

## **АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ДЖИТЕРУ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ**

**Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Мінов М.Л.**

Вінницький національний технічний університет  
Вінницька філія ВАТ „Укртелеком”

### **Вступ**

Перехід до цифрових методів передачі та комутації крім переваг, зумовлених новими технологіями зв'язку, викликав проблеми, які пов'язані з принципами передачі сигналів у цифровій формі. Необхідність забезпечення норм на якість передачі в цифровій мережі зв'язку вимагає врахування тремтіння та дрейфу фази. Фазові тремтіння (джитер) є специфічним видом спотворень, які виникають в процесі формування та передачі цифрових сигналів. Джерела цифрових повідомлень, як правило, генерують цифровий сигнал з рівномірною швидкістю. Регулярність генерації сигналу забезпечується шляхом синхронізації цього процесу. Але при наступних операціях з цифровим сигналом регулярність слідування елементів сигналу дещо порушується: їх фактичне положення не збігається з часовими позиціями, які мали місце в джерелі повідомлення. Відхилення окремих елементів цифрового сигналу від своїх ідеальних часових положень отримало назву тремтіння фази (джитеру).

Результати досліджень фазової стабільності та фазових спотворень в цифрових системах наведено у [1-5]. Слід відмітити, що ці дослідження були спрямовані на вирішення конкретних технічних проблем, що стояли перед розробниками цифрового обладнання. У роботах [6, 7] розглянуто різні причини виникнення фазових спотворень, а також запропоновано методи вимірювання та зменшення їх величин (як правило, за допомогою спеціальних схем фазового автопідстроювання частоти). У роботах [8, 9] проведено аналіз сумарних фазових спотворень в цифрових трактах та обґрунтовано можливість використання функції максимальної помилки часового інтервалу для оцінювання стану цифрових трактів.

На даний час назріла необхідність узагальнити досягнення в області вимірювання джитеру для визначення ефективних шляхів щодо розробки нових методів і засобів оцінювання джитеру, направлених на підвищення якості функціонування телекомунікаційних мереж. Всі ці питання потребують комплексного розвитку [10].

Метою даної роботи є систематизація та порівняльний аналіз останніх досягнень в області оцінювання джитеру та розробка класифікаційної схеми методів вимірювання джитеру.

Задачами дослідження є:

- аналіз причин виникнення фазових спотворень (видів джитеру) в цифрових системах передачі з метою формування критеріїв та підходів до їх можливої ідентифікації;
- класифікація існуючих методів вимірювання джитеру з метою аналізу та систематизації принципів оцінювання стану цифрових трактів за допомогою обраного методу;
- виконання якісного порівняльного аналізу методів оцінювання джитеру з метою вибору діагностичного параметру для оцінювання інформаційного складу фазових спотворень.

### **Аналіз причин виникнення фазових спотворень в цифрових системах передачі**

Виникнення фазових тремтінь у компонентних цифрових сигналах при апаратурній реалізації часового групотворення викликане наступними чинниками:

- періодичним (з частотою циклу) видаленням із рівномірного потоку синхроімпульсів компонентних потоків у складі групового сигналу, які визначають часові положення службових бітів (циклового синхросигналу, бітів керування вирівнюванням та інших);
- виключенням із потоку імпульсів, які визначають положення вирівнювальних часових інтервалів з частотою, яка визначається фактичною розбіжністю між частотами приймання вхідної інформації та передавання цієї інформації у складі групового сигналу;
- проведенням операції вирівнювання не в той момент часу, коли вона необхідна, а в момент часу, який передбачений прийнятою структурою циклу групового сигналу.

Перші два чинники викликають фазову модуляцію імпульсів синхронізації при усередненні частоти, яка зменшується в колах виділення хронізації лінійного тракту та вузькосмугового фазового автопідстроювання (ФАП) часового групотворення.

Тремтіння фази часу очікування мають складові з частотами, які лежать в середній частині смуги пропускання ФАП, і, тому, можуть з'являтися в сигналах компонентних потоків на виході пристроїв

розділення та передаватися по лінійним трактам. У стандартному обладнанні часового групотворення величина цієї складової фазового тремтіння може складати до 1/7 тактового інтервалу для компонентних потоків 2048 та 8448 кбіт/с та до 1/5 тактового інтервалу для компонентного потоку 34368 кбіт/с.

Виникнення тремтінь фази сигналів синхронізації, які формуються задавальним генератором, пов'язане з двома причинами. Першою є так званий фліккер-шум електронних компонентів, інтенсивність якого має зворотну залежність від частоти ( $1/f$  - шум). Друга причина полягає в статистичній невизначеності переходів в сигналах, що викликає фазовий шум в логічних схемах. Ці два джерела не мають великого значення із-за малих величин тремтінь у порівнянні з тремтіннями від інших джерел.

