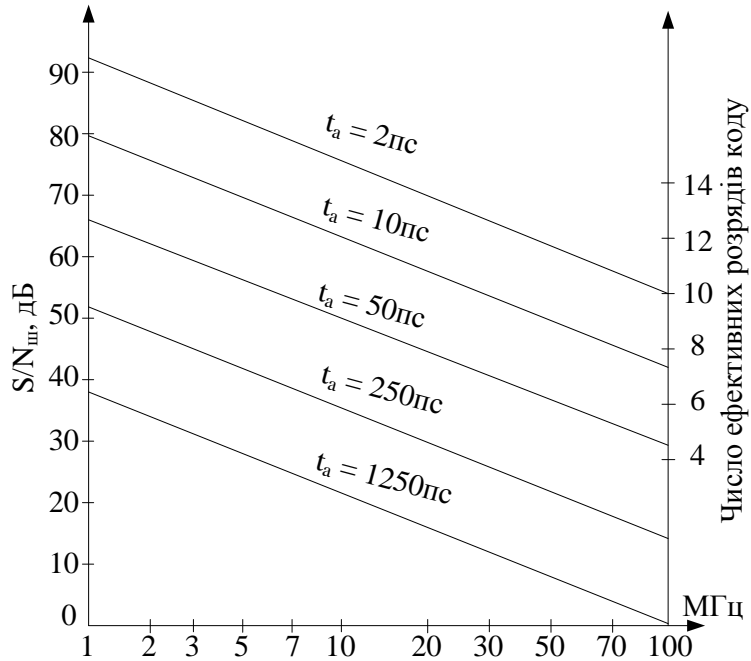


Рисунок 1.2 – Діаграми залежностей відношення сигнал/шум ІКМ від частоти вхідних сигналів

Недосконалість ІКМ проявляється також в нелінійних спотвореннях, які викликають у відновленому вихідному сигналі паразитні гармонічні складові, що перевищують по частоті частоту дискретизації. Нелінійні спотворення оцінюються за відносним вмістом вищих гармонік у спотвореному вихідному сигналі з допомогою коефіцієнта гармонік [40]:

$$k_{\Gamma} = 100 \sqrt{\sum_{i=2}^m u_i^2 / u_1}. \quad (1.16)$$

Іншою мірою оцінювання нелінійних спотворень є коефіцієнт нелінійних спотворень

$$k_i = 100 \cdot \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} u_i^2 / \sum_{i=1}^{\infty} u_i^2}, \quad (1.17)$$

причому

$$k_{\Gamma} = k_n \sqrt{1 - (k_n/100)^2}. \quad (1.18)$$

У випадку сигналу, утвореного спектром гармонік (наприклад, двома гармонічними коливаннями з частотами f_1 та f_2) з інтермодуляційними спотвореннями, у вихідному сигналі виникають комбінації цих частот у вигляді сум і різниць, наприклад $mf_1 \pm nf_2$, де $m, n = 1, 2, 3, \dots$. Повний діапазон зміни перетворюваної величини x за рівнем (діапазон перетворення ІКМ) визначається як $D = X_{\text{макс}} / X_{\text{мін}}$. Якщо $X_{\text{мін}} = 0$, то $D = X_{\text{макс}} / \Delta_{\text{абс}}$ при $\Delta_{\text{абс}} \neq 0$.

При кодуванні випадкових процесів діапазон перетворень ІКМ задають не за екстремальними значеннями сигналів, а відповідно до функції розподілу ймовірностей цих значень. Розширення діапазону перетворення понад рівень $X_{\text{макс}}$ призводить до зниження інформативності розрядів коду та ефективності ІКМ у цілому.

1.2 Методи оцінювання характеристик ІКМ широкосмугових сигналів

Методи оцінювання характеристик ІКМ можна розподілити на чотири групи: візуального контролю, припасування до ідеальної синусоїдальної кривої, статистичних оцінок та спектрального аналізу. До методів візуального контролю належать: метод аналізу відновленого сигналу, метод биття та метод аналізу обвідної. Статистичні оцінки характеристик ІКМ виконуються гістограмним методом та на основі зчеплених гістограм. Спектральні методи використовують дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) та дискретне перетворення Уолша (ДПУ) [38].

Зразкові ІКМ видають номінальні (істинні) значення величини, що визначається похибкою, значно меншою похибки досліджуваних ІКМ. Повна похибка $\Delta_{\text{вип}}$ ІКМ являє собою різницю між номінальним і вимірним значеннями вхідної величини та містить низку складових, у тому числі, зміщення нульового рівня, похибку, яка обумовлена відхиленням крутості характеристики (коефіцієнта) перетворення від заданого значення, похибки нелінійності характеристики перетворення та квантування за рівнем. Використання зразкового ІКМ з більшою роздільною здатністю в порівнянні з випробувальним перетворювачем

дозволяє зменшити похибку $\Delta'_{\text{вип}}$ випробувань в перерахунку на ОМР коду у співвідношенні

$$\Delta'_{\text{вип}} = \Delta_{\text{вип}} \cdot 2^{-(m-n)}, \quad (1.19)$$

де m – розрядність зразкового ІКМ; n – розрядність досліджуваного ІКМ.

