

БОЙКО Юлій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>

e-mail: boiko_julius@ukr.net

СУБЕРЛЯК Дар'я

Хмельницький національний університет

e-mail: suberlyak.do@x-city.ua

АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ДЕКОДУВАННЯ LDPC ТА POLAR-КОДІВ У СТАНДАРТІ 5G: ОЦІНКА СКЛАДНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ

У статті проведено комплексний аналіз структури фізичного рівня 5G NR з акцентом на особливості каналного кодування та методи декодування, що використовуються для забезпечення високої пропускної здатності, надійності та енергоефективності зв'язку. Розглянуто доцільність застосування LDPC-кодів для downlink-каналів з великим обсягом переданих даних та полярних кодів — для коротких повідомлень у керуючих uplink-каналах. Детально проаналізовано ефективність основних алгоритмів декодування LDPC та полярних кодів, таких як BP, Min-Sum, OMS, NMS, SC, SCL, CA-SCL та SC Flip. Проведено порівняння їх точності, складності реалізації та продуктивності у контексті вимог стандарту 5G NR.

Ключові слова: 5G NR, LDPC-коди, полярні коди, фізичний рівень, декодування, алгоритм BP, Min-Sum, SCL, CA-SCL, каналне кодування, eMBB, URLLC, mMTC

BOIKO Juliy, SUBERLIAK Daria

Khmelnitskyi National University

ANALYSIS OF LDPC AND POLAR CODE DECODING ALGORITHMS IN THE 5G STANDARD: EVALUATION OF COMPLEXITY AND EFFICIENCY

This paper presents a detailed analysis of the physical layer architecture of the 5G New Radio (5G NR) standard, with a particular focus on the channel coding schemes and their decoding algorithms, which are essential to achieving the stringent performance requirements of next-generation wireless communication systems. The study explores the rationale behind the adoption of Low-Density Parity-Check (LDPC) codes for downlink and uplink data channels carrying large payloads, due to their excellent error correction capabilities and near-capacity performance. In parallel, Polar codes are examined as the optimal choice for control channels with short block lengths, particularly in uplink scenarios, owing to their low complexity and robustness in low-latency environments.

A comprehensive overview of key decoding algorithms for both LDPC and Polar codes is provided, including Belief Propagation (BP), Min-Sum, Offset Min-Sum (OMS), and Normalized Min-Sum (NMS) for LDPC decoding, and Successive Cancellation (SC), Successive Cancellation List (SCL), Cyclic Redundancy Check-aided SCL (CA-SCL), and SC Flip algorithms for Polar codes. The trade-offs between computational complexity, decoding latency, and bit error rate (BER) performance are discussed in detail. Special attention is given to the performance of these decoding schemes under different service scenarios defined in 5G NR, including enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC), and massive Machine Type Communications (mMTC). Simulation results demonstrate that while BP and Min-Sum offer acceptable performance with high parallelism for LDPC codes, CA-SCL decoding significantly enhances Polar code reliability, particularly when assisted by CRC verification.

The paper also addresses the impact of coding and decoding strategies on energy efficiency and system throughput in real-time 5G deployments. These findings are crucial for base station and user equipment manufacturers striving to balance complexity and performance. Overall, the insights presented contribute to the ongoing development and optimization of reliable, high-capacity, and low-latency 5G NR physical layer technologies.

Keywords: 5G NR, LDPC codes, Polar codes, physical layer, decoding algorithms, BP, Min-Sum, SCL, CA-SCL, channel coding, eMBB, URLLC, mMTC

Стаття надійшла до редакції / Received 11.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 14.04.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Стрімкий розвиток мобільного зв'язку та зростаючі вимоги до якості обслуговування користувачів зумовили появу п'ятого покоління стандарту бездротового зв'язку – 5G New Radio (5G NR) [1]. Цей стандарт покликаний забезпечити високу пропускну здатність, наднизьку затримку, підвищену надійність та енергоефективність, що критично важливо для реалізації таких концепцій, як розширена мобільна широкосмугова передача (eMBB), ультранадійний зв'язок із низькою затримкою (URLLC) та масовий інтернет речей (mMTC). Успішна реалізація цих сценаріїв вимагає використання ефективних кодів корекції помилок і відповідних алгоритмів декодування [2], що дозволяють забезпечити надійну передачу інформації в умовах завад, змішаного трафіку та обмежень пропускної здатності.

У контексті 5G NR надзвичайно актуальним є вибір та оптимізація кодів каналного кодування:

LDPC-кодів для користувацьких даних і Polar-кодів для керуючих сигналів. Обидві технології відіграють фундаментальну роль у досягненні цільових показників продуктивності, проте вимагають ретельного аналізу з точки зору складності реалізації, ефективності декодування та енергоспоживання.

Таким чином, постановка проблеми полягає у необхідності дослідити, проаналізувати та порівняти ефективність різних алгоритмів декодування LDPC- та Polar-кодів в умовах специфічних сценаріїв 5G NR. Це включає аналіз алгоритмів Belief Propagation, Min-Sum, Offset Min-Sum та Normalized Min-Sum для LDPC, а також Successive Cancellation, SCL, CA-SCL та SC Flip для Polar-кодів. Особливу увагу необхідно приділити їх впливу на точність, затримки декодування і обчислювальну складність, що критично для практичної реалізації 5G обладнання як на стороні базових станцій, так і в користувацьких пристроях.

Метою даної роботи є дослідження та узагальнення особливостей каналного кодування в стандарті 5G NR, а також аналіз ефективності сучасних алгоритмів декодування LDPC- та Polar-кодів із врахуванням різних експлуатаційних умов. Отримані результати мають важливе значення як для подальшого вдосконалення фізичного рівня 5G, так і для практичного впровадження високонадійних телекомунікаційних рішень у сфері мобільного зв'язку, автоматизованих систем керування, промислового інтернету речей та інтелектуального транспорту.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз літературних джерел [3-5], опрацювання стандартів і нормативних документів [1] дозволяє сформулювати уявлення про структуру побудови фізичного рівня 5G NR, виявити основні специфічні механізми його функціонування та намітити проблематику, пов'язану з реалізацією сучасних алгоритмів декодування.

Особливу увагу при цьому потрібно приділити аспектам забезпечення надійності передачі даних в умовах складного радіоканалу, високих вимог до швидкодії та енергоефективності, що характерні для нових поколінь бездротового зв'язку [6].

