

**І. В. ФІЛІППЕНКО**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0000-0002-3584-2107

**В. І. СЕРГІЄНКО**

аспірант кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0000-1916-4636

**О. І. ФІЛІППЕНКО**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0000-0003-4616-250X

**І. В. ХАХАНОВА**

доктор технічних наук, професорка,  
професор кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0000-0002-8319-0430

## МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КОРЕКЦІЇ ПОМИЛОК У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ

У роботі розглянуті проблеми забезпечення належного рівня надійності та цілісності передачі даних у межах сучасних розподілених комп'ютерних систем. Основну увагу зосереджено на гетерогенних мережах Інтернету речей (IoT), розгалужених безпроводових сенсорних мережах (WSN) та системах граничних обчислень (Edge Computing), функціонування яких відбувається в умовах складного електромагнітного оточення. Предметом вивчення визначено методи, алгоритми та архітектурні моделі адаптивної корекції помилок, що дають змогу динамічно змінювати параметри апаратного кодування в режимі реального часу. Процес адаптації реалізується на основі врахування багатовимірного вектора факторів, що включає поточний стан каналу зв'язку (рівень шуму, інтерференція, явища замирання), наявні енергетичні ресурси автономного пристрою (рівень заряду, стан джерела) та вимоги прикладного рівня щодо допустимих часових затримок і пропускну здатності.

Встановлено, що в умовах жорстких обмежень енергоспоживання та функціонування у стохастичному середовищі застосування традиційних статичних методів кодування призводить до нераціонального використання апаратних ресурсів. Зазначене явище проявляється у дихотомії неефективності: спостерігається або надмірна витрата енергетичних ресурсів на виконання складних обчислювальних операцій за сприятливих умов передачі, або критична втрата даних внаслідок раптових сплесків завад, виправлення яких виходить за межі можливостей фіксованого коду.

У межах роботи запропоновано модель системи, орієнтовану на реалізацію у ПЛІС (FPGA), що базується на принципах алгоритмічного перемикавання між різними режимами кодування: від режимів «прозорості» (відсутність кодування) та використання простих кодів Геммінга до застосування потужних ітеративних кодів LDPC (Low-Density Parity-Check). Розроблена модель враховує комплексний багатокритеріальний підхід до прийняття рішень, який охоплює оцінку співвідношення сигнал/шум (SNR), моніторинг градієнта розряду акумуляторної батареї та врахування вимог до якості обслуговування (QoS), зокрема допустимих показників затримки.

Наведено теоретичне обґрунтування ефективності запропонованого адаптивного підходу. Акцентовано увагу на доцільності використання архітектури ПЛІС (FPGA), яка дозволяє забезпечити апаратне прискорення процесів аналізу ефіру та миттєву реконфігурацію обчислювальних блоків. Аналітичні розрахунки показують, що така імплементація дозволить досягти зниження динамічного енергоспоживання цифрової частини системи та забезпечити стабільне дотримання заданого рівня надійності в широкому діапазоні умов експлуатації.

**Ключові слова:** адаптивна корекція помилок, комп'ютерні системи, енергоефективність, LDPC, FPGA, безпроводові сенсорні мережі.



I. V. FILIPPENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Design Automation  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0000-0002-3584-2107

V. I. SERHIENKO

Postgraduate Student at the Department of Design Automation  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0009-0000-1916-4636

O. I. FILIPPENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Infocommunication Engineering  
named by V. V. Popovsky  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0000-0003-4616-250X

I. V. HAHANOVA

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor at the Department of Design Automation  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0000-0002-8319-0430

## MODEL OF ADAPTIVE ERROR CORRECTION SYSTEM IN COMPUTER SYSTEMS

*The paper examines the issues of ensuring an appropriate level of reliability and integrity of data transmission within modern distributed computer systems. The main focus is on heterogeneous Internet of Things (IoT) networks, extensive Wireless Sensor Networks (WSN), and Edge Computing systems operating in complex electromagnetic environments. The subject of the study includes methods, algorithms, and architectural models of adaptive error correction, which allow for dynamic modification of hardware coding parameters in real-time. The adaptation process is implemented based on a multidimensional vector of factors, including the current state of the communication channel (noise level, interference, fading), available energy resources of the autonomous device (charge level, source status), and application-layer requirements regarding permissible latency and throughput.*

*It has been established that under conditions of strict power consumption constraints and operation in a stochastic environment, the use of traditional static coding methods leads to irrational use of hardware resources. This phenomenon manifests as a dichotomy of inefficiency: either excessive energy consumption for complex computational operations under favorable transmission conditions or critical data loss due to sudden noise bursts, the correction of which exceeds the capabilities of a fixed code.*

*The paper proposes an FPGA-oriented system model based on the principles of algorithmic switching between different coding modes: from «transparency» modes (no coding) and the use of simple Hamming codes to the application of powerful iterative Low-Density Parity-Check (LDPC) codes. The developed model incorporates a complex multi-criteria decision-making approach covering Signal-to-Noise Ratio (SNR) estimation, battery discharge gradient monitoring, and Quality of Service (QoS) requirements, particularly permissible delay indicators.*

