

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“МЕТОДИ РОЗГОРТАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ
ІНФРАСТРУКТУРИ РОЗУМНОГО МІСТА”**

Виконав: студент 6 курсу, групи ТСДМ-63
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Діскант О.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Гринкевич Г.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(прізвище та ініціали)

Київ - 2019

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Телекомунікаційних систем та мереж

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

телекомунікаційних систем та мереж

В.Ф. Заїка

“ ”

_____ 2019 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Дісканту Олексію Олександровичу

1. Тема роботи: “Методи розгортання телекомунікаційної інфраструктури Розумного Міста”;

керівник роботи Гринкевич Ганна Олександрівна, к.т.н., доцент,
затверджені наказом вищого навчального закладу від 14.11.2019 №518.

2. Строк подання студентом роботи 20.12.2019 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Безпроводові мережі.
2. Середовище Smart City.
3. Сучасні технології у контексті розумного міста
4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Дослідження стану питання розгортання телекомунікаційної інфраструктури розумного міста
2. Дослідження сучасного стану у галузі Smart Lighting та середовища Smart City
3. Огляд сучасних технологій у контексті розумного міста
4. Концептуальна архітектура розумного міста

5. Перелік графічного матеріалу (назва слайдів презентації):

1. Мета роботи;
2. Цільові області для забезпечення сталого цифрового розвитку «Розумного міста» у Києві.
3. Частка ринку за технологією на світовому ринку освітлення
4. Порівняння між найбільш релевантними характеристиками протоколів.
5. Вимоги на архітектурному рівні Smart City
6. Технологія IEEE 802.15.4
7. Розподіл світильників у центральній частині Києва
8. Технологія LoRaWAN
9. Технологія NB –IoT. Технологічне порівняння між LTE-M та NB-IoT
10. Концептуальна архітектура розумного міста
11. Висновки
12. Апробація результатів магістерської роботи

6. Дата видачі завдання 11.09.2019

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	27.09.19	Викон.
2.	Дослідження стану питання розгортання телекомунікаційної інфраструктури розумного міста	15.10.19	Викон.
3.	Дослідження сучасного стану у галузі Smart Lighting та середовища Smart City	31.10.19	Викон.
4.	Огляд сучасних технологій у контексті розумного міста	15.11.19	Викон.
5.	Концептуальна архітектура розумного міста	29.11.19	Викон.
6.	Висновки, вступ, реферат	10.12.19	Викон.
7.	Розробка презентації	18.12.19	Викон.

Студент

Діскант О.О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Гринкевич Г.О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 74 сторінок; 15 рис., 17 табл., 23 джерела.

Об'єкт дослідження – процес розгортання телекомунікаційної інфраструктури розумного освітлення Розумного Міста.

Предмет дослідження - телекомунікаційна інфраструктура Розумного Міста.

Мета роботи – дослідження принципів і методів розгортання телекомунікаційної інфраструктури системи вуличного освітлення міста.

Методи дослідження – теорія імовірності і математичної статистики, теорія масового обслуговування, методи цифрової обробки інформації, моделювання і розрахунки на ЕОМ.

У магістерській роботі проведено широке дослідження майбутньої парадигми Інтернету, екосистеми Smart City та освітлювальної індустрії, щоб вирішити масштаби роботи. Основні цілі були поставлені для дослідження поточного стану ситуації, висвітлення неоднорідності рішень, наявних на ринку, та надання практичних рекомендацій для успішного здійснення такого типу перетворення міської дійсності.

БЕЗПРОВОДОВА МЕРЕЖА, SMART CITY, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНА ІНФРАСТРУКТУРА, ІНФРАСТРУКТУРА РОЗУМНОГО МІСТА, IOT, LORA I IEEE 802.15.4, ТЕХНОЛОГІЯ LORAWAN.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 . ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ПИТАННЯ РОЗГОРТАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ РОЗУМНОГО МІСТА	11
1.1. Методи розгортання телекомунікаційної інфраструктури Розумного Міста	11
1.2. Визначення проблеми	13
1.3. Основна мета роботи.....	14
1.4. Вимоги щодо концептуального ІТ-рішення.....	15
2 . ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНОГО СТАНУ У ГАЛУЗІ SMART LIGHTING ТА СЕРЕДОВИЩА SMART CITY	16
2.1. Інтернет наступного покоління	16
2.2. Революція світлодіодів.....	17
2.3. Проекти Smart City	18
2.4. Класифікація технологій.....	22
3 . МЕТОДИ РОЗГОРТАННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У КОНТЕКСТІ РОЗУМНОГО МІСТА.....	24
3.1. Провідні рішення у контексті Smart City	24
3.2. Безпроводові рішення	25
3.3. Якісний аналіз протоколів	38
4 . КОНЦЕПТУАЛЬНА АРХІТЕКТУРА РОЗУМНОГО МІСТА.....	45
4.1. Вимоги на архітектурному рівні Smart City.....	45
4.2. Технологія IEEE 802.15.4.....	48
4.3. Технологія LoRaWAN.....	54
4.4 Технологія NB -IoT	59
4.5. Порівняння витрат.....	62
ВИСНОВКИ	64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	65

