

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. М. Кичак, Г. Г. Бортник, В. Д. Тромсюк

**МЕТОДИ ТА ПРИСТРОЇ
ОЦІНЮВАННЯ БІТОВИХ ПОМИЛОК
У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК 621.391
К46

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 23.02.2017 р.)

Рецензенти:

О. Б. Шарпан, доктор технічних наук, професор

В. А. Лужецький, доктор технічних наук, професор

Кичак, В. М.

К46 Методи та пристрої оцінювання бітових помилок у телекомунікаційних системах : монографія / В. М. Кичак, Г. Г. Бортник, В. Д. Тромсюк. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 212 с.

ISBN 978-966-641-698-1

У монографії розглянуто методи та засоби оцінювання бітових помилок у телекомунікаційних системах, побудованих на базі методології цифрового оброблення сигналів і завадостійкого кодування. 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 621.391

ISBN 978-966-641-698-1

© В. Кичак, Г. Бортник, В. Тромсюк, 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ПРИСТРОЇВ ОЦІНЮВАННЯ ПБП У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	9
1.1 Аналіз основних джерел та характеристик помилок у телекомунікаційних системах.....	9
1.2 Аналіз основних видів тестових послідовностей	15
1.3 Аналіз методів оцінювання ПБП у телекомунікаційних системах зі вставками та випаданнями бітів	18
1.4 Пристрої оцінювання адитивних і бітових помилок.....	25
1.5 Вибір напрямків і постановка задачі досліджень	27
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ОЦІНЮВАННЯ ПБП І ЗАВАДОСТІЙКОТІ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	30
2.1 Загальні теоретичні передумови оцінювання телекомунікаційних систем зі вставками та випаданнями бітів	30
2.2 Особливості оцінювання ПБП на фоні одиничних адитивних помилок за допомогою ПВП.....	53
2.3 Удосконалений кореляційний метод оцінювання ПБП	57
2.4 Позиційний метод оцінювання ПБП на базі синхропослідовності з особливими параметрами	61
2.5 Метод перестановки ВПС за частотою їх появи.....	67
2.6 Попереднє оцінювання роздільної здатності удосконаленого кореляційного та позиційного методів.....	71
2.7 Оцінювання ПБП при різних видах демодуляції дискретних сигналів.....	78
2.8 Оцінювання оптимальних значень сигнал/шум за наявності бітових помилок у телекомунікаційних системах	85
2.9 Алгоритми обробки вихідних даних пристроїв оцінювання ПБП.....	89
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ОЦІНЮВАННЯ ПБП У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	95
3.1 Організація системи оцінювання бітових помилок.....	95
3.2 Структурні схеми пристрою оцінювання ПБП.....	100
3.2.1 Пристрій оцінювання ПБП побудований на базі удосконаленого кореляційного методу.....	100

3.2.2 Пристрій оцінювання ПБП, побудований на базі позиційного методу.....	106
3.3 Блок знаходження ІВПС.....	112
3.4 Блок прийняття рішення про наявність помилок	118
3.5 Блок формування потоку станів дискретного каналу	122
3.6 Оцінки складності та швидкодії пристроїв оцінювання ПБП, побудованих на базі удосконаленого кореляційного та позиційного методів	123
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБОК ОЦІНЮВАННЯ БІТОВИХ ПОМИЛОК У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	
4.1 Організація програмної моделі	127
4.1.1 Принципи моделювання та функціонування пристроїв оцінювання ПБП.....	127
4.1.2 Структура моделі для дослідження алгоритмів пристроїв оцінювання ПБП.....	129
4.2 Послідовність оцінювання ПБП	130
4.3. Похибки оцінювання параметрів бітових помилок на виході пристроїв оцінювання ПБП.....	132
4.4 Результати перевірки похибки оцінювання ймовірнісних характеристик ПБП.....	137
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	143
ДОДАТОК А Таблиці залежностей кількості випадків невірного виявлення фази від кількості помилок у вікні для кореляційного і позиційного методів оцінювання бітових помилок	154
ДОДАТОК Б Лістинг програмної моделі пристрою оцінювання ПБП синтезованого на базі удосконаленого кореляційного методу	158
ДОДАТОК В Лістинг програмної моделі пристрою оцінювання ПБП синтезованого на базі позиційного методу	169
ДОДАТОК Г Лістинг програмної моделі для перевірки похибки оцінки параметрів бітових помилок на виході пристрою оцінювання ПБП.....	181
Додаток Д Лістинг програм ПЕОМ для оперативної статистичної обробки вихідних даних пристрою оцінювання ПБП.....	194
ДОДАТОК Е Гістограми розподілу помилок	204

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АПД – апаратура передачі даних
БП – блок порівняння
ВПС – відносні позиції синхросимволів
ГКП – генератор кодових послідовностей
ДКК – декодер канального коду
ЗПП – зовнішні запам'ятовувальні пристрої
ІВПС – істотні відносні позиції синхросимволів
ЛПП – лічильник та індикатор помилок
ПБП – параметри бітових помилок
ПВП – псевдовипадкова послідовність
ПС – пристрій синхронізації
СКВ – середньоквадратичне відхилення
СПП – схема порівняння послідовностей
ФАПЧ – фазове автопідстроювання частоти
ФБП – формувач бітового потоку
Auto Syns – Auto Synchronization (ресинхронізація)
BER – Bit Error Rate (коефіцієнт бітових помилок)
BLER – Block Error Rate (коефіцієнт бітових помилок по блоках)
EFS – Error Free Seconds (підрахунок безпомилкових секунд)
ErrCnt – Error Count (підрахунок бітових помилок)
ES – error second
ESR – error second ratio
FEC – Forward Error Correction
LAN – Local area network (локальна обчислювальна мережа)
SES – severely error second
SESR – severely error second ratio
SynsLossCnt – Synchronization Loss Count
US – unavailable seconds

ВСТУП

У зв'язку з стрімким розвитком сучасних технологій усе значнішими стають телекомунікаційні мережі побудовані на базі комп'ютерних систем. Їх надійність, завадостійкість і продуктивність у багатьох випадках визначається якістю цифрових і дискретних каналів, які використовуються в первинних телекомунікаційних і комп'ютерних системах, а також якістю відтворення даних у зовнішніх запам'ятовувальних пристроях (ЗЗП) [1–12].

У сучасних телекомунікаційних системах ставляться високі вимоги до завадостійкості, швидкості передавання даних, надійності та характеристик помилок [9, 13–20]. У будь-якій системі, особливо якщо вона використовується при впливі на неї інтенсивних промислових (переважно імпульсних) завад, виникають різноманітні помилки. У таких системах, на виході демодуляторів можуть з'являтися вставки та випадання бітів, які приводять до зсуву інформаційних послідовностей і до утворення довгих пакетів помилок, що перевищують коректувальну здатність найпотужніших завадостійких кодів [1, 3, 4, 6, 9]. Тому для забезпечення високої достовірності передавання даних необхідна оцінка таких параметрів бітових помилок, як вставки й випадання бітів. Така оцінка повинна однозначно давати відповідь на запитання, які завадостійкі коди потрібно використовувати при передаванні інформації у телекомунікаційних системах з великим рівнем завад, щоб забезпечити заданий рівень завадостійкості, надійності та достовірності.

Питаннями цифрового оброблювання сигналів займалися багато провідних вчених. Розвиток теорії побудови засобів передавання інформації поданий у фундаментальних працях К. Шеннона, В. А. Котельнікова, Ф. Дж. Мак-Вільямса, А. А. Харкевича, Р. М. Хеммінга, Л. М. Фінка, І. В. Кузьміна, В. О. Шварцмана, Б. Я. Советова, А. І. Велічкіна, В. М. Муттера, Г. А. Ємельянова, Н. Дж. Слоена, Дж. Прокіса. Питання оброблювання сигналів різної природи розглядаються в роботах Л. М. Голденберга, А. В. Оппенгейма, Р. В. Шафера, А. В. Давидова, Б. І. Мокіна та ін. Для вирішення проблем оцінювання помилок використовують різноманітні апаратні та програмні засоби [1–9]. При цьому більшість методів оцінювання бітових помилок базуються на порівнянні прийнятої та переданої бітових послідовностей. Питан-

ня дослідження бітових помилок розглядалось у роботах І. Г. Бакланова, В. А. Канакова, А. Я. Кулика, В. В. Яцківа, Е. James Gilley, K. Chy Deepak, Md. Khaliluzzaman, K. V Sambasiva Rao, D. H. Wolaver, A. Morello, M. Sandell, Y. Li, L. J. Cimini, N. R. Solenberger, M. Mizoguchi та М. Morikura та ін. [3, 4, 108–110]. Проте застосування результатів досліджень цих авторів пов'язане з численними наближеннями та великими похибками визначення параметрів бітових помилок (на фоні одиничних адитивних помилок) запропонованими методами та пристроями. Тому виникає задача оцінювання параметрів бітових помилок у широкому діапазоні варіацій параметрів одиничних адитивних помилок.