Зразкові ІКМ і ЦАП повинні мати на 2–3 біта більшу розрядність. Схема реалізації методу оцінювання ДХ з використанням зразкового ІКМ представлена на рис. 1.4, де позначено [34]: 1 – генератор тактових сигналів повного діапазону перетворення; 2 – випробувальний ІКМ; 3 – зразковий ІКМ; 4 – схема порівняння кодів; 5 – аналізатор результатів.

За таких випробувань необхідно виконувати умову

$$\Delta u_{\text{вип}} / t_{\text{зраз}} < q / t_{\text{вип}}, \quad t_{\text{зраз}} < t_{\text{вип}}, \quad (1.20)$$

де $\Delta u_{\text{вип}}$ – зміна тестового сигналу (ТС) в процесі перетворення за час циклу $t_{\text{зраз}}$ зразкового ІКМ; q – крок квантування за рівнем; $t_{\text{вип}}$ – крок дискретизації сигналу випробувального ІКМ.

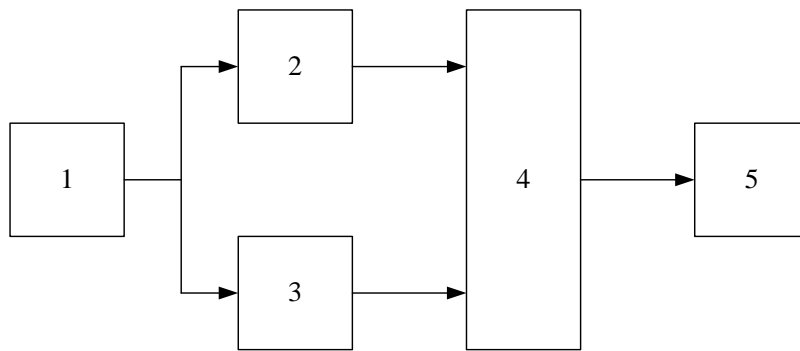


Рисунок 1.4 – Схема реалізації методу оцінювання ДХ ІКМ з використанням зразкового ІКМ

Нелінійність ХП зразкового ІКМ може бути врахована шляхом використання його нормованої характеристики, яка дозволяє вносити поправки в результати досліджень. Коригувальні коефіцієнти зберігаються в пам'яті коригувального приладу.

Метод оцінювання ДХ ІКМ зі зразковим ЦАП зображено на рис. 1.5, де прийнято такі позначення [34]: 1 – тактовий генератор; 2 – лічильник-перетворювач послідовного коду в паралельний; 3 – зраз-

ковий ЦАП; 4 – блок затримки кодів; 5 – випробувальний ІКМ; 6 – блок порівняння кодів; 7 – аналізатор результатів.

Блок затримки враховує інерційність ІКМ. Зразковий ЦАП може бути вбудованим в однокристальний процесор, який буде керувати процесом аналізу. Коригувальні коефіцієнти, які враховують нелінійність характеристики ІКМ і ЦАП, можна вводити й апаратними засобами. Для оперативного якісного контролю ІКМ використовують пристрої візуального відображення та порівняння ТС з вихідним сигналом ІКМ.

Якщо ТС подати на вхід горизонтального відхилення, а перетворений вихідний сигнал ІКМ – на вхід вертикального відхилення осцилографа, то у випадку ідентичності обох сигналів на екрані з’явиться пряма лінія, нахил якої залежить від сукупності коефіцієнта підсилення кола вертикального тракту, який містить ІКМ і ЦАП. Відхилення від прямої відображають похибку перетворення. На похибку такого пристрою впливають несиметричність каналів підсилення, а також їх статичні та динамічні похибки, які підсумовуються із похибкою перетворення ІКМ. Замість осцилографа може бути використаний спецобчислювач.

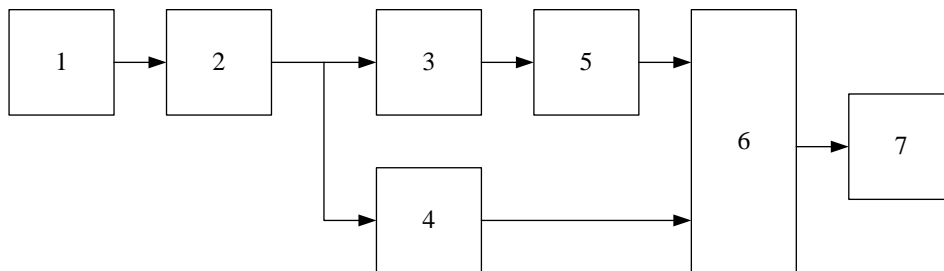


Рисунок 1.5 – Схема реалізації методу оцінювання ДХ ІКМ з використанням зразкового ЦАП

