

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

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

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ  
ЕФЕКТИВНОСТІ ОЦІНЮВАННЯ  
ФАЗОВОГО ДРИЖАННЯ СИГНАЛІВ  
У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2015

УДК 621.376

ББК 32.88

Б21

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 29.01.2015 р.)

Рецензенти:

**В. П. Манойлов**, доктор технічних наук, професор

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

**Бортник, Г. Г.**

Б21      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.

ISBN 978-966-641-621-9

У монографії розглянуто методи та засоби оцінювання параметрів фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах, 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 систем, а також систем цифрового оброблення сигналів.

**УДК 621.376**

**ББК 32.88**

**ISBN 978-966-641-621-9**

© Г. Бортник, М. Васильківський, В. Кичак, 2015

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	5
ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1 НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ОЦІНЮВАННЯ ФАЗОВОГО ДРИЖАННЯ СИГНАЛІВ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	9
1.1 Основні параметри і характеристики ФДр .....	9
1.2 Методи оцінювання ФДр .....	16
1.3 Засоби оцінювання ФДр .....	32
РОЗДІЛ 2 МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ФАЗОВОГО ДРИЖАННЯ .....	39
2.1 Критерії ефективності спектрального оцінювання сигналів ФДр.....	39
2.2 Теоретичне обґрунтування спектрального оцінювання ФДр.....	41
2.3 Періодограмно-корелограмне оцінювання СГП сигналу ФДр ..	48
2.4 Вагові віконні функції .....	52
2.5 Тестові сигнали при спектральному оцінюванні ФДр .....	61
2.6 Аналіз ефективності методу спектрального оцінювання ФДр ..	68
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ДИНАМІЧНОГО ДІАПАЗОНУ ТРАКТУ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ ФАЗОВОГО ДРИЖАННЯ.....	76
3.1 Апаратна методологія підвищення ефективності оцінювання ФДр .....	76
3.2 Математична модель тракту аналого-цифрового перетворення сигналів ФДр.....	78
3.3 Метод розширення динамічного діапазону тракту аналого-цифрового перетворення сигналу ФДр .....	82

3.3.1 Аналіз впливу дрижання відліків АЦП на динамічний діапазон ТАЦП сигналу ФДр.....	82
3.3.2 Розпаралелювання процесу аналого-цифрового перетворення сигналів ФДр з коригуванням затримок імпульсів дискретизації .....	85
3.3.3 Аналіз ефективності методу аналого-цифрового перетворення з коригуванням фазового дрижання відліків .....	90
3.4 Модифікований метод швидкодіючого аналого-цифрового перетворення сигналів ФДр .....	94
<b>РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ</b>	
<b>ОЦІНЮВАННЯ ФДр СИГНАЛІВ У ТКС.....</b>	<b>103</b>
4.1 Інженерна методика побудови засобів оцінювання ФДр сигналів у ТКС.....	103
4.2 Пристрій оцінювання ФДр.....	109
4.3 Апаратно-програмний засіб оцінювання ФДр.....	113
4.4 Аналіз результатів експериментальних досліджень .....	119
<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>124</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АКФ	–	автокореляційна функція
АЦП	–	аналого-цифровий перетворювач
АЧХ	–	амплітудно-частотна характеристика
ВІС	–	велика інтегральна схема
ГСС	–	генератор синусоїдальних сигналів
ДПФ	–	дискретне перетворення Фур'є
ЗФД	–	загальне фазове дрижання
ПЦІ	–	плезіохронна цифрова ієрархія
ПЧІ	–	послідовність часових інтервалів
СПП	–	спектральна густина потужності
СКВ	–	середньоквадратичне відхилення
СП	–	спектр потужності
СЦІ	–	синхронна цифрова ієрархія
ТАЦП	–	тракт аналого-цифрового перетворення
ТКС	–	телекомунікаційні системи
ТС	–	тестовий сигнал
ФДр	–	фазове дрижання
ФНЧ	–	фільтр нижніх частот
ЦАП	–	цифро-аналоговий перетворювач
ЦСА	–	цифровий спектральний аналіз
ЦОС	–	цифрова обробка сигналів
ЦСП	–	цифрова система передачі
ЦТ	–	цифровий тракт
ЧХ	–	частотна характеристика
ШПФ	–	швидке перетворення Фур'є

## ВСТУП

Останнє десятиріччя характеризується стрімким розвитком телекомунікацій. Головною рисою сучасних телекомунікаційних засобів є передавання та оброблення сигналів у цифровій формі [1]. При цьому виникають специфічні проблеми, що пов'язані з особливостями передавання цифрових сигналів трактами телекомунікаційних засобів. Фазове дрижання (ФДр) є однією з основних проблем, що виникає при розробці, виготовленні та експлуатації сучасних цифрових телекомунікаційних засобів. ФДр є специфічним видом спотворень, що виникають у процесі формування та передавання сигналів у цифрових трактах (ЦТ) телекомунікаційних систем (ТКС). У зарубіжній літературі ФДр з частотою вищою 10 Гц називають джитером [2–4].

В умовах сучасного розвитку цифрових телекомунікаційних засобів проблема ФДр сигналів у ЦТ ТКС набуває особливої актуальності, тому що в результаті впровадження нових методів передачі, що передбачають вищі швидкості передавання інформації, джитер сигналів зумовлює появу бітових помилок, а також некерованих проковзувань і порушень синхронізації. А це, в свою чергу, призводить до суттєвого зниження стійкості функціонування телекомунікаційних засобів, погіршення якості зв'язку, а інколи і до втрати зв'язку [3]. Тому при розробці та експлуатації телекомунікаційних засобів одним з найважливіших показників якості є значення ФДр сигналів у ЦТ ТКС.

Для того, щоб гарантувати відповідну якість сигналів зв'язку виконується оцінювання ФДр на виході кожного мережного стику, а також ФДр кожного цифрового обладнання або цифрової ділянки системи передавання [4]. Водночас розвиток нових цифрових телекомунікаційних технологій висуває вимоги щодо підвищення ефективності оцінювання ФДр сигналів у ЦТ ТКС.

Вагомий внесок в розробку теоретичних і практичних питань оцінювання ФДр сигналів внесли наукові колективи під керівництвом І. Г. Бакланова, В. О. Дамма, Б. В. Султанова, В. К. Стеклова, В. В. Шахгільдяна та ін. [2–14]. Результати досліджень ФДр тактових сигналів наведено в [2–6]. У цих дослідженнях вирішувалися технічні проблеми, які пов'язані з появою ФДр тактових сигналів в плезіохронних системах передавання. Результати аналізу методів і засобів оцінювання ФДр у ТКС наведено в роботах [7–9]. У роботах [10, 11]

проаналізовано чинники, що спричиняють ФДр, а також запропоновано аналогові методи оцінювання джитера. У роботах [12, 13] розглянуто причини виникнення ФДр тактових сигналів у волоконно-оптичних системах передачі інформації. Методи виділення періодичних і випадкових складових ФДр розглянуто в працях [11, 14]. Слід відмітити, що ці дослідження були спрямовані на розв'язання конкретних технічних задач, що виникали перед розробниками цифрового обладнання. Разом з тим, методи підвищення ефективності оцінювання ФДр сигналів у ЦТ ТКС знаходяться на стадії формування. А розвиток засобів оцінювання ФДр на сучасному етапі відбувається в основному за рахунок повнішого використання потенціалу методів оцінювання ФДр у часовій області за допомогою комп'ютерної та мікропроцесорної техніки, а також за рахунок збільшених можливостей апаратного та програмного забезпечення. Однак, відомі підходи не забезпечують суттєвого і одночасного покращення основних функціональних показників засобів оцінювання ФДр. Отже, існує важлива наукова задача, яка полягає в необхідності забезпечення у комплексі збільшення динамічного діапазону та підвищення стійкості і роздільної здатності оцінок ФДр сигналів у ЦТ ТКС. Враховуючи загальні тенденції розвитку телекомунікаційної галузі, необхідно відзначити, що розв'язання цієї задачі є актуальною для сьогодення.

Разом з тим, слід зауважити, що якісний стрибок у покращенні ефективності оцінювання ФДр сигналів у ЦТ ТКС може дати лише застосування нових методів оброблення та перетворення сигналів джитера, нових способів організації оброблення сигналів ФДр та нових методик побудови засобів оцінювання ФДр сигналів.

Наведена аргументація підтверджує своєчасність та актуальність поставленої науково-практичної задачі, розв'язання якої потребує створення теоретичних засад та практичних положень для побудови засобів оцінювання ФДр сигналів у ТКС, розвитку методів оброблення та перетворення сигналів джитера, які базуються на теорії цифрової обробки сигналів (ЦОС).

Таким чином, створення методів підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у цифрових трактах ТКС, а також розробка на їх основі пристроїв, що характеризуються розширеним динамічним діапазоном і підвищеною роздільною здатністю та стати-

стичною стійкістю отриманих оцінок є актуальною науковою задачею.

У першому розділі аналізуються основні параметри і характеристики фазового дрижання та сучасний стан і особливості засобів і методів оцінювання фазового дрижання сигналів у цифрових трактах ТКС.

У другому розділі розроблено метод спектрального оцінювання фазового дрижання, що базується на використанні періодограмно-корелограмного оброблення сигналів джитера та застосуванні методології ЦОС.

У третьому розділі запропоновано метод розширення динамічного діапазону тракту аналого-цифрового перетворення сигналів ФДр, а також модифікований метод швидкодіючого аналого-цифрового перетворення сигналів ФДр з покращеними динамічними параметрами.

В четвертому розділі розглянуто розроблену інженерну методику побудови засобів оцінювання ФДр та синтезу структур пристроїв оцінювання ФДр сигналів у ЦТ ТКС. Наведено результати експериментального дослідження макетів пристроїв.



# РОЗДІЛ 1

## НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ОЦІНЮВАННЯ ФАЗОВОГО ДРИЖАННЯ СИГНАЛІВ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

У цьому розділі виконано аналіз основних параметрів і характеристик ФДр, проведено дослідження сучасних методів та засобів оцінювання фазового дрижання сигналів у цифрових трактах телекомунікаційних систем, здійснено вибір напрямків і постановку задачі досліджень.