Значення характеристик помилок у телекомунікаційних системах вимагається при розробці та введенні в експлуатацію контролерів ЗЗП або оперативних запам'ятовувальних пристроїв та апаратури передавання даних ЕОМ (електронно-обчислювальних машин), які передбачають в своєму складі систему корекції помилок FEC (Forward Error Correction), яка передбачає застосування завадостійких кодів для виправлення помилок [1, 4, 9]. Доцільність використання будь-якого способу захисту інформаційних послідовностей залежить від характеру та параметрів бітових помилок. Поширені завадостійкі коди направлені на виправлення адитивних помилок, а не вставок і випадання біт, що в свою чергу спричиняє спотворення даних [1, 4, 9, 20–24].

Процес передавання інформації регламентований стандартами, протоколами та рекомендаціями, які визначають відповідні технології побудови технічних засобів. Вони задають необхідні умови зв'язку, параметри й характеристики телекомунікаційних систем. При цьому в сучасних широкосмугових системах зв'язку, чим менше навантаження (порожня мережа), тим ближче відношення сигнал/завада наближається до нуля. З ростом навантаження (кількості абонентів, пропускної здатності) відношення сигнал/завада погіршується аж до 12...14 дБ після чого, відповідно до налаштувань системи, може відбутися перехід від 3G до 2G. Тому основною задачею є недостатньо ефективне передавання інформації у розподілених комп'ютерних системах при складних умовах зв'язку, оскільки відсутні відомості про рівень вставок і випадань бітів на фоні одиничних адитивних помилок. Такі відомості дозволили б наперед обрати методи кодування інформації, які б дозволили впоратися із прогнозованим (вимірним) рівнем завад.

Для оцінювання якості телекомунікаційних систем, що працюють в умовах інтенсивних промислових (імпульсних) завод і проектування пристрою, який буде виправляти (коректувати) бітові помилки, необхідно знати діапазон зміни їх параметрів: довжини вставок (випадань) та їх позиції в пакеті даних, що передається. Названі параметри бітових помилок можуть бути знайдені в результаті статистичних досліджень каналів телекомунікаційних систем за допомогою швидкодіючих спеціалізованих обчислювальних пристроїв, які працюють у режимі реального часу на тактовій частоті демодульованої послідовності. Складність створення зазначених пристроїв полягає в тому, що бітові помилки проявляються на фоні одиничних адитивних помилок, які завжди присутні в реальних каналах. Останні можуть спричинити підвищення похибки обчислення довжини вставок/випадань та їх позицій. Ступінь впливу адитивних помилок на похибку обчислення параметрів бітових помилок, на сьогодні, практично не досліджено [1, 3–9].

У зв'язку з цим актуальною є науково-технічна задача, яка полягає в розробці методів і технічних засобів оцінювання параметрів бітових помилок у системах зі вставками та випаданнями біт на фоні одиничних адитивних помилок. До таких систем належать розподілені комп'ютерні системи, промислові комп'ютерні системи і комп'ютеризовані телекомунікаційні системи. Виявлення та оцінювання помилок у перерахованих системах є вирішальним для визначення типу заводостійких кодів, які необхідно використовувати для забезпечення високої надійності та достовірності передавання та оброблення даних.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ПРИСТРОЇВ ОЦІНЮВАННЯ ПБП У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

У першому розділі необхідно розглянути характеристики бітових помилок у системах передавання, оброблення та відновлення інформації; проаналізувати відомі методи оцінювання характеристик бітових помилок у каналах передавання, оброблення та відтворення даних, а також відомі пристрої обчислення параметрів адитивних помилок; розглянути проблему оцінювання вставок/випадань бітів на фоні одиничних адитивних помилок.

1.1 Аналіз основних джерел та характеристик помилок у телекомунікаційних системах

Якість каналів визначається достовірністю, надійністю, швидкістю передавання даних і характеристиками помилок. При цьому основною характеристикою помилок у дискретних каналах є коефіцієнт бітових помилок BER, який виражає відносну частоту появи помилково прийнятих бітів дискретного повідомлення [4, 13, 14].

Оскільки поява помилок має випадковий характер, їх статистичні характеристики можуть бути знайдені з достатнім рівнем імовірності лише за результатами тривалих вимірювань. На практиці часто необхідно, щоб визначення параметрів бітових помилок при введенні в експлуатацію та при технічному обслуговуванні обладнання зв'язку здійснювалося на достатніх інтервалах часу вимірювання. Виходячи з цього, в рекомендаціях ITU G.821 [35] і G.826 [36] були знайдені основні параметри та характеристики бітових помилок:

- 1) ES (errored second) – секундний інтервал часу, який містить хоча б один помилковий біт;
- 2) SES (severely errored second) – секундний інтервал часу з високим рівнем помилок ($BER > 10^{-3}$ для G. 821);
- 3) US (unavailable seconds) – інтервал часу, який визначає неготовність дискретного каналу до роботи, вимірюється в секундах;
- 4) ESR (errored second ratio) – відношення числа ES до кількості секунд часу готовності дискретного каналу протягом інтервалу вимірювання;

5) SESR (severely errored second ratio) – відношення числа SES до кількості секунд часу готовності каналу протягом інтервалу вимірювання.

В реальних каналах крім адитивних помилок можуть з'являтися бітові помилки. Походження таких помилок в різних каналах різне. В дискретних каналах вставки/випадання бітів можуть виникати в періоди сильного впливу завад (наприклад, імпульсних).

Частковим випадком бітових помилок є проковзування, які визначаються як повторення або виключення групи символів в синхронній або квазісинхронній послідовності символів в результаті різниці між швидкостями зчитування та записування в буферній пам'яті. У випадку відсутності буферної пам'яті проковзування виникають в міру накопичення фазового зсуву сигналів (джиттера) передавання та приймання [17]. На практиці проковзування проявляються у вигляді секунд неготовності каналу (US).

Сучасні методи вимірювання параметрів каналів передбачають відключення режиму визначення параметра BER при втраті великого масиву даних. У цьому випадку час, протягом якого відбувалася втрата, зчитується як час неготовності каналу. На практиці такі причини, як порушення зв'язку лінії, обрив проводу, також будуть викликати появу параметра US, в такому випадку визначити працездатність системи зв'язку та її вплив на параметри системи шляхом простого оцінювання параметрів цифрового каналу по BER не завжди можливе. Тому в цій системі повинні проводитися окремі вимірювання із знаходження та визначення параметрів бітових помилок, в іншому випадку неможливо гарантувати, що проковзування не можуть стати причиною погіршення якості прийому. Нормування параметрів проковзування наведено в рекомендації ITU-T G.822 [37].

Основними фізичними причинами збоїв зв'язку є: електромагнітна інтерференція; шуми та завади, які діють на ланцюг синхронізації в приймачі (підвищують імовірність неправильного приймання сигналу петлі ФАПЧ); зміна швидкості поширення сигналу (зазвичай пов'язано із зміною характеристик середовища передавання та характерно для радіочастотних систем); імпульсні завади; найбільш значне джерело потенційної нестабільності тактової частоти на прийомі – доплерівські зсуви від кінцевих приймальних пристроїв (виникають під час руху літаків, супутників та інших рухомих об'єктів); розрив ка-

бельної системи; перебої електроживлення; пошкодження дискових систем; пошкодження систем архівації даних; перебої роботи серверів, робочих станцій, мережевих карт; втрата або зміна даних при помилках програмного забезпечення; втрати при зараженні системи комп'ютерними вірусами; несанкціоноване копіювання, знищення або підробка інформації [1, 3, 4, 17].

Всі названі вище причини збоїв зв'язку в кінцевому підсумку спричиняють зсув демодульованої послідовності та появу вставок або випадань бітів у телекомунікаційних системах.

Дискретний канал (рис. 1.1) – канал з передаванням даних у простій двійковій формі. У сучасних системах комунікації для передавання інформації використовуються різні типи модуляції та багаторівневе кодування, однак кінцеве обладнання систем передавання в тій чи іншій мірі використовує саме дискретний канал, тому методологія вимірювань параметрів дискретного каналу становить фундамент вимірювань параметрів каналів зв'язку. Таким чином, методологія вимірювань параметрів дискретного каналу є певним інваріантом методологій вимірювань параметрів будь-яких каналів [6].

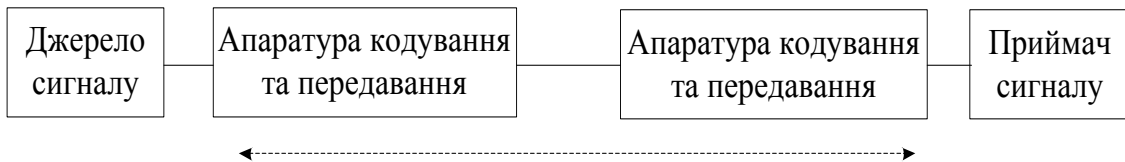


Рисунок 1.1 – Модель дискретного каналу

Модель каналу зі вставками та випаданнями бітів зображена на рис. 1.2, де INSERT – вставка; DELETE – випадання; TRANSMIT – передавання; t_i – вхідний біт; t_{i+1} – вихідний біт; P_i – імовірність вставки; P_d – імовірність випадання; P_s – імовірність адитивної помилки.