В даному розділі коротко розглянуто фізичну структуру каналу 5G NR, наведено базові принципи взаємодії фізичних каналів та обґрунтовано актуальність застосування сучасних коригувальних кодів, зокрема LDPC і Polar-кодів, у відповідних сегментах каналного рівня.

У системі мобільного зв'язку п'ятого покоління 5G NR особлива увага приділяється ефективності фізичного рівня, який є основою для забезпечення високої пропускної здатності, низької затримки та масштабованості мережі. Одним із ключових фізичних каналів у downlink (низхідному напрямку) є PDSCH (Physical Downlink Shared Channel), через який передається основний обсяг користувацьких даних від базової станції (gNB) до абонентського обладнання (UE). Архітектура цього каналу передбачає застосування сучасних методів модуляції (QPSK – 1024-QAM), технологій МІМО, а також передових засобів кодування, зокрема LDPC (Low-Density Parity-Check) та полярних кодів. Структура фізичного каналу з урахуванням процесу декодування наведена на рис. 1 [1].

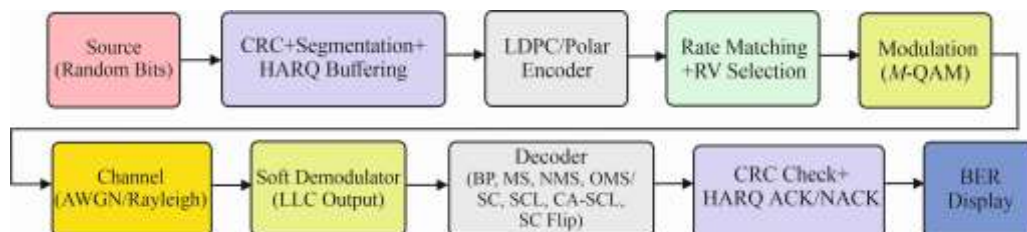


Рис. 1. Схема структурної архітектури фізичного каналу PDSCH у 5G: CRC+Segmentation+HARQ Buffering - Блок CRC-контролю (циклічний надлишковий код), сегментації та буферизації HARQ (гібридного автоматичного запиту на повторення); Encoder – кодер; Rate Matching + RV Selection - Узгодження швидкості + вибір версії надлишковості; Modulation – модулятор; Channel – телекомунікаційний канал; Demodulator – демодулятор; Decoder – декодер; CRC Check+HARQ ACK/NACK - перевірка цілісності отриманих даних (за циклічним надлишковим кодом)+ підтвердження або відмови в отриманні (ACK/NACK) у механізмі HARQ

Перед безпосередньою передачею дані формуються на транспортному рівні через DL-SCH (Downlink Shared Channel). У випадках великого обсягу інформації, транспортний блок (Transport Block, TB) сегментується на кодові блоки (Code Blocks, CBs), кожен з яких супроводжується CRC-контролем (16 біт), а на рівні всього TB додається 24-бітна CRC. Це забезпечує виявлення помилок на обох рівнях декодування та об'єднання.

В стандарті 3GPP 5G NR [1] для каналів користувацьких і керуючих даних застосовано два основні типи кодів виправлення помилок, а саме, LDPC - такі коди використовуються для PDSCH, PUSCH (uplink) і UL-SCH — для великих обсягів даних та полярні коди (Polar) які застосовуються у каналах з короткими повідомленнями, таких як PDCCCH, PBCH, PUCCH та RACH (типи каналів будуть описані нижче).

Таке розмежування відображає прагнення до оптимального балансу між продуктивністю, затримками та обчислювальними витратами, враховуючи сценарії downlink і uplink 3GPP TS 38.212 [1].

LDPC-коди демонструють високу ефективність при кодуванні великих транспортних блоків. Завдяки структурі з розрідженою матрицею парності [7], вони підтримують паралельну апаратну реалізацію, що є перевагою для базових станцій, які мають достатньо обчислювальних ресурсів. Це дозволяє зменшити затримки при декодуванні і підтримувати високу швидкість передачі даних — критично важливу для сервісів eMBB (enhanced Mobile Broadband), таких як потокове HD-відео, доповнена реальність або масовий мультимедійний трафік. LDPC забезпечують гнучке масштабування — від середніх до дуже великих розмірів блоків — і добре адаптуються до змін швидкості передачі.

Полярні коди, вперше запропоновані у 2008 році [8, 9], є першими, що теоретично досягають межі Шеннона [6]. У практичних системах 5G NR вони використовуються для керуючих каналів, де обсяги повідомлень малі, але важлива висока точність і низьке енергоспоживання. Полярні коди підтримують декодування Successive Cancellation (SC) та Successive Cancellation List (SCL), зокрема CA-SCL (CRC-Aided), що підвищує ефективність для коротких повідомлень. В висхідному каналі, де мобільні пристрої мають обмежені ресурси, полярні коди забезпечують енергоефективне і швидке декодування, що особливо важливо для таких сервісів, як URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication). У 5G NR вони використовуються у каналах PUCCH, PDCCH, PBCH, RACH — відповідно до їхнього короткого обсягу та керуючої функції.

На рис. 2 схематично представлено відповідність типів кодів фізичним каналам у мережі 5G.

Інфографіка: Розподіл кодування в каналах 5G NR

PDSCH (Data)	Тип: Користувацький	Напряв: Downlink	Кодування: LDPC
PUSCH (Data)	Тип: Користувацький	Напряв: Uplink	Кодування: LDPC
PDCCH (Control)	Тип: Керуючий	Напряв: Downlink	Кодування: Polar
PUCCH (Control)	Тип: Керуючий	Напряв: Uplink	Кодування: Polar
RACH	Тип: Керуючий	Напряв: Uplink	Кодування: Polar

Рис. 2. Інфографіка як розподіл кодування в каналах 5G NR: PDSCH Physical Downlink Shared Channel - Фізичний канал спільного доступу (канал даних downlink); PUSCH Physical Uplink Shared Channel - Фізичний канал спільного доступу (канал даних uplink); PDCCH Physical Downlink Control Channel - Фізичний канал керування downlink; PUCCH Physical Uplink Control Channel - Фізичний канал керування uplink; RACH Random Access Channel - Канал випадкового доступу (uplink, для ініціалізації зв'язку)

Ці канали формують узгоджену ієрархію, що починається з ініціалізації через RACH, далі проходить через керуючі канали (PDCCH/PUCCH), до передачі основного трафіку (PDSCH/PUSCH). Послідовність їхньої взаємодії відображено на рис. 3.

Ієрархія каналів у 5G формується ланцюгом який містить логічний (Logical), транспортний (Transport) та фізичний рівні (Physical) (рис. 3).