### 1.1 Основні параметри і характеристики ФДр

Для повного оцінювання ФДр та аналізу характеру його зміни в частотній та часовій областях необхідно виконати комплексне дослідження параметрів ФДр у розрізі випадкової та детермінованої складових.

Головними причинами періодичного ФДр (PJ) є завади від місцевих радіостанцій або від перемикачів в електромережах. Воно виникає також внаслідок нестабільної роботи систем фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) [2, 4, 5]. Періодичне ФДр не має кореляції з будь-яким сигналом даних. Цим воно відрізняється від ФДр (DDJ), що залежне від інформаційного сигналу, яке виникає внаслідок міжсимвольної інтерференції (Intersymbol Interference, ISI) сусідніх імпульсів. Характеристика цих спотворень, а отже, і відповідного ФДр, залежатиме від конкретного виду цифрової послідовності.

Алгоритмічне ФДр (AJ) виникає внаслідок принципових особливостей конкретної цифрової системи передачі (ЦСП). Так, в плезіохронних ЦСП прикладом алгоритмічного ФДр служить ФДр цифрового вирівнювання і часу очікування (Stuffing Wait Time Jitter). Таке ФДр (AJ) обумовлено зміною затримки операції цифрового вирівнювання (Bit Stuffing) при мультиплексуванні та демультіплексуванні цифрових потоків. Таку саму природу має ФДр відображення (Mapping Jitter) при розміщенні компонентних (tributary) сигналів у ТКС типу PDH у синхронних транспортних модулях SONET/SDH з використанням операції цифрового вирівнювання [7, 10].

Існує декілька основних причин виникнення ФДр, що впливають на структуру та параметри якості систем зв'язку. ФДр спричиняється внутрішнім та зовнішнім амплітудним і фазовим шумами. В результаті чого ФДр розділяють на випадкове та регулярне. Регулярне ФДр базується на процесах, що характеризують методи передачі даних. Системне ФДр залежить від характеристик цифрової системи передачі. Методи аналізу ФДр базуються на дослідженні око-діаграм та гістограм в часовій області та аналізі його частотних характеристик, які дозволяють розрізнити випадкову та детерміновану складові ФДр. Присутність в мережах регулярного та нерегулярного ФДр зумовлено різними причинами його виникнення. Регулярне (системне) ФДр є корельованим з послідовностями бітів, що передаються. Оскільки затримки при передачі сигналів в скремблерах і кодерах залежать від типу послідовності, що приймається чи передається, процеси в мультиплексах та регенераторах можуть викликати регулярний джитер.

Нерегулярне ФДр зумовлене електромагнітним впливом та інтерференцією із зовнішніми джерелами сигналу, такими як шум, відбивання, перехресні завади чи інтерференція з колами живлення й іншими джерелами електромагнітного випромінювання. В цьому випадку спектр сигналу видає інформацію про джерело інтерферуючого сигналу. Інтерференція із джерелами живлення 50 Гц та іншими низькочастотними сигналами легко ідентифікується, тоді як пошук інтерференції від комп'ютерних і обчислювальних систем пов'язаний з аналізом у смузі до 60 МГц, що викликає труднощі в реалізації контрольно-вимірювальних засобів [12, 14].

Сумарне ФДр (Total Jitter, TJ) складається з випадкового ФДр (Random Jitter, RJ) і систематичного (регулярного) ФДр (Deterministic Jitter, DJ) [3, 6, 10, 11, 15]. На рис. 1.1 наведено класифікацію параметрів ФДр в ТКС.

Випадкове ФДр RJ має гауссову функцію густини ймовірності та визначається за допомогою виразу [3, 11]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.1)$$

де значення величини математичного очікування нормального розподілення  $\mu$  визначається з урахуванням виразу [11]

$$f(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi\sigma^2}}. \quad (1.2)$$

ФДр цього типу визначається як в амплітудних  $UI_{p-p}$ , так і в середньоквадратичних значеннях  $UI_{RMS}$ .

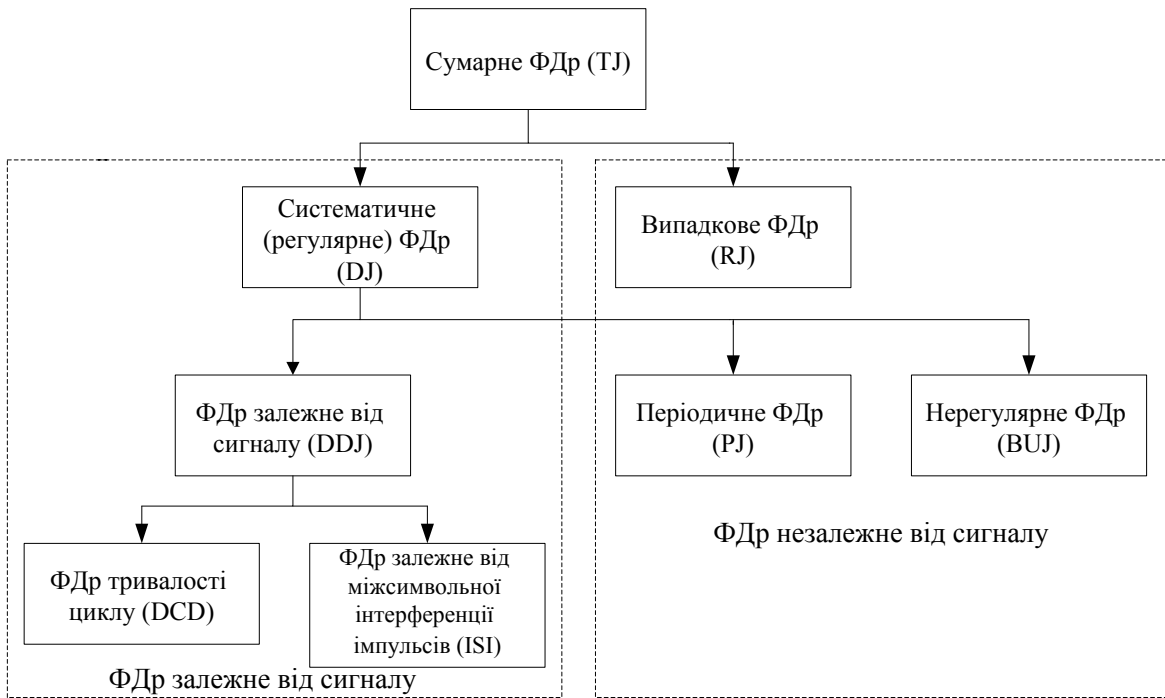


Рисунок 1.1 – Класифікація фазового дрижання

Систематичне ФДр DJ має функцію розподілу густини ймовірності, що відрізняється від гауссової, і обмежену амплітуду. Періодичне ФДр (Periodic Jitter, PJ) іноді ще називають синусоїдальним ФДр SJ, математичну модель якого можна представити за допомогою виразу

$$PJ(t) = A \cos(\omega t + \theta). \quad (1.3)$$

Для періодичного ФДр функція густини розподілення ймовірностей [3, 6, 11]

$$f_{PJ}(p) = \frac{1}{\pi \sqrt{1 - \left(\frac{p}{A}\right)^2}}, \quad -A \leq p \leq A. \quad (1.4)$$

ФДр, яке залежне від інформаційного сигналу (даних) (Data Depending Jitter, DDJ), характеризується такою функцією густини розподілення ймовірностей [11, 15]:

$$f_{DDJ}(d) = \sum_{i=1}^N P_{i,DDJ} \delta(d - D_{i,DDJ}). \quad (1.5)$$

ФДр, яке спричинене спотворенням коефіцієнта заповнення імпульсної послідовності сигналу (Duty Cycle Distortion, DCD), характеризується такою функцією густини розподілення ймовірностей [3, 15]:

$$f_{DCD}(dc) = \frac{1}{2} \left[ \delta\left(dc - \frac{D}{2}\right) + \delta\left(dc + \frac{D}{2}\right) \right]. \quad (1.6)$$

ФДр, яке спричинене міжсимвольною інтерференцією імпульсних послідовностей сигналу та ФДр, яке спричинене спотворенням коефіцієнта заповнення імпульсної послідовності сигналу, є складовими ФДр, яке залежне від інформаційного сигналу (даних). Тому можна записати

$$f_{DDJ} = f_{ISI} \cdot f_{DCD}. \quad (1.7)$$

Звідси отримаємо вираз для визначення функції густини розподілення ймовірностей ФДр, яке спричинене міжсимвольною інтерференцією імпульсних послідовностей сигналу,

$$f_{ISI} = IFT \left[ \frac{F_{DDJ}}{F_{DCD}} \right]. \quad (1.8)$$

Обмежене некорельоване ФДр, яке спричинене перехресними впливами між сусідніми лініями передачі (Bounded Uncorrelated Jitter, BUJ), характеризується такою функцією густини розподілення ймовірностей [3, 11, 15]:

$$f_{BUJ}(b) = \frac{1}{4} \delta\left(b + \frac{A}{2}\right) + \frac{1}{2} \delta(b) + \frac{1}{4} \delta\left(b - \frac{A}{2}\right). \quad (1.9)$$

Густину розподілення ймовірностей загального ФДр (Total Jitter, TJ) визначимо як згортку густин ймовірностей всіх його компонентів згідно з виразом:

$$f_{TJ} = f_{DJ} \cdot f_{RJ}. \quad (1.10)$$

де  $f_{RJ}$  – функція густини розподілення ймовірностей випадкового ФДр;  $f_{DJ}$  – функція густини розподілення ймовірностей детермінованого ФДр, яку можна визначити за допомогою виразу

$$f_{DJ} = f_{PJ} \cdot f_{DDJ} \cdot f_{BUJ}. \quad (1.11)$$

Підставивши у вираз (1.11) вираз (1.10), отримаємо

$$f_{TJ} = f_{RJ} \cdot f_{PJ} \cdot f_{DDJ} \cdot f_{BUJ}. \quad (1.12)$$

Густину розподілення ймовірностей загального ФДр (Total Jitter, TJ) визначимо за допомогою виразу [11, 15]

$$f_{TJ}(t) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma} \left[ e^{-\frac{(t-A)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(t+A)^2}{2\sigma^2}} \right]. \quad (1.13)$$

Фізичний зміст поняття ФДр полягає у тому, що значення потужності сигналу на виході фазового детектора  $\sigma_v^2$  пропорційне середньому квадратичному значенню ФДр  $\sigma_\varphi^2$  [5, 15]

$$\sigma_v^2 = K_d^2 \sigma_\varphi^2, \quad (1.14)$$

де  $K_d$  – коефіцієнт підсилення фазового детектора.