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

FTTX	Fiber To The X - мережа доступу з застосуванням оптичного волокна.
IoT	Internet of Things - Інтернет речей
ISO	International Organization for Standardization- Міжнародна організація зі стандартизації
IT	Information Technologies - Інформаційні технології
LAN	Local Area Network - Локальна комп'ютерна мережа
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine To machine - технології, яка дозволяє просто, надійно та вигідно забезпечити передачу даних між різними пристроями
NFC	Near Field Communication - технологія бездротового високочастотного зв'язку малого радіусу дії «в один дотик»
OSI	Open Systems Interconnection - базова еталонна модель взаємодії відкритих систем
PAN	Personal Area Network - Персональна мережа
QAM	Quadrature Amplitude Modulation - Квадратурно-амплітудна модуляція
QoS	Quality of Service - якість послуг, які надає комунікаційна мережа
TCP	Transport Control Protocol – транспортний протокол
TDMA	Time Division Multiple Access - метод часового поділу одного фізичного каналу зв'язку
UDP	User Datagram Protocol - один із протоколів в стеку TCP/IP
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access - широкосмуговий множинний доступ із кодовим розподілом каналів

ВСТУП

Актуальність теми. Сприйняття та бачення таких суперактуальних ідей як IoT речей для Розумного міста та Інтернету поступово стає реальністю. Багато міст у всьому світі ініціювали процес модернізації своїх систем управління до більш інтелектуальних та ефективних і Київ тут не є винятком. Ця робота в основному присвячена громадському освітленню. Ця робота в основному присвячена громадському освітленню. В силу багатьох причин це, безумовно, може зіграти головну роль в русі цієї трансформації, коли в ньому розглядаються основні проблеми Управління дорожнього руху, відповідального за просування на цьому напрямку, а також проблем, що стосуються концептуальної архітектури, базових протоколів, їх можливостей та доступності серед інших систем на ринку.

Відсутність єдиного стандарту, а також правових, людських та безпекових питань спочатку гальмували процес дозрівання цієї нової парадигми суспільного розвитку. Існування декількох альтернатив призводить до явища надмірних можливостей вибору і часто відштовхує деякі галузі та уряди та органи місцевого самоврядування від прийняття рішень щодо IoT. Тому було проведено обширно опитування для аналізу придатності різних технологічних пристроїв до вимог установки. Рішення були класифіковані на три основні категорії, і по одному з можливих стандартів зв'язку кожного, а саме IEEE 802.15.4, NB-IoT та LoRa, були оцінені для ілюстрації питань розвинення концептуальної архітектури, обчислення показників потужності та витрат.

Вимоги такого розгортання були визначені шляхом узгодження базового набору послуг. В результаті запропоновано два сценарії для моделювання трафіку системи. Математична методологія була використана для встановлення м'якого обмеження на максимальну кількість пристроїв, що обслуговуються одним шлюзом, який має враховуватися виконавцями.

Як добре відоме у випадку NB-IoT пропускна здатність повністю залежить від оператора мережі, отже, порівняння засновані на третій моделі (тобто забезпеченні мінімального трафіку), та орієнтації на зниження експлуатаційних витрат.

Таким чином, ця теза надає Управлінню дорожнього руху початковий підхід до цього питання та об'єктивну довідкову систему для вирішення подальшого розвитку вуличного освітлення в Києві.

Метою магістерської роботи є дослідження принципів і методів розгортання телекомунікаційної інфраструктури системи вуличного освітлення міста.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є телекомунікаційна інфраструктура Розумного Міста.

Предмет дослідження. методи розгортання телекомунікаційної інфраструктури розумного освітлення Розумного Міста.