Існує декілька основних причин виникнення джитеру, що впливають на структуру та параметри якості систем зв'язку. Присутність в мережах регулярного та нерегулярного джитеру зумовлено різними причинами його виникнення. Регулярний (системний) джитер 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 мультиплексорах та регенераторах можуть викликати регулярний джитер. Виникнення регулярного джитеру може бути зумовлене порушеннями в каналі передачі, що пов'язані з наявністю перехресних завад, які також вносять регулярний корельований з послідовністю бітів джитер. Регулярний джитер в цьому випадку виникає при неправильній роботі еквалайзерів або порушеннях у налаштуванні кіл відновлення даних, що характерно в більшій мірі для радіочастотних систем передачі.

Нерегулярний джитер зумовлений електромагнітним впливом та інтерференцією із зовнішніми джерелами сигналу, такими як шум, відбивання, перехресні завади чи інтерференція з колами живлення й іншими джерелами електромагнітного випромінення. 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.

### Класифікація існуючих методів вимірювання джитеру

Для вимірювання джитеру використовують два основних класи методів: класичні, на базі принципів аналогових вимірювань сигналу та цифрові методи вимірювання джитеру [1].

Розглянемо аналогові методи вимірювання джитеру (рис. 1). Суть методів полягає у вимірюванні джитеру сигналу із лінійним кодуванням (NRZ). В результаті з тестового сигналу  $x$ , в якому проводяться вимірювання джитеру, виділяється частота синхронізації, яка використовується для порівняння з цифровим сигналом  $x$ , що пройшов блок ФАПЧ-ФНЧ. Сигнал  $x$  та синхросигнал подаються на фазовий детектор, який виконує порівняння фаз. На виході фазового детектора формується сигнал, напруга, амплітуда та полярність якого залежить від різниці фаз сигналу  $x$  та синхросигналу.

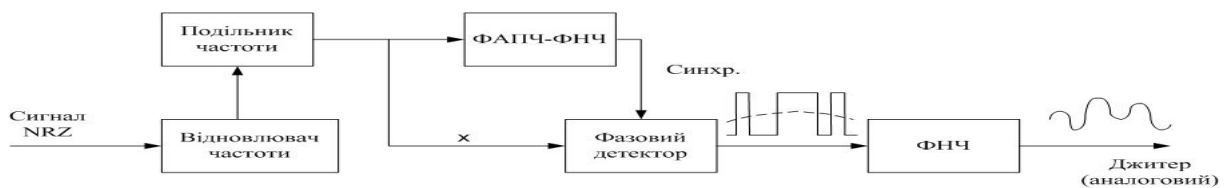


Рис. 1 Аналоговий метод вимірювання джитеру

Аналогові методи вимірювання джитеру має характерні недоліки:

- відновлення синхроімпульсів обмежує діапазон вимірювання джитеру;
- система відновлення синхронізації вносить шуми, які понижують точність вимірювання джитеру;
- широкий динамічний діапазон вимагає широкопasmового подільника частоти, а фазовий детектор обмежує діапазон вимірювання;
- на аналоговий сигнал впливають зовнішні завади;

- амплітуда аналогового сигналу обмежена амплітудою напруги живлення;
- внаслідок вузької смуги пропускання знижується швидкість відновлення синхроімпульсів для захвату частоти;
- дані методи вимагають калібрування перед кожним вимірюванням.

Основною відмінністю цифрових методів є заміна аналогових методів вимірювання цифровою обробкою сигналу. Схема цифрового методу вимірювання джитеру показана на рис. 2. В основі методу є аналого-цифрове перетворення вхідного сигналу, включаючи відносні зміни часу появи фронтів. Отримані значення джитеру використовуються для визначення пікового значення, середньоквадратичного, або проведення спектрального аналізу.