*Theoretical justification of the effectiveness of the proposed adaptive approach is presented. Particular emphasis is placed on the feasibility of using FPGA architecture, which enables hardware acceleration of ether analysis processes and instantaneous reconfiguration of computational blocks. Analytical estimates indicate that such implementation will allow reducing the dynamic power consumption of the digital part of the system and ensuring stable adherence to the specified reliability level across a wide range of operating conditions.*

**Key words:** adaptive error correction, computer systems, energy efficiency, LDPC, FPGA, wireless sensor networks.

### Постановка проблеми

Сучасний етап еволюції комп'ютерної інженерії та телекомунікаційних технологій характеризується значним зростанням чисельності автономних інтелектуальних пристроїв, інтегрованих у глобальні гетерогенні безпроводові мережі, що підтверджується глобальними звітами щодо розвитку телекомунікацій [1]. Концепції Інтернету речей (IoT), розумних міст (Smart Cities), Індустрії 4.0 та автономного транспорту детермінують виникнення принципово нових, більш жорстких вимог до інфраструктури передачі даних. Значна кількість сенсорів, контролерів, виконавчих механізмів та інтелектуальних приладів обліку вимушена функціонувати в складних, а подекуди й агресивних умовах експлуатації. Зазначені умови характеризуються високим та нестабільним рівнем електромагнітних завад (від промислового устаткування до побутової електроніки), ефектами багатоприменового поширення

сигналу в умовах щільної міської забудови, а також суттєвими обмеженнями щодо енергоспоживання, оскільки заміна елементів живлення у великій кількості датчиків часто є економічно недоцільною або фізично неможливою.

Однією з фундаментальних проблем при проектуванні подібних систем є забезпечення гарантованої цілісності та достовірності даних. Наслідки помилки в таких системах можуть мати критичний характер: спотворення команди управління промисловим маніпулятором, втрата сигналу від датчика витоку газу або помилка при передачі медичних даних пацієнта можуть призвести до загрози безпеці персоналу та обладнання. Традиційно вирішення даної задачі здійснюється на каналному рівні шляхом імплементації кодів корекції помилок (ECC), що додають до інформаційного потоку математично обчислену надлишковість. Це надає можливість декодеру на стороні приймача виявляти та коригувати пошкоджені біти без необхідності ініціювання повторного запиту даних, що є критичним фактором для систем реального часу.

Втім, класичний підхід до проектування підсистем завадостійкого кодування дотепер базується на консервативній парадигмі «найгіршого випадку» (worst-case design). Це передбачає, що архітектура кодека та його параметри (довжина блоку, поліном, кількість ітерацій декодування) обираються та фіксуються на етапі розробки таким чином, щоб забезпечити надійність у найбільш несприятливих прогнозованих умовах роботи (наприклад, під час інтенсивних атмосферних явищ або поблизу потужного джерела перешкод), вірогідність виникнення яких статистично становить незначну частку часу експлуатації пристрою.

Статичний підхід до корекції помилок, попри забезпечення високої надійності в екстремальних умовах каналу, характеризується суттєво зниженою ефективністю з погляду енергетичного менеджменту та раціонального використання обчислювальних ресурсів інтегральної схеми в типових (штатних) режимах функціонування.

У реальних сценаріях експлуатації безпроводових систем переважну частину часу канал зв'язку перебуває в задовільному або доброму стані, що відповідає високому значенню співвідношення сигнал/шум (SNR). За таких умов застосування обчислювально складних ітеративних алгоритмів кодування (зокрема, Turbo-кодів або LDPC з великою кількістю ітерацій та використанням м'яких рішень) є невиправданим і призводить до низки негативних системних наслідків.

По-перше, відбувається нераціональне споживання динамічної енергії. Складні ітеративні алгоритми декодування вимагають виконання значного обсягу обчислень, включаючи матричні операції, логарифмічні перетворення та апроксимації типу min-sum. Це спричиняє мільйони зайвих перемикань транзисторів у цифрових блоках (CPU, DSP або FPGA), що для енергообмежених пристроїв з батареєю малої ємності призводить до суттєвого скорочення часу автономної роботи.

По-друге, зростає як середнє значення, так і варіативність затримок обробки даних. Тривалість ітеративного декодування є значною та, що особливо критично, має недетермінований характер, оскільки залежить від кількості ітерацій, необхідних для досягнення збіжності. У кіберфізичних системах реального часу така непередбачуваність затримок може порушити стійкість контуру зворотного зв'язку управління та спричинити виникнення аварійних ситуацій.

По-третє, суттєво знижується ефективна пропускна здатність каналу. Високий рівень надлишковості коду (швидкість коду  $R < 1/2$  або навіть  $R < 1/3$ ) означає, що значна частина ресурсів фізичного каналу витрачається на передачу службових бітів перевірки парності, що неприйнятно для застосувань, які потребують передачі мультимедійних потоків або великих обсягів даних.

