

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Р. Н. Квстний, Я. А. Кулик

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ
ОБРОБКИ ДИСКРЕТНОЇ ІНФОРМАЦІЇ
У МЕРЕЖАХ
З ВИСОКИМ РІВНЕМ ЗАВАД**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК 621.3

К70

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 9 від 25 лютого 2016 р.)

Рецензенти:

А. М. Петух, доктор технічних наук, професор

М. П. Мусієнко, доктор технічних наук, професор

Кветний, Р. Н.

К70 Методи та засоби обробки дискретної інформації у мережах з високим рівнем завад : монографія / Р. Н. Кветний, Я. А. Кулик. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 144 с.

ISBN 978-966-641-686-8

В монографії розглядаються теоретичні засади і практичні аспекти реалізації методів передавання інформації.

Призначена для магістрів, аспірантів та наукових працівників технічного напрямку.

УДК 621.3

ISBN 978-966-641-686-8

© Р. Кветний, Я. Кулик, 2017

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ.....	7
1.1 Особливості побудови цифрових мереж з високим рівнем завад.....	7
1.2 Засоби для обробки сигналів у цифрових мережах.....	9
1.3 Методи завадозахищеного кодування.....	12
1.4 Методи частотно-часового аналізу сигналів.....	16
1.5 Ефект Гіббса.....	27
1.6 Очищення від шумів з допомогою вейвлетів.....	28
1.7 Фільтрація прийнятих сигналів.....	31
1.8 Вибір критеріїв для оцінки ефективності методів очищення інформативних сигналів від шумів.....	34
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ ДЛЯ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ В УМОВАХ ВИСОКОГО РІВНЯ ЗАВАД.....	36
2.1 Застосування методу визначення коефіцієнтів розкладання для усунення ефекту Гіббса.....	37
2.2 Метод визначення коефіцієнтів розкладання і його застосування для вейвлет-розкладання.....	42
2.3 Застосування методу визначення коефіцієнтів розкладання для апроксимації функції Хевісайда.....	45
2.4 Використання адаптивного порогового методу очищення інформативних сигналів від шумів.....	54
2.5 Розробка математичного апарату для багатовіконної оцінки потужності спектра для адаптивного порогового методу.....	57
2.6 Розробка математичного апарату для швидкої медіанної фільтрації.....	65
РОЗДІЛ 3 ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДЛЯ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ В УМОВАХ ВИСОКОГО РІВНЯ ЗАВАД.....	70
3.1 Вдосконалення методу та засобів швидкої медіанної фільтрації.....	70
3.2 Вдосконалення методу багатовіконної оцінки спектра.....	79

3.3 Зменшення складності обчислень для швидкого вейвлет-перетворення.....	84
3.4 Вдосконалення методу паралельних обчислень для швидкого вейвлет-перетворення.....	93
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	
4.1 Оцінка ефективності методу визначення коефіцієнтів розкладання шляхом чисельних експериментів.....	107
4.2 Аналіз ефективності методу багатовіконної оцінки спектра шляхом чисельних експериментів.....	113
4.3 Аналіз ефективності методу швидкої медіанної фільтрації.....	118
4.4 Чисельні експерименти та порівняння методів розпаралелення обчислень швидкого вейвлет- перетворення.....	120
4.5 Експериментальна перевірка ефективності методів з використанням програми для моделювання мережі CAN....	123
ВИСНОВКИ.....	129
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	131

ВСТУП

Постійне зростання використання комп'ютерних технологій і систем відбувається в геометричній прогресії, а одним із ключових аспектів розвитку комп'ютерних систем є створення високоефективних та надійних методів для передавання та приймання даних. Серед комп'ютерних мереж важливе місце займають ті, які працюють в умовах високого рівня завад. До них належать промислові та радіомережі. У промислових вірогідність передавання інформації має пріоритет над швидкістю, і часто виникає необхідність забезпечити результат передавання інформації за будь-яких умов. У мережах Wi-Fi при імовірності помилки 0,1 втрачається більше 40 % інформації, при більшому рівні завад передавання неможливе. За стандартами [1, 2] для радіомереж, зокрема Wi-Fi, WiMAX, рівень сигнал/шум повинен бути не менше 57 дБ. У мережах на основі CAN C 2.0 при досягненні значення лічильника помилок 256 для конкретного вузла, відбувається перехід у режим Bus Off, і в цьому стані передавання інформації відбувається не в повнодуплексному, а в симплексному режимі [3]. Для аналізу даних існує багато методів, але в умовах високого рівня завад традиційні методи не завжди ефективні, тому виникає необхідність вдосконалення існуючих методів.

Проблемами передавання інформації та цифрової обробки сигналів займалися К. Шеннон, В. А. Котельніков, Р. М. Хеммінг, І. В. Кузьмін. Створенням методології побудови ефективних комп'ютерних систем та мереж займалися Ю. С. Яковлев, Л. І. Тимченко, А. О. Мельник. Питання побудови широкосмугових систем зв'язку висвітлені у класичних працях Х. Ф. Хармута і Л. Є. Варакіна тощо.

Перші праці, де розглядалися ортогональні вейвлет-функції, з'явилися на початку XX ст. Це були праці Хаара, який досліджував ортогональні функції, прямокутні за формою. Теоретична можливість розкладу на ортогональні функції була обґрунтована в 50-х роках XX ст., але через складності інтерпретації отриманих результатів вони не знайшли практичного застосування. З появою вейвлетів у 80-х роках, досліджених Добеші, Маллатом, Моллом, Дерпратом та ін., зацікавленість фахівців у всьому світі до ортогональних функцій значно зросла. Математичний апарат вейвлет-аналізу продовжує стрімко роз-

виватись, про що свідчить велика кількість наукових праць та результати досліджень.

Особливістю комп'ютерних мереж з високим рівнем завад є неможливість гарантувати вірогідне передавання інформації каналами зв'язку, що призводить до погіршення роботи системи в цілому або навіть до неможливості її роботи взагалі. Класичні методи обробки прийнятої інформації не завжди забезпечують необхідний результат. Ефективність і надійність роботи системи в цілому залежить більше від якості обробки інформації, ніж від головних процесорних модулів, тому в мережах з високим рівнем завад головну увагу доцільно приділити підвищенню ефективності обробки інформації, межею якої вважається гранична імовірність безпомилкового приймання та обробки інформації.

Ці процеси регламентуються міжнародними стандартами, які визначають обов'язкові та рекомендовані вимоги до створення апаратних засобів та умови, при яких вони можуть працювати. Зокрема для технології xDSL співвідношення сигнал/шум повинно бути 10:1, або 21,3 дБ, а імовірність виникнення помилки не повинна перевищувати 10^{-7} [4]. Якщо ця умова не виконується (у промислових умовах співвідношення сигнал/шум може бути менше 10:1), тоді обладнання працює у нештатному режимі, а точність передаваної інформації гарантуватись не може [5]. Для систем в авіації імовірність помилки повинна складати 10^{-19} [6] на автомобільному транспорті 10^{-12} [7]. Організація промислових мереж з використання радіозв'язку має значні перспективи, оскільки забезпечує високу швидкість передавання інформації та економію на засобах дротового зв'язку, але радіомережі чутливі до завад, тому потребують високоефективних методів для забезпечення постійного зв'язку.

Відомі методи обробки сигналів в умовах високого рівня завад не завжди достатньо ефективні, або вимагають суттєвих апаратних і ресурсних затрат, тому виникає необхідність розробки нових та удосконалення відомих методів.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

У теперішній час у всіх видах комп'ютерних систем широко використовується процедури обробки сигналів з використанням ортогональних функцій. Особливої уваги вони вимагають в комп'ютерних системах з високим рівнем завад. Це пов'язано з наявністю каналів зв'язку різної природи, чутливих до завад, причина виникнення яких є також різною. Дотримання умов організації багатоканальної системи потребує проведення ефективного спектрального аналізу, причому методи обробки сигналів повинні вносити мінімальну похибку, витратити мінімальний процесорний час, що в умовах високого рівня завад, коли необхідно забезпечувати передавання інформації незалежно від ресурсів, є критичним для комп'ютерних систем, а вилучення завад потребує побудови методів ефективної фільтрації.

Для аналізу переваг та недоліків існуючих методів, сфери їх використання та можливості застосування в умовах високого рівня завад необхідно розглянути їх більш докладно.