В цьому контексті логічні канали визначають тип даних (керуючі або користувацькі), транспортні канали визначають структуру передавання (наприклад, DL-SCH, UL-SCH), фізичні канали реалізують передачу по радіоінтерфейсу (наприклад, PDSCH, PUSCH).

Таким чином, у 5G NR застосовується диференційований підхід до вибору кодування залежно від напрямку передачі, типу каналу та обсягу переданих даних. Використання LDPC-кодів у downlink (низхідному каналі) дозволяє обробляти великі обсяги з високою ефективністю, а полярні коди в uplink (у висхідному каналі) оптимізовані для коротких, критичних повідомлень з обмеженими ресурсами.

Цей підхід забезпечує гнучкість, масштабованість, високу завадостійкість і ефективність, що є необхідним для підтримки таких режимів 5G, як eMBB (розширене мобільне широкосмугове підключення – сценарій функціонування 5G, що забезпечує високу швидкість передачі даних та підтримку мультимедіа високої якості), URLLC (ультранадійні комунікації з низькою затримкою - сервісний сценарій 5G, що забезпечує ультранадійний зв'язок із мінімальною затримкою (≤ 1 мс) і майже 100% доступністю, що необхідно для критично важливих застосувань таких як дистанційне керування, автономні транспортні засоби, промислова автоматизація та mMTC - масовий IoT (Internet of Things), масові комунікації типу

“машина-машина” - сценарій 5G, який забезпечує зв'язок для великої кількості пристроїв інтернету речей (IoT) і характеризується низьким енергоспоживанням і високою щільністю підключень [5].

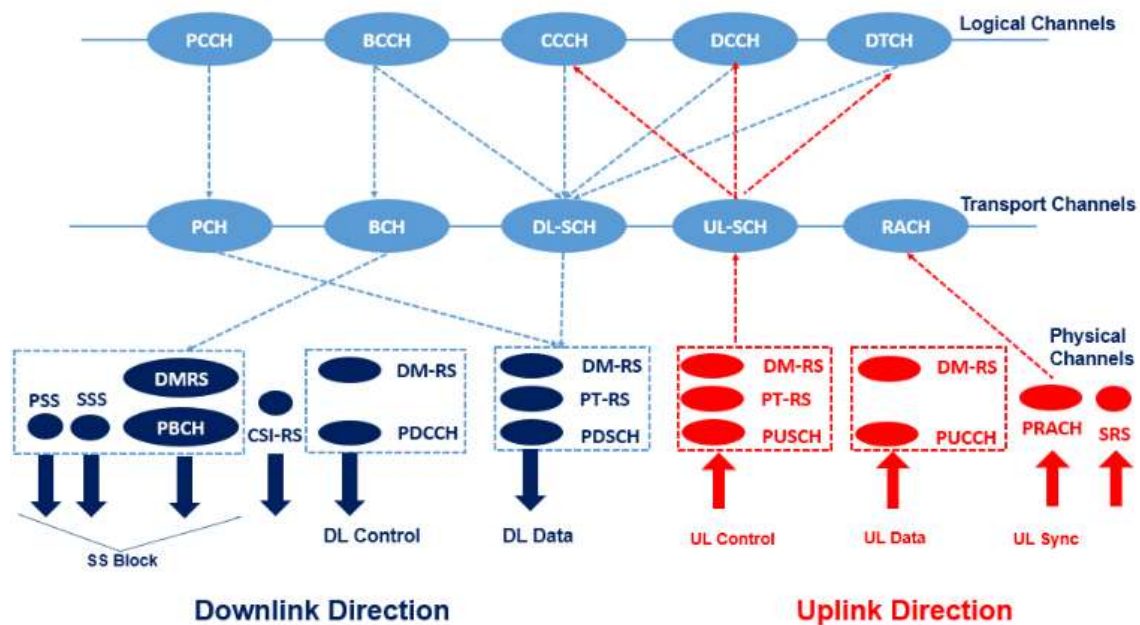


Рис. 3. Принципи взаємодії фізичних каналів у 5G NR

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

LDPC-коди застосовуються у 5G як основний тип каналового кодування для інформаційного каналу. Завдяки своїй близькості до межі Шеннона, вони забезпечують високу ефективність, проте вимагають ретельного підбору алгоритмів декодування для балансування між точністю, складністю та апаратною реалізацією.

З метою порівняння та аналізу алгоритмів декодування LDPC – кодів оцінки складності та продуктивності декодування розглянемо основні засади функціонування таких алгоритмів.

Алгоритм BP - Belief Propagation (поширення ймовірностей (переконань)) (також Sum-Product Algorithm) є оптимальним з точки зору теорії ймовірностей і реалізує обмін логарифмічними апостеріорними ймовірностями (LLR) між вузлами графа Таннера (рис. 4). Обчислення базується на байєсівському підході і здійснюється за допомогою формул (1–4), що включають оновлення повідомлень між вузлами $m_{c \rightarrow v}$, розрахунок апостеріорних LLR та перевірку паритетних умов.

$$m_{c \rightarrow v} = 2 \tanh^{-1} \left(\prod_{v' \in N(c) \setminus v} \tanh \left(\frac{m_{v' \rightarrow c}}{2} \right) \right) \quad (1)$$

$$m_{v \rightarrow c} = \text{LLR}(y_v) + \sum_{c' \in N(v) \setminus c} m_{c' \rightarrow v} \quad (2)$$

$$\text{LLR}(x_v) = \text{LLR}(y_v) + \sum_{c \in N(v)} m_{c \rightarrow v} \quad (3)$$

$$\hat{x}_v = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \text{LLR}(x_v) > 0 \\ 1, & \text{інакше} \end{cases} \quad (4)$$

де N_c - множина всіх вузлів змінних, які з'єднані з перевірючим вузлом c ; v - той вузол змінної, куди ми зараз надсилаємо повідомлення; v' - усі інші вузли змінних, які підключені до c , окрім v (дивитись рис. 4) – тобто обчислюються повідомлення для v , враховуючи усі інші повідомлення $m_{v' \rightarrow c}$ які надійшли в цей перевірючий вузол від інших змінних вузлів.

З рис. 4 можна схематично побачити, що основний крок алгоритму BP сформовано ітеративним обміном повідомленнями між вузлами змінних і перевірючими вузлами графа Таннера. BP забезпечує найвищу точність, але є ресурсоємним через використання гіперболічних функцій і чутливість до петель у графі. Цей підхід демонструє відмінні результати за BER (ймовірністю бітової помилки), однак його реалізація у 5G обмежена через високу апаратну складність та затримки.