Методи дослідження. У магістерській роботі застосовувалися, теорія імовірності і математичної статистики, теорія масового обслуговування, методи цифрової обробки інформації, моделювання і розрахунки на ЕОМ.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні результати магістерської атестаційної роботи доповідалися на конференціях Державного університету телекомунікацій та опубліковано в науковому журналі «Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку».

1 . ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ПИТАННЯ РОЗГОРТАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ РОЗУМНОГО МІСТА

1.1. Методи розгортання телекомунікаційної інфраструктури Розумного Міста

В даний час збільшення тривалості життя людей, посилення міжнародної мобільності, міграція від сільських місцевостей до інших міст не лише створили небачені комерційні, соціальні та освітні можливості, але й виникли нові потреби у місцевої влади та населення Києву. Для того, щоб відповідати цим все більш зростаючим тенденціям, історичне розуміння міста як сутності повинно змінюватися і розвиватися. У цьому контексті концепція Smart City набула значних обертів за останні кілька років і передбачає інтеграцію інформаційно-комунікаційних технологій у безпечний та простий спосіб управління активами міста та покращення життя його мешканців, підприємств та інших структур [1]. Це стає можливим завдяки: покращеному підключенню, загальної доступності величезних баз даних, передовим ІТ-платформам, різноманітним датчикам та інших технологіям.

Згадаємо, що наприклад, жителі міста Стокгольму поставили перед собою дуже амбітну мету до 2040 року перетворити своє місто в найрозумніше та найбільш комунікаційне місто у світі. [2]. Це передбачає таку концепцію суспільства, де доступність, зростання добробуту, інновації, відсутність негативного впливу на навколишнє середовище та соціальна рівність є звичайним явищем. У цьому процесі, безумовно, важливу роль відіграє сталість та стійкість і цілеспрямованість на виконання поставлених цілей. Будь-яка реалізація будуватиметься на тому, що зараз робиться, і має бути розроблена довгостроково та економічно ефективно, при якій подальший розвиток та повторне використання створюють мінімальні труднощі.

Інтелектуальне освітлення та пояснення підґрунть подібних перетворень – одне з головних активних процесів, які залишаються на шляху до впровадження Розумного міста (Smart City). На сьогодні, за даними Європейської комісії, суспі-

льне освітлення місцевого середовища становить до 60% від загальних витрат типового муніципалітету [3].

Зазвичай графіки світла регулюються заздалегідь заданими (а тому статичними, незмінними) параметрами часу увімкнення та вимкнення. На даний час більшість світильників, що використовуюються у Києві базуються на ртуті та натрії високого тиску або на галогенідних металевих лампах, які, як правило, є найбільш поширеними.

На відміну від цього, місто має дещо іншу систему, але все ще досить просту. Централізовано вимірюють інтенсивність сонячного світла, а вуличні ліхтарі контролюють за допомогою ширококомовних повідомлень, що поширюються із застереженою частотою.

На відміну від цього, звичайне місто має дещо іншу систему, але все ще досить просту. Централізовано вимірюють інтенсивність сонячного світла, а вуличні ліхтарі контролюють за допомогою ширококомовних повідомлень, що поширюються із застереженою частотою.

Оскільки міста стають прогресивнішими, ці методи застаріли з різних причин. Поширення світлодіодної технології та її підвищена економія енергії були одним з головних рушійних фактичних змін в освітленні сучасних міст. Не менш важливими є питання світлового забруднення, також питання безпеки та інші елементи, тісно пов'язані з підвищенням якості життя.

Перш за все, «розумні міста» повинні приносити користь мешканцям. В Лос-Анджелесі кілька років тому замінили звичайні вуличні ліхтарі на LED-освітлення. Завдяки цьому, освітлення вулиць споживає на 63% менше електроенергії, викиди вуглекислого газу скоротилися на десятки тисяч тонн на рік, при цьому яскравість таких ламп набагато краща.

У всьому світі з'явилися нові проекти, які вже розробляються [4], [5] та інші. Річ Бліс інфраструктура Контіні уослідно адаптована до підвищення безпеки, підвищення інтелекту і зниження витрат, тому Київ в цьому не може відставати.

Що ж таке «розумне місто»? Простими словами — це взаємодія між містом та його жителями на основі найсучасніших технологій. В основі лежить «Інтернет

речей» — технологія, що дозволяє деяким речам чи системам «спілкуватися» між собою.

У світі вже існує понад тисяча «розумних міст», підрахувала світова компанія з надання послуг Deloitte. Половина — в Китаї, серед лідерів «розумного» міського розвитку — також Європа, Північна Америка, Японія та Південна Корея. Дослідження показує, що з кожним роком держави залучають дедалі більше інвестицій для розбудови розумних міст.