1.1 Особливості побудови цифрових мереж з високим рівнем завад

Міжнародні нормативні документи поділяють джерела індустріальних завад на 11 груп [36]:

1. Електропристрої різного призначення, що експлуатуються в житлових будинках або підключаються до побутової електроосвітлювальної мережі.
2. Електротранспорт.
3. Системи запалювання двигунів внутрішнього згорання.
4. Пристрої, що містять джерела короткочасних завад.
5. Високочастотні установки промислового, наукового та медичного призначення.
6. Лінії електропередач та електричні підстанції.
7. Світильники з газорозрядними лампами.
8. Електропристрої, що живляться від промислових енергосистем і експлуатовані поза житловими будинками.
9. Пристрої з провідним зв'язком.

10. Телевізійні та радіомовні приймачі.

11. Електропристрої, що експлуатуються поблизу службових радіоприймальних установок.

В ЄС поняття «високого рівня завад» означає належність до умов роботи пристроїв для передавання сигналів до 3 і 4 класу завад.

Клас 3 (рівень промислових завад)

Норми для приміщень – центрів управління промисловими об'єктами:

- релейні котушки не забезпечені обмежувальними пристроями, немає контакторів;
- необов'язкове розділення ліній сильного струму та ліній управління від частин установок з більш високим рівнем завад;
- лінії живлення прикладені роздільно від ліній управління, сигнальних і телефонних ліній;
- необов'язкове відділення ліній управління, сигнальних і телефонних ліній одна від одної;
- може використовуватися спільна система заземлення.

Клас 4 (високий рівень промислових завад)

Норми для приміщень, де встановлюються пристрої керування технологічними процесами, розподільні пристрої високих напруг і т. п.:

- реле і контактори, не забезпечені обмежувальними пристроями;
- необов'язкове відділення провідників від частин установок з ризиком рівнем завад;
- спільна прокладка ліній управління, сигнальних і телефонних ліній;
- використання багатожилевих кабелів для ліній управління і сигнальних ліній [36].

Розрізняють локальні обчислювальні мережі для офісного і промислового застосування. В офісах до локальних обчислювальних мереж пред'являються в основному вимоги щодо швидкості передачі даних (особливо це актуально для мультимедіа-додатків реального часу). В офісних і домашніх умовах рівень завад не надто великий, порівняно з виробничими, тому в правильно сконфігурованих мережах колізії виникають рідко. Мінімальні простої, пов'язані з повторним передаванням спотворених і втрачених пакетів даних, не так критичні, як у промислових мережах. В інтернет-мовленні в режимі реалі-

льного часу неправильні кадри можуть бути відновлені за екстраполяційним принципом, базуючись на попередніх даних, оскільки спотворення такого роду малопомітні або мають прийнятний характер. На рисунку 1.1 показані основні класи програмних методів захисту від завад в каналах зв'язку.

До польових промислових мереж, навпаки, висуваються жорсткі вимоги щодо завадостійкості та передбачуваності. Зазвичай до промислових мереж пред'являються такі вимоги:

- жорстка детермінованість поведінки;
- забезпечення функцій реального часу;
- робота на довгих лініях з використанням недорогих фізичних середовищ (зокрема, витої пари);
- підвищена надійність фізичного і канального рівнів передавання даних в умовах виробничого середовища (наприклад, при наявності потужних електромагнітних завад);
- наявність спеціальних високонадійних механічних з'єднань компонентів, що забезпечують захист контактів від агресивного виробничого середовища [37].

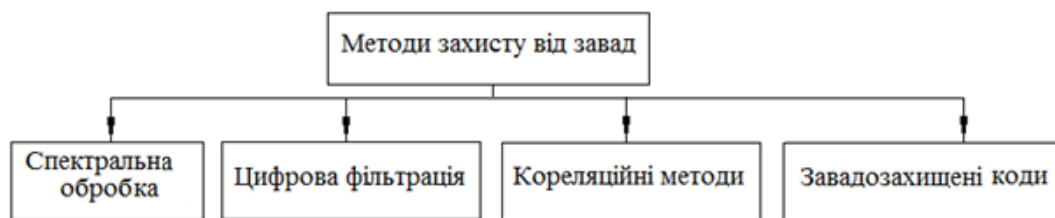


Рисунок 1.1 – Основні групи методів захисту від завад у каналах зв'язку

1.2 Засоби для обробки сигналів у цифрових мережах

Терміни «комп'ютерні системи» та «комп'ютерні мережі» сформувались останнім часом і стандартами не регламентовані. Вони підкреслюють спорідненість (за певними ознаками) структур процесорних засобів, призначених для збирання та обробки інформації. Відмінність структур комп'ютерних систем визначається їх функціональним призначенням. Для розподілених систем прийнятне все висловлене вище, але особливого значення набуває процес передавання інформації. Узагальнену структуру розподіленої комп'ютерної системи можна зобразити у вигляді, що на рисунку 1.2.

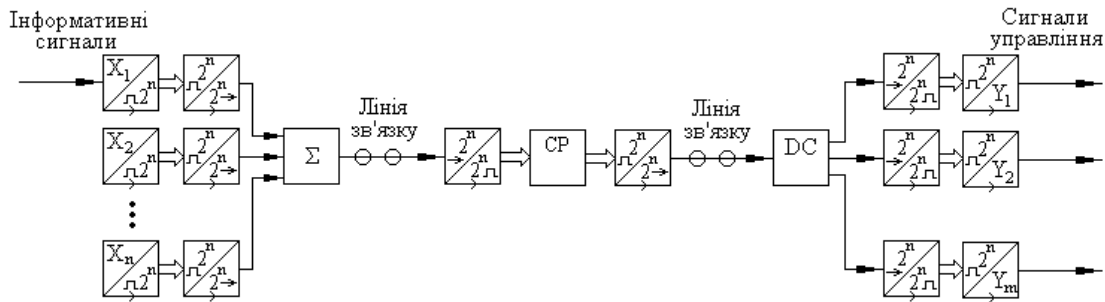


Рисунок 1.2 – Узагальнена структура розподіленої комп'ютерної системи [38]

Вимірювання [6] показали, що чіпсет, який відповідає стандарту IEEE 803.11b, в індустріальному середовищі дає потік короточасних помилок з частотою 10^{-2} – 10^{-4} при швидкості передачі 2 Мбіт/с і використанні квадратурної фазової модуляції QPSK. Крім того, в процесі вимірювань епізодично виникали періоди тривалістю до 1 хв., коли втрати даних доходили від 10 % до 80 %. Аналогічні результати спостерігалися і в інших експериментах.

В промисловості популярне розширення «офісного» Ethernet (IEEE 802.3) – Industrial Ethernet, а також набуває розвитку RadioEthernet [39].

Прикладом промислових мереж, які пристосовані до умов високого рівня завод, є CAN, ProfiBus, ModBus, ASi, HART. Також до мереж, які працюють в умовах високого рівня завод, можна віднести Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth, RadioEthernet, ZigBee.

CAN забезпечує високий рівень захисту даних від спотворення навіть при роботі в складних умовах (потужні заводи), при цьому досягається достатньо велика для таких умов швидкість передавання даних (до 1 Мбіт/с). Важливою перевагою CAN є те, що розробник системи може впливати на пріоритет повідомлень з тим щоб найважливіші з них не очікували в черзі на відправку. Це властивість CAN дозволяє будувати мережі, що підтримують реальний масштаб часу [40]. Структура кадру формату CAN 2.0A показана на рисунку 1.3 [41]. На рисунку 1.4 показана структурна схема приймача CAN, до якого доданий блок фільтрації, яку можна виконувати програмно з використанням цифрового фільтра на цифровому сигнальному процесорі, який також може бути реалізований апаратно.

Стандарт Industrial Ethernet (рисунок 1.5) визначає провідні з'єднання і електричні сигнали на фізичному рівні, формат пакетів і протоколи управління доступом до середовища. Тут застосовуються промислові виті пари з подвійним екрануванням, ІЕ FC TP-кабелі для швидкого монтажу і TP-корди або скляні оптоволоконні кабелі [42]. До блока CSMA/CD можна додати цифровий фільтр, який реалізує заданий спосіб програмного очищення сигналу від шуму.