Методи статистичних випробувань базуються на визначенні гістограми кодів. Характеристику перетворення ІКМ у динамічному режимі можна визначити з виміряного статистичного ряду кодованих дискретних значень випробувального сигналу. При цьому знаходять розподіл частоти вихідних кодів ІКМ і функцію густини ймовірностей, що апроксимують цей розподіл. Відхилення останньої від відомої функції густини ТС є мірою похибки ХП. Умовами випробувань є незалежність і випадковість моментів часу дискретизації ТС. Як ТС може бути використаний синусоїдальний сигнал і шум з експоненціальним або нормальним розподілом [41].

В ідеальному випадку аналого-цифрового перетворення ТС при періодичному його повторюванні, коди кожного із миттєвих значень цього сигналу повинні повторюватись з однією і тією самою частотою $p_i = p$, де $i = 1, \dots, 2^n$ (рис. 1.6, а). Але в реальних умовах, починаючи з визначення частоти ТС, частота появи окремих кодів змінюється, а деякі коди зникають, як це можна бачити на ХП (рис. 1.6, б) і відповідній гістограмі (рис. 1.6, г).

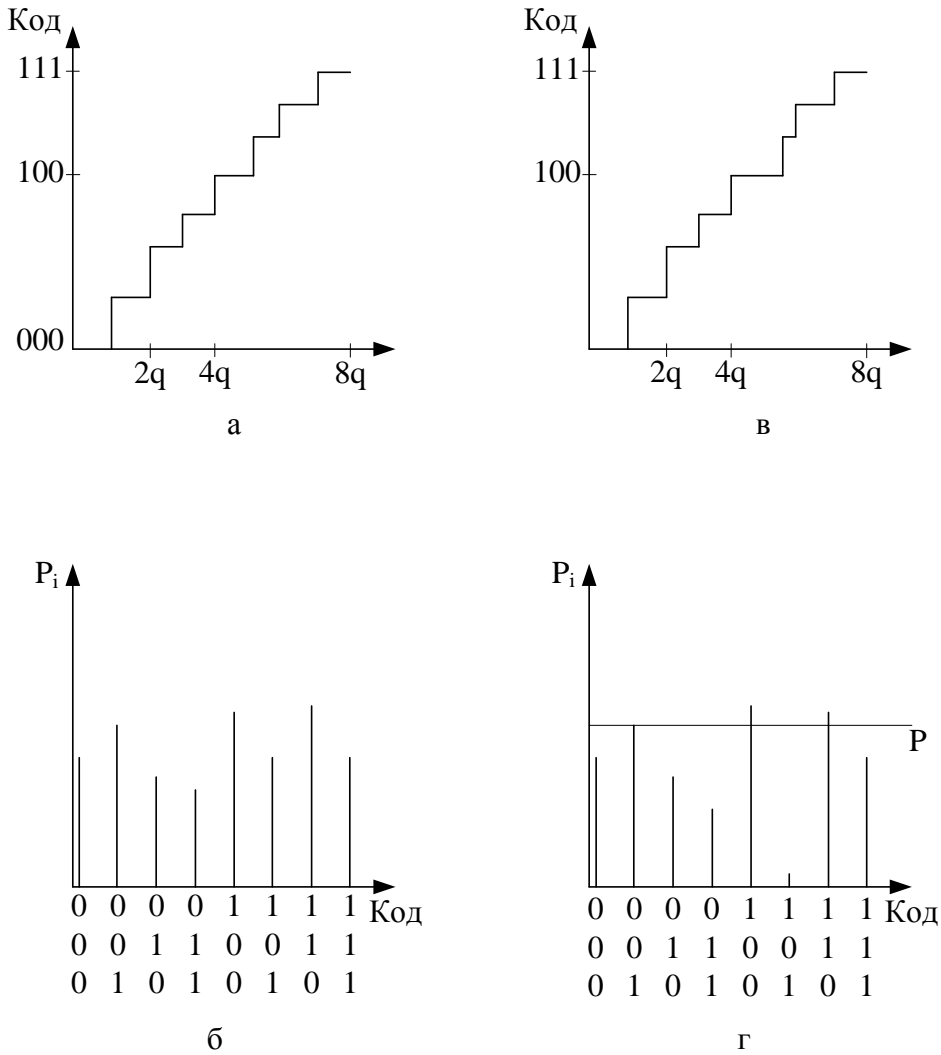


Рисунок 1.6 – Приклади характеристик перетворення ІКМ та відповідних гістограм кодів у динамічному режимі

