

УДК 004.7

DOI: 10.31673/2786-8362.2025.025370

Дакова Л.В., к.т.н.; Аскеров М.Г., к.т.н.;

Даков С.Ю., к.т.н.; Волошин В.О.;

Дунаєвський К.В.

ПЛАНУВАННЯ ЧАСТОТНИХ РЕСУРСІВ І ВІДСТАНЕЙ У ВИСОКОЩІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ WI-FI

Dakova L.V., Askerov M.G., Dakov S.Yu., Voloshyn V.O., Dunaievskiy K.V. Planning Frequency Resources and Distances in High-Density Wi-Fi Networks. The development of nanonetworks is driven by their wide range of applications: nano-devices interconnected into a single system form a “transport artery” for data transmission, yet miniature sensors face strict constraints on energy consumption, computational capability, and memory capacity. This necessitates energy-efficient routing approaches in electromagnetic nanonetworks. The paper provides a consolidated review of contemporary methods for delivering packets to their destination based on systematic collection, analysis, and synthesis of research results from recent years. A comparative study of key forwarding schemes is presented with an assessment of their advantages and limitations, and the most promising solutions are outlined. The findings enable a well-grounded selection of a forwarding method aligned with the requirements of a specific nanonetwork.

Keywords: Internet of Nano-Things, nanonetwork, data transmission, routing, forwarding scheme

Дакова Л.В., Аскеров М.Г., Даков С.Ю., Волошин В.О., Дунаєвський К.В. Планування частотних ресурсів і відстаней у високощільних мережах Wi-Fi. Розвиток наномереж зумовлений широким спектром їхніх застосувань: нанопристрої, з'єднані в єдину систему, утворюють «транспортну артерію» передавання даних, однак мініатюрні сенсори мають жорсткі обмеження за енергоспоживанням, обчислювальною спроможністю та обсягами пам'яті. Це висуває вимогу до енергоефективних підходів маршрутизації в електромагнітних наномережах. У роботі подано узагальнювальний огляд сучасних методів доставлення пакетів до адресата на основі систематичного збирання, аналізу та синтезу результатів досліджень останніх років. Проведено порівняльне вивчення ключових схем переадресації з оцінкою їхніх переваг і обмежень та окреслено найперспективніші рішення. Отримані висновки дають змогу обґрунтовано обирати метод переадресації відповідно до вимог конкретної наномережі.

Ключові слова: Інтернет наноречей, наномережа, передача даних, маршрутизація, схема переадресації

Вступ

Ймовірно, у найближчі роки ми побачимо широке розповсюдження нанопристроїв – інтегрованих систем із характерними розмірами від одиниць до кількох сотень нанометрів. Їхня ключова особливість полягає в тому, що через мініатюрність вони здатні виконувати лише прості операції, які не потребують значних обчислювальних ресурсів, і зберігати обмежені обсяги даних. Ці обмеження, однак, можуть бути істотно пом'якшені завдяки побудові мереж із введенням спеціалізованих вузлів-маршрутизаторів, що координують взаємодію інших нанопристроїв, агрегують інформацію та керують обміном короткими службовими повідомленнями.

Попри активні дослідження, єдиної думки щодо найпридатнішого способу зв'язку між нанопристроями досі немає. Сьогодні розглядають чотири базові підходи: наномеханічний, акустичний, молекулярний та електромагнітний. У цій роботі фокус зроблено саме на електромагнітній взаємодії, коли передавання та приймання даних відбувається за допомогою електромагнітного випромінювання. Прориви в молекулярній та вуглецевій електроніці дали змогу створити низку нанорозмірних компонентів - антен, приймачів-передавачів, сенсорних модулів, мікроджерел живлення та енергоощадних сховищ даних. Очікується, що такі елементи ґрунтуватимуться на інноваційних наноматеріалах, зокрема графені, що забезпечує сприятливі електрофізичні властивості для формування компактних радіочастотних підсистем.