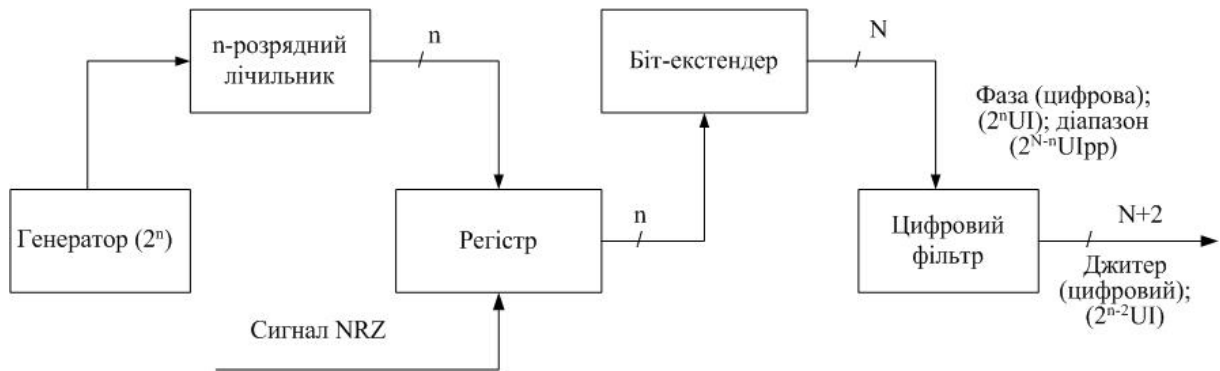


Рис. 2 Цифровий метод вимірювання джитеру

До переваг цифрових методів вимірювання джитеру можна віднести:

- широкую смугу пропускання та низький рівень шуму із-за відсутності 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 UI при роздільній здатності 0,01 UI;
- відсутність необхідності розділення всього діапазону значень джитеру на декілька інтервалів з наступним зрощуванням результатів;
- із-за відсутності ФАПЧ не потрібно виконувати калібрування приладу перед кожним вимірюванням.

Отже, при використанні цифрових методів точність, оперативність та інформативність вимірювання джитеру значно зростає.

Джитер в цифровому сигналі визначається в термінах амплітуди та частоти. В загальному випадку джитер вимірюється в одиничних інтервалах (Unit intervals, UI)

$$J = \frac{T_j}{T_0} \times 100\%, \quad (1)$$

де  $T_j$  - період фазового тремтіння;

$T_0$  - період тактової частоти.

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

При дослідженні джитеру розрізняють наступні напрямки вимірювань:

- вимірювання власного джитеру системи передачі;
- вимірювання максимально допустимого джитеру МТД;
- вимірювання передатної характеристики джитеру JTF, яка визначається як приведена різниця між джитером на виході та джитером на вході пристрою/каналу:

$$JTF(f_i) = 20 \lg \frac{J_{out}(f_i) - J_{in}(f_i)}{J_{in}(f_i)}, \quad (2)$$

де  $J_{out}(f_i)$  - значення величини джитера на виході пристрою/каналу на частоті  $f_i$ ;

$J_m(f_i)$  - значення величини джитера на вході пристрою/каналу на частоті  $f_i$ .

У випадках дослідження джитеру в складних цифрових трактах застосовується метод розкладання тракту на елементарні функціональні складові. Складний цифровий тракт розглядається як послідовність перетворювачів сигналу – регенераторів – фільтрів – мультиплексорів/демультиплексорів. Кожен з цих перетворювачів діє по відношенню до фазових спотворень як фільтр нижніх частот (ФНЧ) з передатною характеристикою  $T_i(p)$ . Передатна характеристика складного цифрового тракту для фазових спотворень може бути представлена виразом:

$$T(p) = \prod_{i=1}^n T_i(p), \quad (3)$$

Для визначення максимально допустимого джитеру використовуються наступні методи:

- метод з критерієм збільшення параметра  $K_{BER}$ , який полягає у визначенні амплітуди джитеру (на заданій частоті) за допомогою визначення еквівалентного джитеру, що являє собою точну та відтворену міру параметру МТТ;
- метод з використанням критерію появи помилок, що базується на визначенні найбільшої амплітуди джитеру на заданій частоті, яка забезпечує не більше двох помилок.

Для визначення передатної характеристики застосовується метод вимірювання, що полягає у внесенні у вхідний цифровий потік джитеру визначеної амплітуди та аналізу джитеру на виході. Варіація частоти дає характеристику залежності параметру JTF від частоти.

Двома найбільш важливими характеристиками спектрального аналізу джитеру є:

- кількість частот, на яких необхідно виміряти спектр;
- „роздільна здатність” вимірювання спектру (кількість відліків).

Класифікаційну схему методів оцінювання джитеру приведено на рис. 3.



Рис. 3 Класифікація методів оцінювання джитеру

Самим спрощеним є метод оцінювання джитеру на базі око-діаграми. Око-діаграма – це сумарне подання всіх бігових періодів сигналу, що вимірюється, які накладені один на одного. Вид око-діаграми дає багато інформації про джитер сигналу. Наприклад, множина окремих фронтів та спадів вказує про наявність джитеру, який залежить від даних. Око-діаграма зручна своєю простотою застосування і може використовуватись для вимірювання у будь-якому колі. Для око-діаграми не потрібно тестового сигналу, хоча, при бажанні, можна використовувати вимірювальний сигнал імпульсного генератора. Око-діаграму можна ефективно застосовувати при дослідженні випадкових та псевдовипадкових даних, які відносяться до діапазонних вимірювань.