Розрізняють два типи вимірювань параметрів каналу – з відключенням і без відключення. Вимірювання з відключенням передбачають, що канал не використовується в процесі вимірювання для передавання реального трафіку. У цьому випадку в якості джерела та приймача сигналу використовуються аналізатори каналу. Вимірювання без відключення – передбачають використання алгоритмів аналізу параметрів каналу при передаванні реального трафіку.

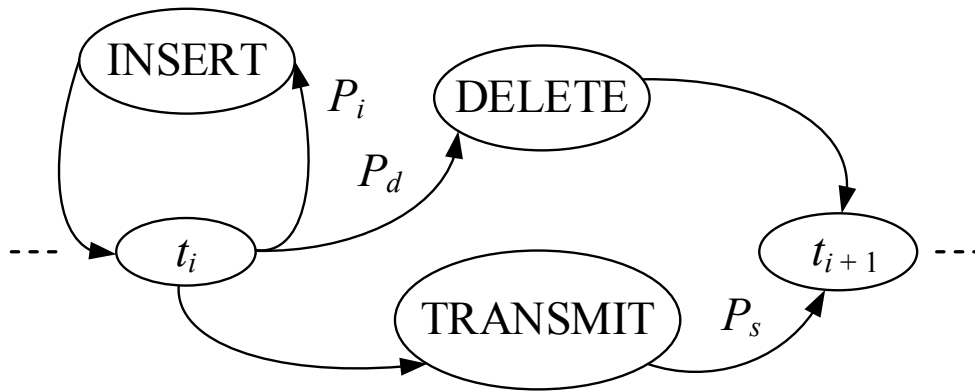


Рисунок 1.2 – Модель каналу зі вставками та випаданнями бітів

При вимірюванні з відключенням каналу сигнал передається у вигляді тестової послідовності, яка на іншому кінці каналу приймається, а потім проводиться аналіз помилок, що вносяться каналом. Для проведення вимірювань аналізатор приймача повинен забезпечувати передбачення структури послідовності, тобто потрібна, так звана, синхронізація тестової послідовності. Вимірювання з відключенням каналу – це єдиний метод аналізу параметрів дискретного каналу з великою точністю, до одиначної бітової помилки. Це гарантується принципом порівняння реальної прийнятої послідовності бітів з передбаченою, яка, в свою чергу, точно збігається з генерованою послідовністю [3, 5].

Модель промислової телекомунікаційної системи зі вставками і випаданнями бітів зображена на рис. 1.3. В цій моделі наведені канали, де можуть виникати вставки та випадання бітів (P_g – імовірність безпомилкового передавання даних). Вважається, що безпомилкове передавання даних має малу імовірність порівняно з імовірністю появи адитивних помилок, вставок і випадань бітів.

Вимірювання без відключення каналу часто називаються моніторингом, оскільки вимірювання проводяться в режимі роботи каналу, а аналізатор в цьому випадку підключається паралельно та здійснює пасивний моніторинг каналу. У працюючому каналі, що несе реальний трафік, немає можливості передбачення переданої інформації, отже, немає можливості простого порівняння реальної послідовності бітів з передбаченою послідовністю, тому неможливо локалізувати одиначну помилку. Методи вимірювання без відключення каналу засновані на ідентифікації помилки в деякому блоці переданої інформації, таким чином, об'єктивна точність вимірювання обмежена розмірами блока, зазвичай дві помилки в блоці ідентифікуються як одна.

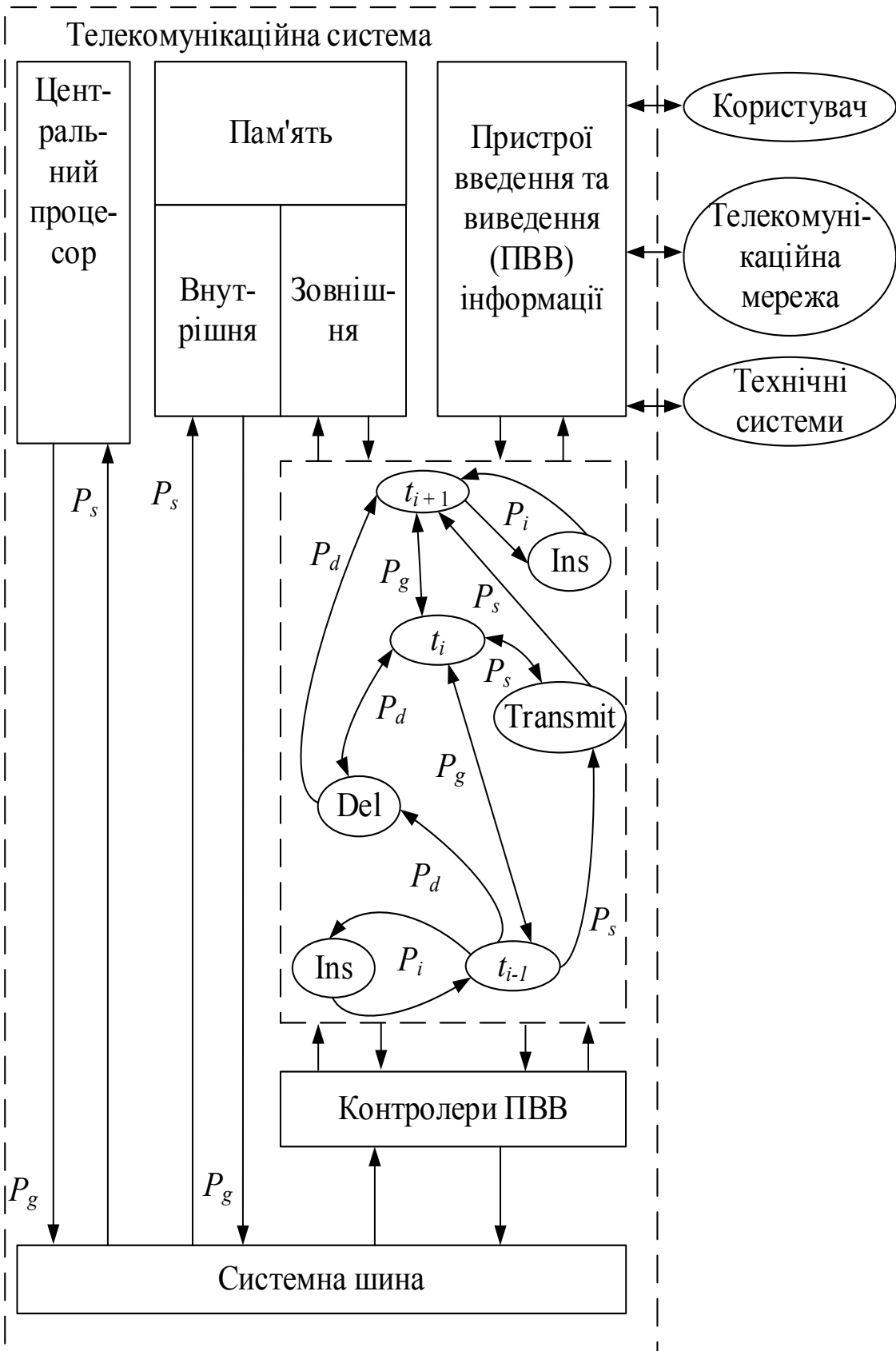


Рисунок 1.3 – Модель цифрової телекомунікаційної системи зі вставками та випаданнями бітів

Можна справедливо вважати, що кількість переданих дискретних символів в каналі дуже велика, при нормальній роботі, кількість помилок у багато разів менша ніж загальне число переданих символів, але також дуже велике, при цьому помилки виникають незалежно одна від одної. Зроблені припущення визначають опис процесу виникнення помилок пуассонівським процесом, який може бути повністю описаний за допомогою інтервалу часу T між послідовними помилками. Величина T випадкова із такою щільністю розподілу ймовірності:

$$W(T) = ae^{-aT}, T > 0, \quad (1.1)$$

де a – середня щільність числа помилок за одиницю часу. Можна побачити, що величина a повністю визначає закон розподілу ймовірності виникнення помилок. Однак крім постійно присутнього в каналі шуму є інші фактори, що викликають появу помилок, як внутрішні, так і зовнішні у відношенні до каналу передавання інформації.

До внутрішніх джерел помилок відносяться: різні нестабільності у внутрішніх ланцюгах синхронізації пристроїв; дрейф сигналів у системі внутрішньої синхронізації пристрою; перехресні завади у внутрішніх ланцюгах пристроїв; порушення в роботі еквалайзерів і в процесах, пов'язаних з нерівномірністю АЧХ; підвищення порогу по шуму, пов'язане зі зміною параметрів модулів пристроїв з часом.