По-четверте, виникає проблема «dark silicon» та надмірного тепловиділення. У сучасних системах-на-кристалах (SoC) з високою щільністю транзисторів одночасна робота всіх функціональних блоків на повну потужність обмежується тепловими обмеженнями. Постійне виконання непотрібних складних обчислень призводить до підвищеного тепловиділення, що змушує штучно знижувати тактову частоту інших підсистем, застосовувати дорожчі системи охолодження або знижувати загальну продуктивність пристрою.

Таким чином, фіксоване використання потужних кодів корекції помилок у штатному режимі призводить до систематичного перевитрачання енергії, ресурсів кристала та пропускної здатності каналу, а також створює додаткові ризики для систем реального часу та енергообмежених застосувань. Це обґрунтовує необхідність переходу до адаптивних, контекстно-залежних стратегій кодування, здатних динамічно оптимізувати параметри FEC залежно від актуального стану каналу та системних обмежень.

Водночас, діаметрально протилежний підхід – використання виключно простих кодів (наприклад, кодів Геммінга, CRC або кодів з перевіркою парності) – є енергоефективним, проте не забезпечує належного рівня надійності. Прості коди не спроможні нівелювати вплив сплесків завад (burst errors) або глибоких завмирань сигналу (fading). Це неминуче призводить до втрати пакетів і масової генерації запитів на повторну передачу (ARQ – Automatic Repeat Request), що спричиняє перевантаження мережі повторними запитами і призводить до ще більших витрат енергії на роботу радіопередавача, ніж було заощаджено на етапі декодування.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Питання адаптації параметрів передачі даних до умов каналу перебувають у фокусі уваги наукової спільноти протягом кількох десятиліть. Проте з розвитком напівпровідникових технологій та зміною парадигми обчислень акценти досліджень зміщуються від суто теоретичних телекомунікаційних аспектів до прикладних рішень.

Згідно з фундаментальною теоремою Шеннона, для кожного каналу з певним рівнем шуму існує гранична пропускна здатність, перевищення якої унеможливило б безпомилкову передачу даних. Класичні дослідження в теорії інформації [2, 3] вказують, що наблизення до цієї межі можливе виключно за умови використання кодів з достатньою довжиною блоку та високою алгоритмічною складністю, що також підтверджується дослідженнями розріджених матриць [4]. Однак ранні роботи здебільшого абстрагувалися від енергетичної вартості самого процесу декодування, розглядаючи його як математичну абстракцію і вважаючи обчислювальний ресурс необмеженим. У сучасних умовах мікроелектроніки, коли енергія стає найбільш дефіцитним ресурсом, ігнорування апаратних витрат на кодування є неприпустимим спрощенням.

У системах мобільного стільникового зв'язку широко застосовується концепція адаптивної модуляції та кодування (AMC – Adaptive Modulation and Coding) [5, 6]. Суть цього методу полягає в динамічному виборі схеми модуляції та швидкості кодування на основі інформації про стан каналу, отриманої через зворотний зв'язок від абонентського пристрою.

Сучасні дослідження [7] свідчать, що в мережах 5G-NR та системах MIMO-OFDM [8] використовуються сучасні LDPC-коди зі змінною швидкістю, які обираються відповідно до стандартизованих таблиць MCS (Modulation and Coding Scheme). Водночас більшість таких рішень орієнтовані переважно на максимізацію спектральної ефективності базової станції та загальної пропускної здатності мережі, а не на мінімізацію енергоспоживання кінцевого користувачького пристрою.

Крім того, протокольні стеки стільникових технологій зазвичай є надто ресурсомісткими для простих сенсорних мереж та IoT-пристроїв з батарейним живленням, де критичними є обмеження енергії, обчислювальних ресурсів та затримок.

Значний обсяг сучасних робіт присвячено проблемам адаптації саме в безпроводових сенсорних мережах (WSN) та Інтернеті речей. У роботі [9] автори пропонують схеми для систем з сонячним живленням, де ключовим фактором прийняття рішень визначено не лише якість каналу, а й залишковий заряд батареї. Аналогічні підходи розглядаються для мереж з «найкращими зусиллями» (Best Effort) [10], де вузол може примусово знижувати потужність передавача або спрощувати алгоритм обробки даних, свідомо жертвуючи дальністю зв'язку заради збереження працездатності. Дослідження [11] розглядає комбіновані схеми ACC-RS/LDPC, де показано, що динамічне перемикання між блоковими кодами Ріда-Соломона та ітеративними LDPC дозволяє заощадити до 30 % загальної енергії вузла у кластеризованих мережах. Важливим висновком цих робіт є твердження, що енергія, витрачена на складне локальне декодування, часто є значно меншою за енергію, необхідну для активації радіомодуля та повторної передачі всього пакету.

Окремий напрям досліджень становить поєднання методів прямої корекції помилок (FEC) та протоколів автоматичного запиту на повторення (ARQ), відоме як Hybrid ARQ (HARQ) [12]. У роботах [13, 14] пропонуються надійні багаторівневі схеми, де система спочатку намагається виправити помилки легким кодом, а у випадку невдачі – ініціює запит на повторну передачу пошкодженого фрагмента або додаткових бітів парності. Це ефективний підхід для передачі файлів, але він вносить стохастичну, непередбачувану затримку, що є неприйнятним для систем управління реального часу.