Якщо ФДр виникають внаслідок дії адитивного гауссового шуму на стабільний сигнал, то фазові шуми можуть бути апроксимовані таким чином [15]:

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{\sigma_n^2}{2P_s}, \quad (1.15)$$

де  $\sigma_n^2$  – потужність адитивного шуму;  $P_s$  – потужність сигналу.

Вираз (1.15) є основною формулою для оцінювання ФДр, яке утворене дією адитивного шуму на синусоїдальний сигнал.

Дослідимо взаємозв'язок фазового шуму періодичних сигналів з тремтінням фронту тактового сигналу. Для цього розглянемо спектр періодичного сигналу під дією випадкового процесу  $\varphi(t)$  із спектральною щільністю  $\Phi_{\varphi}(\omega)$ , який є додатком до фази ідеального тактового сигналу [3, 4, 16]. Представимо періодичний сигнал у вигляді ряду:

$\sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{j\frac{2\pi}{\tau}k \cdot t}$ . З урахуванням шуму  $\varphi(t)$  цей сигнал буде мати вигляд:

$$v(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{jk\left(\frac{2\pi}{\tau} + \varphi(t)\right)}. \quad (1.16)$$

Враховуючи, що  $E(\varphi(t)) = 0$ ,  $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \varphi(t) dt = 0$ , спектральна гу-

стина потужності  $\Phi_v(\omega)$  знаходиться як [4, 16]

$$\Phi_v(\omega) = \frac{1}{2\pi} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} E(v(t)v(t-\tau)) dt \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (1.17)$$

У вираз (1.17) підставимо вираз (1.16) і отримаємо

$$\Phi_v(\omega) = \frac{1}{2\pi} \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_k C_n e^{j\frac{2\pi}{\tau}t(k-n)} \times$$

$$\times e^{-j\tau_1(\omega - \frac{2\pi}{\tau}n)} E(e^{jk\varphi(t) - jn\varphi(t-\tau_1)}) dt d\tau_1. \quad (1.18)$$

Оскільки процес  $\varphi(t)$  є стаціонарним, то складова виразу (1.18)  $E(e^{jk\varphi(t) - jn\varphi(t-\tau_1)})$  не залежить від  $t$ , тоді маємо

$$\Phi_v(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |C_k|^2 \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(e^{jk(\varphi(t-\tau_1) - \varphi(t))}) \cdot e^{-j(\omega - \frac{2\pi}{\tau}k)\tau_1} d\tau_1. \quad (1.19)$$

Розклавши експоненту в ряд та прийнявши, що ширина спектра  $\Phi_v(\omega)$  дорівнює  $\Delta W$  та  $\Delta W \ll \frac{2\pi}{\tau}$ , отримаємо для частот в діапазоні

$$\left| \omega \pm \frac{2\pi}{\tau} \right| < \frac{\Delta W}{2} \text{ вираз}$$

$$\Phi_v(\omega) = |C_1|^2 \left[ \delta(\omega \pm \frac{2\pi}{\tau}) + \Phi_\varphi(\omega \pm \frac{2\pi}{\tau}) \right]. \quad (1.20)$$

Таким чином, необхідно вибирати смугу пропускання регульованого фільтра аналізатора спектра так, щоб знайти спектр фазового шуму  $\Phi_\varphi(\omega)$ .

Визначимо зв'язок між спектрами потужностей випадкових процесів, які відповідають умовам стаціонарності –  $\varphi(t)$  та незалежності –  $\Delta\tau_k$ . Прийmemo, що ширина спектра  $\Phi_\varphi(\omega)$  дорівнює  $\Delta W$  та  $\Delta W \ll \frac{2\pi}{\tau}$ . Тоді

$$\Phi_\varphi(\omega) = (2\pi/\tau)^2 \cdot \Phi_{\Delta\tau}(\omega). \quad (1.21)$$

З урахуванням цього співвідношення вираз для фазового шуму можна записати в такому вигляді:

$$\Phi_\eta(\omega) = \frac{1}{\pi^2} \int_{-\frac{\pi}{\tau}}^{\frac{\pi}{\tau}} \sin^2 \frac{\omega_1 \tau}{2} \cdot \Phi_\xi(\omega_1) \cdot \Phi_\varphi(\omega - \omega_1) d\omega_1. \quad (1.22)$$

Цей вираз описує зв'язок між фазовими шумами періодичних сигналів та тремтінням фронту тактового сигналу. Формула (1.22) може використовуватися для аналізу кількісних показників ФДр тактових сигналів ЦСП.

При частотному дослідженні ФДр необхідно проводити аналіз фазового шуму або спектра ФДр. В даному випадку фазовий шум необхідно порівнювати зі зсувом частоти відносно носійного сигналу або сигналу синхронізації. Спектральний аналіз ФДр є альтернативним методом для отримання ФДр в часовій області. Такий підхід до аналізу ФДр дає можливість визначити детерміноване ФДр за піками спектра аналізованого сигналу.

## 1.2 Методи оцінювання ФДр

Існуючі методи оцінювання ФДр поділяють на три класи: оцінювання спектра ФДр; оцінювання частотних характеристик ФДр за допомогою цифрових смугових фільтрів та оцінювання частотних характеристик ФДр за допомогою аналогових смугових фільтрів.

Найпростішим методом є оцінка ФДр за допомогою цифрового осцилографа та око-діаграми. Метод оцінювання ФДр сигналу ЦСП за допомогою осцилографа забезпечує пряме вимірювання амплітуди періодичного ФДр в сигналі ЦСП [3, 7, 17, 18]. На рис. 1.2 зображено немодульований імпульсний сигнал, модулюючий сигнал та модульований за фазою імпульсний сигнал [3, 7]. Функцію модуляції за фазою можна записати у вигляді

$$\varphi(t) = \alpha \sin(\omega t + \varphi_0) = \alpha \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right), \quad (1.23)$$

де  $\alpha$ ,  $\varphi_0$  – амплітуда та початкова фаза модулюючого коливання.

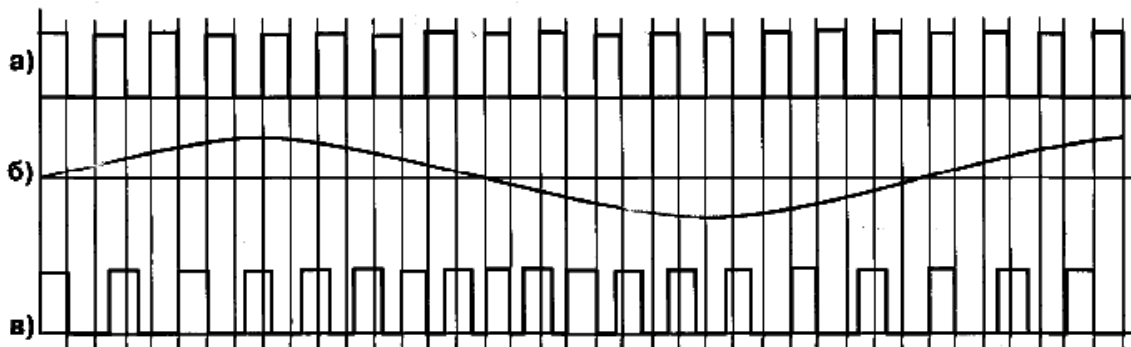


Рисунок 1.2 – Зображення цифрового сигналу, промодульованого за фазою гармонічним коливанням: а) імпульсний сигнал, немодульований за фазою; б) модулюючий сигнал; в) промодульований за фазою імпульсний сигнал



Різницю між відхиленнями фаз двох точок промодульованого сигналу за проміжок часу  $t_z$  визначимо за допомогою виразу [3, 17]

$$\begin{aligned}\Delta\varphi(t) &= \alpha \sin\left(\frac{2\pi(t+t_z)}{T} + \varphi_0\right) - \alpha \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi_0\right) = \\ &= 2\alpha \sin\left(\frac{\pi t_z}{T}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \frac{\pi t_z}{T} + \varphi_0\right).\end{aligned}\quad (1.24)$$

Вираз (1.24) показує, що  $\Delta\varphi(t)$  є гармонічною функцією в часі, в якій  $t_z$  є часом затримки. За допомогою відношення часу затримки до періоду модулюючого коливання  $T$  визначають амплітуду  $2\alpha \sin\left(\frac{\pi}{T}\right)$  та фазу  $\left(\frac{2\pi t}{T} + \frac{\pi t_z}{T} + \varphi_0\right)$  різниці відхилення фаз двох значень цифрового сигналу. Умову амплітуди різниці відхилення фаз двох значень цифрового сигналу визначимо за допомогою виразів [3, 17]:

$$\begin{aligned}\frac{\pi t_z}{T} &= \frac{\pi}{2} + k\pi, \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ \frac{t_z}{T} &= \frac{1}{2} + k, \quad k = 0, 1, 2, \dots\end{aligned}\quad (1.25)$$

З виразу (1.25) видно, що при безперервному вимірюванні різниці фаз між сигналом без затримки та сигналом із затримкою  $t_z$  отримуємо значення ФДр, яке змінюється за гармонічним законом. У випадку невиконання умови з виразу (1.25), необхідно для визначення ФДр використовувати такий вираз [3, 17]:

$$2\alpha = \frac{A}{\sin\left(\frac{\pi t_z}{T}\right)}.\quad (1.26)$$

Отже, для досягнення високої точності оцінювання амплітуди ФДр за допомогою цього методу необхідно, щоб досліджуваний цифровий сигнал був періодичним з цілим числом періодів:

$$t_z = n \cdot T_{CS}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (1.27)$$

де  $T_{CS}$  – період цифрового сигналу.

Підставивши вираз (1.27) у вираз (1.25), отримаємо умову максимальної різниці фаз для двох точок цифрового сигналу

$$\begin{aligned}\frac{nT_{CS}}{T} &= \frac{1}{2} + k; \\ \frac{n \cdot f}{B} &= \frac{1}{2} + k,\end{aligned}\quad (1.28)$$

де  $f$  – частота ФДр;  $B$  – швидкість передавання сигналу в ЦСП.