До зовнішніх джерел помилок можна віднести різні параметри, що впливають на дискретний канал: перехресні завади в каналах передавання; джиттер в системі передавання; електромагнітна інтерференція (завади від машин, флуоресцентних ламп); варіації живлення пристроїв; імпульсні шуми в каналі; механічні пошкодження, надмірна вібрація, погані контакти; деградація параметрів якості середовища передавання (електричного або оптичного кабелю) глобальні порушення, пов'язані з руйнуванням каналу передавання.

Якщо розглянути вплив завад на параметри якості роботи системи передавання, можна відзначити, що вплив помилок відрізняється для різних систем передавання в залежності від наступних факторів [3]: типу трафіку, що передається; типу системи передавання, принципи кодування та наявності ланцюгів резервування передавання сигналу; кількості та частоти помилок; розподілу помилок; джерела завад; стійкості прийнятого в системі передавання принципу передавання

цифрової інформації до помилок; стійкості прийнятого в системі передавання принципу передавання цифрової інформації до інших факторів впливу (джиттера, нестабільності синхронізації).

У зв'язку з цим кілька подібних величин, утворених від універсального параметра BER, що характеризує частоту появи помилок в двійковому каналі, тому що одна помилка в дискретному каналі відповідає втраті одного біта інформації, що передається. Отже аналіз основних джерел і характеристик помилок дозволив визначити в яких випадках виникають вставки і випадання бітів у каналах телекомунікаційних систем. З'ясовано, що бітові помилки виникають у каналах при впливі на них інтенсивних імпульсних завад.

1.2 Аналіз основних видів тестових послідовностей

Для організації вимірювань з відключенням каналу використовується генератор та аналізатор тестової послідовності, підключені по входу та виходу каналу. Між генератором та аналізатором тестової послідовності існує синхронізація по тестовій послідовності, тобто процедура, в результаті якої аналізатор має можливість передбачити наступне значення кожного прийнятого біта.

На практиці використовуються два типи тестових послідовностей – фіксовані та псевдовипадкові послідовності (ПВП) [4, 17, 51].

Основним напрямком стресового тестування є аналіз систем передавання і систем з заповненням [35]. У деяких випадках фіксована послідовність може співпасти з послідовністю заповнення, що може привести до помилкових результатів.

Тому доцільно використовувати ПВП, які характеризуються кількістю регістрів зсуву (N), які використовуються при генерації з довжиною циклу послідовності $L = 2^N - 1$. Структура ПВП пов'язана зі схемою генератора ПВП, представленою на рис. 1.4.

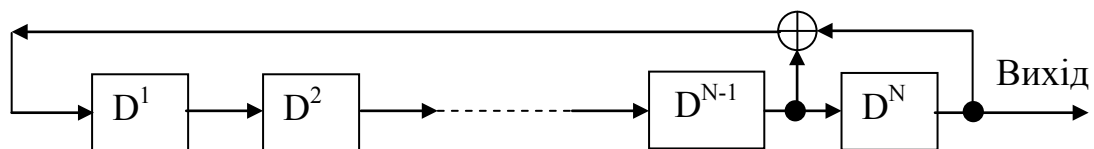


Рисунок 1.4 – Генератор ПВП

В основі принципу роботи генератора ПВП лежить процедура згортогового кодування з використанням N регістрів зсуву з одним зворотним зв'язком (ЗЗ) перед регістром N . Це еквівалентно кодеру згортогового кодування з поліномом (твірним многочленом) $D^N + D^{N-1} + 1$. Відповідно, довжина кодової послідовності залежить від кількості регістрів зсуву та становить $2^N - 1$. Процедура передбачає циклічне повторення послідовності через $2^N - 1$ імпульсів.

Для аналізу прийнятої ПВП використовуються два типи аналізаторів ПВП, схеми яких представлені на рис. 1.5 і 1.6. Найбільш часто використовується метод аналізу ПВП зі ЗЗ (див. рис. 1.5). У цьому випадку синхронізація послідовності здійснюється таким чином: петля ЗЗ розмикається, проводиться завантаження даних в регістри зсуву до повного заповнення, потім петля ЗЗ замикається та проводиться синхронізація по тестовій послідовності.

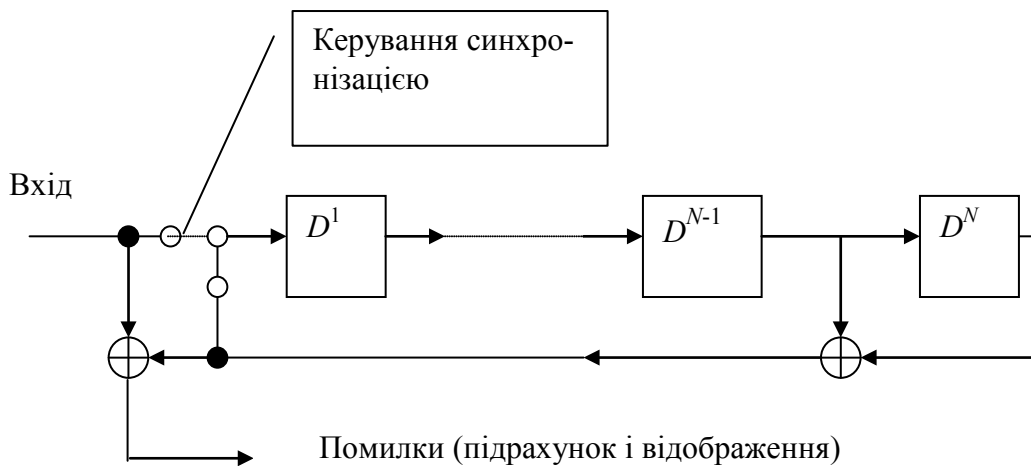


Рисунок 1.5 – Аналізатор ПВП із ЗЗ, метод побітового вимірювання помилок

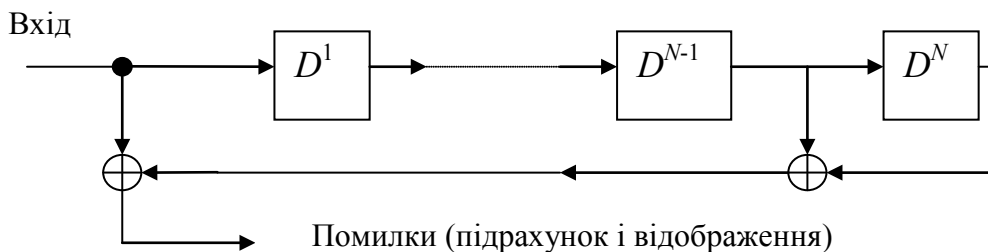


Рисунок 1.6 – Аналізатор ПВП без ЗЗ

Другим методом побудови аналізатора ПВП є метод без ЗЗ (див. рис. 1.6). Такий метод у даний час практично не використовується та визнаний застарілим. Основним його недоліком є наявність процесів згасання сигналів при вимірюваннях каналів з високим параметром помилки. Метод був розроблений для випадків низького параметра помилки в припущенні, що самі помилки виникають випадковим чином та описуються нормальним розподілом.

Основними характеристиками ПВП є: довжина послідовності в бітах; вид полінома, (конфігурація регістрів генератора та аналізатора ПВП); спектральний склад сигналу (рис. 1.7), що залежить від швидкості передавання в каналі.

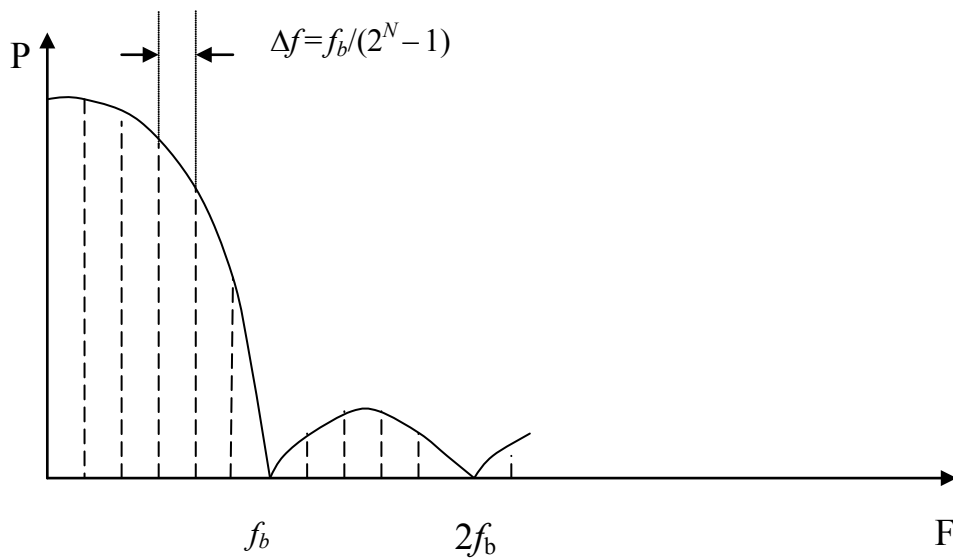


Рисунок 1.7 – Спектральний склад ПВП

Отже основною вимогою, що висуваються до спектральної відстані Δf , є можливість успішної синхронізації за наявності на приймальній стороні вузькосмугового кола синхронізації від вхідного потоку. У разі великої відстані може виникнути джиттер регістрів зсуву. Механізм виникнення джиттера досить простий: довга послідовність нулів, характерна для ПВП великої довжини, спричиняє накопичення фазової помилки за час її передавання, в результаті чого з'являється джиттер. Для того щоб уникнути появи джиттера регістрів зсуву, використовуються рекомендовані ПВП або M-послідовності [23–26].