З метою перетворення української столиці на технологічно розвинений, соціально відповідальний та комфортний для життя мегаполіс 3 роки тому була створена міська ініціатива Kyiv Smart City. Вона покликана змінювати столицю, об'єднуючи киян, бізнес-спільноту, активістів та міську владу задля розвитку розумного міста. Діяльність ініціативи передбачає комплексні та глибокі зміни, як от впровадження сучасних інформаційно-комунікаційних сервісів, розробку нових стандартів енергоефективності та появу відкритої моделі відносин між громадою та місцевою владою. Kyiv Smart City є інноваційною платформою для інфраструктурного, технологічного та соціального розвитку міста.

Це передбачає концепцію суспільства, де доступність, зростання добробуту, інновації, відсутність негативного впливу на навколишнє середовище та соціальна рівність є звичайним явищем. У цьому процесі, безумовно, важливу роль відіграє стійкість та цілеспрямованість на виконання поставлених цілей. Будь-яка реалізація будуватиметься на тому, що зараз робиться, і має бути розроблена довгостроково та економічно ефективно, при якому подальший розвиток та повторне використання створювали б мінімальні труднощі.

1.2. Визначення проблеми

Ідентифікація рішень в таких гетерогенних і широких полях призводять до складної задачі, що складається з багатьох питань, невизначеностей і змінних. Одне з головних питань – це сукупність наявних на сьогодні технологій та протоколів зв'язку. Більшість сучасних систем є запатентованими рішеннями від окремих постачальників освітлення, що працюють тільки в своїй власній екосистемі і

не можуть спілкування між один одним. Це може спричинити майбутню ситуацію із замиканням, яка є дуже небажаною для такого великого міста, як Київ.

На додаток до експлуатації, обслуговування – ще одна частка системи, яка гостро потребує глибоких перетворень. Сучасна практика є недостатньо оптимальною щодо використання як економічних, так і людських активів. Майбутня система вуличного освітлення повинна бути задумана для полегшення робіт з технічного обслуговування та зменшення поточних високих витрат.

І останнє, але не менш важливе, що відповідає цілі енергоефективності – це те, що інтелектуальне освітлення повинно не тільки мінімізувати забруднення та витрачання ресурсів, але в той же час вирішувати такі суб'єктивні питання, як достатній рівень безпеки та комфортність громадян.

1.3. Основна мета роботи

Основна мета – двояка. З одного боку, надання чітких вказівок стосовно критеріїв майбутньої системи вуличного освітлення щодо вибору базової комунікаційної технології, протоколу мережевого зв'язку та його концептуальної архітектури. З іншого боку, слугувати науковою та безпристрасною орієнтацією роботи по прийняттю рішень щодо притягнення спонсорських організацій у місті Києві, цілеспрямовано орієнтованих на максимізацію вигод для суспільства. Рекомендації базуватимуться на неупередженому аналізі різних альтернатив стосовно кількісних показників, таких як потужність та економічні витрати, вказівок стосовно критеріїв майбутньої системи вуличного освітлення щодо вибору базової комунікаційної технології, протоколу мережевого зв'язку та його концептуальної архітектури. З іншого боку, слугуючи науковою та справедливою орієнтованою підставою для прийняття рішень щодо вибору спонсорських організацій у місті Київ, орієнтованих саме на максимізацію вигод для суспільства. Рекомендації базуватимуться на неупередженому аналізі різних альтернатив стосовно кількісних показників, таких як потужність, економічні витрати та багатьох інших.

1.4. Вимоги щодо концептуального IT-рішення

У міської ініціативи Kyiv Smart City передбачаються наступні загальні рекомендації щодо концептуального IT-рішення та декількох можливих його застосувань, включаючи розумне освітлення. Найбільш актуальними є наступні.

- Нові установки повинні будуватися на існуючій інфраструктурі, а їх дизайн повинен охоплювати питання безперебійної сумісності, довгострокової перспективи та екологічної відповідальності.

- Громадяни є центром сучасної еволюції і повинні бути забезпечені засобами для участі у ній та висловлення своєї думки.

- Ресурси повинні розподілятися однаково і бути доступними для всіх мешканців, що дозволяє кожному користуватися новими послугами, незалежно від їх походження та статусу.

- Приватний бізнес повинен розглядатися як ще одна соціальна рушійна сила трансформації.