MS-алгоритм (Min-Sum – алгоритм мінімальної суми) [10] є спрощеною версією BP, що замінює складні функціональні обчислення у (1) на мінімізацію за формулою (5), залишаючи аналогічну структуру оновлення повідомлень (6) і обчислення апостеріорного LLR (7). Така заміна істотно знижує обчислювальну складність і робить алгоритм придатним для апаратної реалізації у мобільних системах і мережах [1].

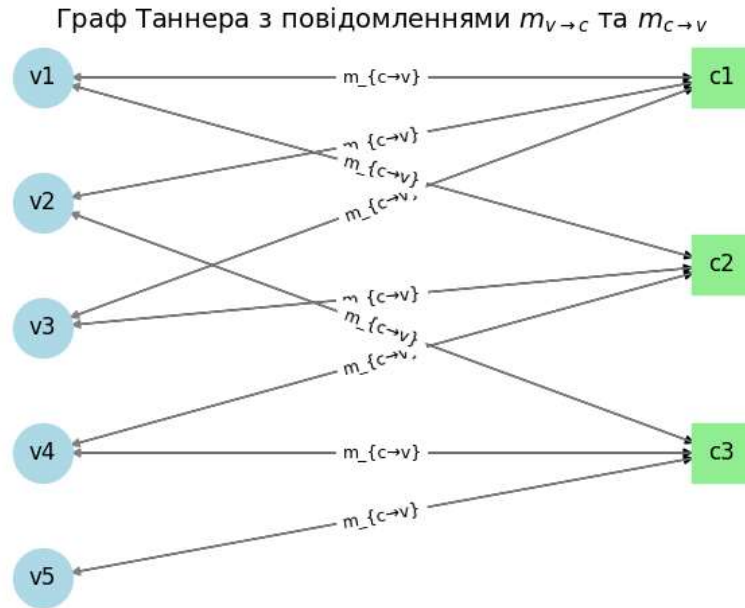


Рис. 4. Граф Таннера для LDPC: кола - вузли змінних ($v_1, v_2, \dots$); квадрати - перевіірні вузли ($c_1, c_2, \dots$)

На рис.5 представлено блок-схему одного кроку ітерації за алгоритмом BP.

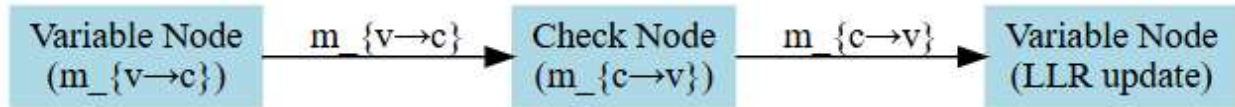


Рис. 5. Блок-схема одного кроку ітерації за алгоритмом BP

Метод MS вирізняється високою швидкістю обчислень і легкістю впровадження, однак його точність знижується при низькому рівні шуму, де метод BP показує значно кращі результати. Попри це, MS часто обирають для використання на пристроях із обмеженими ресурсами [6].

$$m_{c \rightarrow v} = \left(\prod_{v' \in N(c) \setminus v} \text{sign}(m_{v' \rightarrow c}) \right) \cdot \min_{v' \in N(c) \setminus v} |m_{v' \rightarrow c}| \quad (5)$$

$$m_{v \rightarrow c} = \text{LLR}(y_v) + \sum_{c' \in N(v) \setminus c} m_{c' \rightarrow v} \quad (6)$$

$$\text{LLR}(x_v) = \text{LLR}(y_v) + \sum_{c \in N(v)} m_{c \rightarrow v} \quad (7)$$

Отже, MS має високу швидкість виконання та простоту реалізації, проте точність страждає на низьких рівнях шуму, де BP демонструє суттєво кращі результати. Водночас, як показує огляд передових публікацій [5-8], MS залишається популярним рішенням для пристроїв з обмеженими ресурсами.

В алгоритми Normalized Min-Sum (NMS – нормалізованої мінімальної суми) та Offset Min-Sum (OMS – мінімальної суми із зміщенням) вводять додаткові параметри для компенсації похибки апроксимації у базовому алгоритмі MS. У OMS компенсуюча константа β віднімається від мінімуму (8), зменшуючи надмірну песимізацію повідомлень.

$$m_{c \rightarrow v} = \left(\prod_{v' \in N(c) \setminus v} \text{sign}(m_{v' \rightarrow c}) \right) \cdot \max \left(\min_{v' \in N(c) \setminus v} |m_{v' \rightarrow c}| - \beta, 0 \right) \quad (8)$$

В NMS використовується нормалізаційний множник α (9), що пом'якшує значення повідомлень, покращуючи точність без значного зростання складності.

$$m_{c \rightarrow v} = \left(\prod_{v' \in N(c) \setminus v} \text{sign}(m_{v' \rightarrow c}) \right) \cdot \alpha \cdot \min_{v' \in N(c) \setminus v} |m_{v' \rightarrow c}| \quad (9)$$

Алгоритмічні етапи для NMS/OMS включають обчислення повідомлень перевірочними вузлами (8 або 9), оновлення повідомлень змінними вузлами (10):

$$m_{v \rightarrow c} = \text{LLR}(y_v) + \sum_{c' \in N(v) \setminus c} m_{c' \rightarrow v}, \quad (10)$$

обчислення LLR (логарифмічне відношення правдоподібностей) згідно (11):

$$\text{LLR}(x_v) = \text{LLR}(y_v) + \sum_{c \in N(v)} m_{c \rightarrow v}, \quad (11)$$

прийняття рішень за тією ж логікою, що і в BP, (4).

Ці модифікації забезпечують баланс між точністю та апаратною простотою і активно застосовуються в практичних 5G-системах, зокрема у фізичному рівні downlink/uplink (низхідному/висхідному).

На рис.6 представлено зіставлення основних характеристик розглянутих алгоритмів за трьома критеріями: обчислювальна складність, точність декодування та складність апаратної реалізації.