Аналіз останніх досліджень. В [1] описується підхід TEFoward і показано, що за наявності кількох скоординованих шлюзів цей підхід забезпечує енергоефективне спрямоване доставлення з контрольованим “часом життя” пакета, перевершуючи TEFlood, S-Flooding та

R-Forward і наближаючись до «optimal forwarding» за витратами енергії. В [2] автори зіставляють флудингові та спрямовані підходи (в т.ч. TTL-обмежені) за метриками енергоспоживання, затримки та масштабованості, що допомагає обґрунтувати вибір між TE Flood/TE Forward, R-Forward, S-Flooding і «optimal forwarding». В [3] продемонстровано методику й параметри симуляцій для TE Forward як “backhaul”-механізму, безпосередньо порівняно його з TE Flood, S-Flooding, R-Forward і оптимальною пересилкою, показуючи виграш TE Forward у динамічних каналах за близьких до оптимуму енерговитрат.

Постановка завдання. Систематизувати і проаналізувати наукові результати останніх років щодо способів доставлення даних в електромагнітних наномережах та узгодити терміни і припущення, що лежать в основі кожної схеми. Визначити критерії оцінювання, серед яких енергоспоживання, затримка, розмір і щільність мережі, а також рівень втрат пакетів, і привести їх до порівнюваного вигляду. Провести моделювання роботи мережі для розглянутих алгоритмів, зіставити отримані показники та виділити сильні і слабкі сторони кожного підходу. На основі результатів побудувати рекомендації щодо вибору методу переадресації залежно від вимог до конкретної наномережі та умов каналу. Підсумувати висновки про алгоритм, що демонструє найменше енергоспоживання, і окреслити напрями подальших досліджень для підвищення ефективності передачі даних.

Метою роботи є формування узагальненого огляду і порівняльного аналізу методів переадресації в електромагнітних наномережах з акцентом на енергоефективність і придатність до різних сценаріїв застосування. Визначити, яка схема забезпечує найкращий компроміс між енергоспоживанням, затримкою, масштабованістю та допустимими втратами пакетів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Електромагнітна сенсорна наномережа зазвичай включає три класи вузлів. По-перше, навузли це прості, малопотужні пристрої з мінімальними обчислювальними можливостями та невеликими буферами, здатні фіксувати параметри середовища і передавати виміряні дані; серед них вирізняють наносенсори (збір інформації) та наноактуатори (цільовий вплив на середовище). По-друге, наномаршрутизатори складніші від навузлів, вони агрегують трафік, виконують попередню обробку, приймають локальні рішення про маршрутизацію та використовують короткі керуючі повідомлення для координації поведінки мережі. По-третє, наномережеві шлюзи це найпотужніші вузли, які з’єднують наносвіт із мікро або макрорівнем, забезпечуючи інтеграцію з зовнішніми системами збору, аналізу та управління [4].

Інтеграція наномереж із сучасними мережами загального користування розширює сферу застосувань (від біомедичних імплантів і точного моніторингу довкілля до промислових мікросистем контролю), але водночас породжує низку викликів. Оскільки використання замінних елементів живлення в нанопристроях практично нереалістичне, перевага надається енергозбиранню з оточення (вібрації, теплові градієнти, світло, радіочастотне випромінювання). Через малі габарити отримувана потужність обмежена, тому енергоефективність протоколів це центральна вимога до архітектури наномереж. Кожна операція передавання, приймання чи обробки пакета має ціну у вигляді витраченої енергії, а отже протоколи мають мінімізувати кількість транзакцій, дублювання трафіку та непотрібні повтори.

Крім енергетичних обмежень, у наномережах актуальні й класичні проблеми мережування: дублювання пакетів, «петлі» маршрутизації, локальні перевантаження та нестабільність маршрутів. Якщо в традиційних мережах це здебільшого знижує ефективність використання ресурсів, то в наномасштабі наслідки критичні: зайві ретрансляції швидко виснажують вузли і можуть призводити до деградації чи навіть відмови всієї мережі. Ситуацію ускладнює динамічність топології збору даних (перемикання ролей вузлів, зміни умов поширення, нерівномірність енергозапасів), що вимагає адаптивних, легких за накладними витратами схем передавання й самоорганізації.