З (1.28) отримуємо аналітичний вираз для визначення частот ФДр, на яких необхідно виконувати оцінювання амплітуди ФДр за допомогою цифрового осцилографа

$$f = B \cdot \frac{T_{CS}}{T}, \quad (1.29)$$

де  $T$  – період модулюючого коливання.

У випадку, коли значення частоти ФДр не відповідає умові виразу (1.28) необхідно використовувати вираз (1.27). Для визначення точності цього методу оцінювання ФДр виконаємо перетворення виразу (1.24) до такого вигляду:

$$\Delta\varphi = 2\alpha \cdot B \cdot C, \quad (1.30)$$

де  $B = \sin \frac{\pi t_z}{T}$ ,  $C = \cos \left( \frac{2\pi t}{T} + \frac{\pi t_z}{T} + \varphi_0 \right)$  – значення функцій, які залежать від особливостей роботи цифрового осцилографа.

З урахуванням (1.30) визначаються похибки оцінювання ФДр за допомогою використання частинних похідних по окремих значущих змінних [3, 18]:

$$\begin{aligned}\Delta(\Delta\varphi) &= l \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t_z} \right) \Delta t_z \right]^2 / 3 + \left[ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial T} \right) \Delta T \right]^2 / 3 + \left[ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) \Delta t \right]^2 / 3 + \Delta T_{izm}^2 / 3} = \\ &= l \sqrt{\frac{4\alpha^2}{3} + \left( \left[ C \frac{\partial B}{\partial t_z} \Delta t_z \right]^2 + \left[ C \frac{\partial B}{\partial T} \Delta T \right]^2 + \left[ B \frac{\partial C}{\partial t} \Delta t \right]^2 \right) + \frac{\Delta T_{izm}^2}{3}},\end{aligned}\quad (1.31)$$

де  $l$  – коефіцієнт, який визначає ймовірність похибки визначення ФДр;  $\Delta T_{izm}$  – похибка визначення зони коливання імпульсу сигналу.

Проведемо оцінювання величини похибки визначення параметра  $B$  для ФДр у діапазоні зміни значень  $\Delta t_z$  згідно з виразом [3, 18]

$$\begin{aligned} \Delta B(\Delta t_z) &= \sin \frac{\pi t_z}{T} - \sin \frac{\pi(t_z \pm \Delta t_z)}{T} = \\ &= \sin \frac{\pi t_z}{T} - \sin \frac{\pi t_z}{T} \cdot \cos \frac{\pi \Delta t_z}{T} \pm \cos \frac{\pi \Delta t_z}{T}. \end{aligned} \quad (1.32)$$

Враховуючи діапазон значень  $\Delta t_z$ , що відповідають умові виразу (1.25), з (1.32) отримаємо

$$\Delta B(\Delta t_z) = 1 - \cos \frac{\pi \Delta t_z}{T}. \quad (1.33)$$

Оцінювання точності визначення ФДр в ТКС виконаємо згідно з виразом [3,18]

$$\Delta B(\Delta T) = 1 - \cos \frac{\pi t_z \Delta T}{T^2} = 1 - \cos \left( \frac{\pi}{2} + k\pi \right) \delta T. \quad (1.34)$$

Цей метод оцінювання амплітуди ФДр необхідно використовувати за умови періодичності модулюючого коливання інформаційного цифрового сигналу ЦСП.

Оцінювання ФДр на базі око-діаграми є простим методом. Око-діаграма – це сумарне подання всіх бітових періодів сигналу, які накладені один на одного. Для око-діаграми не потрібне використання тестового сигналу, хоча можна застосовувати імпульсний тестовий сигнал [19–23]. Тобто, зображення сигналу від початку періоду 2 до початку періоду 3 накладається на зображення сигналу від початку періоду 1 до початку періоду 2, і так для всіх періодів (рис. 1.3) [19].

Іншим методом оцінювання ФДр є гістограма. Гістограма являє собою розподіл набору значень, що відображаються досліджуваним параметром (період або амплітуда, які відкладаються по осі X), залежно від частоти їх виникнення (вісь Y). Гістограма забезпечує наочність, яка око-діаграмі недосяжна. При пошуку несправності, характеристики сигналу, такі як час зростання і спадання, період і коефіцієнт заповнення можуть бути показані на гістограмі. Дані гістограми ілюс-

трукують розподіл продуктивності для різних режимів роботи, яка може бути поставлена у відповідність з умовами функціонування системи передачі, типом послідовності, що передається.

Ключовим застосуванням гістограм є розподіл частоти значень похибки інтервалу часу (Time Interval Error – TIE) для всіх бітових переходів вимірюваного сигналу [20]. TIE – це різниця в часі між дійсними та очікуваними точками перетину на око-діаграмі. У цьому методі використовується функція інтервалу  $x(t)$ , яка визначається як різниця між значеннями  $T_{on}(t)$  та досліджуваним сигналом  $T(t)$

$$x(t) = T(t) - T_{on}(t). \quad (1.35)$$

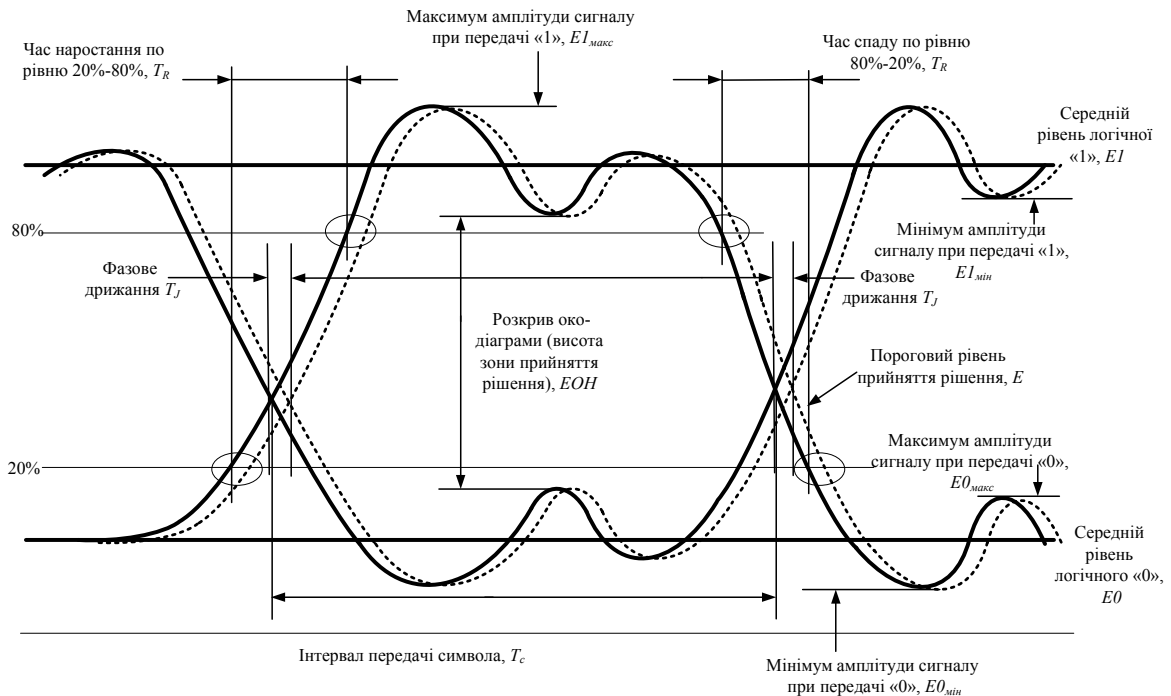


Рисунок 1.3 – Око-діаграма та її основні параметри

При переході до розрахунків параметрів стабільності замість функції  $x(t)$  використовується послідовність відліків відхилень часових інтервалів  $x_i$ , які взяті через рівні проміжки часу  $\lambda_0$  [21]:

$$x_i = x(t_0 + i\lambda_0), \quad (1.36)$$

де  $\lambda_0$  – початок відліку.

Гістограма значень ТІЕ – це основні дані для процедур відокремлення ФДр, що необхідні для різних стандартів ТКС.

Іншим методом оцінювання результуючого ФДр (Total Jitter, TJ) є його нормалізована гістограма, яка представляється залежністю коефіцієнта бітових помилок  $K_{BER}$  від положення точки стробування на одиничному часовому інтервалі ОІ [20, 22]. Точці стробування (ОІ = 0,5), яка знаходиться посередині одиничного інтервалу, відповідає практично безпомилкова передача. При зміщенні цієї точки значення  $K_{BER}$  зростає. Гістограма забезпечує рівень розуміння, який окодіаграмі не доступний.

При пошуку несправності, характеристики сигналу, такі як час наростання і спаду, період і коефіцієнт заповнення, можуть бути відображені на гістограмі. Ці гістограми ілюструють розподіл продуктивності для різних режимів роботи, який може бути співвіднесений з умовами функціонування системи передачі, наприклад, видом переданої послідовності.

Наступним методом оцінювання ФДр є побудова кривої U-типу (bathtub curve), яка представляється графіком залежності частоти помилок по бітах ( $K_{BER}$ ) від розташування пробної точки на одиничному інтервалі (рис. 1.4).