Сучасні публікації [15, 16] розглядають перспективне використання методів машинного навчання та навчання з підкріпленням для керування параметрами кодека та досягнення високої пропускної здатності. Інтелектуальний агент навчається обирати оптимальну надлишковість, аналізуючи статистику помилок та передбачаючи стан каналу на основі історичних даних. Хоча такі методи демонструють високу ефективність адаптації у складних нестаціонарних середовищах, їх апаратна реалізація вимагає значних обчислювальних ресурсів, що на даному етапі розвитку технологій не завжди доступно в бюджетних мікроконтролерах та IoT-чіпах.

Аналіз літератури свідчить про наявність невирішеної проблеми, а саме більшість існуючих рішень зосереджені або на високорівневих мережевих протоколах, ігноруючи апаратні особливості, або на фізичному рівні потужних телекомунікаційних систем, ігноруючи енергетичні обмеження кінцевих пристроїв.

Відсутні комплексні моделі для вбудованих систем середньої продуктивності, які б інтегрували в єдину систему прийняття рішень три критичні різномірні фактори:

- якість каналу;
- енергетичний стан джерела живлення, тобто внутрішній ресурс системи, що визначає стратегію функціонування;
- вимоги застосунку до затримки, а саме зовнішні вимоги бізнес-логіки системи.

Таким чином, постає актуальною проблема пошуку оптимального динамічного балансу між надійністю, швидкодією та енергоефективністю. Вирішення означеної проблеми вбачається у переході від статичних, жорстко детермінованих архітектур до гнучких адаптивних систем, здатних здійснювати моніторинг стану середовища та коригувати внутрішні параметри в режимі реального часу. Розробка комплексних архітектурних моделей таких систем є нагальним завданням сучасної комп'ютерної інженерії, що дозволить створити передумови для розбудови наступного покоління енергоефективних, надійних та автономних обчислювальних мереж.

### Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягає в розробці апаратно-орієнтованої моделі адаптивної системи корекції помилок, спрямованої на оптимізацію енергоспоживання та надійності передачі даних у енергообмежених системах (зокрема, мережах Інтернету речей – IoT та безпроводових сенсорних мережах). Модель повинна забезпечувати динамічний, контекстно-залежний вибір алгоритму кодування (FEC – Forward Error Correction) на основі безперервного моніторингу комбінації параметрів та внутрішнього стану обчислювальної системи.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Узагальнена структурна схема адаптивної системи кодування та модуляції з зворотним зв'язком за станом каналу наведена на рисунку 1. Вона включає три основні складові: передавач, фізичний канал передачі даних та приймач. На відміну від традиційних систем з фіксованою послідовністю перетворень даних, запропонована модель представляє адаптивну систему як сукупність кількох паралельних або реконфігурованих апаратних блоків, активація та конфігурація яких здійснюється динамічно залежно від поточного стану каналу. Це забезпечує можливість зміни топології обчислювального конвеєра в реальному часі.