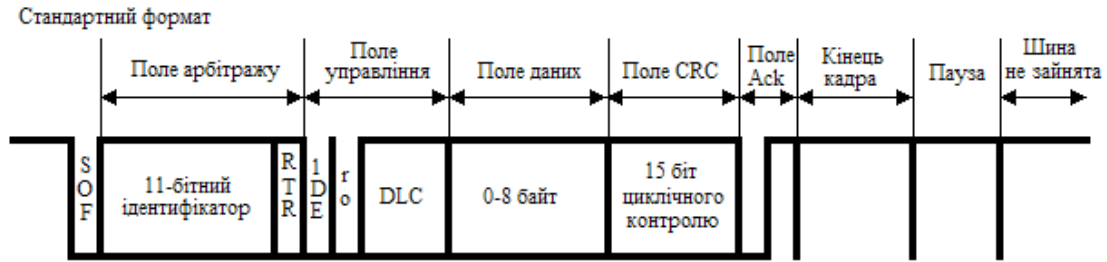


Рисунок 1.3 – Формат кадру повідомлення стандартного формату CAN 2.0A

У своїй роботі [43] Генрі Отт перерахував основні методи і дав практичні рекомендації щодо боротьби з завадами:

- захист на апаратному рівні (екранування, заземлення, балансування, ізоляція, вибір кабелю, використання електричних фільтрів);
- програмна фільтрація прийнятого сигналу;
- придушення завад (в частотній або часовій області) ;
- передача повідомлення з використанням корегувального коду;
- повторний запит пакетів.

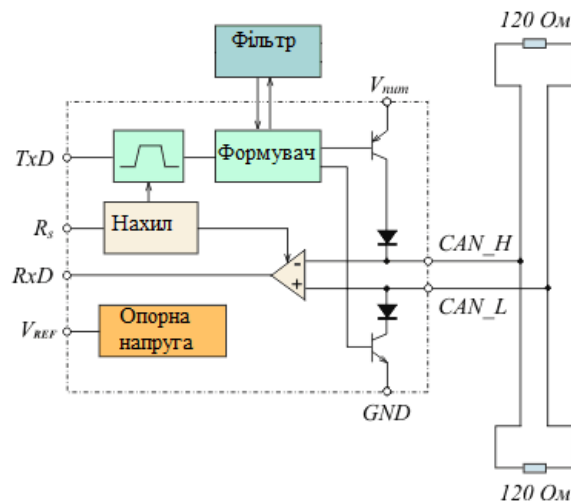


Рисунок 1.4 – Структура приймача CAN з використанням додаткового блока [44]

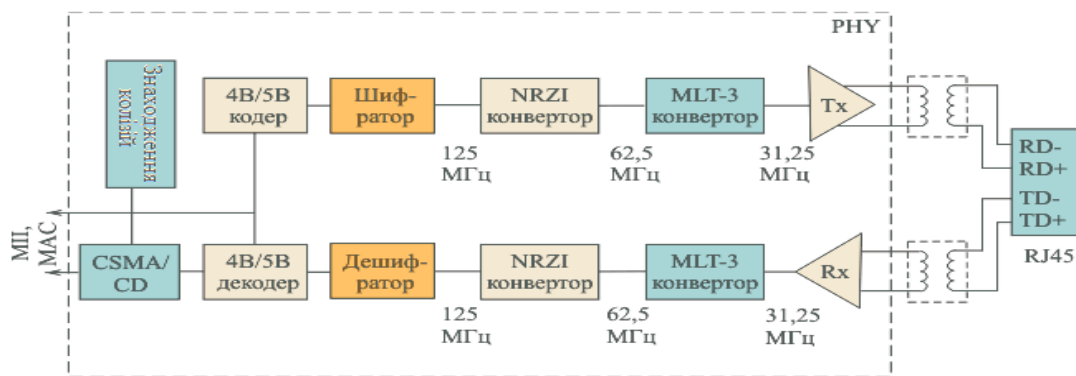


Рисунок 1.5 – Структурна схема блока приймача повідомлення для PHY Ethernet [45]

Серед методів обробки сигналів, які можуть бути вдосконалені без значного збільшення вартості, можна виділити методи фільтрації та методи придушення завад в часовій чи частотній області, оскільки вдосконалення цих методів вимагає лише зміни драйвера мережевої карти комп'ютера чи іншого приймаючого пристрою.

1.3 Методи завадозахищеного кодування

Для систематизації методів кодування можна ввести класифікацію кодів за функціональними ознаками (рисунок 1.6). Так всі коди можна розділити на коди загального призначення, спеціалізовані коди та коди для передавання інформації. Третю групу утворюють коди, призначені, в основному, для використання в системах та пристроях передавання інформації. Кодові послідовності, що використовуються для розширення смуги частот і утворення широкосмугового сигналу можна розподілити на два основні класи: ортогональні (квазіортогональні) та псевдовипадкові з малим рівнем взаємної кореляції [38].

На рисунку 1.7 показана залежність імовірності помилки на один біт від імовірності помилки в каналному символі при використанні деяких видів завадозахищеного кодування (коди Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема, Хеммінга, Голя, Фібоначчі) при різних параметрах. З рисунка видно, що найкращі завадозахищені коди можуть знизити імовірність помилки в 10^5 – 10^7 разів. Для більшості задач цього достатнього, але у промислових мережах ставляться більш жорсткі вимоги, зокрема імовірність помилки повинна бути знижена до 10^{-9} на біт, а високий рівень завад може збільшити імовірність неправильного розпізнавання каналного символу до 10^{-1} – 10^{-2} .

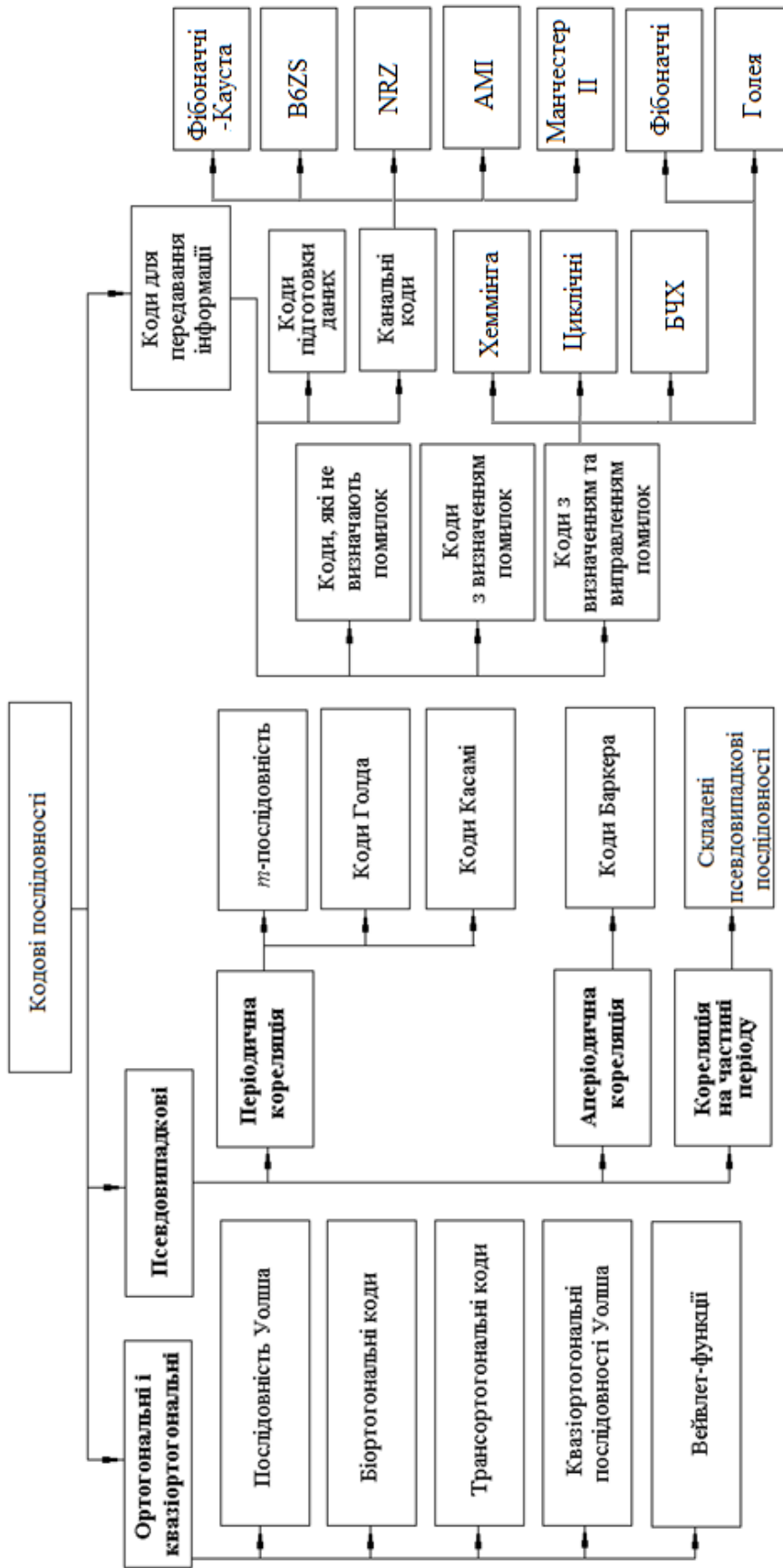


Рисунок 1.6 – Класифікація двійкових кодів за функціональними ознаками

З рисунка видно, що коди з меншою надлишковістю забезпечують більшу ймовірність виправлення всіх помилок. Ймовірність виправлення всіх помилок у повідомленні можна зменшити до 10^{-7} і менше, але значна надлишковість може зменшувати швидкість передавання інформації в десятки разів.