Ці області проілюстровані на рис. 1.1, і стає зрозуміло, що стоїть над ними як головна умова всього процесу оцифрування.

Здійснення цього вимагає взаємодії з різними структурами та зацікавленими сторонами, включаючи телекомунікаційні компанії, різні офіси міської ради та деякі інші організації. Таким чином, у подальшому викладанні пропонується можлива і прагматична альтернатива з урахуванням нинішніх та ймовірних майбутніх обставин у Києві.

Сучасний стан у галузі Smart Lighting та середовища Smart City досліджено у наступних розділах. Розділ 2 та 3 присвячені ретельному аналізу ринку IoT, визначенню протоколів, що найбільш відповідні сформульованим завданням з урахуванням вищезазначених вимог. Три з них обрані для ілюстрації прикладу концептуальної архітектури системи та отримання оцінок щодо її виміру та вартості. 4й розділ завершує цю роботу шляхом узагальнення основних понять та результатів і введення майбутніх напрямків дослідження.

2 . ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНОГО СТАНУ У ГАЛУЗІ SMART LIGHTING ТА СЕРЕДОВИЩА SMART CITY

2.1. Інтернет наступного покоління

У даному розділі представлено невеликий огляд світового досвіду розвитку Smart City та сектору Smart Lighting у великих містах, будуть описані загальні концепції, ключові моменти, поточні проекти та їх технічні характеристики.

Спочатку Інтернет був розробленим в інтересах військової справи у США, але це не зайняло багато часу, поки він не був сприйнятим та використаним в інтересах урядів, академічними шарами, не став обов'язковою складовою бізнесу та реальністю життя більшості звичайних мешканців.

В останній чверті XX-го століття, людство в цілому, експерти, звичайні особи змінюються, процес постійний, що призводить до так званого цифрового суспільства, яке має Інтернет в якості одного з його суттєвіших внутрішніх компонентів.

Підключення до світової мережі на сьогоднішній день є досить вигідною комерційною діяльністю і відкрило можливості для раніше непередбачених бізнес-моделей та інших не звичайних використань. Не менш важливою є неперервна еволюція взаємодії людини з цією технологією та сучасні тенденції, що рухаються до парадигми безперервного зв'язку: взаємопов'язаність, легкість спілкування та співпраці.

Постало чимало питань щодо того, яким має бути Інтернет у майбутньому та чи повинні міжнародні організми брати активну участь у його трансформації. У цьому сенсі Європейська Комісія сприяла майбутньому Інтернет-державно-приватному партнерству (FI PPP) для вирішення цих питань, сприяла співпраці між основними європейськими зацікавленими сторонами та розробляла міждоменні платформи наступного покоління, придатні для різних областей використання та бізнесу для того, щоб покращити динаміку ринку. Ця ж організація визначила майбутній Інтернет як соціально-технічну систему, що включає в себе

доступну для Інтернету інформацію та послуги в поєднанні з фізичним середовищем та поведінкою людини і підтримує розумні програми суспільного значення.

Технологічна неоднорідність стане опорою для різноманітних інфраструктур, які вимагають високого ступеня самостійності та успішності взаємодії, що охоплює адміністративні, державні та приватні межі. Інституції повинні розраховувати на достатню підготовку для успішного вирішення значних викликів у різних сферах, прагнучи принести користь усьому суспільству [6].

Загальними принципами повинні бути:

- Децентралізація: визначити соціально-економічні наслідки поведінки монополій, стимулювання обчислювальних технологій, IoT та блокчейнів на основі відкритих стандартів.

- Конфіденційність: підвищена обізнаність щодо особистих даних громадян вимагає, щоб нові правила відповідали прозорості та їх умови були легко зрозумілими.

- Мультидисциплінарність: передбачає простий доступ до відкритих науково-дослідних та публічних даних, а також підтримання сумісності для забезпечення надійного взаємозв'язку між технологіями.

- Законодавство : націлено на реформування неефективного та застарілого законодавчого процесу, щоб він не відставав від технологічного розвитку.

У цьому контексті вуличне освітлення було визначено як ключовий сектор у процесі модернізації, і воно повинно розумно відповідати на постійно мінливі потреби та інтереси зацікавлених сторін.