При погіршенні роздільної здатності ІКМ і пропусканні коду при деякому значенні вхідного сигналу на гістограмі спостерігаються розриви. Оскільки число відліків фіксоване, розривам відповідає підвищена кількість відліків сусідніх значень кодів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Нарытник Т.М. Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах / Т. М. Нарытник, В. П. Бабак, М. Е. Ильченко. – К. : Техніка, 2000. – 304 с.
2. Птачек М. Цифровое телевидение / М. Птачек. – М. : Радио и связь, 1990. – 528 с.
3. Банкет В. Л. Цифровые методы в спутниковой связи / В. Л. Банкет, В. М. Дорофеев. – М. : Радио и связь, 1988. – 240 с.
4. Кузьмин С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. – М. : Радио и связь, 1986. – 352 с.
5. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. – К. : Изд-во КВІЦ, 2000. – 428 с. – ISBN 966-7192-20-2.
6. Зубарев Ю. Б. Цифровое телевизионное вещание. Основы, методы, системы / Ю. Б. Зубарев, М. И. Кривошеев, И. Н. Красносельский. – М. : НИИР, 2001. – 568 с.
7. Мамаев М. С. Системы цифрового телевидения и радиовещания / М. С. Мамаев, Ю. Н. Мамаев, Б. Г. Теряев. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 254 с. – ISBN 5-93517-277-1.
8. Рабинович Д. Цифровые методы в радиолокации / Д. Рабинович, Ч. Гейджер, Э. Брунгер // ТИИЭР. – 1985. – № 2. – С. 182–199.
9. Феер К. Беспроводная связь. Методы модуляции и расширения спектра / К. Феер. – М. : Радио и связь, 2000. – 520 с. – ISBN 5-256-01444-7.
10. Шахнович И. В. Современные технологии беспроводной связи / И. В. Шахнович. – М. : Техносфера, 2006. – 288 с.
11. Бакланов И. Г. Методы измерений в системах связи / И. Г. Бакланов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 1999. – 195 с.
12. Бакланов И. Г. Технологии измерений первичной сети. Ч. 1 : Системы E1, PDH, SDH / И. Г. Бакланов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. – 141 с. – ISBN 5-88405-019-4.
13. Бакланов И. Г. Технологии измерений первичной сети. Ч. 2 : Системы синхронизации, В-ISDM, АТМ / И. Г. Бакланов – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. – 149 с. – ISBN 5-88405-020-8.

14. Бакланов И. Г. Тестирование и диагностика систем сети / И. Г. Бакланов – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2001. – 265 с.
15. Гуревич В. Э. Импульсно-кодовая модуляция в многоканальной телефонной связи / В. Э. Гуревич, Ю. Г. Лопушнян, Г. В. Рабинович. – М. : Связь, 1973. – 336 с.
16. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестер. – М. : Техносфера, 2007. – 1016 с.
17. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / Уолт Кестер. – М. : Техносфера, 2010. – 328 с. – ISBN 978-5-94836-243-4.
18. Прокис Д. Цифровая связь / Д. Прокис. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с. – ISBN 5-256-01434-X.
19. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с. – ISBN 5-8459-0386-6.
20. Стеклов В. К. Транспортні мережі телекомунікацій / М. Л. Бірюков, В. К. Стеклов, Б. Я. Костік ; ред. В. К. Стеклова. – К. : Техніка, 2005. – 312 с. – ISBN 966-575-192-1.
21. Стеклов В. К. Проектування телекомунікаційних мереж : підр. для вузів / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман ; під ред. В. К. Стеклова. – К. : Техніка, 2002. – 792 с.
22. Цифровая связь : справочник / И. П. Панфилов, В. К. Стеклов, М. Л. Бирюков и др. ; Под ред. В. К. Стеклова. – К. : Техніка, 1992. – 230 с. – ISBN 5-335-00883-0.
23. Никифоров Н. П. Измерение качественных показателей каналов связи с ИКМ / Н. П. Никифоров, А. М. Циклис, А. Р. Шпигель. – М. : Радио и связь, 1984. – 104 с.
24. Шпигель А. Р. Модель источника шумов квантования в канале ТЧ систем передачи с ИКМ / А. Р. Шпигель, В. М. Щавинская // Электросвязь. – 1982. – № 3. – С. 20–24.
25. Шпигель А. Р. Измеритель порога перегрузки в каналах ТЧ, образованных методом ИКМ / С. Г. Камлет, А. Р. Шпигель, В. М. Щавинская // Электросвязь. – 1979. – № 1. – С. 37–41.
26. Измерения в технике связи / М. А. Ракк, Л. Я. Мельникова, Г. П. Лабеецкая, Г. Ш. Кульбикаян. – М. : ГОУ УМЦ ОЖТ, 2008. – 566 с. – ISBN 5-89035-557-7.