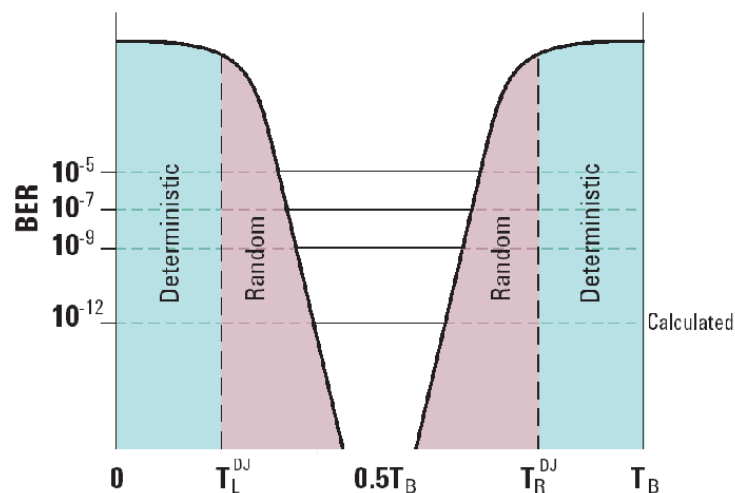


Рисунок 1.4 – U-подібна крива для оцінювання ФДр

Такий графік подають в логарифмічному масштабі, щоб зменшити нахил кривої. Коли пробна точка знаходиться біля точки переходу, то  $K_{BER} = 0,5$ , що означає однакову вірогідність правильного чи неправильного визначення біта. При пересуванні пробної точки до центра одиничного інтервалу  $K_{BER}$  стрімко зменшується. У цій області переважає механізм випадкового ФДр і  $K_{BER}$  визначається середньоквадратичним відхиленням процесів Гауса, які визначають випадкове ФДр. Вважається, що оптимальним положенням пробної точки є центр одиничного інтервалу. Сторони кривої U-типу показують межі безпомилкової передачі при обраному допустимому рівні  $K_{BER}$ . Чим далі знаходиться ліва сторона кривої від правої сторони при визначеному  $K_{BER}$ , тим більший запас стійкості до ФДр у досліджуваній системі. Крива U-типу може використовуватись для розділення випадкового та детермінованого ФДр, а також для визначення середньоквадратичного відхилення випадкової складової [7, 17, 23].

Аналіз ФДр у частотній області – це ще один метод визначення причин його виникнення. Джерела детермінованого ФДр у частотній області виявляються у вигляді дискретного спектра. При частотному розгляді проводиться аналіз фазового шуму або спектра ФДр, і фазовий шум або ФДр співвідноситься із зсувом носійної частоти або частоти синхронізації.

Розділення ФДр на складові є одним із методів його оцінювання і є дуже важливим на практиці. Якщо можна відокремити детерміноване ФДр і потім визначити поведінку середньоквадратичного відхилення випадкового ФДр, то можна швидко оцінити частоту бітової помилки (BER), не виконуючи тривалих процедур, які потрібні при визначенні BER з порядком  $10^{-12}$  і достовірністю на рівні 95 % [10, 18, 23].

Третій метод розділення компонент ФДр – застосування дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) до послідовності часових інтервалів (ПЧІ) [8, 24, 25]. З отриманого спектра видаляються складові, обумовлені детермінованим ФДр, після чого проводиться зворотне перетворення Фур'є. В результаті можна отримати випадкове ФДр без детермінованої компоненти.

Для комплексного аналізу періодичного ФДр, випадкового ФДр та обмеженого некорельованого ФДр можна використовувати спектральну методологію, яка базується на ДПФ. Реалізація цієї

методології при аналізі ФДр базується на заповненні пропущених значень ПЧІ методом інтерполяції [8, 24]. В результаті інтерпольовані значення ПЧІ ігноруються. Використання інтерполяції невідомих значень ПЧІ за найближчими відомими значеннями спотворює спектр послідовності ПЧІ у смузі нижніх частот з подавленням амплітуд високочастотних складових. Такі спотворення спектра призводять до погіршення точності оцінювання усіх складових ФДр [8, 25].

Модифікація цього методу спектрального аналізу компонентів ФДр базується на заповненні пропущених значень ПЧІ шляхом заміни їх на значення, які характеризують періодичну складову ФДр, що дозволяє розділити періодичну та випадкову складові ФДр. Цей метод можна реалізувати шляхом виконання таких етапів [8, 25]:

- невідомі значення в послідовності ПЧІ замінюються періодичною послідовністю нулів та одиниць та за допомогою ДПФ виконується перехід з часової у частотну область;

- визначення пікових складових спектра послідовності ПЧІ, які відповідають значенням періодичного ФДр з відкиданням складових спектра, які не відповідають піковим значенням періодичного ФДр;

- виконання процедури зворотного ДПФ, в результаті чого отримуємо послідовність періодичних складових ФДр у часовій області;

- виконання процедури коригування послідовності складових періодичного ФДр та заміни невідомих значень послідовності ПЧІ на відповідні значення отриманої послідовності складових періодичного ФДр;

- за допомогою фільтрації у частотній області виконується процедура виділення з послідовності ПЧІ періодичної складової ФДр;

- значення послідовності, що характеризують періодичне ФДр, замінюють на невідомі значення і в подальшому аналізі при розділенні та оцінюванні параметрів випадкової та періодичної складових ФДр не враховуються.

Комплексний аналіз випадкового та обмеженого некорельованого ФДр базується на дослідженні відмінностей відповідних автокореляційних функцій (АКФ) компонентів загального ФДр. Для аналізу характеристики появи ФДр у  $D$  взаємодіючих ланках ТКС та через  $d$  наведень, що виникають, можна АКФ обмеженого некорельованого ФДр представити як [9, 11, 26]:

$$k_{BUJ}(n) = \begin{cases} 0,5 \cdot \sum_{d=1}^D \Delta_d^2, & \text{для } n = 0 \\ 0,25 \cdot \sum_{d=1}^D \Delta_d^2, & \text{для } n = 1 \\ 0, & \text{для } n \geq 2, \end{cases} \quad (1.37)$$

де  $\Delta_d$  – параметр, який характеризує зміну положення фронту/спаду імпульсу, що передається в умовах наведень з  $d$ -ї ланки.

Враховуючи, що основним джерелом випадкового ФДр є тепловий шум, то його АКФ будемо описувати за допомогою виразу [11, 26]

$$k_{RJ}(n) = \begin{cases} \sigma_{RJ}^2, & \text{для } n = 0 \\ 0, & \text{для } n \geq 1, \end{cases} \quad (1.38)$$

де  $\sigma_{RJ}$  – середньоквадратичне відхилення (СКВ) значень випадкового ФДр.

Враховуючи, що причини виникнення випадкового та обмеженого некорельованого ФДр є незалежними, сумарна АКФ буде визначатися як

$$k_{BUJ+RJ}(n) = k_{BUJ}(n) + k_{RJ}(n). \quad (1.39)$$

Підставивши у вираз (1.39) значення параметрів ФДр, отримаємо

$$k_{BUJ+RJ}(n) = \begin{cases} \sigma_{RJ}^2 + 0,5 \cdot \sum_{d=1}^D \Delta_d^2, & \text{для } n = 0 \\ 0,25 \cdot \sum_{d=1}^D \Delta_d^2, & \text{для } n = 1 \\ 0, & \text{для } n \geq 2. \end{cases} \quad (1.40)$$

Визначимо  $k_{BUJ+RJ}(0)$  з виразу (1.40):



$$k_{BUJ+RJ}(0) = 2 \cdot k_{BUJ+RJ}(1) + \sigma_{RJ}^2. \quad (1.41)$$

Звідси отримаємо

$$\sigma_{RJ} = \sqrt{k_{BUJ+RJ}(0) - 2 \cdot k_{BUJ+RJ}(1)}. \quad (1.42)$$

Таким чином, за допомогою відомої загальної АКФ для випадкового і обмеженого некорельованого ФДр та, використовуючи вираз (1.42), визначимо СКВ  $RJ_{RMS} = \sigma_{RJ}$  випадкової складової загального ФДр. У випадку, коли відомі значення ПЧІ, оцінювання АКФ можна проводити за допомогою виразу [9, 26]:

$$k_{BUJ+RJ}(n) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=0}^{N-n-1} (TIE(i) - \overline{TIE}) \cdot (TIE(i+n) - \overline{TIE}), \quad (1.43)$$

де  $n = 0, 1, 2 \dots n_{\max}$ ;  $\overline{TIE}$  – середнє значення послідовності ПЧІ:

$$\overline{TIE} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} TIE(i). \quad (1.44)$$

При визначенні АКФ ПЧІ необхідно враховувати лише відомі значення послідовності. Для випадку, коли враховуються невідомі значення ПЧІ, вирази (1.43) та (1.44) будуть мати вигляд:

$$k_{BUJ+RJ}(n) = \frac{1}{K_n} \sum_{i=0}^{N-n-1} (TIE(i) - \overline{TIE}) \cdot (TIE(i+n) - \overline{TIE}) \Big|_{\substack{TIE(i) \neq NaN \\ TIE(i+n) \neq NaN}}; \quad (1.45)$$

$$\overline{TIE} = \frac{1}{K_0} \sum_{i=0}^{N-1} TIE(i) \Big|_{TIE(i) \neq NaN}, \quad (1.46)$$

де  $K_n$  – кількість пар відомих значень ПЧІ, які зсунені один від одного на  $n$  тактів.

Після оцінювання СКВ  $\sigma_{RJ}$  випадкового ФДр необхідно визначити діапазон обмеженого некорельованого ФДр за допомогою коригування гістограми значень послідовності ПЧІ. Коригування гістограми ПЧІ базується на оцінюванні обмеженого некорельованого ФДр при відомому СКВ  $\sigma_{RJ}$  випадкового ФДр шляхом підбору відповідних значень математичних сподівань  $\mu^+$  та  $\mu^-$  нормальних розподілень значень гістограми випадкового та обмеженого некорельованого ФДр. Тоді діапазон обмеженого некорельованого ФДр можна знайти за допомогою виразу  $BUJ_{p-p} = \mu^+ - \mu^-$ .

Суть аналогових методів оцінювання ФДр полягає у визначенні ФДр сигналу із лінійним кодуванням (NRZ) [10, 27]. В результаті з тестового сигналу  $x$ , за допомогою якого проводяться визначення ФДр, виділяється частота синхронізації, яка використовується для порівняння з цифровим сигналом  $x$ , що пройшов блок ФАПЧ-ФНЧ (рис. 1.5) [5, 10, 27].

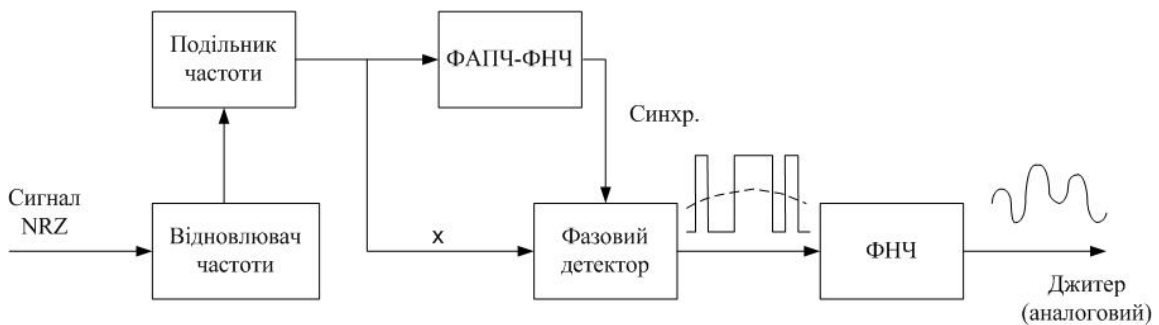


Рисунок 1.5 – Структура аналогового методу оцінювання ФДр

Сигнал  $x$  та синхросигнал подаються на фазовий детектор, який виконує порівняння фаз. На виході фазового детектора формується сигнал, амплітуда та полярність якого залежить від різниці фаз сигналу  $x$  та синхросигналу.