У цьому контексті стаття подає огляд основних способів доставлення даних у електромагнітних наномережах, приділяючи увагу компромісам між коефіцієнтом доставлення, затримкою, масштабованістю та енергоспоживанням. Розглядаються такі підходи, як *optimal forwarding*, *Selective Flooding (S-Flooding)*, *Random Forwarding (R-Forward)*, *TTL-based Efficient Flooding (TEFlooding)* та *TTL-based Efficient Forward (TEForward)*. Їхній порівняльний аналіз дає змогу окреслити сценарії застосування кожного методу, визначити умови, за яких той чи інший механізм є доцільним, і сформулювати підґрунтя для подальшого вдосконалення енергоефективних протоколів маршрутизації на нанорівні.

Алгоритм *Optimal forwarding*. Алгоритм оптимальної пересилки виходить із того, що роботою наномережі керує наношлюз, а збір даних відбувається за умов динамічної зміни каналу (федінг, перешкоди, поглинання на ТГц-частотах). Ідея полягає в тому, щоб мінімізувати енергоспоживання, доставляючи пакети до шлюзу найенергоефективнішим маршрутом. Отже, головне завдання - оперативно знайти саме цей шлях. Для цього кожний нановузол формує уявлення топології у вигляді зваженого графа, де вершини це пристрої та шлюзи, а ребра і їхні ваги визначаються координатами вузлів, оцінкою відстанню/якістю лінки й вартістю передачі. У реальному часі оцінюється сумарна енергія, потрібна для перекидання даних на наступний вузол, з урахуванням можливих повторів через помилки, і далі виконується вибір маршруту в напрямку найменшої «ціни», зазвичай за допомогою алгоритму Дейкстри. Таке планування дає найкращий результат, коли канал відносно стабільний або хоча б передбачуваний, а оцінки лінків (наприклад, з RSSI/BER чи простих моделей втрат) достатньо точні [5].

Водночас підтримка такого «глобального» уявлення про мережу сама по собі коштовна для наномасштабних пристроїв: зростають витрати на обчислення, пам'ять і службову сигналізацію, що швидко стає неприпустимим. Тому на практиці оптимальну пересилку часто спрощують: обчислення зсувають у бік наношлюзу (він агрегує метрики й розсилає компактні таблиці), обмежують радіус пошуку найкращого наступника до сусідньої околиці, вводять кластеризацію (маршрути вираховують на рівні «голів» кластерів), а оновлення виконують подійно, лише коли істотно змінюється якість лінки або енергозапас вузла. Додають і «справедливість за енергією», щоб уникати виснаження одиничних ретрансляторів, а також кешують маршрути з локальним швидким ремонтом при відмовах. У підсумку *Optimal Forwarding* зберігає свій головний сенс, прямувати найенергоощаднішим шляхом до шлюзу, але реалізується через низку практичних наближень, які зменшують накладні витрати й роблять метод придатним для реальних електромагнітних наномереж.

Алгоритм *S-Flooding*. *Selective Flooding (S-Flooding)* запропоновано як відповідь на втрати пропускну здатності, що виникають через неконтрольоване дублювання трафіку під час класичного затоплення мережі. Ідея полягає в керованому широкомовленні: коли нановузол отримує повідомлення, він ретранслює його всім сусідам у своєму радіусі дії, але робить це лише один раз для кожної унікальної комбінації «ідентифікатор пакета – ідентифікатор відправника». Завдяки короткому кешу нещодавно бачених пар вузол відкидає повтори і не надсилає пакет назад тому, хто його щойно передав. Додатковим обмеженням є не ретранслювати в бік, протилежний пункту призначення (наприклад, до шлюзу/збірної точки) що «звужує воронку» розповсюдження і зменшує кількість зайвих гілок поширення. У підсумку мережа зберігає стійкість до втрат лінків і локальних збоїв, але з куди нижчим рівнем марного трафіку, ніж за наївного *flooding* [6].