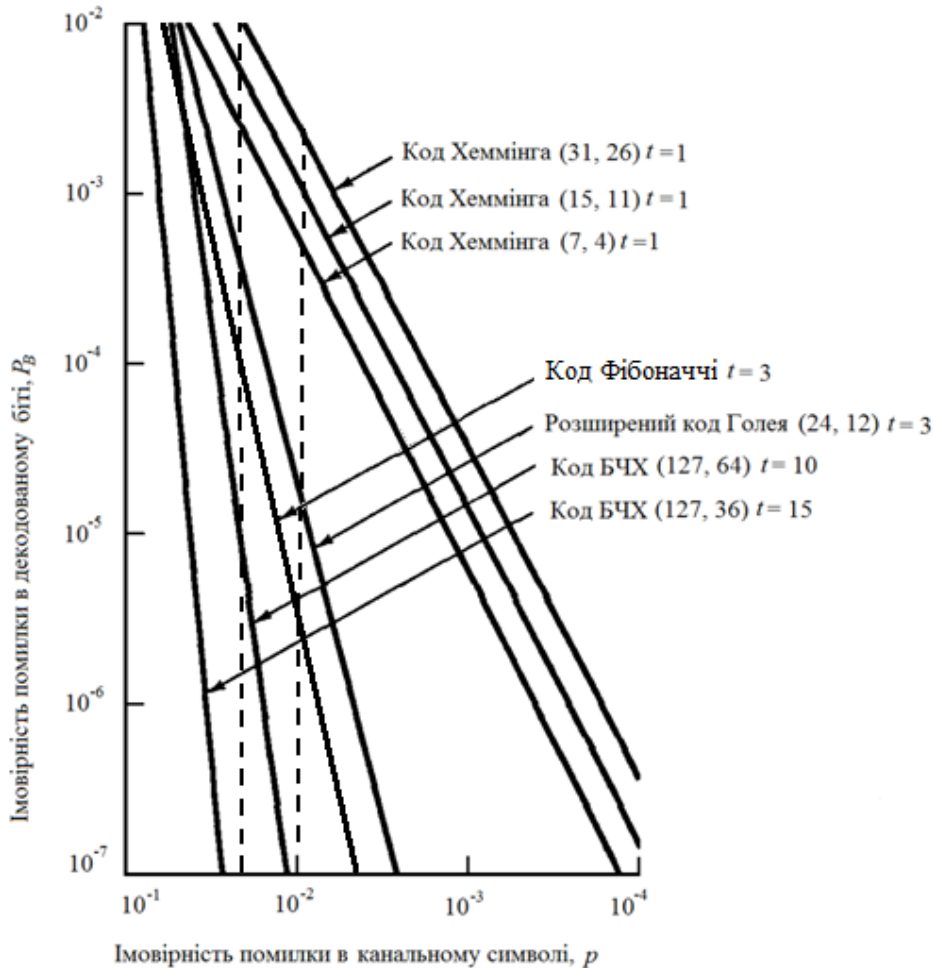


Рисунок 1.7 – Залежність ймовірності помилки на один біт від ймовірності помилки в каналі символі при використанні завадозахищеного кодування

Цю проблему можна вирішити за рахунок використання великої надлишковості, яка призводить до падіння швидкості в десятки разів, за рахунок збільшення смуги частот та збільшення співвідношення сигнал/шум, що в кінцевому результаті дає збільшення вартості обслуговування мережі. Таким чином таких методів, таких як завадозахищене кодування частково вирішує проблему передавання інформації

ції в умовах високого рівня завад. Ще один недолік методів кодування пов'язаний з тим, що ці методи, як правило, реалізовані апаратно і базуються на стандарті, який наперед визначає параметри апаратних засобів і не дозволяє їх змінювати. Для використання нових методів на основі цифрової фільтрації достатньо перепрограмувати мережеву карту.

В таблиці 1.1 показане порівняння характеристик різних заводозахищених кодів для випадку гарантованого виявлення та виправлення $t = 3$ помилок у повідомленні довжиною $n = 127$ (для розширеного кода Голя $n = 24$). Повна надлишковість розраховувалась відношенням кількості інформаційних символів в оптимальній формі код [46] до загальної кількості символів коду (коди Хеммінга, Боуза–Чоудхурі–Хоквінгема та Голя є оптимальними, тому для них $R = R^*$).

Коди Хеммінга, Боуза–Чоудхурі–Хоквінгема та циклічні коди близькі за характеристиками та відрізняються способами кодування та декодування. Окремо варто розглянути заводозахищені коди Фібоначчі [47, 48], розробкою яких займались Ю.А. Орлович, Ю.А. Сторожук та інші вчені з наукової школи О.П. Стахова. Ці коди мають природну надлишковість, а тому здатні виправляти помилки. В [49] показано, що надлишковість кодів Фібоначчі складає 44 % незалежно від розрядної сітки. У такому вигляді цей код здатний виправити всі можливі комбінації для 1 помилки та виявляти деякі комбінації для 3-х помилок (для 20-розрядної комбінації імовірність складає 10^{-2} [50], чого для заводозахищених кодів недостатньо), тому використовується подвоєння мінімальної форми помилки, що спричиняє збільшення надлишковості майже вдвічі ($1,44 \cdot 1,44 = 2$). Код Фібоначчі не має кодової надлишковості ($k = n$), але є неоптимальним кодом, тому повну надлишковість розраховуємо як $R^* = 1 / (1,44 \cdot 1,44) = 0,48$.

В [51] стверджується, що код Фібоначчі має в 10^3 – 10^6 разів більшу заводостійкість. З рисунка 1.10 видно, що це твердження справедливе для однакових t , проте при однакових значеннях повної надлишковості код Фібоначчі показує гірші результати. Окрім того, код Фібоначчі незручний для використання в промислових мережах, оскільки, як показано в [52], цей код потребує власної апаратної та програмної бази для реалізації.

З таблиці 1.1 видно, що найбільшу надлишковість має код Фібоначчі, але при цьому від здатен виправляти 3 помилки та пакети помилок при $t > 3$, а також виявляти пакети помилок довжиною до $0,5n - 1$. Код Боуза–Чоудхурі–Хоквінгема при такі самій повній надлишковості здатний виправляти $t = 10$ помилок.

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик заводо захищених кодів

Заводо захищений код	Хеммінга	Голя	Фібоначчі	Боуза–Чоудхурі–Хоквінгема
Імовірність P_B при $p = 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Імовірність P_B при $p = 3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-3}$
Кількість символів, n	127	24	127	127
Інформаційних символів, k	113	12	127	113
Надлишковість, $R = k / n$	0,8897	0,5	1	0,8897
Повна надлишковість, R^*	0,8897	0,5	0,48	0,8897
Виправляє помилок, t	3	3	3	3

1.4 Методи частотно-часового аналізу сигналів

Спектральною енергетичною функцією або спектральною щільністю енергії називають функцію $S_e(\omega) = |S(\omega)|^2$. Якщо відома ця функція, що відповідає якомусь процесу $\Delta x_0(t)$, то може бути обчислене значення I_x

$$I_x = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_e(\omega) d\omega. \quad (1.1)$$

Метод обчислення описаний в працях з теорії автоматичного управління [53].

Виконне перетворення Фур'є частково вирішує проблему часової локалізації сигналів (або їх складових). Результатом цього перетворення є спектр частот, які містяться в певному часовому проміжку, який носить назву «вікно»

$$F(t, \omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) W(\tau - t) e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (1.2)$$

де $F(t, \omega)$ – розподіл частот частини сигналу $f(t)$ в околі часу t ;
 $W(\tau - t)$ – віконна (вагова) функція.