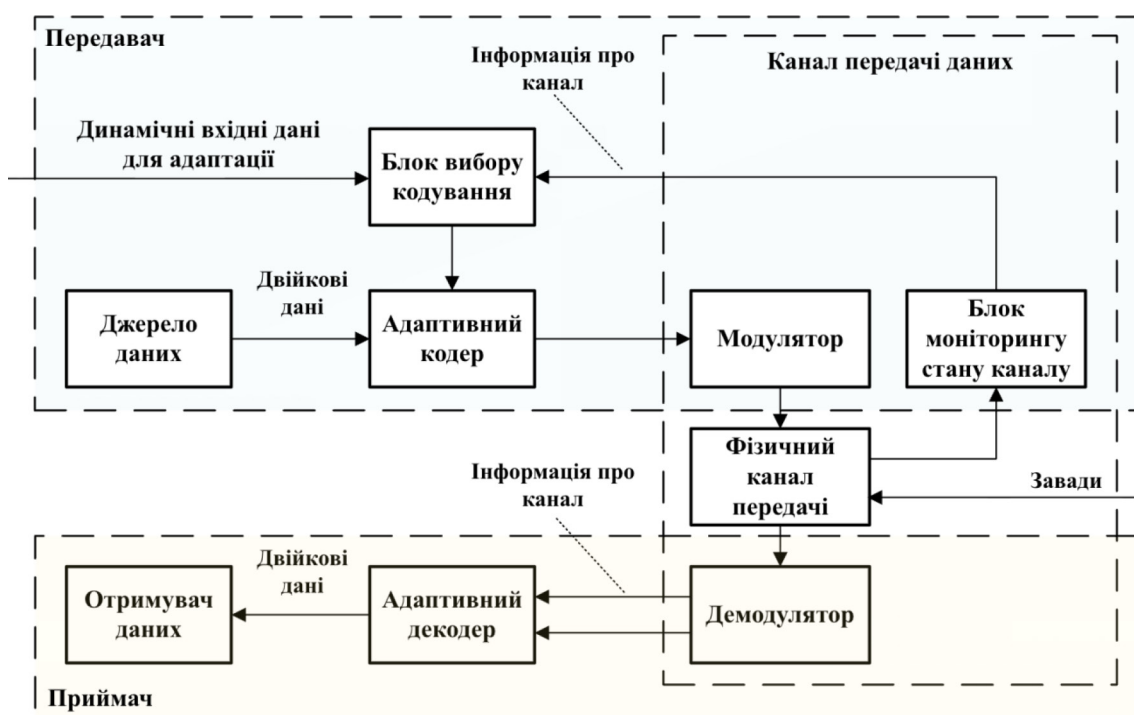


Рис. 1. Структурна схема адаптивної системи корекції помилок

На відміну від класичних адаптивних систем кодування та модуляції, де оцінка стану каналу здійснюється переважно на стороні приймача з подальшим зворотним зв'язком, запропонована модель реалізує гібридний підхід з пріоритетом локального моніторингу на передавачі.

Запропонована модель адаптивної системи на верхньому рівні абстракції представлена як інтеграція трьох основних функціональних доменів: блоку моніторингу стану каналу, блоку вибору кодування та адаптивного кодера. Блок моніторингу стану каналу розташований на стороні передавача і виконує функцію «сенсора» радіосередовища. Він здійснює пряму оцінку якості каналу на основі локальних вимірювань (наприклад, рівня шуму або інтерференції під час пауз у передачі, аналізу пілот-сигналів чи інших доступних метрик), формує об'єктивну оцінку параметрів каналу (зокрема, відношення сигнал/шум – SNR) та передає цю інформацію до блоку прийняття рішень. Такий підхід дозволяє частково або повністю замінити традиційний зворотний канал CSI, зменшуючи затримки та надлишковість у системах з обмеженими ресурсами. Блок вибору кодування є центральним елементом системи на стороні передавача. Він агрегує дані з кількох джерел:

- інформацію про стан каналу (від блоку моніторингу);
- зовнішні параметри обмежень та вимог, зокрема рівень заряду батареї, політики QoS та допустимі значення затримки (від блоку вхідних параметрів адаптації).

На основі агрегованих даних блок реалізує алгоритм прийняття рішень і формує керуючі сигнали для адаптивного кодера, забезпечуючи динамічну зміну параметрів кодування, модуляції та, за потреби, топології обчислювального конвеєра.

Блок адаптивного кодування у запропонованій моделі виконує роль виконавчого механізму, який безпосередньо обробляє вхідний потік двійкових даних від джерела. Залежно від керуючих сигналів, сформованих блоком вибору кодування, він динамічно застосовує один із доступних алгоритмів кодування: (наприклад, LDPC, Hamming або Vurass). Після застосування обраного алгоритму кодер додає службові маркери (наприклад, індикатори MCS, довжини блоку, типу кодування) у потік даних перед передачею на модулятор. Це забезпечує сумісність з приймачем, дозволяючи йому правильно налаштувати декодер і уникнути помилок синхронізації режимів. Така архітектура адаптивного кодера дозволяє ефективно балансувати між пропускну здатністю, надійністю та енергоспоживанням, враховуючи не лише стан каналу, але й зовнішні обмеження (QoS, затримка, рівень заряду батареї).

Функціонування запропонованої моделі адаптивної системи модуляції та кодування описується як перехід між станами керуючого скінченного автомата (Finite State Machine, FSM). Такий підхід забезпечує чітку, детерміновану та ефективну реалізацію адаптації в реальному часі, оскільки FSM дозволяє моделювати поведінку системи як послідовність дискретних станів з чітко визначеними умовами переходу та діями в кожному стані. Модель передбачає щонайменше три базові стратегії (режими роботи), вибір яких залежить від поточної комбінації вхідних векторів стану. Ці вектори включають:

- оцінку стану каналу (наприклад, SNR або еквівалентні метрики, отримані від блоку моніторингу);
- зовнішні параметри обмежень та вимог (рівень заряду батареї, політики QoS, допустимі значення затримки).

Таблиця 1

### Режими роботи адаптивної системи

Режим	Характеристика каналу	Енергетичний стан	Використаний алгоритм	Стратегічний пріоритет
Енергозберігаючий	Низький рівень шуму (Високий SNR, >10dB)	Нормальний або Низький	Відсутнє кодування або простий блоковий код (Геммінг, BCH)	Мінімізація апаратної затримки та динамічного енергоспоживання
Захищений	Високий рівень шуму (Низький SNR, <5dB)	Нормальний	Потужний ітеративний код (LDPC, Turbo, Polar)	Максимізація надійності (BER), гарантія доставки даних
Критичний	Будь-який (навіть поганий)	Критично низький (<10 %)	Простий код або зниження швидкості передачі (Repetition Code)	Продовження часу функціонування вузла будь-якою ціною

Функціонування запропонованої адаптивної системи модуляції та кодування (AMC) реалізується через перехід між станами скінченного керуючого автомата (FSM), де кожен стан відповідає одній з трьох базових стратегій (режимів). Вибір режиму визначається комбінацією вхідних параметрів: оцінкою стану каналу (SNR або еквівалентні метрики) та системними обмеженнями (рівень заряду батареї, політики QoS, вимоги до затримки). Для уникнення частих непотрібних перемикань (ефекту «ping-pong») у порогові значення введено гістерезис – різні пороги для переходу вгору та вниз.