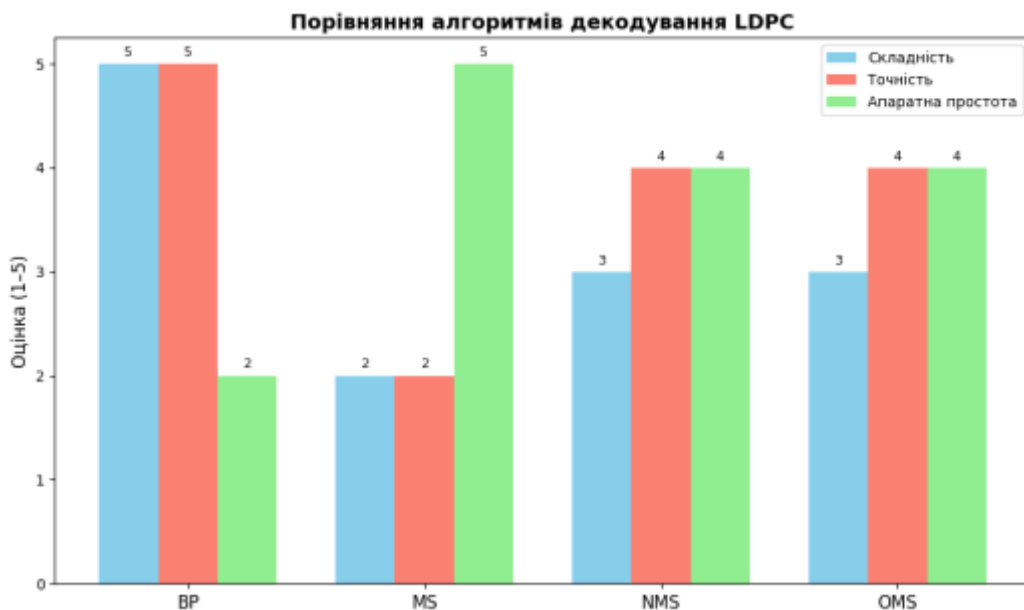


Рис. 6. Зіставлення основних характеристик розглянутих алгоритмів за трьома критеріями: обчислювальна складність, точність декодування та складність апаратної реалізації

Основний висновок наступний. BP демонструє максимальну точність, однак має найвищу обчислювальну та апаратну складність. Натомість MS забезпечує найпростішу реалізацію і найменше споживання ресурсів, жертвуючи точністю. OMS та NMS виступають компромісними підходами з помірною складністю і значним покращенням точності відносно базового MS.

Зведена оцінка представлена у таблиці 1.

У контексті 5G-комунікацій вибір алгоритму декодування LDPC-кодів визначається компромісом між точністю, швидкістю обробки та вимогами до апаратної реалізації. Хоч BP забезпечує найкращу продуктивність, його складність обмежує застосування. Алгоритм MS є ефективним для простих систем [10], а NMS/OMS становлять баланс, що ідеально підходить для сучасних комунікаційних стандартів, таких як 5G NR.

Як вже зазначалось вище полярні коди, відкриті Е. Аріканом (2008 р.) і є важливим класом блокових кодів, які використовуються в новітніх бездротових технологіях, зокрема в стандарті 5G NR. Ефективність їх застосування значною мірою залежить від вибору алгоритму декодування. Тому доцільно в рамках мети статті проаналізувати кілька методів декодування полярних кодів, серед яких базовий SC (послідовного сканування), його розширення SCL (послідовного скасування з підтримкою списку), а також модифікації з використанням CRC (циклічного надлишкового коду) та прискорених підходів.

Початковий метод Successive Cancellation або послідовного сканування передбачає послідовну обробку вхідних логарифмічних відношень правдоподібності (LLR), які надходять від демодулятора. Прийняття рішення щодо кожного біта відбувається з урахуванням вже оброблених попередніх значень.

Таблиця 1

Зведені дані для порівняння алгоритмів декодування LDPC

Критерій	BP	Min-Sum (MS)	Normalized MS (NMS)	Offset MS (OMS)
Точність	★★★★ (найвища)	★★	★★★★	★★★★
Складність обчислень	Висока ($\tanh$, $\tanh^{-1}$)	Низька ($\min$)	Помірна ($\alpha \cdot \min$)	Помірна ($\min - \beta$)
Гнучкість	Низька	Обмежена	Залежить від параметра α	Залежить від параметра β
Стійкість до петель	Чутливий	Краща	Краща	Краща
Придатність для 5G	Теоретично можливо	Дуже добре підходить	Використовується	Використовується
Апаратна реалізація	Ускладнена	Проста	Трохи складніша	Трохи складніша

Такий підхід ґрунтується на рекурсивному графовому представленні коду з характерною метеликоподібною структурою (див. рис. 7), що дозволяє реалізовувати обчислення згідно з функціями (12) та (13).

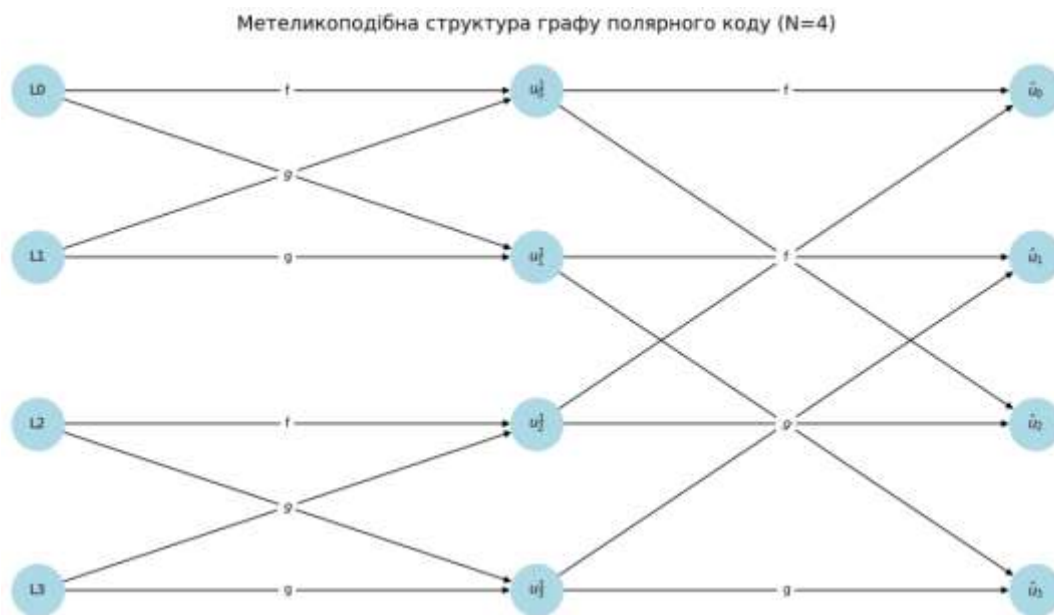


Рис. 7. Метеликоподібна структура графу полярного коду для N=4

$$f(L_1, L_2) = \text{sign}(L_1) \cdot \text{sign}(L_2) \cdot \min(|L_1|, |L_2|) \quad (12)$$

$$g(L_1, L_2, u) = L_2 + (1 - 2u) \cdot L_1 \quad (13)$$

На кожному рівні такого графа застосовуються дві ключові функції, а саме: $f(L_1, L_2)$ - використовується для обчислення LLR верхньої гілки графа (при переході з попереднього рівня до поточного) та $g(L_1, L_2, u)$ - використовується для нижньої гілки і враховує вже прийняте значення u на попередньому етапі, відповідно до формули (13). На кожному етапі декодування використовується логарифмічне співвідношення ймовірностей (LLR), яке формально виражається через співвідношення (14):

$$L(u_i) = \log \frac{P(y, \hat{u}_0^{i-1} | u_i = 0)}{P(y, \hat{u}_0^{i-1} | u_i = 1)} \quad (14)$$