У випадку використання вагової функції

$$F(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f[n]w[n-m]e^{-j\omega n} \quad (1.3)$$

отримується дискретне перетворення Фур'є. Найбільш поширені віконні функції показані у таблиці 1.2:

- прямокутне вікно, яке складається з N відліків

$$w(n) = \begin{cases} 1, n \in [0, N-1] \\ 0, n \notin [0, N-1]; \end{cases}$$

- вікно Ханна $w(n) = 0,5 - (1 - \cos(\frac{2\pi n}{N-1}))$, де N – ширина вікна;

- вікно Хеммінга $w(n) = 0,5336 - 0,46164 \cos(\frac{2\pi n}{N-1})$;

- вікно Блекмана $w(n) = a_0 - a_1 \cos(\frac{2\pi n}{N-1}) + a_2 \cos(\frac{4\pi n}{N-1})$,

де $a_0 = \frac{1-\alpha}{2}$; $a_1 = \frac{1}{2}$; $a_2 = \frac{\alpha}{2}$;

- вікно Кайзера $w(n) = \frac{I_0(\beta \sqrt{1 - (\frac{2n - N + 1}{N - 1})^2})}{I_0(\beta)}$,

де I_0 – модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку; β – коефіцієнт, що визначає частку енергії, зосередженої в головній «пелюстці» спектра віконної функції. Рекомендоване значення від 4 до 9 [54].

Таблиця 1.2 – Порівняння різних віконних функцій [55]

Тип вікна	Прямокутне	Синусне	Ханна	Хемінга	Блекмана
Рівень бічних «пелюсток» частотної характеристики, дБ	-13	-23	-31,5	-42	-58

У багатьох класичних алгоритмах аналізу сигналів використовується фільтр Вінера. Традиційно, методи часових рядів часто використовуються для оцінки миттєвої потужності спектра сигнала [56]. Проте, добре відомо, що традиційне використання методів часових рядів, наприклад, вікна Хеннінга, створює велику дисперсію [57]. Її викликають хаотично розміщені спектральні сплески внаслідок обробки сигналу. Спектральні піки виникають завдяки значній дисперсії помилки при оцінці потужності спектра, якому сприяють два ефекти: стохастичні завади, характерні для оцінки при використанні миттєвих часових рядів, і адитивні завади, пов'язані з вхідним сигналом.

При використанні віконного перетворення Фур'є неможливо одночасно забезпечити відповідну точність по частоті і по часу. Чим вужче вікно, тим вища точність по часу і нижча по частоті.

Точність по часовій і частотній осях постійна, що небажано для деяких задач, для яких характерний нерівномірний розподіл на різних частотах. В таких випадках краще використовувати *вейвлет-перетворення*, часова точність якого збільшується з частотою, а частотна, відповідно, знижується.

Завдяки можливості локалізації сигналу одночасно в частотному і часовому просторі, вейвлети використовуються для забезпечення розв'язку задач апроксимації, регресії, прогнозування, фільтрації, ідентифікації тощо. Зараз широко досліджуються як теоретичні, так і практичні аспекти вейвлет-перетворень [58 – 63].

Співвідношення точності частотної і часової локалізації підпорядковується принципу невизначеності Гейзенберга–Габора і показане на рисунку 1.8.

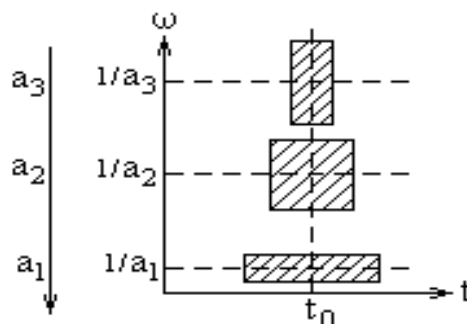


Рисунок 1.8 – Співвідношення частотної і часової локалізації вейвлетів

Разом з методами спектрального аналізу досліджуються методи кепстрального аналізу [64]. Розвиток цих методів гальмує складність обробки (інтерпретації) результатів цього перетворення. Він може бути знайдений за аналітичним виразом

$$C_s(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln(S(\omega)^2) e^{i\omega q} d\omega, \quad (1.4)$$

де $S(\omega)$ – енергетичний спектр функції.

Окрім спектральних методів існують кореляційні методи і на їх основі намагаються зробити методи для аналізу та фільтрації сигналів [65–68]. Є спроби кореляційні методи об'єднати разом із спектральними [69], оскільки кореляційну функцію можна представити через спектральну щільність, відому як перетворення Хінчина–Вінера

$$R(\tau) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega = \int_0^{\infty} S(\omega) \cos \omega\tau d\omega. \quad (1.5)$$

Мулін, Валден та інші дослідники, розглядали моделювання оцінки спектра як проблему очищення від шумів [70, 71].

Вейвлет-аналіз широко використовується в сейсмології, акустиці, медицині, зв'язку, оброблюванні сигналів та зображень і тому в багатьох працях розглядається його застосування в окремих галузях [72–82].

Якщо задано певний вейвлет-базис $\{\phi_{j,k}, \psi_{j,k}\}$, то будь-яку функцію $x(\tau)$ можна охарактеризувати коефіцієнтами:

$$s_j = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \phi_j(\tau) d\tau; \quad (1.6)$$

$$d_j = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \psi_j(\tau) d\tau. \quad (1.7)$$

Ця функція може бути відновлена оберненим перетворенням за формулою

$$x(\tau) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} s_{j_n, k} \varphi_{j_n, k}(\tau) + \sum_{j=j_n}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j, k} \psi_{j, k}(\tau). \quad (1.8)$$

Вейвлет-аналіз може використовуватись для всіх задач, для яких використовується звичайний аналіз в базисі Фур'є. При цьому вейвлети мають кращу часову і частотну локалізацію: звичайне перетворення в базисі Фур'є не дає відповіді щодо часової локалізації складових спектра, а віконне перетворення Фур'є дає часткову відповідь про часову локалізацію (див. рис. 1.8).

Розкладання функції за біортогональним базисом схоже на ортогональне розкладання – воно вимагає пари функціональних послідовностей φ_n і φ_n' , що $(\varphi_n, \varphi_n') = \delta_{k,l}$. Для того, щоб виконувалась збіжність, обидві функції послідовності повинні задовольняти властивості базису Рісса.

Підпростір V_m , $m \in Z$, визначається як сукупність замкнених вкладених лінійних підпросторів $\varphi_{n,m} = 2^{m/2} \varphi(2^m x - n)$, $n \in Z$

$$\dots \subset V_{-2} \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset V_2 \subset \dots$$

Розклад функції на множину підпросторів V_m , $m \in Z$ називається кратномасштабним аналізом.

Пара (V_m, V_m') , $m \in Z$ буде складовими біортогонального кратномасштабного аналізу, якщо для деякого базису (φ_n, φ_n') виконується умова

$$(\varphi(-k), \varphi'(-l)) = \begin{cases} 1, \text{ при } k = l, k, l \in Z; \\ 0, \text{ інакше.} \end{cases} \quad (1.9)$$

Розглядаючи біортогональну проекцію функції f на сукупність просторів V_m ,

$$Q_m f = \sum_{n \in Z} (f, \varphi_{m,n}) \varphi_{m,n}, \quad (1.10)$$

де $Q_m f$ – наближення функції f ,

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ Р 51318.11-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от промышленных, научных, медицинских и бытовых (ПНМБ) высокочастотных устройств. Нормы и методы испытаний. – Введ. 1999 – 12 – 24. – М. : Госстандарт России, 1999. – 24 с.
2. ETSI EN 301 489-1 V1.4.1 2002-08. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM). ElectroMagnetic Compatibility (EMC), standard for radio equipment and services. Part 1: Common technical requirements. – European Telecommunications Standards Institute, 2002. – 35 p.
3. Третьяков С. А. CAN на пороге нового столетия / С. А. Третьяков // Мир компьютерной автоматизации. – 1999. – № 2. – Режим доступа до журн.: <http://can.marathon.ru/system/files/upload/dm-990405.doc-02.pdf>.
4. Филимонов. А. Алгоритмы модуляции технологий xDSL / А. Филимонов. – Режим доступа: <http://www.p-stone.ru/libr/nets/tcpip/data/public6/>.
5. Бондаренко М. Ф. Моделі розпізнавання нештатних ситуацій в складноорганізованих системах на основі алгебри скінченних предикатів / М. Ф. Бондаренко, А. Л. Єрохін // Зв'язок. – 2004. – № 5. – С. 55–59.
6. Willig A. Wireless technology in industrial networks / A. Willig, K. Matheus, A. Wolisz // Proc. of the IEEE. – June 2005. – Vol. 93, № 6. – P. 1130–1151.
7. Wiberg P. Wireless technology in industry – Application and user scenarios / P.Wiberg, A.Wiberg, U.Bilstrup // Proceeding of IEEE Int. Conf. Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'01). – 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 15–18 Oct. 2001. – P. 123–133.
8. Кулик А. Я. Визначення параметрів тестування каналу зв'язку / А. Я. Кулик, С. Г. Кривогубченко, Я. А. Кулик // Вісник Хмельницького національного університету. Серія : Технічні науки. – 2007. – Т. 1, № 3.– С. 198–202.