Аналогові методи оцінювання ФДр мають характерні недоліки:

- відновлення синхроімпульсів обмежує діапазон оцінювання ФДр;
- система відновлення синхронізації вносить шуми, які понижують роздільну здатність оцінювання ФДр;

- широкий динамічний діапазон вимагає ширококутового подільника частоти, а фазовий детектор обмежує динамічний діапазон оцінювання;
- на аналоговий сигнал впливають зовнішні завади;
- амплітуда аналогового сигналу обмежена амплітудою напруги живлення;
- внаслідок вузької смуги пропускання знижується швидкість відновлення синхроімпульсів для захвату частоти;
- ці методи вимагають калібрування перед кожним оцінюванням ФДр.

Основною відмінністю цифрових методів є заміна аналогових методів оцінювання методами на базі ЦОС. Схема цифрового методу оцінювання ФДр показана на рис. 1.6 [9, 22, 28, 29]. В основі методу є аналого-цифрове перетворення вхідного сигналу, включаючи відносні зміни часу появи фронтів. Отримані значення ФДр використовуються для визначення пікового та середньоквадратичного значення або проведення спектрального аналізу.

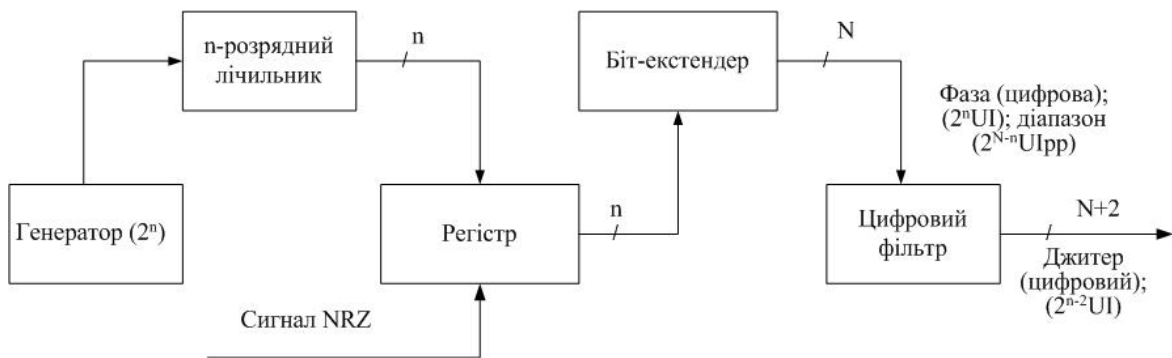


Рисунок 1.6 – Цифровий метод оцінювання ФДр

До переваг цифрових методів оцінювання ФДр можна віднести:

- широку смугу пропускання та низький рівень шуму через відсутність відновлення синхроімпульсів;
- розширення смуги пропускання та вирівнювання АЧХ за рахунок цифрового фазового детектора, який ділить кожен фронт NRZ на складові;
- зниження шуму за рахунок несприйнятливості цифрового подільника до впливу шумів;
- похибки оброблення не перевищують 0,01 %;

- динамічний діапазон вимірювання дорівнює 4000 ОІ при роздільній здатності 0,01 ОІ
- відсутність необхідності розділення всього діапазону значень ФДр на декілька інтервалів з наступним зрощуванням результатів;
- через відсутність ФАПЧ не потрібно виконувати калібрування пристрою перед кожним оцінюванням.

Отже, при використанні цифрових методів роздільна здатність, оперативність та інформативність оцінювання ФДр зростає.

У загальному випадку ФДр визначається в одиничних інтервалах (Unit intervals, UI) [22, 28]

$$J = \frac{T_j}{T_0} \times 100\%, \quad (1.47)$$

де  $T_j$  – період ФДр;  $T_0$  – період тактової частоти.

Амплітуда ФДр як функція передачі фази позначається індексом *pp* (peak-to-peak). Значення ФДр може бути оцінене з достатньою точністю тільки у випадку, якщо встановлена достатня ширина смуги, яка використовується для зважування наявного спектра ФДр. Тому виконують два оцінювання з використанням різних зважувальних смугових фільтрів.

При експериментальному дослідженні ФДр розрізняють такі напрямки оцінювань:

- оцінювання власного ФДр системи передачі;
- оцінювання максимально допустимого ФДр МТІ;
- оцінювання частотної характеристики ФДр ІТФ, яка визначається як приведена різниця між ФДр на виході та ФДр на вході пристрою/каналу [22, 28],

$$JTF(f_i) = 20 \lg \frac{J_{out}(f_i) - J_{in}(f_i)}{J_{in}(f_i)}, \quad (1.48)$$

де  $J_{out}(f_i)$  – значення ФДр на виході пристрою/каналу на частоті  $f_i$ ;  $J_{in}(f_i)$  – значення ФДр на вході пристрою/каналу на частоті  $f_i$ .

У випадках дослідження ФДр в складних цифрових трактах застосовується метод розкладання тракту на елементарні функціональні

складові. Складний ЦТ розглядається як послідовність перетворювачів сигналу: регенераторів, фільтрів, мультиплексорів/демультиплексорів. Кожен з цих перетворювачів діє відносно фазових спотворень як фільтр нижніх частот (ФНЧ) з передатною характеристикою  $T_i(p)$ . Передатна характеристика складного цифрового тракту для ФДр може бути представлена виразом

$$T(p) = \prod_{i=1}^n T_i(p). \quad (1.49)$$

Для визначення максимально допустимого ФДр можуть використовуватись [15, 22]:

- метод з критерієм збільшення параметра  $K_{BER}$ , який полягає у визначенні амплітуди ФДр (на заданій частоті) за допомогою визначення еквівалентного ФДр, що являє собою точну та відтворену міру параметра МТТ;

- метод з використанням критерію появи помилок, що базується на визначенні найбільшої амплітуди ФДр на заданій частоті, яка забезпечує не більше двох помилок.

Для визначення частотної характеристики ФДр застосовується метод, що полягає у внесенні у вхідний цифровий потік ФДр заданої амплітуди та його аналізу на виході. Варіація частоти дає характеристику залежності амплітуди ФДр від частоти. Двома найважливішими характеристиками спектрального аналізу ФДр є кількість частот, на яких необхідно проаналізувати спектр та роздільна здатність при оцінюванні спектра.

Ефективним методом оцінювання ФДр є спектральний аналіз, де джерела детермінованого ФДр виявляються у вигляді піків на неперервній кривій випадкового фазового шуму. Спектральні методи оцінювання ФДр є високоточними і використовуються для оцінювання ФДр розроблюваних приладів та пошуку складних пошкоджень у ТКС в лабораторних умовах.

Класифікаційну схему існуючих методів оцінювання ФДр наведено на рис. 1.7.

Ще одним методом аналізу ФДр в частотній області є застосування швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Кількість відліків сигналу при ШПФ

$$L = N \cdot M, \quad (1.50)$$

де  $N$  – необхідна кількість спектральних відліків;  $M$  – ціле число, більше одиниці.

Тоді вираз для ШПФ буде мати вигляд:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \sum_{m=0}^{M-1} x(n + mN) \right] e^{-j(2\pi/N)nk}, \quad (1.51)$$

де  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ .



Рисунок 1.7 – Класифікація методів оцінювання ФДр

З формули випливає, що фактично при розрахунках спектра виконується попереднє підсумовування вхідних відліків, які рівновіддалені один від одного на  $N$  точок, після чого визначається ДПФ нової послідовності.

Якісний порівняльний аналіз існуючих методів оцінювання ФДр наведено в таблиці 1.1.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Довгий С. О. Сучасні телекомунікації / С. О. Довгий, О. Я. Савченко, П. П. Воробієнко. – К. : Український видавничий центр, 2002. – 520 с.
2. Шахгильдян В. В. Системы фазовой автоподстройки частоты / В. В. Шахгильдян, А. А. Ляховкин. – М. : Связь, 1972. – 448 с.
3. Шахгильдян В. В. Системы фазовой синхронизации / В. В. Шахгильдян, В. Н. Акимов, В. Н. Белюстина и др. – М. : Радио и связь, 1982. – 288 с.
4. Стеклов В. К. Комбинированные системы фазовой автоподстройки / В. К. Стеклов, А. А. Руденко, А. К. Юдин. – К. : Техніка, 2004. – 328 с.
5. Стеклов В. К. Системи фазового автопідстроювання високої точності та швидкодії / В. К. Стеклов, О. А. Руденко, Б. Я. Костік. – К. : Техніка, 2005. – 344 с.
6. Султанов Б. В. Анализ цифровых систем фазовой синхронизации на основе функциональных разложений Вольтерра : монография. / Б. В. Султанов. – П. : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. – 169 с.
7. Бакланов И. Г. Тестирование и диагностика систем связи / И. Г. Бакланов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2001. – 264 с.
8. Дамм В. А. Восстановление пропущенных значений ошибок временных интервалов при разделении компонентов общего фазового дрожания цифрового сигнала / В. А. Дамм, В. А. Шалагинов, В. В. Елиферевский и др. // Вестник РГРТУ. – 2008. – № 4 – С. 10–18.
9. Султанов Б. В. Спектральный метод измерения фазового дрожания / Б. В. Султанов, М. А. Щербаков, А. П. Иванов и др. // Датчики и системы. – 2005. – № 6 – С. 31–35.
10. Бакланов И. Г. Методы измерений в системах связи / И. Г. Бакланов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 1999. – 195 с.