де $P(y, \hat{u}_0^{i-1} | u_i = 0)$ - умовна ймовірність отримати вихід каналу y , знаючі попередні декодовані біти $\hat{u}_0^{i-1}$, за умови, що поточний біт u_i дорівнює 0 або 1.

Функції f і g , які лежать в основі рекурсивного обчислення, обробляють вхідні LLR на кожному рівні графа. При цьому рішення щодо кожного інформаційного біта приймається на основі критерію максимальної апостеріорної ймовірності, що наведено у формулі (15):

$$\hat{u}_i = \begin{cases} 0, & \text{якщо } L(u_i) \geq 0 \\ 1, & \text{інакше} \end{cases} \quad (15)$$

Метеликоподібна топологія декодера, представлена на рис. 7, чітко демонструє процес трансформації вхідних LLR у послідовність оцінених інформаційних бітів. Такий підхід вирізняється простою апаратною реалізацією, лінійною складністю і низьким енергоспоживанням, що є перевагою в умовах обмежених обчислювальних ресурсів, наприклад, для пристроїв IoT. Водночас недоліками є висока латентність (затримка) та значна ймовірність помилок при коротких довжинах коду. Блок-схема SC-декодера (рис. 8) демонструє архітектуру обробки LLR-інформації, включаючи ядро SC (Core), метрику шляху (Path Metrics), механізм розгалуження (Path Split, List Pruning) та блок перевірки CRC (CRC Check) який дуже актуальний для розширених варіантів алгоритму.

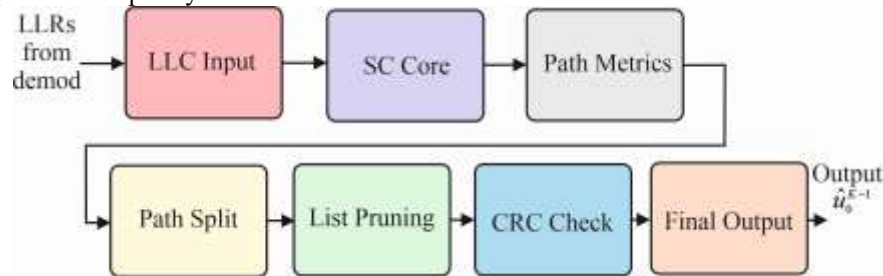


Рис. 8. Блок-схема SC-декодера

Алгоритм SCL (Successive Cancellation List) є подальшим розвитком базового SC-декодування, в якому зберігається не один, а множина можливих варіантів декодування. Після кожного бітового рішення генерується пара гіпотез (0 і 1), після чого на основі спеціальної метрики виду:

$$PM = \sum_{i=0}^{N-1} \log(1 + e^{-L(u_i)}) - u_i \cdot L(u_i), \quad (16)$$

обираються L найвірогідніших шляхів. Така обробка значно знижує ризик прийняття помилкового рішення і дозволяє повернутись до альтернативного варіанту у разі виявлення невідповідності.

Фрагмент графа (рис. 9) ілюструє, як відбувається розгалуження шляхів у процесі декодування. SCL-алгоритм є особливо ефективним при коротких кодових словах, що робить його придатним для декодування керуючих каналів у мережах п'ятого покоління.

Модифікація SCL [9] з використанням CRC (CRC-aided SCL (CA-SCL) - підвищення надійності через перевірку контрольної суми) полягає у включенні контрольної суми на етапі кодування. RC додається до інформаційного слова згідно з розміткою:

$$u = [u_0, u_1, \dots, u_{K-1}, c_0, \dots, c_{L-1}, 0, \dots, 0] \quad (17)$$

де K – кількість інформаційних бітів; L – довжина CRC (звичайно 8, 11, 16 біт); c_i – CRC біти; 0 – так звані «заморожені» біти [6] для коду довжиною N .

Обчислення (17) виконується за допомогою генераторного полінома виду:

$$g(x) = x^8 + x^7 + x^2 + x + 1 \quad (18)$$

Після побудови всіх кандидатів-декодування результат перевіряється на відповідність CRC, і лише ті, що проходять перевірку, розглядаються як валідні.

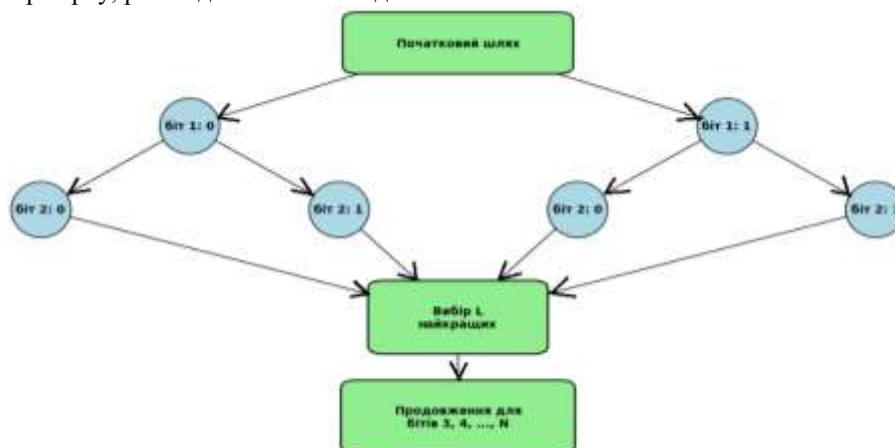


Рис. 9. Фрагмент графу (метелик) для SCL декодування

Цей підхід дозволяє досягти майже максимальної продуктивності, наближеної до ML-декодування (за критерієм максимально правдоподібного декодування, тобто з максимізацією ймовірності отриманого спостереження), зокрема при невеликій довжині коду. Структура побудови полярного коду з CRC наведена на рис. 10.