2.2. Революція світлодіодів

Тривалий термін експлуатації, відсутність небезпечних хімічних речовин, зниження витрат на обслуговування та енергоефективність є найбільш відомими з багатьох корисних властивостей світлодіодів над традиційними натрієвими лампами високого тиску або ртутними лампами. Ці значні переваги призвели до прогресуючої модернізації систем громадського і приватного освітлення, відомих як *LEDification* [7] та проілюстрованих на рис. 2.1. Відповідно до сучасних тенден-

цій, очікується, що до 2025 року 9 з 10 лампочок будуть світлодіодними [10].

Однак легке світлове забруднення, яке визначається як неефективне та непотрібне використання світла, починає розглядатися як ще одна форма забруднення навколишнього середовища. Останні дослідження викликали занепокоєння щодо непевного несприятливого впливу цього типу освітлення на здоров'я людини та дикої природи [12], точніше на циркадний ритм та якість сну. Звідси зростає значення інтелектуального контролю поза енергетичним виміром.

Дуже короткий час початку роботи, швидкий час перемикання, повна потужність затемнення та висока пристосованість роблять світлодіоди ідеально підходящими для застосувань в системах Smart Lighting. Однак для того, щоб в повній мірі скористатися їхніми можливостями, важливим стає телеметричний шар (телеметрична складова), який координує його роботу. Згідно з недавнім практичним дослідженням в умовах реальної життєдіяльності економія електроенергії складає в середньому вище 37%, а потенціальне може досягати 75%, коли світлодіодні пристрої, адаптивне управління, сонячна та вітрова енергії поєднуються разом. З іншого боку, модернізація освітлення стала важким завданням, оскільки багатьом операторам не вистачає розумного контролю в їх розгортанні або вони зобов'язані застосовувати власні рішення. На жаль, дефіцит досліджень та відсутність стандартів сприяють поганому плануванню розгортання та протидіють вищезгаданим здобуткам.

2.3. Проекти Smart City

На початку чергової технологічної революції Smart Lighting виділяється безліччю проектів, що реалізуються неймовірними швидкими темпами. Такі міста, як Глазго [13], Лос-Анджелес [14], Лондон [15], Амстердам [16], Чикаго [17] або Дубай [8], а також в Україні [9] вже завершили пілотні етапи і готові здійснити значне розміщення. У більшості випадків відповідальна державна або місцева установа налагодила партнерство з певною групою приватних компаній, автономні власні рішення яких будуть встановлені. На жаль, не вдалося знайти точних технічних деталей жодної з цих домовленостей.

Можна стверджувати, що більшість постачальників пропонують радіо рішення на основі 6LoWPAN, Zigbee або Wi-Fi.

З цієї причини у цій главі розглядаються декілька проектів та ініціатив Smart City, що фінансуються, головним чином, Європейською Комісією і є добре документованими та доступними. Незважаючи на те, що вони не присвячені розумному освітленню, вони є прекрасним прикладом, і їх висновки та засвоєні уроки можуть бути легко екстрапольовані в поле огляду систем Smart Lighting.

Проект Smartsantander. Це міський експериментальний заклад в рамках ініціативи FIRE для досліджень та експериментів у послугах та застосуванні IoT в екосистемі Smart міста. Спочатку він був створений для подолання серйозних обмежень уже розроблених тестових панелей, реалістичної оцінки прийнятності з боку користувачів та можливості розвитку нових додатків. Більше 10 000 пристроїв, що складаються з фіксованих та мобільних вузлів, NFC, шлюзів та смартфонів, розповсюджуються по всьому місту для підтримки нових інноваційних послуг для муніципалітету та його жителів. Деякі приклади: моніторинг навколишнього середовища, управління паркінгами на відкритому повітрі, зрошення парків і садів або надзвичайний моніторинг інтенсивності. Інтегрування різних протоколів і технологій, є ключовим фактором для того, щоб великомасштабна операція Smartsantander, що побудований в три концептуальних архітектурних рівня, міг впоратися з цією неоднорідністю (див. рис. 2.2).

- Вузли IoT – це більшість пристроїв, що знаходяться на тестовій панелі. Вони обмежені ресурсами (пам'ять, енергія та потужність) і розміщуються в суворих екологічних умовах.

- Шлюзи IoT є більш потужними вузлами, але все ще засновані на вбудованих пристроях. Основні їх функції -підключення пристроїв IoT до основної мережі, зчитування та обслуговування датчиків.

- Сервери -це потужні пристрої, безпосередньо підключені до основної мережі та належать до віртуальної хмарної інфраструктури. Основне їх використання -розміщення даних і програм IoT.