Режим «Енергозберігаючий» (High Throughput / Low Power Mode) – застосовується за сприятливих умов каналу (високий SNR, низький рівень шуму та інтерференції). Мета – максимізувати швидкість передачі даних і мінімізувати накладні витрати на кодування. Використовується режим Vurass (без кодування) або легкий код Геммінга (Hamming code), здатний швидко виправляти поодинокі помилки. Ключовою архітектурною особливістю є застосування Clock Gating – техніки динамічного відключення тактового сигналу від складних блоків кодера та декодера (наприклад, ітеративних декодерів LDPC або Turbo). Це призводить до припинення перемикання транзисторів у логічних елементах, знижуючи динамічне енергоспоживання цифрового ядра майже до рівня статичних витоків (leakage current). У результаті досягається суттєве зменшення середнього енергоспоживання пристрою без втрати пропускну здатності в добрих каналних умовах.

Режим «Захищений» (High Reliability Mode) – активується при погіршенні стану каналу, коли рівень шуму перевищує встановлений поріг (наприклад, SNR падає нижче певного значення). Блок вибору кодування формує сигнал на ввімкнення живлення та тактування потужного кодека (наприклад, LDPC з низькою швидкістю коду). Це призводить до короткочасного зростання енергоспоживання цифрової частини та збільшення затримки на обробку (через ітерації кодування та декодування). Стратегія ґрунтується на принципі доцільної одноразової витрати енергії на складну обчислювальну обробку для гарантованої доставки пакету, на протигагу багаторазовим повторним передачам простого коду через радіоканал (що споживає значно більше енергії на PA – power amplifier – та призводить до вищого загального витрачання батареї). Таким чином, режим оптимізує баланс між надійністю та енергоефективністю.

Режим «Критичний» (Energy Survival / Ultra-Low Power Mode) – активується при падінні рівня заряду батареї нижче критичного порогу (наприклад, <10–20 %). Пріоритет кардинально змінюється на збереження працездатності вузла якомога довше. Система програмно блокує перехід у енергоємні режими (навіть за поганої якості каналу), переходячи на прості коди повторення (repetition codes), знижену швидкість модуляції або мінімальне

кодування. Це свідомий компроміс: пропускна здатність суттєво знижується, затримки зростають, але вузол залишається на зв'язку максимально тривалий час, уникаючи повного розряду та втрати функціональності.

Запровадження гістерезису в порогові значення перемикання є важливим аспектом алгоритму: різні пороги для входу та виходу з режиму запобігають частим реконфігураціям, які самі по собі витрачають енергію та ресурси на перехідні процеси (наприклад, перемикання живлення, ініціалізацію блоків, оновлення конвеєра).

### Особливості апаратної реалізації

Перспективною є практична імплементація запропонованої моделі адаптивної системи модуляції та кодування (АМС) на базі сучасних програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС/FPGA) або енергоефективних систем-на-кристалі (SoC). FPGA виступають оптимальною платформою для таких задач завдяки підтримці паралельної обробки даних, динамічній реконфігурації в реальному часі та вбудованим механізмам низькорівневого управління тактуванням і живленням.

На рівні RTL-проекування критично важливим аспектом визначено використання низькорівневих технік управління тактовим сигналом, зокрема Clock Gating. Це дозволяє «заморожувати» стан неактивних IP-ядер кодеків у передавачі та приймачі без втрати контексту даних, знижуючи динамічну потужність споживання до мінімуму (практично до рівня статичних витоків). Такий підхід особливо ефективний у режимах «Енергозберігаючий» та «Критичний», де значна частина обчислювального конвеєра може бути відключена залежно від стану каналу та рівня заряду батареї.

Блок управління (керуючий кінцевий автомат – FSM) пропонується реалізовувати як компактний апаратний модуль безпосередньо на кристалі FPGA передавача. За попередніми оцінками, його ресурсоемність (логічні елементи, регістри) буде незначною порівняно з загальним обсягом дизайну, але забезпечить детерміновану, передбачувану поведінку системи з мінімальними накладними витратами на перемикання.

Для надійної синхронізації режимів роботи передавача та приймача передбачено вставку спеціальних полів (індикаторів MCS – Modulation and Coding Scheme) у фіксовану частину заголовка пакету. Ці поля захищаються найбільш надійним кодом з фіксованими (консервативними) параметрами, що гарантує їх успішне декодування навіть у найгірших умовах каналу. Завдяки цьому приймач завжди може правильно налаштувати свій адаптивний тракт обробки даних, уникавши помилок десинхронізації режимів. Такий механізм сигналізації є стандартним у сучасних системах (наприклад, у 5G NR та LTE), але в запропонованій моделі він інтегрується з енергозберігаючою логікою та гібридною оцінкою каналу.