Практична реалізація *S-Flooding* спирається на дуже легкі механізми: унікалізацію пакетів (через комбінацію ID пакета та ID джерела), невеликий буфер для «нещодавніх» ідентифікаторів та просте правило спрямованості «лише у бік призначення». Ці вимоги добре вписуються в обмеження на вузли за пам'яттю й обчисленнями. Часто додають дрібні вдосконалення: короткий TTL, аби обмежити дальність затоплення; випадкову мікрозатримку перед ретрансляцією, щоб зменшити ймовірність одночасних передач; прості показники наближення до цілі (градієнт за відстанню/рівнем сигналу до шлюзу), які допомагають точніше відсікати «зайві» напрямки. Завдяки цьому *S-Flooding* дає прогнозовану доставку в

динамічних топологіях без складних таблиць маршрутизації, що корисно там, де стан каналу швидко змінюється і підтримувати глобальну картину мережі надто дорого.

Водночас масштабування лишається головним слабким місцем методу. У великих або щільних наномережах навіть вибіркове затоплення породжує значну кількість одночасних передач, колізій і повторних спроб, що збільшує навантаження на канал і, як наслідок, енергоспоживання всіх задіяних вузлів. У крайніх випадках зростають затримки та зменшується реальна пропускна здатність. Тому S-Flooding зазвичай застосовують у поєднанні з додатковими обмеженнями (жорсткіший TTL, адаптивна щільність ретрансляцій) або в гібридних схемах, де на верхніх рівнях мережі діють більш «спрямовані» алгоритми, а S-Flooding використовується як надійний базовий механізм поширення в локальній околиці чи під час відмов і зміни топології. Такий підхід зберігає основну перевагу, а саме мінімізацію втрат пропускної здатності через дублювання і водночас пом'якшує енергетичні витрати та колізії, притаманні великим розгортанням.

Алгоритм R-Forward. R-Forward ґрунтується на випадковому виборі наступного ретранслятора серед сусідніх наномаршрутизаторів у радіусі дії вузла. Перед передаванням нановузол виконує коротке виявлення сусідів і переконується, що поблизу є принаймні один придатний кандидат. Якщо таких кілька, вибір робиться рівномірно, після чого здійснюється стрибок. Коли поруч немає жодного ідентифікованого наномаршрутизатора, пакет утримується у черзі джерела до моменту зміни топології або поліпшення умов каналу, після чого спробу повторюють. Таким чином R-Forward не потребує повної карти мережі і зберігає працездатність у середовищах зі швидкими флуктуаціями зв'язності [7].

Щоб запобігти зациклень, кожен вузол підтримує невеликий кеш нещодавніх передач, де для кожного повідомлення зберігається пара з ідентифікатора пакета та обраного наступного переходу. Якщо той самий пакет знову опиняється на вузлі з пропозицією рухатися туди, куди його вже скеровували, ретрансляція блокується або обирається інший сусід. Доречно додавати короткий ліміт кількості стрибків або час життя пакета. Це скорочує імовірність повторних обходів і прибирає надмірні дублювання, зберігаючи стабільний рівень енергоспоживання.

На практиці базову випадковість часто поєднують з легкими евристиками. Можна вводити малу випадкову затримку перед відправленням, щоб розвести у часі одночасні передачі сусідів і знизити частоту колізій. Якщо якість зв'язку з різними сусідами помітно різниться, корисним стає зважений вибір, коли кандидати з кращим прийомом мають трохи вищу імовірність бути обраними, але випадковий компонент зберігається для розподілу навантаження. Переваги R-Forward проявляються у простоті реалізації, відсутності дорогих таблиць маршрутизації та стійкості до змін топології. Обмеження теж очевидні. У дуже щільних розгортаннях можливе зростання числа колізій і повторних спроб, тому доцільно налаштовувати короткі обмеження на стрибки, застосовувати механізми старіння записів у кеші та контролювати черги. За таких умов метод дає передбачувану енергетичну поведінку і забезпечує прийнятну доставку в умовах невизначеного або нестабільного каналу.

Алгоритм TEFlood. TEFlood описує поширення повідомлень із чітким обмеженням часу життя пакета або кількості стрибків. Після вичерпання цього ліміту пакет видаляється з мережі, що природно стримує розростання трафіку. Алгоритм покладається на періодичні маяки від вузлів і шлюзів. За цими короткими широкомовними повідомленнями кожен наномаршрутизатор оцінює наближеність до пункту призначення, зазвичай до наношлюзу, та формує локальний градієнт наближення. Далі працює просте правило спрямованої передачі. Вузол ретранслює пакет тільки тим сусідам, які розташовані ближче до мети, ніж попередній відправник. Якщо пакет потрапляє на вузол, що опинився далі від шлюзу, ніж вузол джерела цього стрибка, ретрансляція припиняється. Таким чином трафік природно стискається у напрямку до цілі, а дублювання та зворотні гілки відсікаються [8].