11. Корольков А. В. Разделение компонентов общего фазового дрожания цифрового сигнала данных / А. В. Корольков, В. А. Дамм, В. А. Шалагинов. // Вестник РГРТУ. – 2009. – № 3 – С. 37–40.
12. Бакланов И. Г. Технологии измерений в современных телекоммуникациях / И. Г. Бакланов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 1997. – 139 с.
13. Бакланов И. Г. Технологии измерений первичной сети. Часть 1. Системы E1, PDH, SDH. / И. Г. Бакланов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. – 145 с.
14. Стеклов В. К. Сучасні системи управління в телекомунікація : монографія / В. К. Стеклов, Б. Я. Костік, Л. Н. Беркман. – К. : Техніка, 2005. – 396 с.
15. Бирюков Н. Л. Анализ суммарных фазовых искажений в цифровых трактах / Н. Л. Бирюков, Н. Р. Триска // Зв'язок. – 2003. – № 4 – С. 22–26.
16. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи. / С. Брени. – М. : Мир, 2003. – 418 с.
17. Хамадулин Э. Ф. Методы и средства измерений в телекоммуникационных системах : учеб. пособие. / Э. Ф. Хамадулин. – М. : Высшее образование, 2009. – 365 с.
18. Панфілов І. П. Вимірювання в телекомунікації: Підручник / І. П. Панфілов, М. С. Гаврилюк. – О. : УДАЗ, 1998. – 255 с.
19. Бакланов И. Г. ISDN и Frame Relay. Технология и практика измерений. / И. Г. Бакланов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 1999. – 187 с.
20. Бакланов И. Г. Технологии измерений первичной сети. Часть 2. Системы синхронизации, В-ISDM, АТМ. / И. Г. Бакланов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2002. – 150 с.
21. Бакланов И. Г. Технологии измерений первичной сети. Системы синхронизации, В-ISDM, АТМ / И. Г. Бакланов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2002. – 149 с.
22. Бакланов И. Г. SDH-NGSDH: практический взгляд на развитие транспортных сетей / И. Г. Бакланов. – М. : Метротек, 2006. – 736 с.



23. Колинько Т. А. Измерения в цифровых системах связи. Практическое руководство / Т. А. Колинько. – К. : Век+, 2002. – 320 с.
24. Бирюков Н. Л. Использование функции максимальной ошибки временного интервала для оценки состояния цифровых трактов / Н. Л. Бирюков, Н. Р. Триска // Зв'язок. – 2004. – № 1 – С. 29–32.
25. Залманзон Л. А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. / Л. А. Залманзон. – М. : Наука, 1989. – 496 с.
26. 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.
27. Марченко А. Л. Основы преобразования информационных сигналов. / А. Л. Марченко, Е. А. Марченко. – М. : Горячая линия Телеком, 2010. – 290 с.
28. Бакланов И. Г. NGN: принципы построения и организации / И. Г. Бакланов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2008. – 400 с.
29. Айфичер Э. С. Цифровая обработка сигналов: практический подход. / Э. С. Айфичер, Б. У. Джервис. – М. : Вильямс, 2008. – 992 с.
30. ITU-T Recommendation O.171 (1997) Timing jitter and wander measuring equipment for digital systems which are based on the plesiochronous digital hierarchy (PDH) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.itu.int/rec/T-REC-O.171-199704-I>. – Назва з екрана.
31. ITU-T Recommendation O.172 (2005) Jitter and wander measuring equipment for digital systems which are based on the synchronous digital hierarchy (SDH) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.itu.int/rec/T-REC-O.172-200504-I>. – Назва з екрана.
32. ITU-T Recommendation O.173 (2007) Jitter measuring equipment for digital systems which are based on the Optical Transport Network (OTN) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.itu.int/rec/T-REC-O.173-201007-S>. – Назва з екрана.
33. ITU-T Recommendation G.823 (2000) The control of jitter and wander within digital networks which are based on the 2048 kbit/s

hierarchy. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.823-200003-I>. – Назва з екрана.

34. ITU-T Recommendation G.825 (1993) The control of jitter and wander within digital networks which are based on the synchronous digital hierarchy (SDH). [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.825-200003-I> – Назва з екрана.

35. КНД 45-074-97 (1998) Системи передачі цифрові. Норми на параметри основного цифрового каналу і цифрових трактів первинної мережі зв'язку України. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://normativ.com.ua/types/tdoc3714.php> – Назва з екрана.

36. Раннев Г. Г. Методы и средства измерений : учеб. для вузов. / Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. – М. : Академия, 2004. – 336 с.

37. Афонский А. А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. – М. : Солон-пресс, 2009. – 248 с.

38. Рубичев Н. А. Измерительные информационные системы : учеб. пособ. / Н. А. Рубичев. – М. : Дрофа, 2010. – 334 с.

39. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. / Б. Скляр. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.

40. Панфилов И. П. Цифровая связь. / И. П. Панфилов, В. К. Стеклов, Н. Л. Бирюков и др. – К. : Техніка, 1992. – 228 с.

41. Дансмор Б. Справочник по телекоммуникационным технологиям. / Б. Дансмор, Т. Скандьер. – М. : Вильямс, 2004. – 640 с.

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

43. Бортник Г. Г. Аналіз точності оцінювання максимально допустимого джитеру в телекомунікаційних системах / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський // Збірник наук. статей II Всеукраїнського з'їзду еколог. з міжнар. участю (Екологія / Ecology-2009). – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – С. 263–266.

44. Крухмалев В. В. Цифровые системы передачи. Учебное пособие. / В. В. Крухмалев, В. Н. Гордиенко, А. Д. Моченов. – М. : Горячая линия телеком, 2007. – 352 с.
45. Давыдкин П. Н. Тактовая сетевая синхронизация. / П. Н. Давыдкин, М. Н. Колтунов, А. В. Рыжков. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2004. – 205 с.
46. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов. / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М. : Мир, 1978. – 848 с.
47. Оппенгейм А. Цифровая обработка сигналов. / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – М. : Техносфера, 2006. – 856 с.
48. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. / С. Л. Марпл-мл. – М. : Мир, 1990. – 584 с.
49. Proakis J. G. Digital signal processing: Principles, Algorithms, and Applications. / J. G. Proakis, D. G. Manolakis. – New Jersey. : Prentice-Hall, 1996. – 1036 p.
50. G. Bortnik, The analysis of time signal jitter influence on the telecommunication system work quality / G. Bortnik, M. Vasylykivskyj, M. Minov // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2008) : матеріали ІХ міжнар. конф. – Львів : ЛНТУ «Львівська політехніка», 2008. – С. 416–417.
51. М. В. Васильківський, Цифровий метод вимірювання джитеру в телекомунікаційних системах / М. В. Васильківський, Н. О. Пунченко // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2008) : матеріали ІV міжнар. наук.-техн. конф. – Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2008. – С. 191.
52. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М. : Мир, 1989. – 540 с.
53. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. / А. Б. Сергиенко. – СПб : Питер, 2002. – 608 с.
54. Г. Бортник, Спектральний аналіз джитеру в телекомунікаційних системах / Г. Бортник, М. Васильківський, В. Яблонський // Сучасні проблеми радіотехніки, телекомунікацій та приладобудування

(СПРТП-2009) : матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – С. 9.

55. Бортник Г. Г. Спектральний метод оцінювання джитеру в телекомунікаційних системах / Г.Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. А. Челоян // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 2. – С. 109–114.

56. Бортник Г. Г. Спектральний метод оцінювання параметрів періодичного фазового дрижання групових сигналів у системах передавання / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 2. – С. 57–61.

57. Oppenheim A. V. Discrete-time signal processing. / A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, J. R. Buck. – New Jersey : Prentice-Hall, 1998. – 897 p.

58. Бортник Г. Г. Метод оцінювання фазового дрижання в комп'ютерних і телекомунікаційних мережах / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. В. Стальченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – № 2. – С. 79–82.

59. Бортник Г. Г. Спектральний метод оцінювання параметрів фазового дрижання групових сигналів у системах передавання / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП\_11\_2012) : матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф. – Хмельницький : Вісник ХНУ, 2012. – С. 55–56.

60. Бортник Г. Г. Метод оцінювання детермінованих складових фазового дрижання у цифрових системах передавання / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. Г. Бортник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 3. – С. 45–48.

61. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. / Р. Блейхут. – М. : Мир, 1989. – 448 с.

62. Раушер К. Основы спектрального анализа. / К. Раушер, Ф. Йанссен, Р. Минихольд. – М. : Горячая линия телеком, 2006. – 224 с.

63. Гадзиковский В. И. Теоретические основы цифровой обработки сигналов. / В. И. Гадзиковский. – М. : Радио и связь, 2004. – 343 с.

64. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов. / У. Кестер. – М. : Техносфера, 2010. – 328 с.
65. Бондарев В. Н. Цифровая обработка сигналов: методы и средства / В. Н. Бондарев, Г. Трестер, В. С. Чернега. – Х. : Конус, 2001. – 398 с.
66. Бортник Г. Г. Метод оцінювання основних параметрів фазового дрижання в системах передавання даних / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 6. – С. 97–101.
67. Bortnik G. Phase jitter estimation in radio channels of telecommunication systems / G. Bortnik, M. Vasylykivskyj // Modern problems of radio engineerings, telecommunications and computer science (TCSET'2012) : матеріали XI міжнародної конференції – Львів : ЛНТУ «Львівська політехніка», 2012. – С. 307.
68. Шахтарин Б. И. Методы спектрального оценивания случайных сигналов : учебное пособие / Б. И. Шахтарин, В. А. Ковригин. – М. : Гелиос АРВ, 2005. – 248 с.
69. Лэй Э. Цифровая обработка сигналов для инженеров и технических специалистов. / Э. Лэй. – М. : Группа ИДТ, 2007. – 336 с.
70. Бортник Г. Г. Математична модель джитеру в складних телекомунікаційних мережах / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, Н. О. Пунченко // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2008) : матеріали ІХ міжнар. наук. конф. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – С. 6–7.
71. Бортник Г. Г. Спектральні моделі фазового дрижання в цифрових системах передачі / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, М. А. Мельник // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 1. – С. 173–176.
72. Алексеев Е. Б. Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей : учебное пособие. / Е. Б. Алексеев, В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев и др. – М. : Горячая линия телеком, 2008. – 392 с.