Іншим методом оцінки джитеру є гістограма. Гістограма являє собою розподіл набору значень, що відображаються вимірюваним параметром (період або амплітуда, які відкладаються по осі X), в залежності 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 ілюструють розподіл продуктивності для різних режимів роботи, яка може бути поставлена у відповідність з умовами функціонування кола, наприклад, типом послідовності, що передається.

Ключовим застосуванням гістограм є розподіл частоти значень похибки інтервала часу (Time Interval Error - TIE) для всіх бітових переходів вимірюваного сигналу. TIE – це різниця в часі між дійсними та очікуваними точками перетину на око-діаграмі. В основі методу використовується функція інтервалу  $x(t)$ , яка визначається як різниця між значеннями  $T_{on}(t)$  та досліджуваного сигналу  $T(t)$ :

$$x(t) = T(t) - T_{on}(t), \quad (4)$$

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

$$x_i = x(t_0 + i \lambda_0), \quad (5)$$

де  $\lambda_0$  – початок відліку

Гістограма значень TIE – це основні дані для процедур відокремлення джитеру, що необхідні для різних стандартів цифрових шин.

Іншим методом оцінювання результуючого джитеру (Total Jitter, TJ) є його нормалізована гістограма, яка представляється залежністю коефіцієнту бітових помилок  $K_{BER}$  від положення точки стробування на одиничному часовому інтервалі UI. Точці стробування (UI = 0,5), яка знаходиться посередині одиничного інтервалу, відповідає практично безпомилкова передача. При зміщенні цієї точки величина  $K_{BER}$  зростає.

Наступним методом оцінки джитера є побудова кривої U-типу (bathtub curve), яка представляється графіком залежності частоти помилок по бітам ( $K_{BER}$ ) від розташування пробної точки на одиничному інтервалі (UI). Такий графік подають в логарифмічному вигляді, 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 центру одиничного інтервалу  $K_{BER}$  стрімко зменшується. В даній області переважає механізм випадкового джитеру і  $K_{BER}$  визначається середньоквадратичним відхиленням процесів Гауса, які визначають випадковий джитер. 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 джитеру у розробленій системі. Крива U-типу може використовуватись для розділення випадкового та детермінованого джитеру а також для визначення середньоквадратичного відхилення випадкової складової.

Дослідження джитеру в частотній області є ще одним методом визначення причин його виникнення. Джерела детермінованого джитеру в частотній області виявляються у вигляді лінійного (дискретного) спектра. При частотному аналізі фазовий шум або джитер ставиться у відповідність із зсувом частоти відносно носійної або синхронізації.

Вимірювання фазового шуму забезпечує найбільш точну оцінку джитеру завдяки більшій частоті дискретизації сигналу і керуванню смугою частот. Це дає можливість розібратись в процесах, що відбуваються в розроблюваному приладі, а саме при використанні кварцевих генераторів і фазового автопідстроювання частоти, а також легко визначити детермінований джитер за піками у спектрі. Аналіз фазового шуму також використовується при оптимізації кіл відновлення синхросигналу та визначені внутрішніх джерел завад і шуму.

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

$$L = N \cdot M, \quad (6)$$

де  $N$  – необхідна кількість спектральних відліків;

$M$  – ціле число, більше одиниці.

Тоді вираз для ШПФ буде мати вигляд:

$$X(\kappa) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \sum_{m=0}^{M-1} x(n + mN) \right] e^{-j(2\pi/N)nk}, \quad (7)$$

де  $\kappa = 0, 1, \dots, N - 1$ .

3 формули впливає, що фактично при розрахунках спектра виконується попереднє підсумовування вхідних відліків, які знаходяться рівновіддалено один від одного на  $N$  точок, після чого визначається дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) нової послідовності.

Дуже ефективним методом оцінювання джитеру є спектральний аналіз, де джерела детермінованого джитеру виявляються у вигляді піків на неперервній кривій випадкового фазового шуму. Спектральні методи вимірювання джитеру є точними і підходять для оцінювання джитеру розроблених приладів та пошуку складних пошкоджень в цифровому обладнанні в лабораторних умовах.