9. Алгоритм швидкого оброблювання значень для медіанних фільтрів / А. Я. Кулик, В. В. Томків, Я. А. Кулик, О. А. Кулик // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008. – Т. 15, № 1. – С. 56–62.
10. Кулик А. Я. Побудова приймача з використанням дискримінантної процедури на засадах критерію Фішера / А. Я. Кулик, О. М. Москвін, С. Г. Кривогубченко, Я. А. Кулик // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – Т. 17, № 1. – С. 59–64.
11. Кулик А. Я. Приймання інформативних сигналів на фоні завад з апріорно невизначеними параметрами / А. Я. Кулик, Я. А. Кулик // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2010. – Т. 19, № 1. – С. 38–41.
12. Кулик А. Я. Забезпечення фільтрації цифрових сигналів і оцінка її ефективності / А. Я. Кулик, Я. А. Кулик // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2010. – Т. 20, № 2. – С. 5–15.
13. Кулик А. Я. Використання медіанного фільтра у проблемно-орієнтованих розподілених комп'ютерних системах / А. Я. Кулик, Я. А. Кулик // Науковий вісник Чернівецького Університету. Серія : Комп'ютерні системи та компоненти. – 2010. – Т. 1, Вип. 1, № 1. – С. 51–54.
14. Кветний Р. Н. Аналіз сигналів у системах автоматизованого контролю / Р. Н. Кветний, Я. А. Кулик // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2011. – Т. 22, № 2. – С. 44–50.
15. Кветний Р. Н. Визначення необхідних характеристик тестового сигналу / Р. Н. Кветний, Я. А. Кулик // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки, 2012 – № 3. – С. 24–27.
16. Алгоритм швидкого оброблювання значень для медіанних фільтрів / А. Я. Кулик, В. В. Томків, Я. А. Кулик, О. А. Кулик // Научные исследования и их практическое применение : Материалы международного научн.-практ. конф. – Одеса, 2007. – Т. 3, № 3. – С. 9–16.
17. Кулик А. Я. Increase of effective speed of transfer of the information / А. Я. Кулик, Я. А. Кулик, С. Г. Кривогубченко // Nauka I

inowacja – 2008 : Materialy IV międzynarodowej naukowo–praktycznej konferencji. – Przemysł : Nauka i studia, 2008. – Т. 11, № 11. – С. 5–8.

18. Кулик А. Я. An information transmission in the conditions of the adaptation of transmission information system to communication channel parameters / А. Я. Кулик, С. Г. Кривогубченко, Я. А. Кулик // Vedecke prumysl evropskeho kontinentu – 2008 : Materialy IV mezinarodni vedecko–prakticka conference. – Prague : Education and science, 2008. – Т. 15. – С. 24–29.

19. Кулик А. Я. Comparative analysis of the spectrum signals in different bases / А. Я. Кулик, Я. А. Кулик, О. А. Кулик // Nastoleni moderni vedy – 2010 : Materialy IV mezinarodni vedecko-prakticka conference. – Prague : Education and science. – 2010. – Т. 9. – С. 51–57.

20. Кулик А. Я. Construction of systems of transfer of the information with use of the device of wavelet-functions / А. Я. Кулик, Я. А. Кулик, О. А. Кулик // Vedecke prumysl evropskeho kontinentu – 2010 : Materialy IV mezinarodni vedecko-prakticka conference. – Prague : Education and science, 2010. – Т. 23. – С. 85–89.

21. Кулик А. Я. Impact channel for information transfer process / А. Я. Кулик, Я. А. Кулик, О. А. Кулик // Wschodnie partnerstwo – 2010 : Materialy IV międzynarodowej naukowo–praktycznej konferencji. – Przemysł : Nauka i studia, 2010. – Т. 6. – С. 28–39.

22. Кулик А. Я. Select noiseproof codes for information transmission lines collective / А. Я. Кулик, Я. А. Кулик, О. А. Кулик // Образование и наука 21 век – 2010 : Материали за VI международна научна практична конференция. – София : Бял ГРАД–БГ, 2010. – Т. 19. – С. 96–100.

23. Кулик Я. А. Швидкий алгоритм медіанної фільтрації : XXXIX науково–технічна конференція професорсько–викладацького складу, співробітників та студентів університету : електронне наукове видання матеріалів конференції / Я. А. Кулик, Р. Н. Кветний – Режим доступу : <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2010/inaeksu/txt/Kulyk%20Ya.%20A..pdf>.

24. Кулик Я. А. Використання вейвлет–перетворення для аналізу сигналів і систем : Регіональна науково–технічна конференція професорсько–викладацького складу, співробітників та студентів

університету : електронне наукове видання матеріалів конференції / Я. А. Кулик, Р. Н. Кветний – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2011/inaeksu/txt/kulykya.pdf>.

25. Кветний Р. Н. Ідентифікація сигналу у системах автоматизованого контролю / Р. Н. Кветний, Я. А. Кулик // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС – 2011) : Перша міжнародна наукова конференція пам'яті професора Володимира Поджаренка, збірник тез доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2011.

26. Кветний Р. Н. Усунення явища Гіббса з допомогою метода підсумовування / Р. Н. Кветний., Я. А. Кулик // Сборник научных трудов SWorld. – Иваново : МАРКОВА АД, 2013. – Том 11, вып. 4. – С. 30–35.

27. Кулик Я. А. Розпаралелення обчислень для швидкого вейвлет-перетворення / Я. А. Кулик // Сучасна наука: теорія і практика : матеріал V Всеукраїнської науково-практичної заочної конференції. – К., 2014. – С. 106–110.

28. Кулик Я. А. Розпаралелення обчислень для швидкого вейвлет-перетворення / Я. А. Кулик // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014) : XII Міжнародна конференція, тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ. – 2014. – 222 с.

29. Кулик Я. А. Багатовіконна оцінка спектра сигналу для порогового методу / Я. А. Кулик // ІНТЕРНЕТ-ОСВІТА-НАУКА-2014 (ІОН-2014) : Дев'ята міжнародна науково-практична конференція : збірник праць. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 318 с.

30. Кулик А. Я. Побудова приймача з використанням дискримінантною процедури на засадах критерію Фішера / А. Я. Кулик, С. Г. Кривогубченко, Я. А. Кулик // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 6. – С. 221–224.

31. Патент на корисну модель № 50279 Україна, МПК (2009) Н03М 13/00. Спосіб передавання інформації / А. Я. Кулик, О. А. Кулик, Я. А. Кулик, С. Г. Кривогубченко, Д. С. Кривогубченко, заявник і власник патенту – Вінницький національний технічний університет – № u201000359 ; заявл. 15.01.2010 ; опубл. 25.05.2010, Бюл № 10. – 2010.

32. Патент на корисну модель № 53497 Україна, МПК (2009) Н03М 13/00. Пристрій для передавання інформації / А. Я. Кулик, О. А. Кулик, Я. А. Кулик, С. Г. Кривогубченко, Д. С. Кривогубченко, заявник і власник патенту – Вінницький національний технічний університет – № u201003873 ; заявл. 06.04.2010 ; опубл. 11.10.2010, Бюл № 19. – 2010.

33. Кулик А. Я. Математична модель каналу зв'язку / А. Я. Кулик, Я. А. Кулик // Питання прикладної математики і математичного моделювання : зб. наук. – Дніпро. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту, 2010. – С. 202–213.

34. Кулик А. Я. Ідентифікація цифрових сигналів у системі передавання інформації / А. Я. Кулик, Я. А. Кулик // Питання прикладної математики і математичного моделювання: зб. наук. – Дніпро. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту, 2011. – С. 200–206.