### Висновки

У роботі запропоновано апаратно-орієнтовану модель адаптивної системи корекції помилок (з елементами адаптивної модуляції та кодування), яка є ключовим фактором підвищення енергоефективності, надійності та життєздатності наступного покоління розподілених комп'ютерних систем і мереж Інтернету речей (IoT).

Запропонована модель відрізняється від існуючих рішень завдяки інтеграції в єдиний замкнений контур управління різномірних параметрів: фізичних характеристик каналу зв'язку (SNR, рівень завад), внутрішнього енергетичного стану джерела живлення (рівень заряду батареї) та вимог прикладного рівня до затримки й QoS. Такий підхід забезпечує контекстно-залежне прийняття рішень, що дозволяє системі адаптуватися до реальних умов експлуатації набагато ефективніше, ніж класичні фіксовані або частково адаптивні схеми.

Адаптивна зміна кодека (від Bypass/легкого Hamming до потужних LDPC або Repetition Codes) дає змогу підтримувати цільовий рівень BER навіть у жорстких умовах сильних завад, коли фіксовані прості коди призвели б до повного розриву з'єднання, а фіксовані складні коди працювали б неефективно (з надмірними обчислювальними та енергетичними витратами) при нормальних умовах каналу.

Доведено, що застосування гібридної стратегії перемикання режимів (з урахуванням гістерезису, Clock Gating та енергетичних пріоритетів) дозволяє суттєво знизити середнє енергоспоживання вузла IoT, подовжуючи термін служби батарей без критичної втрати пропускної здатності чи надійності. Система ефективно уникає крайнощів: надмірного споживання в «захисних» режимах або повної відмови від передачі в «критичних» умовах.

Розроблена архітектура є модульною та масштабованою: її можна розширювати шляхом інтеграції нових класів алгоритмів кодування (наприклад, Polar Codes, Rate-compatible LDPC), впровадження елементів машинного навчання для предиктивного оцінювання стану каналу або адаптації під конкретні стандарти (NB-IoT, LoRaWAN, Zigbee тощо). Реалізація на базі FPGA/SoC з низькорівневим Clock Gating робить модель придатною для енергообмежених пристроїв.

Впровадження подібних адаптивних апаратних модулів є необхідним еволюційним кроком для створення енергонезалежних, самоорганізованих та високонадійних сенсорних мереж, здатних функціонувати тривалий час без обслуговування у віддалених регіонах, промислових об'єктах, моніторингу критичної інфраструктури чи екологічних системах.

## Список використаної літератури

1. MCE (ITU). Global Connectivity Report 2022. Женева: Міжнародний Союз Телекомунікацій, 2022. URL: <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/global-connectivity-report-2022/> (дата звернення: 02.02.2026)
2. Gallager R. Low-density parity-check codes. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1962. Vol. 8, no. 1. P. 21–28. URL: <https://doi.org/10.1109/tit.1962.1057683>
3. Soon-Ghee Chua, Goldsmith A. Adaptive coded modulation for fading channels. *ICC'97 – International Conference on Communications*, Montreal, Que., Canada. URL: <https://doi.org/10.1109/icc.1997.595036>
4. MacKay D. J. C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices. *IEEE International Symposium on Information Theory*, Ulm, Germany. URL: <https://doi.org/10.1109/isit.1997.613028>
5. Alhmiedat T. An Adaptive Energy-Efficient Data Collection System for ZigBee Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2015. Vol. 11, no. 12. P. 734937. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/734937>
6. Goldsmith A. Adaptive modulation and coding for fading channels. *1999 IEEE Information Theory and Communications Workshop*, Kruger National Park, South Africa. URL: <https://doi.org/10.1109/itcom.1999.781396>
7. Migabo E., Djouani K., Kurien A. An Energy-Efficient and Adaptive Channel Coding Approach for Narrowband Internet of Things (NB-IoT) Systems. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 12. P. 3465. URL: <https://doi.org/10.3390/s20123465>
8. Introduction to OFDM. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB®*. Chichester, UK, 2010. P. 111–151. URL: <https://doi.org/10.1002/9780470825631.ch4> (дата звернення: 09.02.2026).
9. Adaptive Forward Error Correction Scheme to Improve Data Reliability in Solar-Powered Wireless Sensor Networks / J. Jung et al. *2016 International Conference on Information Science and Security (ICISS)*, Pattaya, Thailand, 19–22 December 2016. 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/icissec.2016.7885838>
10. Adaptive forward error correction for best effort Wireless Sensor Networks / K. Yu et al. *ICC 2012–2012 IEEE International Conference on Communications*, Ottawa, ON, Canada, 10–15 June 2012. 2012. URL: <https://doi.org/10.1109/icc.2012.6364798>
11. Daanouni I., Baghdad A. ACC-LDPC and ACC-RS/LDPC Schemes for Reliable and Energy-Efficient Multi-hop Wireless Sensor Network. *International Journal of Wireless Information Networks*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10776-023-00600-2>
12. On Hybrid ARQ adaptive Forward Error Correction in wireless sensor networks / O. Eriksson et al. *IECON 2011 – 37th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Melbourne, Vic, Australia, 7–10 November 2011. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/iecon.2011.6119788>
13. Ez-zazi I., Arioua M., El Oualkadi A. On the design of coding framework for energy efficient and reliable multi-hop sensor networks. *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 109. P. 537–544. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.334>
14. Kim K., Lee J., Lee J. Energy Efficient and Reliable ARQ Scheme ( $E^2$  R-ACK) for Mission Critical M2M/IoT Services. *Wireless Personal Communications*. 2014. Vol. 78, no. 4. P. 1917–1933. URL: <https://doi.org/10.1007/s11277-014-2053-z>
15. RL-AFEC / K. Chen et al. *MMSys '22: 13th ACM Multimedia Systems Conference*, Athlone Ireland. New York, NY, USA, 2022. URL: <https://doi.org/10.1145/3524273.3528184>
16. Sharif A., Potdar V. M., Ahmad R. F. Adaptive Channel Coding and Modulation Scheme Selection for Achieving High Throughput in Wireless Networks. *2010 IEEE 24th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, Perth, Australia, 20–23 April 2010. 2010. URL: <https://doi.org/10.1109/waina.2010.197>