Найбільш універсальними аналізаторами джитера є високошвидкісні цифрові записуючі осцилографи реального масштабу часу (Digital Storage Oscilloscopes, DSO). Оскільки DSO функціонують у діапазоні до 6 ГГц, вони можуть вимірювати джитер на швидкостях до 3,2 Гбіт/с. Рівень власного середньоквадратичного джитеру цих осцилографів є менше 1,5 пікосекунди. Для підвищення ефективної роздільної здатності у часі в осцилографах може використовуватися інтерполяція між виборками [3].

Для виконання порівняльного аналізу методи оцінювання джитеру можна розділити на 3 класи:

Методи оцінювання джитеру поділяють на 3 класи:

- вимірювання спектра джитеру;
- вимірювання частотних характеристик джитеру за допомогою цифрових смугових фільтрів;
- вимірювання частотних характеристик джитеру за допомогою аналогових смугових фільтрів.

Перших два класи відносяться до групи цифрових методів вимірювання джитеру, а третій – до аналогових. Детальний якісний порівняльний аналіз існуючих методів вимірювання джитеру наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

### Якісний порівняльний аналіз методів оцінювання джитеру

Методи оцінювання джитеру		Якісна оцінка				
		точність	швидкодія	адекватність вимірювання	діапазонні можливості	можливості діагностики
Вимірювання спектра джитеру	Око діаграма	висока	висока	висока	вузькі	відсутні
	Гістограма	середня	низька	середня	вузькі	широкі
	ШПФ ТІЕ	висока	середня	середня	широкі	широкі
	U-крива	середня	низька	висока	вузькі	відсутні
	Аналіз фазового шуму	висока	середня	висока	широкі	широкі
Вимірювання ЧХ джитеру за допомогою цифрових смугових фільтрів		середня	висока	висока	вузькі	вузькі
Вимірювання ЧХ джитеру за допомогою аналогових смугових фільтрів		середня	низька	висока	вузькі	відсутні

### Висновки

1. У роботі систематизовано відомі підходи до визначення та класифікації фазових спотворень цифрових сигналів – джитеру. Розглянуто причини та механізми виникнення джитеру, а також його вплив на якість передачі інформації в телекомунікаційних мережах.

2. Аналіз причин виникнення джитеру показав, що його джерело може бути виявлене за спектральними або часовими характеристиками досліджуваного сигналу. Отже, при вимірюваннях джитеру слід враховувати різне його походження в системах PDH та SDH. В системах PDH джитер виникає при некоректній роботі апаратури передачі (наприклад, тремтіння частоти задаючого генератора) або внаслідок власного середовища поширення сигналу, тобто має фізичну природу. В системах SDH джитер має алгоритмічне походження. У системах PDH джитер є постійним по амплітуді, а в системах SDH – імпульсним.

3. Для вимірювання джитеру в мережах PDH використовують метод з накопиченням даних та аналізом середнього значення параметру. Такий метод вимірювання джитеру в системах SDH не використовується, оскільки амплітуду джитеру в даному випадку не можливо зафіксувати.

На основі проведеного аналізу поставлено загальну задачу дослідження можливості вимірювання джитеру шляхом застосування спектральних методів на базі швидких цифрових алгоритмів обробки сигналів.

4. Цифрові методи спектрального аналізу джитеру дають можливість дослідити тонку структуру джитеру і створюють умови для діагностування телекомунікаційного аналізу.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бакланов И.Г. Несколько серьезных слов о джиттере // Метрология и измерительная техника в отрасли связи.- 2005.- № 2.- С. 24-35.
2. Бакланов И.Г. Методы измерений в системах связи.- М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1999.- 195 с.
3. Бакланов И.Г. Тестирование и диагностика систем связи.- М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2001.- 264 с.
4. Колинко Т.А. Измерения в цифровых системах связи.- К.: НТИ, 2002. – 320 с.
5. Панфілов І.П. Вимірювання в телекомунікаціях.- Одеса.: УДАЗ, 1998. – 256 с.
6. Стеклов В.К. Системи фазового автопідстроювання високої точності та швидкодії.- К.: „Техніка”, 2005. – 344 с.
7. Стеклов В.К. Комбинированные системы фазовой автоподстройки.- К.: „Техніка” 2004. – 328 с.
8. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Анализ суммарных фазовых искажений в цифровых трактах // Зв’язок – 2003.- № 4; С. 22-26.
9. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Использование функции максимальной ошибки временного интервала для оценки состояния цифровых трактов // Зв’язок – 2004.- № 1; С. 29-32.
10. Бортник Г., Яблонський В., Васильківський М. Аналіз методів і засобів оцінювання джитера та вандера в телекомунікаційних системах // Матеріали ІІІ-тїої МНТК „СПРТП-2007”, Вінниця, 2007. – С.13, 14.