35. Кулик Я. А. Разработка корректора канала на основе фильтра Винера / Я. А. Кулик // Современный научный вестник. Научно-теоретический и практический журнал. Серия: Физика, Строительство и архитектура, Технические науки – Белгород : Руснауцкнига, 2014. – № 7 (203). – С. 35–44.

36. VXI – Стандарт информационных и контрольно-измерительных технологий. – Режим доступа: <http://vxi.su/praktikum/industrialnye-pomehi/>.

37. Радиотехнические цепи и сигналы / Д. В. Васильев, М. Р. Витоль, Ю. Н. Горшенков и др. ; под ред. К. А. Самойло, – М. : Радио и связь, 1982. – 528 с.

38. Кулик Анатолій Ярославович. Теорія інформації і кодування : навч. посібник / А. Я. Кулик, С. Г. Кривогубченко. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 145 с.

39. Зимин В. В. Промышленные сети : учеб. пособие для студентов вузов. – Н. Новгород : НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2008. – 252 с.

40. Савенко О. С. Сет-архітектура в промислових мережах / О. С. Савенко, А. Ф. Крищук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 4. – С. 219–223.

41. Распределенная система сбора и анализа данных на основе CAN-bus / Д. И. Орехов, А. С. Чепурнов, А. А. Сабельников,

Д. И. Маймистов // Приборы и Техника Эксперимента. – 2007. – № 4. – С. 1–8.

42. Таненбаум Эндрю. Компьютерные сети / Эндрю Таненбаум. – 4-е изд. – Сп-б. : Питер, 2003. – 992 с.

43. Отт Генри. Методы подавления шумов и помех в электронных системах / Генри Отт. – М. : Мир, 1979. – 318 с.

44. Cabling and connector pin assignment. – CiA DR-303-1, ver.1.0, 1999. – 26 p.

45. A beginners guide to Ethernet 802.3. Engineer-to-Engineer Note EE-269. – Analog Devices, In. – 2005, 26 p.

46. Буценко Ю. П. Оперативный контроль вычислений на основе информационной избыточности / Ю. П. Буценко, Ю. Г. Савченко // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2010. – № 3. – С. 17–25.

47. Стахов А. П. Компьютеры Фибоначчи и новая теория кодирования: история, теория, перспективы / А. П. Стахов // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2004. – № 2(18).

48. Кодирование данных в информационно-регистрающих системах / А. П. Стахов, Ю. А. Сторожук, Ю. П. Орлович, Б. Я. Лихтциндер. – К. : Техника, 1985. – 127 с.

49. Stakhov A. Fibonacci matrices, a generalization of the “Cassini formula”, and a new coding theory / A. P. Stakhov // Chaos, Solitons & Fractals. – 2006. – № 30(1). – P. 56–66.

50. Стахов А. П. Кодирование данных, основанное на фибоначиевых матрицах / А. П. Стахов // Проблемы Гармонии, Симметрии и Золотого Сечения в Природе, Науке и Искусстве : Труды Международной конференции. – Винница, 2003.

51. Стахов А. П. «Золотая» пропорция в цифровой технике / А. П. Стахов // Автоматика и вычислительная техника. – 1980. – № 1.

52. Стахов А. П. Машинная арифметика ЦВМ в кодах Фибоначчи и золотой пропорции / А. П. Стахов, В. А. Лужецкий – М. : Научный совет АН СССР по комплексной проблеме «Кибернетика», 1981. – 64 с.

53. Голд Б. Цифровая обработка сигналов / Б. Голд, Ч. Рэйдер. – М. : Сов. радио, 1973. – 367 с.

54. Smith W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing / W. Smith, W. Steven – San Diego, California, USA: California Technical Publishing.

55. Kaiser J. On the use of the I_0 -sinh window for spectrum analysis / J. Kaiser, R. Schafer // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1980. – V. 28, № 1. – P. 105–107.

56. Ефанов В. Н. О вычислении мгновенного спектра / В.Н. Ефанов, И. И. Коршевер, В. М. Лобастое // Автометрия. – 1973. – № 3. – С. 39–45.

57. Oppenheim Alan. Discrete-Time Signal Processing / Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schafer, John R. Buck // Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999. – 468 p.

58. Князева Т. Н. Модификация вейвлет-методов очистки от шума сигналов с особенностями данных с нестационарным шумом / Т. Н. Князева // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPA-2009) : тр. 11-й Междунар. конф. – СПб., 2009. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/pdf/dspa09-06.doc>.

59. Ходунин А. В. Применение вейвлет-преобразования для регистрации хаотической синхронизации связанных систем ФАЧП / А. В. Ходунин, А. А. Коточигов // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPA-2008) : тр. 10-й Междунар. конф. – СПб., 2008. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/pdf/dspa08-08.doc>.

60. Крот А. М. Теория анализа и синтеза бэнк-фильтров и их применение / А. М. Крот, В. О. Кудрявцев. – СПб. : АВТЭКС, 2000. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru>.

61. Давыдов А. В. Вейвлетные преобразования сигналов / А. В. Давыдов. – Екатеринбург : Фонд электронных документов, 2005. – 180 с. – Режим доступа: <http://prodav.narod.ru/index.htm>.

62. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие / А. Н. Яковлев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.

63. Optical wavelet de-noising applied in multi-span nonlinear fiber links / Qunfeng Shao, Xiaoping Zhang, Xiaoqiong Qi [та ин.] // SciVerse Scopus/Optical electronics. – 2010. – V. 283, № 7. – P. 1261–1267. – Pe-

жим доступа до журн.: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401809011997>.

64. Зайцев А. В. Кепстральный способ изменения скорости движения объекта / А. В. Зайцев, Н. В. Силаев // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2008) : тр. 10-й Междунар. конф. – СПб., 2008. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/pdf/dspa08-28.doc>.

65. Малиничев Д. М. Некоторые корреляционные свойства M-последовательностей / Д. М. Малиничев, Нгуен Хуу Кхань Ньян, Уан Винь Ан. // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2010) : тр. 12-й Междунар. конф. – СПб., 2010. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/dspa2010-2.pdf>.

66. Кренгель Е. И. О взаимной корреляции некоторых пар почти идеальных троичных последовательностей / Е. И. Кренгель // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2008) : тр. 10-й Междунар. конф. – СПб., 2008. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/pdf/dspa08-02.doc>.

67. Ханян Г. С. Влияние спектрального просачивания на поведение автокорреляционной функции усеченного гармонического сигнала / Г. С. Ханян // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2008) : тр. 10-й Междунар. конф. – СПб., 2008. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/pdf/dspa08-12.doc>.

68. Малиничев Д. М. Исследование автокорреляционных свойств сложных сигналов / Д. М. Малиничев, В. В. Бойков, А. В. Елисеенков // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2008) : тр. 10-й Междунар. конф. – СПб., 2008. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/pdf/dspa08-03.doc>.

69. Рыбин В. В. Описание сигналов и линейных нестационарных систем управления в базисах вейвлетов и их анализ в вычислительных средах / В. В. Рыбин // труды МАИ. – М., 2003. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/index.htm>.

70. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing / S. Mallat. – 2nd ed. – San Diego, CA : Academic, 1999. – 637 p.

71. Percival D. B. Wavelet Methods for Time Series Analysis / D. B. Percival, A.T. Walden. – Cambridge : University Press, 2000. – 600 p.

72. Казарян М. Л. Оптимальные методы зонного кодирования посредством дискретного преобразования Хаара / М. Л. Казарян // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2010) : тр. 12-й Междунар. конф. – СПб., 2010. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/dspa2010-1.pdf>.

73. Рогозинский Г. Г. К выбору оптимального вейвлета для перцепционного кодирования звуковых сигналов / Г. Г. Рогозинский // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2010) : тр. 12-й Междунар. конф. – СПб., 2010. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/dspa2010-1.pdf>.

74. Жарких А. А. Сравнительная характеристика базисов вейвлетов для представления речевых сигналов / А. А. Жарких, А. С. Юрко // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2007) : тр. 9-й Междунар. конф. – СПб., 2007.

75. Шелухин О. И. Вейвлет-анализ фрактальных свойств речевого тракта / О. И. Шелухин, А. В. Осин // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2007) : тр. 9-й Междунар. конф. – СПб., 2007. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/pdf/dspa07-33.doc>.

76. Дрёмин И. М. Вейвлеты и их использование / И. М. Дрёмин, О. В. Иванов, В. А. Нечитайло // Успехи физических наук. 2001. – Т. 171, № 5. – С. 465–501.