27. Иванов А. Б. Контроль соответствия в телекоммуникациях и связи.– М. : САЙРУС СИСТЕМС, 2000.– 375 с. – ISBN 5-88230-115-7.
28. Иванов А. Б. Контроль качества в телекоммуникациях и связи / А. Б. Иванов. – М. : САЙРУС СИСТЕМС, 2001. – 376 с.
29. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1982. – 624 с.
30. Тихонов В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М. : Радио и связь, 1991. – 608 с. – ISBN 5-256-00789-0.
31. Грановский В. А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения / В. А. Грановский. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1984. – 224 с.
32. Колинко Т. А. Измерения в цифровых системах связи. – К. : ВЕК, 2002. – 320 с. – ISBN 966-7140-25-5.
33. Тихонов Б. Н. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах / Б. Н. Тихонов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 374 с. – ISBN 5-93517-338-7.
34. Гельман М. М. Системные аналого-цифровые преобразователи и процессоры сигналов / М. М Гельман. – М. : Мир, 1999. – 559 с. – ISBN 5-03-003316-5.
35. Брагин А. А. Основы метрологического обеспечения аналого-цифровых преобразователей электрических сигналов / А. А. Брагин, А. Л. Семенюк. – М. : Изд. стандартов, 1989.– 164 с.
36. Беллами Д. Цифровая телефония / Беллами Д.– М. : Эко-Трендз, 2004. – 640 с. – ISBN 5-88405-059-3.
37. 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. – ISSN 0033-8494.
38. Аминев А. М. Методы и средства контроля динамических параметров быстродействующих АЦП / А. М. Аминев, Г. Д. Бахтияров, А. Л. Тимофеев // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – № 4. – С. 36–55. – ISSN 0373-2428.
39. Романов В. А. Параметры АЦП общего применения и быстродействующих АЦП / В. А. Романов // Электронные компоненты и системы. – 2001. – № 8. – С. 24, 25. – ISSN 1817-2369.

40. Загурский В. Я. Исследование нелинейности аналого-цифровых устройств / В. Я. Загурский, Н. Я. Семенова // Методы и средства преобразования информации. – 1989. – № 9. – С. 80–93.

41. 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. – ISSN 0132-4160.

42. Using an interpolation method for noise shaping in A/D converters / Daponte P., Holcer R., Horniak L. [et al.] // 7th European Workshop on ADC Modeling and Testing : proceedings of the conference, Prague, Czech Republic, June, 2002. – P. 147–150.

43. 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, May 2005. – V. 1. – P. 144–149. – ISSN 0018-9456.

44. Carbone P. Performance of stochastic and deterministic dithered quantizers / P. Carbone, D. Petri // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, April, 2000. – P. 337–340. – ISSN 0018-9456.

45. Carbone P. Statistical efficiency of the ADC sinewave histogram test / P. Carbone, E. Nunzi, D. Petri // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, 2002. – P. 849–852. – ISSN 0018-9456.

46. Walden R.H. Analog-to digital converter survey and analysis // IEEE Journal on Selected Areas in Communication. – April 1999. – P. 539–550. – ISSN 0733-8716.

47. Yu-Wei Lin A 1-GS/s FFT/IFFT Processor for UWB applications / Yu-Wei Lin, Hsuan-Yu Liu, Chen-Yi Lee // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2005. – V. 40, No. 8. – P. 1726–1734.

48. Загурский В. Я. Метод исследования нелинейности аналого-цифровых преобразователей в динамике / В. Я. Загурский, Н. Я. Семенова // Измерительная техника. – 1989. – № 9. – С. 3–4.

49. Schoukens J. Design of broadband excitation signals with a user imposed power spectrum and amplitude distribution / Schoukens J., Dobrowiecki T. // Instrumentation and Measurement Technology Conference. IMTC/98 : proceedings of the conference, St. Paul, USA, May 1998. – V. 2. – P. 1002–1005. – ISBN 0-7803-4797-8.

50. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов: практический поход / Эммануил С. Айфичер, Барри У. Джервис. – М. : Вильямс, 2004. – 992 с. – ISBN 5-8459-0710-1.
51. 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. – ISBN 5-256-00678-9.
52. Бондарев В. Н. Цифровая обработка сигналов: методы и средства / В. Н. Бондарев, Г. Трестер, В. С. Чернега.– Х. : Конус, 2001.– 398 с. – ISBN 966-7836-14-3.
53. Лайонс Ричард. Цифровая обработка сигналов : пер. с англ. / Ричард Лайонс. – 2-е издание. – М. : Бином-Пресс, 2006. – 656 с. – ISBN 5-9518-0149-4.
54. Медведев Ю. С. Точность цифровой оценки спектра сигнала / Ю. С. Медведев, М. Ю. Перов, А. В. Якимов // Труды 1-го совещания по проекту SfP Semiconductors. – Нижний Новгород, 2001. – С. 99–108.
55. Giaquinto N. Detection, digital correction and global effect of A/D converters nonlinearities / N. Giaquinto, M. Savino, A. Trotta // International Workshop on ADC Modelling, Slovak Republic, May 1996. – P. 122–127.
56. Горлач А. А. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике / А. А. Горлач, М. Я. Минц, В. Н. Чинков. – К. : Техніка, 1985. – 151 с.
57. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов / В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2009. – 384 с.
58. Уайндер С. Справочник по технологиям и средствам связи / С. Уайндер. – М. : Мир, 2000. – 429 с.
59. Gao X. M. Modeling the harmonic distortion of analog-to-digital converter using Volterra series / X. M. Gao, S. Sun // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference : proceedings of the conference, IMTC/1994, May, 1994. – V. 2. – P. 911–913. – ISBN 0-7803-1880-3.
60. Moschitta A. Statistical performance of Gaussian ADC histogram test / A. Moschitta, P. Carbone, D. Petri // 8th International Workshop on ADC Modeling and Testing: proceedings of the conference, Perugia, Italy, September 2003. – P. 213–217. – ISSN 1549-8328.