Рис. 10. Схема формування полярного коду з CRC

З метою підвищення швидкодії SC-декодерів були розроблені алгоритми Fast SC та SC Flip (прискорені алгоритми для ресурсно обмежених систем). У Fast SC використовується дерево обробки, де ідентифікуються певні типові шаблони (Rate-0, Rate-1, REP, SPC), що дозволяє здійснювати блокове декодування та уникати повного проходження рекурсії. Фрагмент такого дерева для $N=8$ наведено на рис. 11.

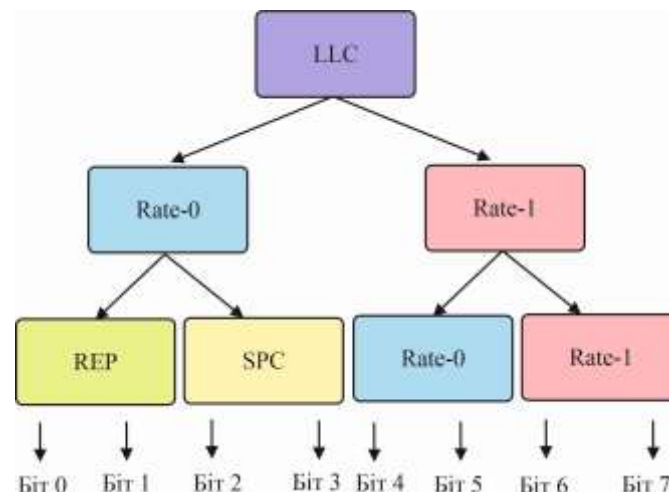


Рис. 11. Фрагмент дерева декодування полярного коду довжини $N=8$, сформованого за принципами Fast-SSC

Алгоритм SC Flip, у свою чергу, дозволяє виправляти помилки після першої невдалої спроби (наприклад, якщо CRC не пройдено), переобчислюючи найбільш ненадійні біти. Такий підхід є доцільним для сценаріїв з варіативною якістю каналу, наприклад, у транспортних або промислових мережах.

На рис. 12 приведено оцінка алгоритмів декодування полярних кодів для 5G в базисі показників складність, точність та апаратна простота.

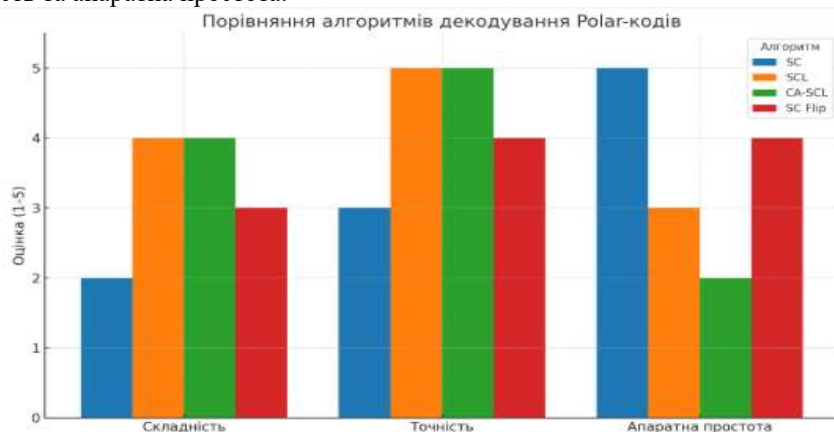


Рис. 12. Зіставлення основних характеристик розглянутих алгоритмів декодування полярних кодів за трьома критеріями: обчислювальна складність, точність декодування та складність апаратної реалізації

З порівняльної характеристики основних алгоритмів декодування Polar-кодів (рис. 12) за трьома ключовими параметрами: складністю, точністю та апаратною простотою можна встановити наступне. Оцінювання проведено за шкалою від 1 до 5 (як і для LDPC кодів на рис. 6), де вищий бал означає кращий показник за відповідним критерієм. Алгоритм SC вирізняється найнижчою складністю реалізації (2 бали) та максимальною апаратною простотою (5 балів). Однак точність такого підходу залишається на середньому рівні (3 бали). Це робить його придатним для систем з жорсткими енергетичними обмеженнями, проте недостатньо ефективним у високонадійних сценаріях, характерних для сучасних телекомунікаційних систем, зокрема 5G. Алгоритм SCL демонструє значне покращення точності (5 балів) завдяки обробці кількох гіпотез декодування. Проте це супроводжується зростанням обчислювальної складності (4 бали) та деяким зниженням апаратної простоти (3 бали). Він підходить для застосувань у 5G, однак потребує оптимізації, особливо в контексті обмежених ресурсів. CA-SCL (CRC-aided SCL), як розширення SCL з використанням контрольної суми CRC, забезпечує найвищу точність декодування (5 балів) і зберігає помірну складність (4 бали). Його апаратна реалізація є дещо складнішою (2 бали), проте саме цей алгоритм є стандартом для декодування керуючих каналів у 5G (наприклад, PDCCH, дивитись рис. 3), завдяки надійності, яка наближається до максимальної можливої (ML-декодування). Алгоритм SC Flip, який поєднує базову схему SC із механізмом переобчислення при виявленні помилки, демонструє збалансовані показники, а саме середню складність (3 бали), високу апаратну простоту (4 бали) і прийнятну точність (4 бали). Це робить його ефективним вибором для пристроїв з обмеженими ресурсами — таких як IoT-модулі — та сценаріїв з низькою затримкою, характерних для частини застосувань у 5G [11] і майбутніх 6G-сценаріях розгортання мереж електронних комунікацій.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В статті проведено ґрунтовний аналіз механізмів каналного кодування на фізичному рівні системи 5G NR, зокрема щодо застосування LDPC та полярних кодів. Розглянуто відповідність типів кодів до різних фізичних каналів, а також проаналізовано особливості алгоритмів декодування, що використовуються в практичних реалізаціях.

Для LDPC-кодів охарактеризовано чотири основні алгоритми декодування: BP, MS, NMS та OMS. Визначено, що BP забезпечує найвищу точність, однак надто складний для масового застосування в системах із жорсткими обмеженнями на ресурси. Спрощені алгоритми MS, NMS та OMS є ефективнішими з точки зору апаратної реалізації та використовуються в реальних 5G-рішеннях.