Час життя пакета може бути заданий як лічильник стрибків або як часовий інтервал. Початкове значення доцільно ініціалізувати з урахуванням оціненої відстані до шлюзу, яку вузол отримує з маяків, а також стану каналу і щільності сусідів. На практиці корисно коригувати ліміт у бік зменшення під час перевантаження і у бік збільшення у розріджених

ділянках мережі. Щоб зменшити колізії, перед передаванням додають невелику випадкову затримку, а повтори придушують за допомогою кешу нещодавно бачених ідентифікаторів пакетів. У результаті мережа уникає нескінченного «гуляння» одного і того самого повідомлення, а енергоспоживання зменшується завдяки скороченню непотрібних передач.

TEFlood добре працює у динамічних умовах, де підтримувати повну карту топології занадто дорого. Маяки дають достатньо свіжу, хоч і грубу, картину відносних відстаней, тому рішення приймаються локально і швидко. Водночас є компроміси. Маяки потребують власних витрат енергії, а занадто рідкісні оновлення призводять до застарілих оцінок, через що пакети інколи відсікаються зайве рано. У розріджених ділянках може виникати локальний максимум, коли жоден сусід формально не ближчий до мети. У таких випадках застосовують коротке утримання пакета з повторною спробою після оновлення маяків або невеликий обхід зі зниженим пріоритетом. Додаткового виграшу дає поєднання з режимами сну і пробудження навузлів та агрегацією вимірювань у проміжних точках, що ще більше зменшує кількість передач.

У підсумку TEFlood поєднує простоту локальних правил із суворим контролем часу життя пакета. Обмеження на напрям руху та на тривалість існування суттєво знижують навантаження і допомагають утримувати енергоспоживання на прийнятному рівні, зберігаючи при цьому надійне просування трафіку до шлюзу навіть за швидких змін каналу.

Алгоритм TEFoward. TEFoward спирається на обмежений час життя пакета та на кероване збирання відомостей про топологію. Після отримання маяків нановузли коротко синхронізуються: кожен наномаршрутизатор багаторазово ретранслює службовий сигнал, а всі проміжні вузли повертають ініціаторові компактні відповіді з вказанням приблизної кількості стрибків до себе. На основі цих відповідей формується уявлення про найкоротші траєкторії в сенсі числа проміжних пристроїв, після чого джерело обирає пріоритетний напрям і запускає передавання з лічильником часу життя або допустимих стрибків. Завдяки такій підготовці дані просуваються не навмання, а уздовж маршруту з мінімальною відстанню в стрибках, а обмежений термін існування пакета запобігає безкінечним блуканням у мережі [9].

Практична сила TEFoward у поєднанні двох механізмів. По-перше, локальна топологічна розвідка дає джерелу узгоджену картину близьких шляхів без потреби підтримувати повну таблицю маршрутизації в кожному вузлі. По-друге, обмеження часу життя змушує мережу природно відсікати тупикові варіанти. Щоб підвищити надійність, до простої кількості стрибків доцільно додавати легкі поправки за якістю лінку чи залишковою енергією ретран-