1.3 Аналіз методів оцінювання ПБП у телекомунікаційних системах зі вставками та випаданнями бітів

BER визначається, як відношення числа помилково прийнятих бітів до загального числа бітів, які прийняті протягом сеансу вимірювання. Тривалість сеансу визначається виходячи з статистичних характеристик завад і потрібної точності вимірювань. Практичне правило для визначення тривалості сеансу вимірювань полягає в тому, що здійснюється заміна знаку степеня очікуваного значення BER на протилежний та до степеня додають два [38].

BER може бути знайдено шляхом порівняння переданої через канал тестової послідовності, з такою самою послідовністю, яка зберігається в пам'яті або генерується на приймальній стороні [4]. Для проведення таких вимірювань на передавальному та приймальному боці повинні бути встановлені синхронно-працюючі генератори тестових бітових послідовностей (рис. 1.8). На рис. 1.8 використовуються такі скорочення: ГКП – генератор кодової послідовності; ПС – пристрій синхронізації; БП – блок порівняння; ЛПІ – лічильник та індикатор помилок; АПД – апаратура передавання даних.

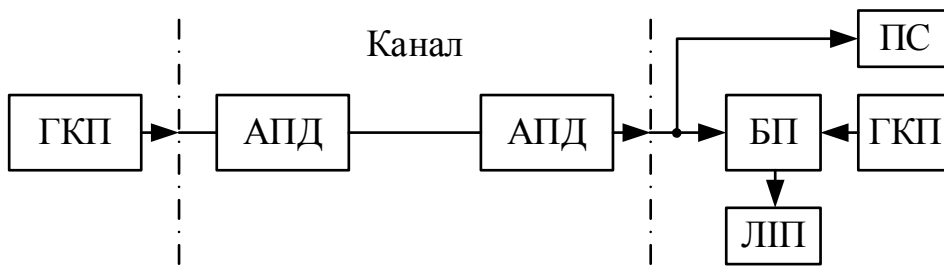


Рисунок 1.8 – Використання синхронно-працюючих ГКП

Простий ГКП, який задовольняє необхідні вимоги [38] можна побудувати на базі регістра зсуву з лінійними ЗЗ (рис. 1.9). Перед початком генерації в регістр заноситься будь-яке значення, крім – «0000». ПБП максимальної довжини (М-послідовності), які отримуються за допомогою подібних регістрів зсуву, мають низку переваг, які властиві істинним випадковим послідовностям [25, 34, 39, 40] (m – число ступенів регістра зсуву): баланс нулів та одиниць забезпечується тим, що М-послідовність містить $2^{m-1}-1$ нулів і 2^{m-1} одиниць; ідеальна автокореляційна функція досягається завдяки тому, що М-послідовність

відрізняється від циклічно зсунутої такої самої послідовності рівно в 2^{m-1} позиціях [25, 39, 40]; максимальна довжина M-послідовності має період $2^m - 1$, тому всі m -бітові комбінації крім нулів на одному періоді послідовності зустрічаються по одному разу.

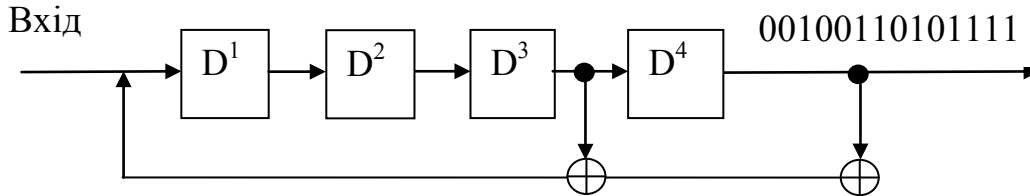


Рисунок 1.9 – Схема генератора M-послідовності

Параметр BER вважається основним параметром тестування будь-яких дискретних каналів і систем, тому що він визначає функцію розподілу ймовірності виникнення помилки в таких каналах. Таким чином, параметр BER є найбільш поширеною статистичною характеристикою якісних параметрів каналу. Стосовно вимірюваних величин цей параметр є вторинним та обчислюється на підставі даних про кількість прийнятих помилок в тестовій послідовності в різні періоди часу. Тому необхідно говорити про методи розрахунку параметра BER за даними про кількість помилок [3–15].

Як було показано вище, існує декілька алгоритмів аналізу помилок в прийнятому потоці з ПВП. На рис. 1.10 представлені три основні алгоритми розрахунку BER згідно з даними про помилки в каналі.

Відомо, що в процесі вимірювання існує дві точки синхронізації вимірювань: початок вимірювання та час, при якому досягається заданий поріг помилки (на рис. 1.10 показано 100 помилок). Вибір параметра BIT ERR = 100 заснований на припущенні нормального розподілу виникнення помилок. В цьому випадку відносна похибка вимірювань визначається як

$$\eta = 1/\sqrt{N}, \quad (1.2)$$

де N – кількість помилок. Для більшої частини експлуатаційних вимірювань відносна похибка в 10 % є цілком допустимою.

Слід зазначити, що припущення про нормальний закон розподілу виникнення помилок буде доречним в разі незалежного виникнення. Однак, як уже зазначалося, в каналах передавання є тенденція до групування помилок, тобто моменти виникнення помилок корелюють з

деякими зовнішніми факторами і є залежними. Цей ефект є вкрай небажаним ще і з тієї причини, що незалежні помилки набагато краще піддаються виправленню за допомогою коригувальних кодів. Для декореляції помилок у каналі в системах зв'язку (наприклад, в LAN за стандартами IEEE 802.x) використовується скремблювання.