61. Волощук Ю. І. Сигнали та процеси у радіотехніці: підручник для студентів вищих навчальних закладів: Т. 2 / Ю. І. Волощук. – Харків : Компанія СМІТ, 2003. – 444 с. – ISBN 966-8530-05-5.

62. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – 3-е изд. – М. : Высшая школа, 2000. – 462 с.

63. Дорофеев П. Современные быстродействующие АЦП с большим динамическим диапазоном / П. Дорофеев, П. Руднев // Электроника: НТБ. – 2006. – № 4. – С. 23–25. – ISSN 0132-3784.

64. Пунченко Н. О. 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. – ISSN 2219-9365.

65. Бендат Д. Прикладной анализ случайных данных / Д. Бендат, А. Пирсол – М. : Мир, 1989. – 540 с.

66. Вадзинский Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р. Н. Вадзинский. – СПб. : Наука, 2001. – 295 с.

67. Денисенко А. Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника. Справочное руководство / А. Н. Денисенко. – М. : Горячая линия-Телеком, 2005. – 704 с. – ISBN 5-93517-214-3.

68. Бабак В. П. Обробка сигналів / В. П. Бабак, В. С.Хандецький, Е. Шрюфер. – К. : Либідь, 1996. – 392 с. –ISBN 5-325-00631-2.

69. Жовинский А. Н. Инженерный экспресс-анализ случайных процессов / А. Н. Жовинский, В. Н. Жовинский. – М. : Энергия, 1979. – 112 с.

70. Шиляев С. Особенности применения высокочастотных АЦП / С. Шиляев, О. Фомин // Электроника : НТБ. – 2008. – № 1. – С. 84–87.

71. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1989. – 656 с. – ISBN 5-256-00264-3.

72. Бортник Г. Г. Модель фазового дрижання в аналого-цифрових перетворювачах телекомунікаційних систем / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, Н. О. Пунченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – № 1. – С. 111–114. – ISSN 2219-9365.

73. Пунченко Н.О. 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. – ISSN 2219-9365.

74. Пунченко Н. О. Метод визначення характеристики перетворення аналого-цифрового перетворювача у динамічному режимі / В. М. Кичак, С. Г. Бортник Н. О. Пунченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – № 3. – С. 39–44.

75. Пунченко Н. О. Експрес-контроль динамічних характеристик аналого-цифрових перетворювачів / М. Л. Мінов, Н. О. Пунченко, В. Ф. Яблонський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 1. – С. 58–62.

76. Мерзликін С. Сверхбыстродействующие АЦП: особенности архитектуры / С. Мерзликін // Электроника : НТБ. – 2008. – № 1. – С. 30–33. – ISSN 0132-3784.

77. 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. – ISBN 5-343-00260-9.

78. Пунченко Н. О. Високопродуктивний метод визначення динамічних характеристик імпульсно-кодових модуляторів / В. М. Кичак, Н. О. Пунченко, О. Г. Бортник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 1. – С. 51–54.

79. Левин Б. Р. Статистическая теория связи и ее практические приложения / Б. Р. Левин. – М. : Связь, 1979. – 288 с.

80. Бортник Г. Г. Моделювання аналого-цифрових перетворювачів / Г. Г. Бортник., В. М. Кичак, Н. О. Пунченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, Вінниця, 19–21 травня 2010 р. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – С. 309–310. – ISBN 978-966-641-356-0.

81. Васильев В. И. Компьютерная обработка сигналов / В. И. Васильев, И. П. Гуров. – СПб. : БХВ-Санкт-Петербург, 1998. – 240 с.

82. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл-мл. – М. : Мир, 1990. – 584 с.

83. Бортник Г. Г. Метод коригування джитеру в телекомунікаційних системах / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, Н. О. Пунченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007. – № 2. – С. 101–104.