73. Федосов В. П. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW : учебное пособие. / В. П. Федосов, А. К. Нестеренко. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 456 с.

74. Солонина А. И. Цифровая обработка сигналов: моделирование в Simulink / А. И. Солонина. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.

75. Бортник Г. Г. Математичне моделювання сигналів цифрових систем передачі в умовах джитеру / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010) : матеріали X міжнар. наук. конф. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – С. 97–98.

76. Хелд Г. Технологии передачи данных. / Г. Хелд. – СПб. : Питер, 2003. – 720 с.

77. Гольдштейн Б. С. Сети святы : учеб. для вузов / Б. С. Гольдштейн, Н. А. Соколов, Г. Г. Яновский. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.

78. Умняшкин С. В. Теоретические основы цифровой обработки и представления сигналов : учеб. пособие / С. В. Умняшкин. – М. : Техносфера, 2012. – 368 с.

79. Деев В. В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи / В. В. Деев. – СПб. : Наука, 2007. – 267 с.

80. Журавлев В. И. Цифровая фазовая модуляция / В. И. Журавлев, А. Н. Руднев. – М. : Радиотехника, 2012. – 208 с.

81. Бортник Г. Г. Метод підвищення точності оцінювання складових джитеру в телекомунікаційних мережах / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, Л. Ф. Мінов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія : тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – С. 325–326.

82. Бортник Г. Аналіз методів і засобів оцінювання джитера та вандера в телекомунікаційних системах / Г. Бортник, В. Яблонський, М. Васильківський // Сучасні проблеми радіотехніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2007) : матеріали III міжнар. наук.-практ. конф. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – С. 13–14.

83. Бортник Г. Г. Аналіз фазового дрижання в системах дистанційного екологічного контролю / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський // III Всеукр. з'їзду еколог. з міжнар. участю (Екологія / Ecology-2011) : збірник наук. статей – Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 356–359.

84. Власенко В. А. Методы синтеза быстрых алгоритмов свертки и спектрального анализа сигналов. / В. А. Власенко, Ю. М. Лаппа, Л. П. Ярославский. – М. : Наука, 1990. – 180 с.

85. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. / С. Смит. – М. : Додэка XXI, 2008. – 720 с.

86. Солонина А. И. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов / А. И. Солонина, Д. А. Улахович, Л. А. Яковлев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.

87. Smith S. W. Digital signal processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists / S. W. Smith. – Burlington. : Prentice-Hall, 2003. – 665 p.

88. Куприянов М. С. Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования / М. С. Куприянов, Б. Д. Матюшкин. – СПб. : Политехника, 1999. – 592 с.

89. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Ф. Мейзда. – М. : Мир, 1990. – 535 с.

90. Шишмарев В. Ю. Средства измерений / В. Ю. Шишмарев. – М. : Академия, 2008. – 320 с.

91. 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.

92. G. Bortnik, Correction of clock jitter in analog-digital equipment of telecommunication system / G. Bortnik, M. Vasylykivskyj, V. Cheloyan // Modern problems of radio engineerings, telecommunications and computer science (TCSET'2010) : матеріали X міжнар. конф. – Львів : ЛНТУ «Львівська політехніка», 2010. – С. 221.

93. Бортник Г. Г. Метод коригування власного джитеру тактових сигналів телекомунікаційних систем / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, Н. О. Пунченко // *Електроника и связь*. – 2008. – № 1–2. – С. 196–199.

94. Бортник Г. Г. Метод коригування власного джитеру тактових сигналів телекомунікаційних систем / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, Н. О. Пунченко // *Проблемы электроники : материалы XXVIII міжнар. наук.-техн. конф.* – Київ : КПІ, 2008. – С. 196–199.

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

96. Marcel J. M. Pelgrom. *Analog to Digital Conversion* / Marcel J. M. Pelgrom. – Springer, 2010. – 455 p.

97. Allen R. L. *Signal Analysis: Time, Frequency, Scale, and Structure*. / R. L. Allen, D. W. Mills. – Wiley : IEEE Press, 2004. – 966 p.

98. Садовский Г. А. Теоретические основы информационно-измерительной техники: учеб. пособие / Г. А. Садовский. – М. : Высш. шк., 2008. – 478 с.

99. Гельман М. М. Системные аналого-цифровые преобразователи и процессоры сигналов. / М. М. Гельман. – М. : Мир, 1999. – 559 с.

100. 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.

101. G. G. Bortnik, Phase jitter model in microcircuits of analog-digital converters / G. G. Bortnik, M. V. Vasylykivskyj // *Electronics and nanotechnology : матеріали XXXII міжнар. наук. конф.* – Київ : КПІ, 2012. – С. 10.

102. Г. Бортник, Оцінювання фазового дрижання в аналого-цифрових перетворювачах телекомунікаційних систем / Г. Бортник, М. Васильківський, Н. Пунченко // *Сучасні проблеми радіотехніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011) : матеріали V міжнар. наук.-практ. конф.* – Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 39–40.



103. Бортник Г. Г. Вимірювання фазового дрижання в аналого-цифрових перетворювачах телекомунікаційних систем передачі / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, Н. О. Пунченко // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2011) : матеріали І міжнар. наук. конф. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – С. 27.
104. Микросхемы АЦП и ЦАП. Справочник. – М. : Додэка ХХІ, 2005. – 404 с.
105. Никамин В. А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Справочник / В. А. Никамин. – М. : Корона принт, 2003. – 224 с.
106. Руднев П. И. 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.
107. Бортник Г. Г. Математична модель джитеру у волоконно-оптичних системах передачі інформації / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. А. Челоян // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – № 1. – С. 234–238.
108. Tohru K. Statistical methods in control and signal processing. / K. Tohru, S. Sueo. – New York. : Marcel Dekker, 1997. – 573 p.
109. Солонина А. И. Цифровая обработка сигналов и MATLAB. / А. И. Солонина, Д. М. Клионский, Т. В. Меркучева и др. – СПб. : БХВ-Петербург, 2013. – 512 с.
110. Аминев А. М. Методы и средства контроля динамических параметров быстродействующих АЦП / А. М. Аминев, Г. Д. Бахтиаров, А. Л. Тимофеев // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – № 4. – С. 36–55.
111. 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.
112. Васильківський М. В. Дослідження джитеру в складних телекомунікаційних мережах / М. В. Васильківський, О. В. Стальченко //

Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 2. – С. 86–89.

113. 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.

114. Бортник Г. Г. Пристрій аналого-цифрового перетворення широкосмугових сигналів / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-12-2013) : матеріали XII міжнар. наук.-техн. конф. – Одеса – м. Хмельницький : ОНАЗ ім. О.С. Попова, Вісник ХНУ, 2013. – С. 59–60.

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

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

117. Хабаров Ю. А. Структурные методы построения устройств АЦП сверхбыстродействующего класса / Ю. А. Хабаров // Приборы и средства автоматизации. – 1993. – № 4. – С. 22–26.

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

119. Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А. Г. Зюко. – М. : Радио и связь, 1985. – 272 с.

120. Афонский А. А. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. – М. : Солон-пресс, 2011. – 690 с.

121. Бортник Г. Г. Пристрій аналого-цифрового перетворення шумоподібних сигналів / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 2. – С. 78–81.

122. Бортник Г. Г. Методи та засоби оцінювання параметрів абонентських ліній зв'язку: монографія / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак, В. Ф. Яблонський. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 139 с.

123. Боридько С. И. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учебное пособие. / С. И. Боридько, Н. В. Дементьев, Б. Н. Тихонов, И. А. Ходжаев. – М. : Горячая линия телеком, 2007. – 374 с.

124. 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. – № 2. – С. 82–85.

125. Бортник Г. Г. Метод покращення шумових властивостей тракту аналого-цифрового перетворення аналізаторів фазового дрижання / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. Г. Бортник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 3. – С. 77–80.

126. 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.

127. Minkoff J. Signal processing fundamentals and applications for communications and sensing systems / J. Minkoff. – Norwood. : Artech House, 2002. – 325 p.

128. Хмелев К. Ф. Основы SDH : монография. / К. Ф. Хмелев. – К. : Видавництво Політехніка, 2003. – 584 с.

129. Конахович Г. Ф. Сети передачи пакетных данных. / Г. Ф. Конахович, В. М. Чуприн. – К. : МК-Пресс, 2006. – 272 с.

130. Патент на корисну модель 86550. Україна, МПК НОЗ К 13/02. Аналого-цифровий перетворювач / Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Стальченко О. В.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 200804872 ; заявл. 15.04.2013 ; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. – 3 с.

131. Пескова С. А. Сети и телекоммуникации : учеб. пособие. / С. А. Пескова, А. В. Кузин, А. Н. Волков. – М. : Академия, 2007. – 352 с.
132. Иванов А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения / А. Б. Иванов. – М. : Комп. Сайрус Системс, 1999. – 672 с.
133. Фокин В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети : учеб. пособие / В. Г. Фокин. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2008. – 270 с.
134. Мартиросов В. Е. Теория и техника приема дискретных сигналов ЦСПИ / В. Е. Мартиросов. – М. : Радиотехника, 2005. – 136 с.
135. Волков Л. Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики : учеб. пособие / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2005. – 392 с.
136. Васин В. А. Радиосистемы передачи информации : учеб. пособие для вузов. / В. А. Васин, В. В. Калмыков, Ю. Н. Себекин и др. – М. : горячая линия телеком, 2005. – 472 с.
137. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия / М. Гук. – СПб. : Питер, 2003. – 528 с.
138. Бортник Г. Г. Методи та засоби обробки високочастотних сигналів : монографія / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 132 с.
139. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов. / В. П. Дьяконов. – М. : Солон-пресс, 2008. – 384 с.
140. Дьяконов В. П. Современные измерительные генераторы сигналов. / В. П. Дьяконов. – М. : Солон-пресс, 2011. – 378 с.
141. Кехтарнаваз Н. Цифровая обработка сигналов на системном уровне с использованием LabVIEW / Н. Кехтарнаваз, Н. Ким. – М. : Додэка XXI, 2007. – 304 с.

*Наукове видання*

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

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ОЦІНЮВАННЯ ФАЗОВОГО ДРИЖАННЯ СИГНАЛІВ  
У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Г. Бортником

Підписано до друку 05.05.2015 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,08  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2015-18

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. Порика, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.