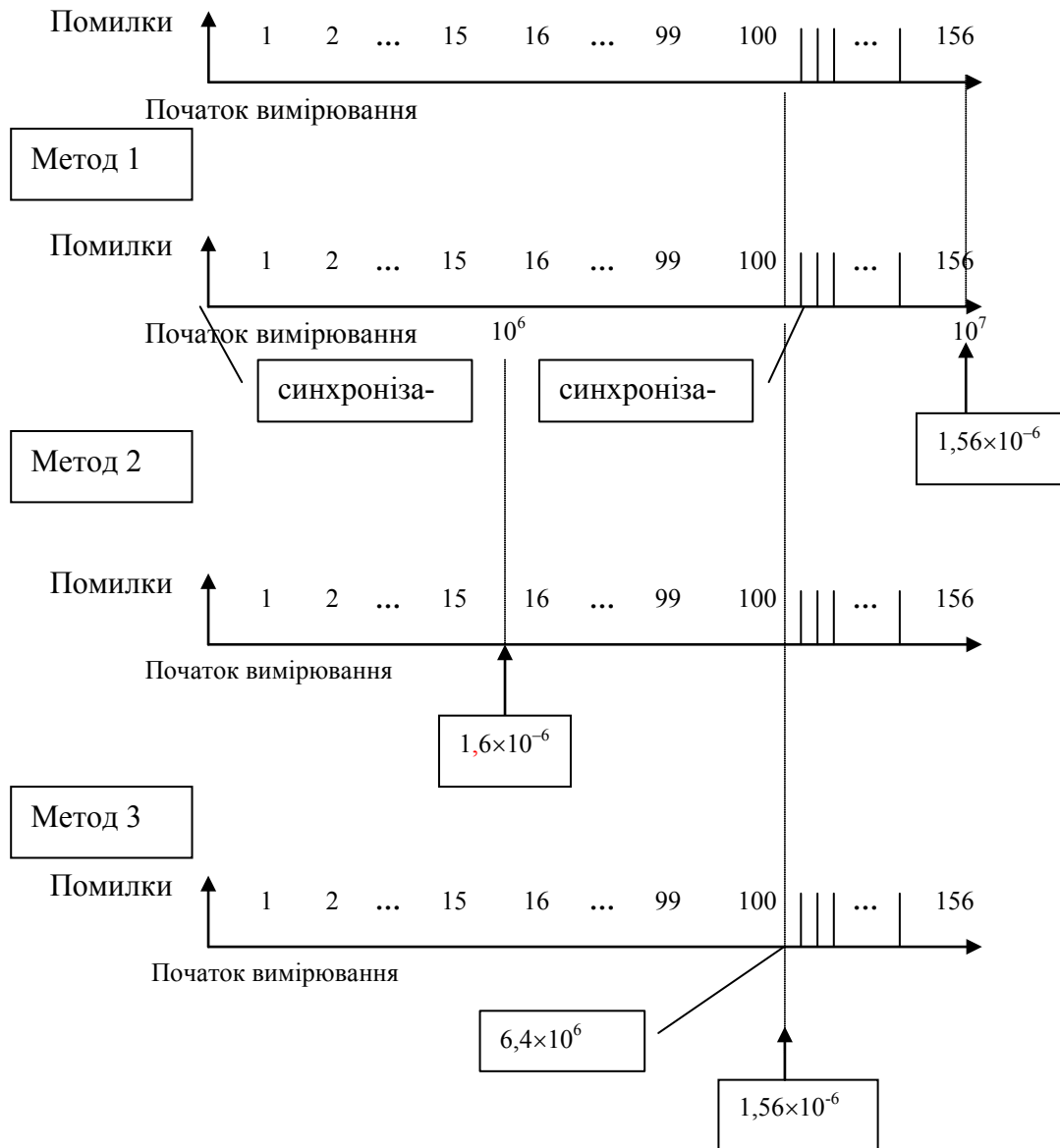


Рисунок 1.10 – Алгоритм вимірювання параметра BER

Перший метод – розрахунок відношення BER після прийому перших 100 помилок, що автоматично гарантує високу точність вимірювання (краще 10 %). Однак від початку вимірювання до отримання результату необхідний деякий час.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прокис Д. Цифровая связь / Джон Прокис ; пер. с англ. под ред. Д. Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.
2. Основи побудови засобів та систем телекомунікації : навч. посібн. / В. М. Кичак, С. Т. Барась, О. С. Городецька, Ю. І. Кравцов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 186 с.
3. Бакланов И. Г. Технологии измерений первичной сети. Часть 2. Системы синхронизации, В-ISDN, АТМ / И. Г. Бакланов. – М. : Эко-Трендз, 2000. – 186 с.
4. Канаков В. А. Новые технологии измерения в цифровых каналах передачи информации : учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Современные системы мобильной цифровой связи, проблемы помехозащищенности и защиты информации» / В. А. Канаков. – Нижний Новгород, 2006. – 91 с.
5. Сикарев А. А. Оптимальный приём дискретных сообщений / А. А. Сикарев, А. И. Фалько. – М. : Связь, 1978. – 328 с.
6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М. : Вильямс, 2004. – 1098 с.
7. Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи / А. Г. Зюко. – М. : Связь, 1972. – 360 с.
8. Банкет В. Л. Дискретная математика в задачах теории цифровой связи : учебн. пособие / В. Л. Банкет. – Одесса : ОНАС, 2008. – 118 с.
9. Massoud S. Digital Communications / Salehi Massoud, Proakis John. – McGraw-Hill Education, 2007. – 1168 p.
10. Боккер П. Передача данных. Техника связи в системах телеобработки данных : в 2 т. Т. 2. Устройства и системы / П. Боккер ; пер. с нем. под ред. Д. Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 1981. – 256 с.
11. Типикин А. П. Коррекция ошибок в оптических накопителях информации / А. П. Типикин, В. В. Петров, А. Г. Бабанин. – К. : Наукова думка, 1990. – 172 с.
12. Тихонов В. И. Оптимальный приём сигналов / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1983. – 320 с.
13. Иванов А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения / А. Б. Иванов. – М. : САЙРУС СИСТЕМС, 1999. – 672 с.
14. Назаров А. Н. АТМ: Технологии высокоскоростных сетей / А. Н. Назаров, М. В. Симонов. – М. : Эко-Трендз, 1997. – 163 с.

15. Слепов Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи (ATM, PDH, SDH, SONET и WDM) / Н. Н. Слепов. – М. : Радио и связь, 2003. – 468 с.
16. Tri T. На Digital Satellite Communications / Т. Tri. – McGraw-Hill Publishing Company, 1990. – 468 p.
17. Redd J. Calculating Statistical Confidence Levels for Error-Probability Estimates / J. Redd // Lightwave, 2000. – April 1. – 110–114 pp.
18. Wolaver D. H. Measure Error Rates Quickly and Accurately / D. H. Wolaver // Electronic Design, 1995. – May 30. – 89–98 pp.
19. Шляпоберский В. И. Основы техники передачи дискретных сообщений / В. И. Шляпоберский. – М. : Связь, 1973. – 480 с.
20. Основи техніки передавання інформації / Р. Н. Кветний, М. М. Компанець, С. Г. Кривогубченко, А. Я. Кулик. – Вінниця : ВНТУ, 2001. – 364 с.
21. David R. Smith. Digital Transmission Systems, 3 Edition / Smith R. David. – New York : Springer Science+Business Media, 2004. – 808 с.
22. Коричнев Л. П. Статистический контроль каналов связи / Л. П. Коричнев, В. Д. Королев. – М. : Радио и связь, 1989. – 240 с.
23. Бакланов И. Г. ISDN и FRAME RELAY: Технология и практика измерений / И. Г. Бакланов. – М. : Эко-Трендз, 1998. – 240 с.
24. Бакланов И. Г. Тестирование и диагностика систем связи / И. Г. Бакланов. – М. : Эко-Трендз, 2001. – 271 с.
25. Бакланов И. Г. Технологии измерений в современных телекоммуникациях / И. Г. Бакланов – М.: Эко-Трендз, 1997. – 139 с.
26. Peyton Z. Digital Communication Systems / Z. Peyton Jr. Peebles. – New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1987. – 416 p.
27. Roger L. Freeman. Fundamentals of Telecommunications / Freeman L. Roger. – New York : Published by John Wiley & Sons, Inc., 1999. – 676 p. – ISBNs: 0-471-29699-6 (Hardback); – 0-471-22416-2 (Electronic).
28. Захаров И. С. Основные показатели результативности процесса функционирования измерительных систем с переменными параметрами элементов / И. С. Захаров, О. И. Атакищев, А. Г. Сайбель // Телекоммуникации. – 2003. – № 7. – С. 2–5.
29. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки / Р. Блейхут. – М. : Мир, 1986. – 576 с.

30. Кларк Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Дж. Кларк, Дж. Кейн. – М. : Радио и связь, 1987. – 392 с.
31. Теория кодирования / Т. Касами, Н. Токура, Ё. Ивадари, Я. Инагаки. – М. : Мир, 1978. – 576 с.
32. Теория информации и кодирование / Б. Б. Самсонов, Е. М. Плохов, А. И. Филоненков, Т. В. Кречет. – Ростов н/Д, 2002. – 288 с.
33. Стиффлер Дж. Дж. Теория синхронной связи / Стиффлер Дж. Дж. ; пер. с англ. под ред. Б. С. Цыбакова, Э. М. Габидулина. – М. : Связь, 1975. – 488 с.
34. Колтунов Н. Н. Синхронизация по циклам в цифровых системах связи / Н. Н. Колтунов, В. Г. Коновалов, З. И. Лангуров – М. : Связь, 1980. –151 с.
35. ITU Recommendation G.821 // End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections. SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Digital networks – Quality and availability targets. ITU-T. (www.itu.org).
36. ITU Recommendation G.826 // Error performance of an international digital connection operating at a bit rate below the primary rate and forming part of an Integrated Services Digital Network. SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Digital networks – Quality and availability targets. ITU-T. (www.itu.org).
37. ITU Recommendation G.822 // Controlled slip rate objectives on an International digital connection. ITU-T. (www.itu.org).
38. Hu Zhengbing. Increasing the Data Transmission Robustness in WSN Using the Modified Error Correction Codes on Residue Number System / Hu Zhengbing, V. Yatskiv, A. Sachenko // Elektronika ir Elektrotechnika, 2015. – V. 21, № 1. – P. 76–81.
39. David L. Mills. Internet Time Synchronization: The Network Time Protocol / David L. Mills // IEEE Transactions on Communications. – 1991, – № 10, October. – V. 39.
40. American National Standard for Telecommunications. «Synchronization Interface Standards for Digital Networks». ANSI T1. 101 1994.