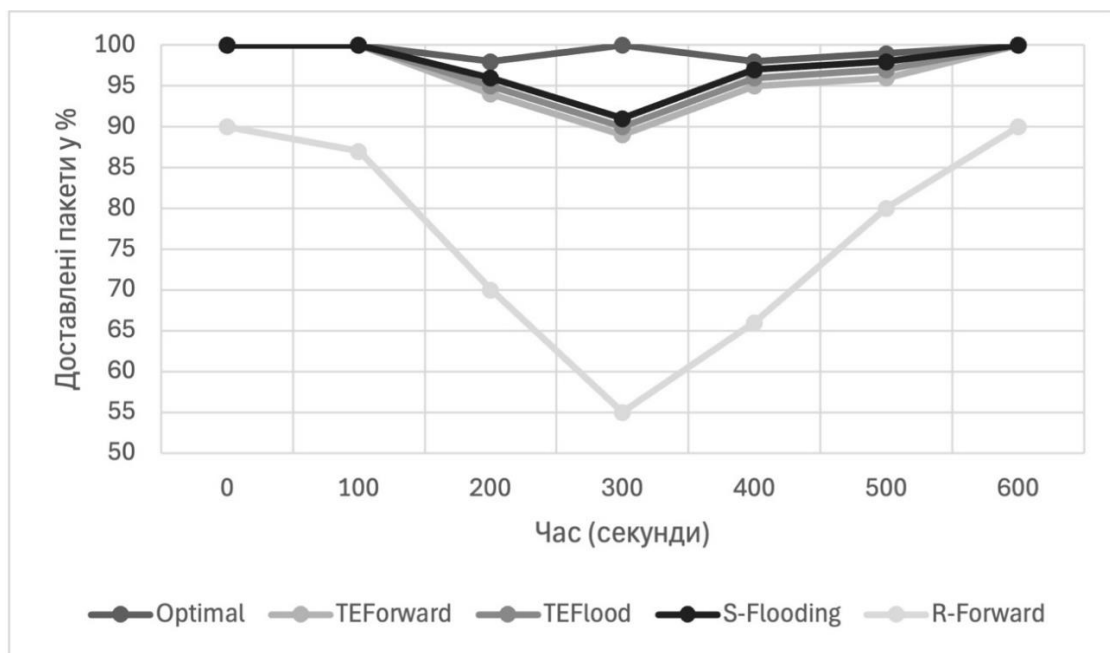


Рис. 1. Процент доставлених пакетів в залежності від обраного способу передавання даних

сляторів, тоді вибір «найкращого» напрямку стає стійкішим до випадкових коливань каналу. На рівні доступу корисно вводити невелике випадкове рознесення у часі під час ретрансляції службових сигналів, це зменшує імовірність колізій і дубляжу відповідей. У щільних топологіях застосовують компактні фільтри на повтори, щоб однакові повідомлення не циркулювали зайвий раз.