84. Бортник Г. Г. Метод коригування власного джитеру тактових сигналів телекомунікаційних систем / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, Н. О. Пунченко // Електроніка і зв'язь. – 2008. – № 1. – С. 196–199.

85. Шемаров А. И. Цифровая генерация шумоподобных сигналов и оценка их статистических свойств / А. И. Шемаров, А. Б. Давыдов // Доклады БГУИР. – 2006. – № 3. – С. 67–71.

86. Прикладные математические методы анализа в радиотехнике : учеб. пособие для радиотехнич. спец. вузов / Ю. А. Евсеев, Г. В. Обрезков, В. Д. Разевиг [и др.] ; под ред. Г. В. Обрезкова. – М. : Высш. шк., 1985. – 343 с.

87. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2003. – 604 с. – ISBN 5-318-00666-3.

88. Теория передачи сигналов / А. Г. Зюко, Д. Д. Кловский, М. В. Назаров, Л. М. Финк. – М. : Радио и связь, 1986. – 304 с.

89. Пунченко Н. Інформаційно-вимірювальна система визначення динамічних характеристик аналого-цифрових перетворювачів / В. Кичак, Н. Пунченко // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування : матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції, Вінниця, 8–10 жовтня 2009 р. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – Ч. 2. – С. 68.

90. Быков В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В. В. Быков. – М. : Сов. радио, 1971. – 328 с.

91. Бортник Г. Г. Цифровой метод коригування джитеру в телекомунікаційних системах / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, Н. О. Пунченко // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций : материалы 4-й международной молодежной научно-технической конф., Севастополь, 21–25 апреля 2008 г. – Севастополь : СевНТУ, 2008. – С.191. – ISBN 978-966-2960-25-9.

92. Пунченко Н. О. Метод визначення динамічних характеристик імпульсно-кодівих модуляторів на базі взаємних спектральних перетворень / В. М. Кичак, Н. О. Пунченко, О. Г. Бортник // Вимі-

рювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 2. – С. 64–68. – ISSN 2219-9365.

93. Punchenko N. High-efficient method of determination of a dynamic characteristic of the analog-to-digital converter / V. Kychak, S. Bortnyk, N. Punchenko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2010) : proceedings of the Xth Int. Conf., Lviv-Slavsko, Ukraine, February 27-27, 2010. – Lviv : Publishing House of Lviv Polytechnic, 2010. – P. 65.

94. Моисеев В. С. Системное проектирование преобразователей информации / В. С. Моисеев. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отделение, 1982. – 255 с.

95. Трахтман А. М. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах / А. М. Трахтман, В. А. Трахтман. – М. : Сов. радио, 1975. – 208 с.

96. Пунченко Н. О. Спектральний метод визначення динамічних характеристик імпульсно-кодових модуляторів / В. М. Кичак, Н. О. Пунченко, О. Г. Бортник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції: 5–8 червня 2012 р. м.Хмельницький. – Хмельницький : Хмельницький національний університет, 2012. – С. 53–56. – ISBN 978-966-8776-24-3.

97. Вьюхин В. В. Анализ погрешностей цифровых измерительных систем с параллельными каналами / В. В. Вьюхин, Ю. А. Попов // Автометрия. – 2004. – № 1. – С. 60–64.

98. Бортник Г. Г. Метод підвищення завадостійкості диференціальної імпульсно-кової модуляції / Г. Г. Бортник, В. А. Челоян, Н. О. Пунченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 2. – С. 44–47.

99. Ридер Р. Особенности проектирования многоканальных АЦП / Р. Ридер, М. Лунней, Дж. Хенд // Электронные компоненты и системы. – 2006. – № 6. – С. 3–6.

100. Бортник Г. Г. Пристрій аналого-цифрового перетворення сигналів зображення / Г. Г. Бортник, М. Л. Мінов, Н. О. Пунченко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008. – № 1. – С. 41–46. – ISSN 1681-7893.