77. Новоселов С. А. Использование согласованных вейвлет-фильтров в задаче защиты речевой информации / С. А. Новоселов, А. И. Савватин // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2010) : тр. 12-й Междунар. конф. – СПб., 2010. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/dspa2010-1.pdf>.

78. Гаврилин А. Т. Оптимальная процедура обнаружения и различения биспектрально организованных триплетов / А. Т. Гаврилин // Радиофизика : тр. научн. конф. по радиофизике. – Н. Новгород : ННГУ, 2005. – С. 280–281.

79. Ульдинович С. В. Распознавание фонем на основе согласованных вейвлет-фильтров / С. В. Ульдинович, С. А. Новоселов,

А. Л. Приоров // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2008) : тр. 10-й Междунар. конф. – СПб., 2008. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/pdf/dspa08-17.doc>.

80. С. В. Туяков. Частотная фильтрация дискретных эмпирических данных в вейвлет-базисе и базисе собственных векторов субполосной матрицы / Туяков С. В. // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2010) : тр. 12-й Междунар. конф. – СПб., 2010. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/dspa2010-1.pdf>.

81. Гетманов В. Г. Применение wavelet-преобразований и сплайновых аппроксимационных функций для фильтрации нестационарных акустических сигналов / В. Г. Гетманов, М. В. Зверев, С. Е. Орлов // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2010) : тр. 12-й Междунар. конф. – СПб., 2010. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/dspa2010-1.pdf>.

82. Рогозинский Г. Г. К выбору оптимального вейвлета для перцепционного кодирования звуковых сигналов / Г. Г. Рогозинский // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2010) : тр. 12-й Междунар. конф. – СПб., 2010. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/dspa2010-1.pdf>.

83. Виноградов И. М. Основы теории чисел. / И. М. Виноградов. – М. : Наука, 1981. – 176 с.

84. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – М. : МИР, 2005. – 338 с.

85. Зверев В. А. Выделение сигналов из помех численными методами / В. А. Зверев, А. А. Стромков. – Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2001. – 188 с.

86. Залманзон Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л. А. Залманзон. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 496 с.

87. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток / Г. Нуссбаумер – М. : Радио и связь, 1985. – 248 с.

88. Willbraham Henry. On a certain periodic function / Henry Willbraham // Cambridge and Dublin Mathematical Journal. – 1848. – V. 3. – P. 198–201.

89. Gibbs J. Willard. Fourier's Series. / J. Willard Gibbs // Nature. – 1898. – V. 59, № 1522. – P. 200.
90. Kelly S. E. Gibbs phenomenon for wavelets / S. E. Kelly // Applied and Computational Harmonic Analysis, 1996. – V. 3, № 1. – P.72–81.
91. 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.
92. Булыгин В. С. Явление Гиббса – МС / В. С. Булыгин – Режим доступа: http://www.it-centre.ru/News/28_05_2002.html.
93. Jerri A. J. The Gibbs Phenomenon in Fourier Analysis, Splines and Wavelet Approximations / A. J. Jerri. – Dordrecht, Netherlands : Kluwer, 1998. – 340 p.
94. Sansone G. Orthogonal Functions: Revised English Edition (Dover Books on Mathematics) / G. Sansone. – New York : Dover, 1991. – D. 141–148.
95. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши – Ижевск : РХД, 2001. – 464 с.
96. Narcowich Francis J. Wavelets Associated with Periodic Basis Functions / Francis J. Narcowich, Joseph D. Warda // Applied and Computational Harmonic Analysis. – 1996. – V. 3, № 1. – P. 40–56.
97. Юр Т. В. Исследование фильтрующих свойств вейвлет-преобразования / Т. В. Юр, В. И. Дубровин, В. Н. Харитонов // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – 2010. – № 2.
98. Филипский Ю. К. Квазисогласованные вейвлет-фильтры / Ю. К. Филипский, А. А.Бородин // Труды одесского политехнического университета, 2005. – Вып. 2(24).
99. Donoho D. L. De-Noising by soft-thresholding / D. L. Donoho // IEEE Trans. on Inf. Theory. – V. 41, № 3. – P. 613–627.
100. Weszka J. Threshold evaluation Techniques / J. Weszka, A. Rosenfeld // IEEE Trans. SMC-8, 1978. – P. 622–629.
101. Johnstone Iain M. Empirical Bayes selection of wavelet thresholds / Iain M. Johnstone, Bernard W. Silverman // The Annals of Statistics. – 2005. – no. 4(33). – P. 1700–1752. – Режим доступа до журн.: <http://projecteuclid.org/euclid.aos/1123250227>

102. Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы / В. И. Джиган. – К. : Техносфера, 2013. – 528 с.

103. Шахнович И. В. Современные технологии беспроводной связи / И. В. Шахнович. – М. : Техносфера, 2006 г. – 288 с.

104. Бочкарёв В. В. Адаптивное параметрическое спектральное оценивание нестационарных сигналов / В. В. Бочкарёв, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2003) : тр. 5 междунар. конф. – СПб. : АВТЭКС, 2003. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru>.

105. Афонский А. А., Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов ; [под ред. проф. В. П. Дьяконова]. – М. : СОЛОН-Пресс, 2009. – 248 с.

106. Мельников Н. В. Реализация алгоритма формирования полосового перенастраиваемого фильтра с конечной импульсной характеристикой в задачах цифровой обработки сигналов на цифровых процессорах / Н. В. Мельников, Г. В. Пирский, В. А. Фин // Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPА-2010) : тр. 12-й Междунар. конф. – СПб., 2010. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/dspa2010.php3>.

107. Williams Arthur V. Electronic Filter Design Handbook / Arthur Williams V., Fred Taylors J. – New York : McGraw-Hill, 1988.

108. Оппенгейм А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – 2-е изд., испр. – М. : Техносфера, 2007. – 856 с.

109. Воробьёв Н. Одномерный цифровой медианный фильтр с трёхотсчётным окном / Н. Воробьёв // Chip News, 1999. – № 8. – Режим доступа до журн.: <http://chipinfo.ru/literature/chipnews/199908/29.html>.

110. Радченко Ю. С. Эффективность приёма сигналов на фоне комбинированной помехи с дополнительной обработкой в медианном фильтре / Ю. С. Радченко // Журнал радиоэлектроники. – 2001. – № 7. – Режим доступа до журн.: <http://jre.cplire.ru/win/jul01/2/text.html>.

111. Balser T. New Approximations for Avoiding Gibbs Phenomenon in Wavelet Subspaces: A Diss... of D-r Phil. in Math. / T. Balser // University of Wisconsin-Milwaukee, 1998. – 58 p.

112. Gray M. Robert. Toeplitz and Circulant Matrices: A review / Robert M. Gray // Foundations and Trends in Communications and Information Theory. – 2006. – V. 2, №. 3. – P. 155–239. – Режим доступа: <http://ee.stanford.edu/~gray/toeplitz.pdf>.

113. The Robust Dynamical Contribution to Precipitation Extremes in Idealized Warming Simulations across Model Resolutions / J. Lu, LYR Leung, Q. Yang [та ін.] // Geophysical Research Letters. – 2014. – № 41(8). – P. 2971–2978.

114. Sankar R. Traffic Monitoring and Congestion Prediction Using Handoffs in Wireless Cellular Communications / R.Sankar, L. Civil. // IEEE 47th Annual International Vehicular Technology Conference (IEEE VTC). – Phoenix, AZ, May 1997. – P. 520–524.

115. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – М. : Советское радио, 1974. – 552 с.

116. Воеводин В. В. Параллельные вычисления / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – СПб-б. : БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.

117. Kelly Susan E. Gibbs phenomenon for wavelets / Susan Kelly E. // Applied and Computational Harmonic Analysis. – № 3(1). – 1996. – P. 1–22.

118. Программа моделирования шины CAN. – Режим доступа: <http://can.marathon.ru/page/prog/modelcan>.

Наукове видання

**Роман Наумович Кветний
Ярослав Анатолійович Кулик**

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОБРОБКИ
ДИСКРЕТНИХ СИГНАЛІВ
У МЕРЕЖАХ З ВИСОКИМ РІВНЕМ ЗАВАД**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Я. Куликом

Підписано до друку 19.04.2017 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,32.

Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2017-08

Вінницький національний технічний університет,

ІРВЦ ВНТУ,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ,

ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-85-32.

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

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.

21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.