41. Abate J. E. AT&T's New Approach to the Synchronization of Telecommunication Networks / J. E. Abate // IEEE Communications Magazine. – 1989. – V. 27, № 4, April.
42. Yatskiv V. Improved Data Communication in WSN Using Modular Arithmetic / V. Yatskiv, A. Sachenko, N. Yatskiv // Wireless Communication and HTW – Berlin : University of Applied Sciences Berlin, 2010. – P. 39–49.
43. Линдсей В. Системы синхронизации в связи и управлении / В. Линдсей ; пер. с англ. под ред. Ю. Н. Бакаева и М. В. Капранова. – М. : Сов. радио, 1978. – 600 с.
44. Лосев В. В. Поиск и декодирование сложных дискретных сигналов / В. В. Лосев, Е. Б. Бродская, В. И. Коржик ; под ред. В. И. Коржика. – М. : Радио и связь, 1988. – 224 с.
45. Davidek V. Implementing a Noise Cancellation System with the TMS320C31 / V. Davidek, J. Sika, J. Stusak. – Texas : Instruments, Inc., 1996. – 23 с.
46. Трахтман А. М. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах / А. М. Трахтман, В. А. Трахтман. – М. : Советское радио, 1975. – 208 с.
47. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2012. – 608 с.
48. Lee W. C. Y. Mobile Communications Engineering: Theory and Applications 2nd Edition / William C. Y. Lee. – New York : McGraw-Hill Series on Telecommunications, 1997. – 689 p.
49. Лидл Р. Конечные поля : в 2 т. / Р. Лидл, Г. Нидеррайтер. – М. : Мир, 1988. – 392 с.
50. McElice R. J. Finite fields for computer scientists and engineers / Robert J. McElice. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 1987. – 208 с.
51. Сарвате Д. В. Взаимокорреляционные свойства псевдослучайных и родственных последовательностей / Д. В. Сарвате, М. Б. Персли // ТИИЭР, 1980, – Т. 68, № 5. – С. 59–90.
52. Патент № 4158193 США. МПК G08C 025/00; H04L 017/00. Data transmission test set with synchronization detector. / D'Antonio Renato A. – № 803987 ; – заявлено 06.06.77 ; опубл. 12.06.79.
53. Патент № 5282211 США. МПК G06F 11/00. Slip detection during bit-error-rate measurement. / I Robert M. Manlick, Matthew L. Fichtenbaum. – № 776850 ; – заявлено 15.10.91 ; опубл. 25.01.94.

54. Патент № 5392289 США. МПК G06F 11/00; H04L 12/00; H04L 7/00; H03M 13/00. Error rate measurement using a comparison of received and reconstructed PN sequences. / George R. Varian, Palo Alto. – № 136075 ; заявлено 13.10.93 ; опубл. 21.02.95.

55. Патент № 5349611 США. МПК H04L 007/00; H04L 009/00; H04J 003/6. Recovering synchronization in a data stream. / George R. Varian, Palo Alto. – № 003896 ; – заявлено 13.01.93 ; опубл. 20.09.95.

56. Пат. 89368 UA, МПК H03K 19/088. Логічний елемент I-НІ / В. В. Стронський, В. Д. Тромсюк ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201303346 ; заявл. 19.03.2013 ; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8. – 5 с.

57. Пат. 83366 UA, МПК H03K 19/08. Логічний елемент / В. М. Кичак, В. В. Стронський, В. Д. Тромсюк ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u2013 00762 ; заявл. 22.01.2013 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17. – 6 с.

58. Тромсюк В. Д. Метод підвищення точності при прийомі частотно-модульованих сигналів / В. М. Кичак. В. Д. Тромсюк // Міжнар. науково-технічна конф., 24–26 жовтня, 2013 р. : матеріали конф. – Чернівці, 2013. – С. 27–28.

59. Кичак В. М. Підвищення завадостійкості при прийомі дискретних сигналів / В. М. Кичак, В. Д. Тромсюк // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи : матеріали Міжнар. науково-технічної конф. (Київ, 10-16 березня 2014 р.). – К., 2014. – С. 183–185.

60. Кичак В. М. Аналіз ефективності цифрових методів модуляції/демодуляції / В. М. Кичак, В. Д. Тромсюк // Інфокомунікації – сучасність та майбутнє : матеріали Міжнар. науково-технічна конф. (Одеса, 30-31 жовтня 2014 р.). – Одеса, 2014. – С. 141–145.

61. Кичак В. М. Алгоритмы контроля параметров битовых ошибок в дискретных каналах связи / В. М. Кичак, В. Д. Тромсюк // Технические науки – от теории к практике : сборник статей по материалам XLVIII-XLIX междунар. научно-практической конф. (Новосибирск, 26 августа – 11 сентября, 2015 г.). – Новосибирск, 2015. – С. 7–11.

62. Kuchak V. The principles of control system parameters bit error / V. Kuchak, V. Tromsyuk // Technical Sciences: modern issues and development Prospects: International scientific conference, Sheffield, November 9, 2015. – Sheffield. – С. 116-119.

63. Кичак В. М. Особливості формування вхідного бітового потоку для оцінки бітових помилок в дискретних каналах зв'язку /

В. М. Кичак, В. Д. Тромсюк // Радіо-технічні поля, сигнали, апарати та системи : матеріали Міжнар. науково-технічної конф. (Київ, 14–20 березня, 2016 р.). – Київ, 2016. – С. 147–149.

64. Kychak V. Initial data processing algorithms of bit error rate testers / V. Kychak, V. Tromsyuk // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2016): proceedings of the Int. conf., Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23-26, 2016. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2016. – P. 566-568.

65. Кичак В. М. Підвищення завадостійкості при прийомі ЧМн дискретних сигналів / В. М. Кичак, В. Д. Тромсюк // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук. тех. зб. – 2014. – №178. – С. 24-30.

66. Кичак В. М. Кореляційний метод оцінювання параметрів бітових помилок / В. М. Кичак, В. Д. Тромсюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 5. – С. 180–185.

67. Кичак В. М. Позиційний метод оцінювання характеристик бітових помилок / В. М. Кичак, В. Д. Тромсюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 3. – С. 116–124.

68. Кичак В. М. Оцінювання бітових помилок при різних видах демодуляції дискретних сигналів / В. М. Кичак, В. Д. Тромсюк // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». – 2015. – № 63. – С. 55–63.

69. Кичак В. М. Дослідження роздільної здатності кореляційного і позиційного методів / В. М. Кичак, В. Д. Тромсюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП_16_2016) : XVI міжнар. науково-технічна конф. (Одеса, 10–15 червня, 2016 р.). – Одеса, 2016. – С. 115–116.

70. Кичак В. М. Оцінювання роздільної здатності кореляційного та позиційного методів / В. М. Кичак, В. Д. Тромсюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2016. – № 2. – С. 204-209.

71. Кичак В. М. Метод сортировки относительных позиций синхросимволов по частоте их появления / В. М. Кичак, В. Д. Тромсюк // Проблемы управления и информатики. – 2016. – № 5. – С. 7–14.

72. Романец Ю. В. Защита информации в компьютерных системах и сетях / Ю. В. Романец, П. А. Тимофеев, В. Ф. Шаньгин. – М. : Радио и связь, 1999. – 328 с.

73. Иванов М. А. Криптографические методы защиты информации в компьютерных системах и сетях / М. А. Иванов. – М. : КУДИЦ-ОБРАЗ, 2001. – 368 с.
74. Су Цзюнь. Повышение эффективности передачи данных в беспроводных сенсорных сетях на основе многопутевой маршрутизации / Су Цзюнь, В. В. Яцкив, А. О. Саченко // Физика, математика, информатика. Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест, 2010. – № 5 (650). – С. 21–24.
75. Aghes H. On the Quadratic Spans of de Bruijn Sequences / Aghes H. Chan, Richard A. Games // IEEE Transactions On Information Theory, – 1990. – V. 36, No. 4, July. – P. 822–829.
76. Кнут Д. Искусство программирования : Т. 1. Основные алгоритмы : уч. пос. / Д. Кнут. – 3-е изд. – М. : Вильямс, 2000. – 720 с.
77. Кнут Д. Искусство программирования : Т. 3. Сортировка и поиск : уч. пос. / Д. Кнут. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2000. – 832 с.
78. Кормен Т. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест. – М. : МЦНМО, 2001. – 960 с.
79. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман, Ю. В. Матиясевич. – М. : Мир, 1979. – 536 с.
80. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.
81. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника / Е. П. Угрюмов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2000. – 528 с.
82. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения / В. Феллер ; пер. с англ. под ред. Е. Б. Дынкина. – М. : Мир, 1984. – Т. 1. – 337 с.
83. Standard ECMA-130. Data interchange on read-only 120 mm optical data disks (CD-ROM). 2nd Edition June 1996. <http://www.ecma-international.org/publications/files/ecma-st/ECMA-130.pdf>
84. Бибило П. Н. Синтез логических схем с использованием языка VHDL / П. Н. Бибило. – М. : СОЛОН-Р, 2002. – 384 с.
85. Суворова Е. А. Проектирование цифровых систем на VHDL / Е. А. Суворова, Ю. Е. Шейнин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 576 с.
86. Parnell K. Programmable Logic Design Quick Handbook. Xilinx Corp / K. Parnell, N. Mentha. – Xilinx, Inc., 2003, – 190 p.
87. Xilinx DS031 Virtex-II Platform FPGAs: Complete Data Sheet. – 2002, – 319 p.