Тим часом, необхідність мінімізації втручання людини, а також збільшення масштабованості та простежуваності вирішується горизонтальним логічним поділом на дві площини:

- Спостереження та управління, відповідальне за загальне управління, конфігурацію підключення та відтворення та виявлення несправностей.
- Експерименти з IoT присвячені налаштуванню та виконанню експериментів.

Зондування за участю, можливо, є однією з найбільш руйнівних особливостей цього проекту, оскільки воно передбачає участь громадян. У цьому сценарії різні види інформації подаються на платформу за допомогою персональних портативних електронних пристроїв, наприклад, GPS координати, компас, шум, температура тощо. Крім того, підписка на повідомлення про аварії та тривогу включається в послугу, яка називається *темпом місто*, що відкриває можливість для масової співпраці між користувачами та установами [7].

Незважаючи на те, що інтелектуальне керування освітленням не було застосовано як випадок використання, через документ з'явиться кілька посилань на SmartSantander. Він є прекрасним джерелом інформації, повною цінними уроками, які необхідно враховувати при проектуванні будь-якої масивної інфраструктури IoT. Нарешті, варто згадати, що платформа передбачає об'єднання та взаємодію з іншими експериментальними установками, такими як у Белграді, Гільфорді чи Любеку.

Оулу, всюдиусще розумне місто. Це ще один тестовий зразок Smart City, але створений у місті Оулу, північна Фінляндія, щоб дослідники могли встановити технічну та культурну готовність, визначити критичну масу користувачів та передбачити майбутній успіх різних застосунків у реальному світі. Серед багатьох викликів, представлених цією масштабною системою, найбільшою проблемою є покриття операційних та оновлення витрат після первинних капітальних вкладень, вимірювання успіху шляхом оцінки його соціально-економічного впливу та роботи з нетерплячими місцевими ЗМІ та широкою громадськістю. Зрештою, ме-

тою було створити середовище повністю орієнтоване на користувачів Smart City, що забезпечує персоналізовані, але не нав'язливі послуги, які б підвищували інтерактивність громадян.

Інфраструктура складається з інтерактивних публічних дисплеїв, мережі ranOULU та проміжного рівня, що забезпечує ресурси для підтримки різних експериментів.

Де ranOULU – муніципальна бездротова мережа, оснащена декількома технологіями для досягнення різноманітних цілей.

- WiFi : надає безкоштовний доступ до Інтернету з обмеженнями hout hout, зберігає обширні мережеві сліди для ретроспективного аналізу та дозволяє оцінювати місцезнаходження користувача через реєстр MAC-адресів.

- Bluetooth : точки доступу розкидані по центру міста, в основному встановлені на світлофорах, для моделювання пішохідних та автомобільних потоків та публікації мультимедійного вмісту на персональних портативних електронних пристроях.

- 6LoWPAN : бездротова мережа датчиків для обліку енергії та моніторингу навколишнього середовища.

Хоча система управління освітлення не була розглянута і в цьому проекті, Оула є відмінним прикладом для інтегрування різних радіо технологій, кожна з яких присутня в конкретній місії, в гармонійному співіснуванні, яке є фундаментальним аспектом для повного вирішення питань Smart City.

Розумний регіон. У регіоні Вастерботтен (північна Швеція) проект Sense Smart Region був ініційований з метою поєднання реальної та віртуальної інформації для покращення досвіду громадян, комунальних служб та інших продуктів. Для цього відбулося партнерство між технологічним університетом Лулеа, муніципалітетами Лулеа та Сकेллефтеа та консорціумом приватних організацій. Проект працює вже 3,5 роки і базується на FI-WARE, європейській платформі IoT, яка має на меті створити референтний набір майбутніх Інтернет-провайдерів для розвитку розумних додатків у різних галузях.

LoRaWAN є базовою мережевою технологією завдяки своєму широкому ді-

апазоні, незалежності від операторів та можливостям рitioning. Всі готові розгорнуті лінії оптичного волокна в мережі були використані для магістрального зв'язку між віддаленими шлюзами LoRa та серверами платформи. Поки випробування проводилися в контрольованому середовищі, вони були в основному зосереджені на аналізі масштабованості, але є плани перетворити інфраструктуру на відкритий простір, вільний для кожного. Що стосується освітлення, то існує запущений проєкт управління розумними роботами з обслуговування в системі.

Кінцева мета – створити безпечну та надійну платформу, здатну адаптуватися до нових технологічних досягнень та забезпечити регіональну владу необхідною інформацією для кращого розуміння та належного вирішення питань громадян. Хоча весь проєкт ще знаходиться на ранніх стадіях, доцільно висвітлити цю зміну парадигми – від розумного міста до регіону Smart. Це сприяє співпраці між містами для пошуку спільного технологічного рішення, залишаючи після себе системи IoT.