Щодо полярних кодів, досліджено алгоритми SC, SCL, CA-SCL, SC Flip та Fast-SSC. З'ясовано, що базовий SC-алгоритм демонструє низьку апаратну складність і високу енергоефективність, проте поступається в точності. CA-SCL, як найбільш точний підхід, отримав широке впровадження для декодування керуючих каналів завдяки високій надійності. Інші алгоритми (наприклад, SC Flip) забезпечують компроміс між складністю та продуктивністю. Проведене дослідження підтвердило доцільність адаптивного підходу до вибору алгоритмів декодування залежно від типу каналу, вимог до затримки, енергоспоживання та цільового сценарію застосування (eMBB, URLLC, mMTC).

Перспективи подальших розвідок у даному напрямі полягають у проектуванні та синтезі інтелектуальних декодерів на основі глибокого машинного навчання, які здатні адаптивно реагувати на стан каналу і навчатися з метою підвищення продуктивності декодування. Такий підхід дозволить створювати більш гнучкі та ефективні рішення для майбутніх поколінь бездротових систем зв'язку, включаючи 6G, де вимоги до швидкодії, надійності та енергоефективності стануть ще жорсткішими.

Література

1. 5G, NR, Physical layer procedures for data (3GPP TS 38.214 version 16.2.0 Release 16) [Electronic resource]. — 2020. — Access mode : https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138214/16.02.00_60/ts_138214v160200p.pdf (last access: 18.07.2025).
2. Yue, C., Shirvanimoghaddam, M., Vucetic, B. & Li, Y. (2023). Channel Coding and Decoding Schemes for URLLC. Ultra-Reliable and Low-Latency Communications (URLLC) Theory and Practice: Advances in 5G and Beyond. - Wiley, 2023, 119-168.
3. Baig, S., Ahmad, M., Asif, H. M., Shehzad, M. N. & Jaffery, M. H. (2018). Dual PHY Layer for Non-Orthogonal Multiple Access Transceiver in 5G Networks. *IEEE Access*, 6, 3130-3139.
4. Ijaz A. *et al.* (2016). Enabling Massive IoT in 5G and Beyond Systems: PHY Radio Frame Design Considerations. *IEEE Access*, 4, 3322-3339.
5. Sharma, V., Arya, R. K., & Kumar, S. (2023). A robust transmission with enhancement of 5G PHY using FBMC and AMC for machine-to-machine communication node. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3, 323-332.
6. Семенко, А. І., Бойко, Ю. М., Шпур, О. М., Стрелковська, І. В., Корчинський, В. В., & Яровий, Р.

О. (2024). Сучасні технології інфокомунікаційних та комп'ютерних мереж. - Київ: Європейський університет, ФО-П Білецький Р.Г., 2024. - 557 с. ISBN 978-617-853-009-9.

7. Бойко, Ю., Єрьоменко, О., & Гур'єв, О. (2023). Можливості LDPC-кодів у підвищенні продуктивності оптичних телекомунікацій з OFDM. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 13-26.

8. Xie Z., Chen P., Chen, R. & Fang, Y. (2021). Polar Coded Modulation Operated With Physical Network Coding. *IEEE Signal Processing Letters*, 28, 997-1001.

9. Boiko, J., Druzhynin, V., Buchyk, S., Pyatin, I., & Kulko, A. (2024). Methodology of FPGA Implementation and Performance Evaluation of Polar Coding for 5G Communications. *CEUR Workshop Proceedings*, 3654, 15-24.

10. Бойко, Ю. М., & Пятін, І. С. (2024). Визначення продуктивності LDPC кодів засобами HDL в системах зв'язку технології WI-FI 6. *Вчені Записки*, 35(74),1, 19-26.

11. Halahan, N., Berkman, L., Drobyk, O., Makarenko, A., & Zavatskyi, V. (2025). Devising a method for receiving a multidimensional signal using high-order phase difference modulation in next-generation mobile networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 135(9), 19-32.

References

1. 5G, NR, Physical layer procedures for data (3GPP TS 38.214 version 16.2.0 Release 16) [Electronic resource]. – 2020. – Access mode : https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138214/16.02.00_60/ts_138214v160200p.pdf (last access: 18.07.2025).

2. Yue, C., Shirvanimoghaddam, M., Vucetic, B. & Li, Y. (2023). Channel Coding and Decoding Schemes for URLLC. Ultra-Reliable and Low-Latency Communications (URLLC) Theory and Practice: Advances in 5G and Beyond. - Wiley, 2023, 119-168.

3. Baig, S., Ahmad, M., Asif, H. M., Shehzad, M. N. & Jaffery, M. H. (2018). Dual PHY Layer for Non-Orthogonal Multiple Access Transceiver in 5G Networks. *IEEE Access*, 6, 3130-3139.

4. Ijaz A. et al. (2016). Enabling Massive IoT in 5G and Beyond Systems: PHY Radio Frame Design Considerations. *IEEE Access*, 4, 3322-3339.

5. Sharma, V., Arya, R. K., & Kumar, S. (2023). A robust transmission with enhancement of 5G PHY using FBMC and AMC for machine-to-machine communication node. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3, 323-332.

6. Semenko, A. I., Boiko, J. M., Shpur, O. M., Strelkovska, I. V., Korchynskyi, V. V., & Yarovyi, R. O. (2024). Suchasni tekhnolohii infokomunikatsiinykh ta kompiuternykh merezh. - Kyiv: European University, FO-P Biletskyi R.H., 2024. - 557 s. ISBN 978-617-853-009-9.

7. Boiko, J., Eromenko, O., & Huriev, O. (2023). Capabilities of LDPC codes to improve the productivity of optical telecommunications with OFDM. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 13-26.

8. Xie Z., Chen P., Chen, R. & Fang, Y. (2021). Polar Coded Modulation Operated With Physical Network Coding. *IEEE Signal Processing Letters*, 28, 997-1001.

9. Boiko, J., Druzhynin, V., Buchyk, S., Pyatin, I., & Kulko, A. (2024). Methodology of FPGA Implementation and Performance Evaluation of Polar Coding for 5G Communications. *CEUR Workshop Proceedings*, 3654, 15-24.

10. Boiko J.M., & Pyatin I.S. (2024). Determining the performance of LDPC codes using HDL in communication systems WI-FI 6 technology. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University*, 35(74),1, 19-26.

11. Halahan, N., Berkman, L., Drobyk, O., Makarenko, A., & Zavatskyi, V. (2025). Devising a method for receiving a multidimensional signal using high-order phase difference modulation in next-generation mobile networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 135(9), 19-32.