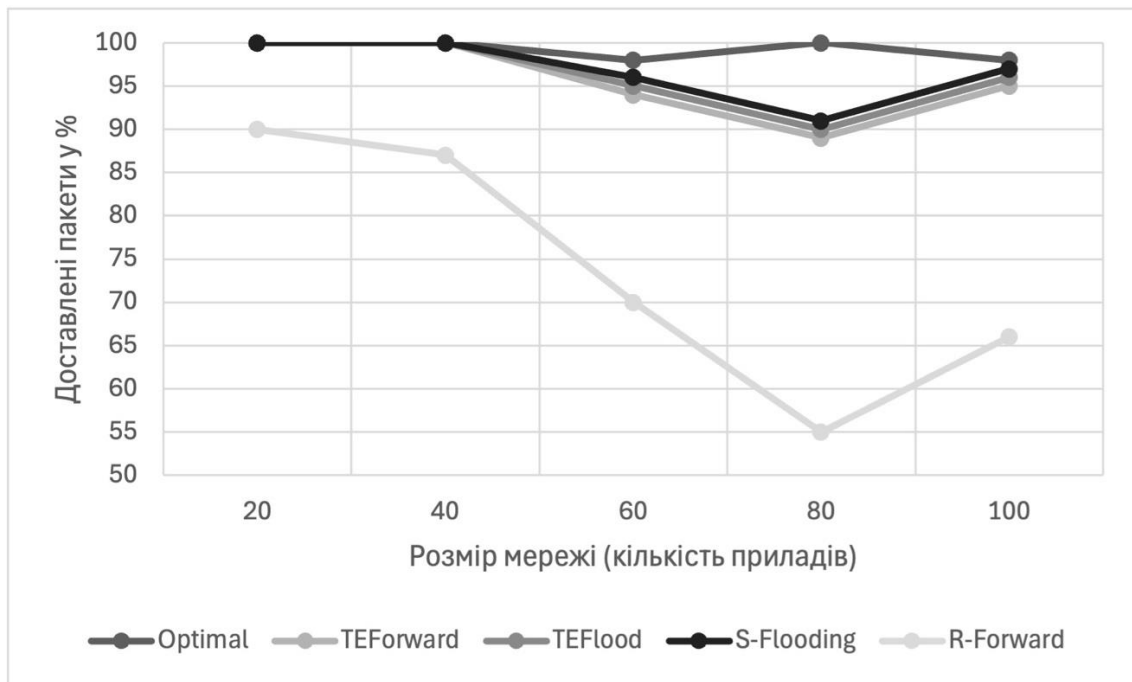


Рис. 2. Процент доставлених пакетів в залежності від розміру мережі

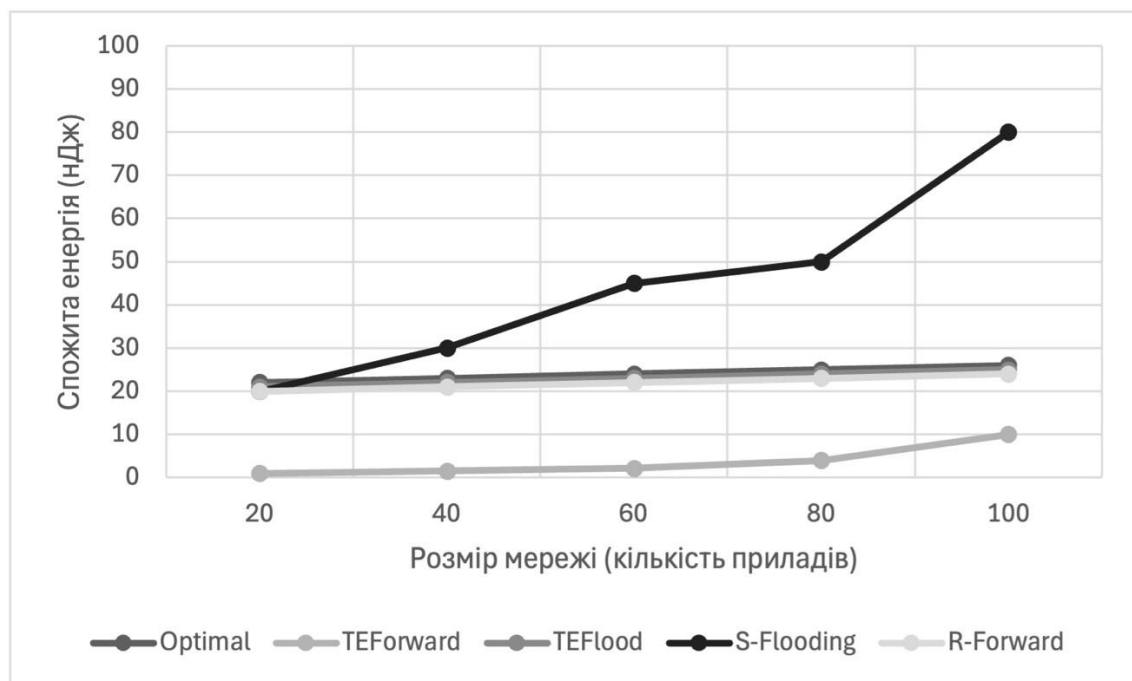


Рис. 3. Рівень споживання енергії в залежності від розміру мережі

Разом із перевагами існує й плата за координацію. Часті маяки і зворотні відповіді збільшують службове навантаження, а надто рідкісні оновлення призводять до застарілої карти околиці. Тому інтервал між маяками пристосовують до динаміки середовища, у стабільні періоди він довший, у турбулентні коротший. Якщо тимчасово виникає ситуація, коли жоден сусід не дає скорочення шляху, джерело утримує пакет до наступної хвили оновлень або

виконує короткий обхід із зниженим пріоритетом, не виходячи за межі дозволеного часу життя. У підсумку TEFoward забезпечує спрямоване доставлення без важких глобальних таблиць, а поєднання попередньої розвідки з лімітом існування пакета підвищує ефективність використання ресурсу каналу і зменшує витрати енергії в більшості реалістичних сценаріїв.