## References

1. International Telecommunication Union (2022), *Global Connectivity Report 2022*, ITU, Geneva, Switzerland, available at: <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/global-connectivity-report-2022/> (last accessed: 02.02.2026).
2. Gallager, R. (1962). Low-density parity-check codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, 8(1), 21–28. <https://doi.org/10.1109/tit.1962.1057683>
3. Soon-Ghee Chua & Goldsmith, A. (1997). Adaptive coded modulation for fading channels. *Proceedings of ICC'97 – International Conference on Communications*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icc.1997.595036>
4. MacKay, D. J. C. (1997). Good error-correcting codes based on very sparse matrices. *Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/isit.1997.613028>
5. Alhmiedat, T. (2015). An Adaptive Energy-Efficient Data Collection System for ZigBee Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(12). <https://doi.org/10.1155/2015/734937>
6. Goldsmith, A. (1999). Adaptive modulation and coding for fading channels. *IEEE Information Theory and Communications Workshop*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/itcom.1999.781396>
7. Migabo, E., Djouani, K., & Kurien, A. (2020). An Energy-Efficient and Adaptive Channel Coding Approach for Narrowband Internet of Things (NB-IoT) Systems. *Sensors*, 20(12), 3465. <https://doi.org/10.3390/s20123465>

8. Introduction to OFDM. (2010). У *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB®* (р. 111–151). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470825631.ch4>
9. Jung, J., Kang, M., Yoon, I., & Noh, D. K. (2016). Adaptive Forward Error Correction Scheme to Improve Data Reliability in Solar-Powered Wireless Sensor Networks. У *2016 International Conference on Information Science and Security (ICISS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icissec.2016.7885838>
10. Yu, K., Barac, F., Gidlund, M., & Akerberg, J. (2012). Adaptive forward error correction for best effort Wireless Sensor Networks. У *ICC 2012–2012 IEEE International Conference on Communications*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icc.2012.6364798>
11. Daanoune, I., & Baghdad, A. (2023). ACC-LDPC and ACC-RS/LDPC Schemes for Reliable and Energy-Efficient Multi-hop Wireless Sensor Network. *International Journal of Wireless Information Networks*. <https://doi.org/10.1007/s10776-023-00600-2>
12. Eriksson, O., Bjornemo, E., Ahlen, A., & Gidlund, M. (2011). On Hybrid ARQ adaptive Forward Error Correction in wireless sensor networks. У *IECON 2011–37th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iecon.2011.6119788>
13. Ez-zazi, I., Arioua, M., & El Oualkadi, A. (2017). On the design of coding framework for energy efficient and reliable multi-hop sensor networks. *Procedia Computer Science*, 109, 537–544. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.334>
14. Kim, K., Lee, J., & Lee, J. (2014). Energy Efficient and Reliable ARQ Scheme ( $E^2$  R-ACK) for Mission Critical M2M/IoT Services. *Wireless Personal Communications*, 78(4), 1917–1933. <https://doi.org/10.1007/s11277-014-2053-z>
15. Chen, K., Wang, H., Fang, S., Li, X., Ye, M., & Chao, H. J. (2022). RL-AFEC. *Proceedings of MMSys '22: 13th ACM Multimedia Systems Conference*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3524273.3528184>
16. Sharif, A., Potdar, V. M., & Ahmad, R. F. (2010). Adaptive Channel Coding and Modulation Scheme Selection for Achieving High Throughput in Wireless Networks. *Proceedings of 2010 IEEE 24th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/waina.2010.197>

Дата першого надходження статті до видання: 14.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026