101. Козак В. Прецизионные аналого-цифровые преобразователи / В. Козак // Электроника : НТБ. – 2006. – № 4. – С. 35–37.
102. Хабаров Ю. А. Структурные методы построения устройств АЦП сверхбыстродействующего класса / Ю. А. Хабаров // Приборы и средства автоматизации. – 1993. – № 4. – С. 22–26.
103. Современный подход к моделированию АЦП в телекоммуникационных устройствах / К. Эдельман, Б. Брэннон, С. Даунинг, Т. МакЛеод // Электроника : НТБ. – 2007. – № 2. – С. 112–114.
104. Пунченко Н. О. Метод ідентифікації моделі аналого-цифрового перетворювача / С. Г. Бортник, Н. О. Пунченко, О. В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 1. – С. 88–91.
105. Пунченко Н. О. Динамічна модель аналого-цифрового перетворювача / В. М. Кичак, С. Г. Бортник., Н. О. Пунченко // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації : тези доповідей II Міжнар. науково-практичної конф., Вінниця, 22–24 квітня 2009 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – С. 180–181.
106. Бортник Г. Г. Дослідження інтегральної нелінійності аналого-цифрового перетворювача у базисі дискретних функцій Фур'є / Г. Г. Бортник, С. Г. Бортник // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 5. – С. 117–120. – ISSN 1997-9266.
107. Бахметьев А. А. Микросхемы для аналого-цифрового преобразования / А. А. Бахметьев. – М. : ДОДЭКА, 1996. – 384 с.
108. Никамин В. А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи : справочник / В. А. Никамин. – СПб. : КОРОНА принт ; М. : Альтекс-А, 2003. – 224 с.
109. Волович Г. И. Микросхемы АЦП и ЦАП : справочник / Волович Г. И., Ежов В. Б. ; отв. ред. Т.Е. Брод. – М. : Додэка-XXI, 2005. – 432 с. – ISBN 5-94120-091-9.
110. Проектирование специализированных информационно-вычислительных систем : учеб. пособие / Ю. М. Смирнов, Г. Н. Воробьев, Е. С. Потапов, В. В. Сюзев. – М. : Высш. шк., 1984. – 359 с.
111. Бортник Г. Г. Методи та засоби обробки високочастотних сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 132 с. – ISBN 966-7199-23-1.

112. Salkintzis A. K. ADC and DSP challenges in the development of software radio base stations / A. K. Salkintzis, H. Nie, P. T. Mathiopoulos // IEEE Personal Communications Magazine, August 1999. – P. 47–55. – ISSN 1070-9916.

113. Кичак В. М. Методи реалізації швидкодіючих засобів цифрової обробки сигналів / В. М. Кичак, Г. Г. Бортник, В. В. Ролінський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – № 4. – С. 87–91. – ISSN 2219-9365.

114. Пунченко Н. О. Оптимізація систем з цифровим обробленням сигналів / В. М. Кичак, С. Г. Бортник, Н. О. Пунченко // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010) : тези доповідей десятої Міжнар. науково-технічної конф., Вінниця, 19–21 жовтня 2010 р. – Вінниця, 2010. – С. 155.

115. Ширяев В. В. Компьютерные измерительные средства / В. В. Ширяев. – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – 190 с.

116. Analog to Digital Converters. – Режим доступу до публікації : <http://www.analog.com/en/analog-digital-converters/products/index.html>

117. Дьяконов В. П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2009. – 248 с. – ISBN 978-5-91359-049-7.

118. Мячев А. А. Интерфейсы средств вычислительной техники : справочник / А. А. Мячев. – М. : Радио и связь, 1993. – 352 с. – ISBN 5-256-00990-7.

119. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия / М. Гук. – Спб. : Питер, 2003. – 528 с. – ISBN 5-94723-180-8.

120. Бортник Г. Г. Вимірювання фазового дрижання в аналого-цифрових перетворювачах цифрових систем передачі / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, Н. О. Пунченко // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах : тези доповідей I Міжнародної наукової конференції, Вінниця, 18-20 жовтня 2011 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2011. – С. 27. – ISBN 978-966-641-429-1.

121. Бортник Г. Г. Математична модель джитеру в складних телекомунікаційних мережах / Г. Г. Бортник., М. В. Васильківський, Н. О. Пунченко // Контроль і управління в технічних системах : тези доповідей IX Міжнародної конф., Вінниця, 21–24 жовтня 2008 р. – Ре-

жим доступу до публікації : http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2008/materials/subsection_2.2.pdf

122. Патент на корисну модель 35547. Україна, МПК Н03М 1/18. Пристрій для аналого-цифрового перетворення / Бортник Г. Г., Мінов М. Л., Пунченко Н. О., Стальченко О. В. ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200804872 ; заявл. 15.04.2008 ; опубл. 25.09.2008, Бюл. № 18. – 3 с.

123. Перебаскин А. В. Отечественные микросхемы / А. В. Перебаскин. – М. : Додэка-XXI, 2004. – 400 с.

124. Пунченко Н. Вимірювач динамічних характеристик аналого-цифрових перетворювачів / Н. Пунченко // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування: матеріали V Міжнародної конференції, Вінниця, 19–21 травня 2011 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2011. – С. 23–24.

125. 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.

Наукове видання

**Бортник Геннадій Григорович
Кичак Василь Мартинович
Пунченко Наталія Олегівна**

**МЕТОДИ ТА ПРИСТРОЇ ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ІМПУЛЬСНО-КODOВИХ МОДУЛЯТОРІВ
ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Г. Бортником

Підписано до друку 17.09.2014 р.
Формат 29,7× 42¹/₄. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,51.
Наклад 300. (1-й запуск 1-75) прим.
Зам. № В2014-42

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к.114.
Тел. (0432) 59-85-32
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
ДК № 4377 від 31.07.2012.