Порівняння існуючих алгоритмів передачі даних в електромагнітних наномережах.

Було проведено моделювання наномережі, що працює на вищезазначених алгоритмах. Графічні результати моделювання продемонстровані на рис. 1-3. Як видно з представлених результатів, використання методу передачі даних TEFoward незалежно від розміру мережі дозволяє істотно знизити витрати енергії, при цьому уникаючи додаткових втрат пакетів при передачі, а також не вносячи істотних затримок.

Висновки

У статті подано огляд і порівняльний аналіз ключових алгоритмів передавання даних для електромагнітних наномереж. Кожен підхід має власні сильні сторони та обмеження, а вибір конкретного рішення визначається вимогами проєктованої системи. Насамперед енергоспоживанням, масштабом мережі, допустимою затримкою та рівнем втрат пакетів. Найскладнішим викликом залишається висока вартість енергії, адже будь-яка операція в наносенсорній мережі прямо позначається на ресурсі живлення. Також виконано моделювання роботи мережі за розглянутими алгоритмами. Результати симуляцій дали змогу зіставити їхню ефективність і визначити варіант із найменшим енергоспоживанням, що може слугувати практичною орієнтирною точкою для подальшого проєктування.

Список використаної літератури:

1. Yu H., Ng B., Seah W. K. G. TTL-Based Efficient Forwarding for Nanonetworks With Multiple Coordinated IoT Gateways. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. Vol. 5, no. 3. P. 1807–1815. URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2018.2812868>.
2. Survey on Terahertz Nanocommunication and Networking: A Top-Down Perspective / F. Lemic et al. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2021. Vol. 39, no. 6. P. 1506–1543. URL: <https://doi.org/10.1109/jsac.2021.3071837>.
3. H. Yu, B. Ng, W. K. G. Seah and Y. Qu. TTL-based efficient forwarding for the backhaul tier in nanonetworks. 2017 14th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 2017, pp. 554-559. URL: <https://doi.org/10.1109/CCNC.2017.7983167>.
4. Cruz Alvarado M. A., Bazán P. A. Understanding the Internet of Nano Things: overview, trends, and challenges. *e-Ciencias de la Información*. 2018. URL: <https://doi.org/10.15517/eci.v1i1.33807>.
5. Yu H., Ng B., Seah W.K.G. Forwarding Schemes for EM-based Wireless Nanosensor Networks in the Terahertz Band. *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication (NANOCOM '15)*. New York: ACM, 2015. C. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1145/2800795.2800799>.
6. Xu J., Zhang Y., Jiang J., Kan J. An Energy Balance Clustering Routing Protocol for Intra-Body Wireless Nanosensor Networks. *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 22. P. 4875. URL: <https://doi.org/10.3390/s19224875>.
7. Yao X.-W., Wu Y.-C.-G., Huang W. Routing techniques in wireless nanonetworks: A survey. *Nano Communication Networks*. 2019. Vol. 21. P. 100250. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nancom.2019.100250>.
8. Bouchedjera I. A., Louail L., Aliouat Z. Addressing and flood-based communications for the software-defined metamaterial paradigm. *Nano Communication Networks*. 2020. P. 100336. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nancom.2020.100336>.
9. Iqbal I., Nazir M., Sabah A. Design of Energy-Efficient Protocol Stack for Nanocommunication Using Greedy Algorithms. *Journal of Computer Networks and Communications*. 2022. Vol. 2022. P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/3150865>.

Автори статті

Дакова Лариса – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0001-6104-8217

Аскеров Мукафат – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, Національна Академія Наук України, професор, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0000-6611-2732

Даков Сергій – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0001-9413-3709

Волошин Василь – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0008-6906-6370

Дунаєвський Костянтин – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0004-2078-4348

Authors of the article

Dakova Larysa – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-6104-8217

Askerov Mukafat – Candidate of Sciences (technical), Leading Researcher, National Academy of Sciences of Ukraine, Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0000-6611-2732

Dakov Serhii – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-9413-3709

Voloshyn Vasyl – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0008-6906-6370

Dunaievskyi Kostiantyn – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0004-2078-4348