88. Прата С. Язык программирования С : лекции и упражнения / Стивен Прата. – 5-е издание. – М. : Вильямс, 2006. – 960 с.
89. Блох Э. Л. Модели источника ошибок в каналах передачи цифровой информации / Э. Л. Блох. – М. : Связь, 1971. – 312 с.
90. Patrick A. H. Bours. Codes for Correcting Insertion and Deletion Errors / Patrick A. H. Bours. – Eindhoven : Eindhoven Technical University, 1994. – 165 p.
91. Edward A. Ratzel. Codes for Channels with Insertions, Deletions and Substitutions [Электронный ресурс] / Edward A. Ratzel, David J. C. MacKay // 2nd International Symposium on Turbo Codes and Related Topics Brest, France, 4–7 September, 2000. – 28 p. – Режим доступа: <http://www.inference.phy.cam.ac.uk/ear23/papers/telecoms.pdf>.
92. David L. Capacity of Insertion and Deletion Channels [Электронный ресурс] / David Leigh // 3rd International Symposium on Turbo Codes and Related Topics, Brest, France, July 23, 2001. – 16 p. – Режим доступа: <http://www.inference.eng.cam.ac.uk/is/papers/leigh.pdf>.
93. Кнут Д. Искусство программирования. – Т. 2. Получисленные алгоритмы : уч. пос. / Д. Кнут. – 3-е изд. – М. : Вильямс, 2000. – 832 с.
94. Прата С. Язык программирования С++. Лекции и упражнения / Стивен Прата. – 5-е издание. – М. : Вильямс, 2007. – 1187 с.
95. Brian W. Kernighan. Программирование на С / Brian W. Kernighan, Dennis M. Ritchie. – М. : Вильямс, 1998. – 984 с.
96. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения. Серия «Библиотека профессионала» / В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.
97. Якимов Е. В. Цифровая обработка сигналов / Е. В. Якимов, Г. В. Вавилова, И. А. Клубович. – Томск : Томский политехнический университет, 2008. – 308 с.
98. Методы обработки сигналов при наличии помех в линиях связи / К. Ф. Каменев, Н. Е. Кириллов, Н. И. Кобин, В. К. Кульчицкий. – М. : Радио и связь, 1985. – 224 с.
99. Sun K. An Improved Time-Frequency Analysis Method in Interference Detection for GNSS Receivers / Kewen Sun, Tian Jin, Dongkai Yang // Sensors – Academic Editor: Wilmar Hernandez. – 2015. – № 15. – P. 9404–9426.
100. Benesty J. Conceptual Framework for Noise Reduction / J. Benesty, J. A. Chen. – N.-Y. : Springer, – 2015, – 89 p.

101. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – М. : Радио и связь, 1989. – 656 с.
102. Куприянов М. С. Цифровая обработка сигналов: алгоритмы, процессоры, средства проектирования / М. С. Куприянов, Б. Д. Матюшкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 1999. – 592 с.
103. Андрианов А. В. Линейное предсказание и его применение в радиотехнике / А. В. Андрианов // Радиотехника. – 1981. – Т. 36, № 1. – С. 11–18.
104. Коратаев Г. А. Методы линейного предсказания / Г. А. Коратаев // Зарубежная радиоэлектроника. – 1980. – № 10. – С. 49–65.
105. Lei Xu. Blind multipath channel equalization based on eigenvector decomposition / Lei Xu, Liu Lijuan, Xu Chongyang. // *Compele. Bradford.* – 2004. – V. 23, Iss. 1. – P. 277.
106. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов. Практический подход / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М. : Вильямс, 2004. – 992 с.
107. Тараканов А. Н. Адаптивная цифровая обработка сигналов : учебное пособие / А. Н. Тараканов, В. В. Хрящев, А. Л. Приоров. – Ярославль : ЯрГУ, 2001. – 134 с.
108. Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов. Теория и алгоритмы / В. И. Джиган. – М. : Техносфера, 2013. – 528 с.
109. A. Sudhir Babu. Evaluation of BER for AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channels under Various Modulation Schemes / A. Sudhir Babu, Dr. K.V Sambasiva Rao // *International Journal of Computer Applications (0975–8887).* – 2011. – V. 26, No. 9.
110. Deepak K. Chy. Evaluation of SNR for AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channels Under DPSK Modulation Scheme with Constant BER / Deepak K. Chy , Md. Khaliluzzaman // *International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing (2330–1007).* – 2015. – V. 6, No. 6. – P. 7–12.
111. James E. Gilley. Bit-Error-Rate Simulation Using Matlab / James E. Gilley // *Transkrypt international, INC.* – 2003, August 19. – P. 1–8.
112. Рудик В. Д. Проектування на ПАІС в середовищі Anadigm Designer2 / В. Д. Рудик, В. Д. Тромсюк // *Вісник Хмельницького національного університету.* – 2012. – № 2. – С. 180–186.
113. Интернет-сайт компании Math-Works. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com>.

114. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А. Г. Зюко, А. И. Фалько, И. П. Панфилов и др. ; под ред. А. Г. Зюко. – М. : Радио и связь, 1985. – 272 с.

115. Bortnik G. Correction of clock jitter in analog-digital equipment of telecommunication systems / G. Bortnik, M. Vasylykivskyj, V. Cheloyan // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : Proceedings of the 10th International Conference, TCSET'2010. – 2010. – P. 221.

116. Сукачев Э. А. Введение в теорию сигналов с управляемой межсимвольной интерференцией : монография / Э. А. Сукачев, П. А. Шулипа. – Одесса : ВМВ, 2011. – 200 с.

117. Кулик А. Я. Концепція роботи систем мобільного зв'язку 3G із застосуванням алгебри логарифма функції правдоподібності для алгоритму декодування Vi-SOVA / А. Я. Кулик, Ю. Ю. Іванов // Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка : наукові праці ДонНТУ. – 2013. – № 18 (206). – С. 84-91.

118. Сверхширокополосные скрытые системы радиосвязи: тр. Всеросс. научн.-техн. дист. конф. «Информационно-телекоммуникационные технологии» [Электронный ресурс] / В. И. Гусевский, Л. А. Белов. – М. : МАИ, 2003. – Режим доступа: <http://conf2003.mail.ru/index.php?module=articles>

119. Харкевич А. А. Борьба с помехами. / А. А. Харкевич. – М. : Наука, 1965. – 276 с.

120. Кузьмин И. В. Основы теории информации и кодирования : учебн. [для студ. высш. уч. зав.] / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус. – К. : Вища школа, 1986. – 238 с.

121. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений / Л. М. Финк. – М. : Советское радио, 1970. – 728 с.

122. Филатов В. А. О моделях обработки данных на основе иерархии сетей высокого уровня / В. А. Филатов, В. Е. Кучеренко // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2004. – № 1. – С. 95–100.

123. Экстремальная радионавигация / И. Н. Белоглазов, Г. А. Медведев, Р. И. Половников и др. ; под ред. Р. И. Половникова, В. П. Тарасенко. – М. : Наука, 1978. – 280 с.

124. Идентификация статистических параметров в одной модели условной независимости [Электронный ресурс] / М. И. Шлезингер. – Режим доступа: <http://www.irte.org.ua/image>.

125. Васильев К. К. Методы обработки сигналов / К. К. Васильев. – Ульяновск : УЛГТУ, 2001. – 80 с.

126. Кветный Р. Н. Математическое моделирование в задачах проектирования средств автоматики и информационно-измерительной техники : уч. пос. [для студ. высш. уч. зав.] / Р. Н. Кветный. – К. : УМК ВО, 1989. – 112 с.

127. Кулик А. Я. Приймання інформативних сигналів на фоні завад з апріорно невизначеними параметрами / А. Я. Кулик // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2006. – № 1(24). – С. 103–106.

128. Мокін Б. І. Методи ідентифікації електромеханічних процесів у лінійних системах : навч. посібн. [для студ. вищ. навч. закл.] / Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 240 с.

129. Мокін Б. І. Методи ідентифікації електромеханічних процесів : навч. посібн. [для студ. вищ. навч. закл.] / Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 300 с.

130. Ларіонов Ю. І. Дослідження операцій в інформаційних системах : навч. посібн. [для студ. вищ. навч. закл.] / Ю. І. Ларіонов, В. М. Левикін, М. А. Хажмурадов. – Харків : СМІТ, 2005. – 364 с.

131. Коржик В. И. Расчёт помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений : справочник / В. И. Коржик, Л. М. Финк, К. Н. Щелкунов. – М. : Радио и связь, 1981. – 232 с.

132. Техніка передавання аналогової та дискретної інформації : навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] / А. С. Васюра, С. Г. Кривогубченко, А. Я. Кулик та ін. – Вінниця : ВДТУ, 1998. – 101 с.

133. Сравнительный анализ приближений для вероятности обнаружения радиолокационных сигналов [Электронный ресурс] / Р. С. Аносов, С. С. Аносов // Журнал радиоэлектроники. – 2000. – № 8. – Режим доступа до журн.: <http://jre.cplire.ru/jre/aug00/4/text.html>.

134. Ван Трис Г. Теория обработки оценок и модуляции : в 3 т. / Г. Ван Трис. – М. : Советское радио, 1972.

135. Kulyk A. J. Optimization of process of exchange information in the computer systems: Materialy IV mezinarodni vedecko-prakticka conference // Zpravy Vedecke IDEJE-2008 (Praha, 27.10–05.11.2008) / A. J. Kulyk, D. S. Krivogubtchenko, A. A. Kulyk. – Praha : Education and Science s.r.o., 2008. – Dil 11. – P. 106–10.