Ця ідея Smart City як федерації розгортань не нова. Кілька прикладів різних ініціатив - консорціум OneLab, в основному орієнтований на дослідницькі засоби, The Things Network, спільноту, що використовує рішення LoRaWAN, та FIESTA-IoT, що підкреслює серед інших смислову сумісність [8].

2.4. Класифікація технологій

IoT (Internet of Things), або Інтернет речей українською – це паралельне ключове слово, під яким розуміється групування комплексу різних технологій з унікальними характеристиками. Покриття, без сумніву, є найпоширенішим показником для класифікації, і воно також вибране для цього дослідження.

Цим поняттям охоплюються наступні дві категорії з дуже схожими аббревіатурами:

- **Бездротові мережі з низькою потужністю (LoWPAN)**: це мережа на невеликій відстані, спеціально розроблена для однорангових комунікацій при низькій швидкості, низькій потужності та суворих умовах навколишнього середовища. Спочатку персональні сітьові мережі були зосереджені на підключенні пристроїв,

зосереджених навколо робочої області людини, але ця концепція поширювалася на будь-яку обмежену мережу з обмеженим діапазоном. Прикладами є протоколи на основі IEEE 802.15.4 (Zigbee, Thread, 6LoWPAN тощо), NFC, Bluetooth або RFID.

• **Широкомасштабні мережі з низькою потужністю (LPWAN):** це бездротова мережа на великій відстані, пристосована для забезпечення низької швидкості зв'язку з головними датчиками та приводами на великих географічних територіях. Такі рішення, як LoRaWAN та Sigfox, народилися через непридатність традиційних стільникових технологій задовольняти жорсткі вимоги енергоефективності IoT та відсутність підтримки мобільності в LoWPAN. Пізніше стільникові технології розвивалися та адаптувались до цієї нової парадигми зв'язку, їх презентують такі рішення, як EC-GSM, LTE-M або NB-IoT.

Слід зауважити тезу розмежування між ISM та LPWAN стільниковими технологіями. Причиною є чітке розмежування рішень, у яких інфраструктура належить кінцевому користувачеві (колишньому) або належить оператору, який комерціфікує її використання як останнього сервісу.

3 . МЕТОДИ РОЗГОРТАННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У КОНТЕКСТІ РОЗУМНОГО МІСТА

3.1. Провідні рішення у контексті Smart City

У цьому розділі представлено практично вичерпний огляд сучасних джунглів технологій, наявних у контексті Smart City. Поряд з кількома деталями декількох стандартних систем організацій пояснюються найбільш домінуючі особливості їх протоколів. Слід зауважити, що більш широкі пояснення даються з тими рішеннями або з їх перспективним майбутнім, або з важливою часткою ринку сьогодні.

Найбільш успішні провідні технології зазнали інтенсивного розвитку в останні кілька років, головним чином через експоненціальне збільшення абонентів підключених в мережу та її послуги, розширення і реконструкція мережі та масове і швидке впровадження FTTH-рішень.

У будь-якому випадку, найпоширенішими носіями провідної передачі є:

- Скручена пара – найдавніша, найпростіша до останніх років, більшість спільних провідників середовища спілкування. Причиною скручування кабелів є необхідність забезпечення кращої якості сигналу, скасовуючи зовнішні електромагнітні перешкоди.

- Оптичне волокно передає інформацію у вигляді світлових сигналів через пластиковий матеріал. Передача базується на принципі загального внутрішнього відбиття.

- Передача електропередач передає дані разом з електричною енергією, використовуючи існуючі лінії електропередач, накладаючи сигнал низької енергії та високої частоти.

В основному, стосуючись економічних питань, можливість комунікації ліній електропередач для вуличного освітлення перевершує інші варіанти. Основними причинами є його сумісність із поточною інфраструктурою та уникнення дорогих та небезпечних громадських споруд. Серед різноманітних протоколів, що

підтримують цю технологію, DALI (Digital Addressable Lighting Interface) є тим, що переважає в більшості досліджень, і встановлення в нові дні, або окремі, або комбіновані з іншими технологіями [19].

Це міжнародний стандарт, описаний в IEC 60929, спеціально розроблений для управління освітленням. Незважаючи на добре прийняте і поширене рішення, воно не є життєздатним вибором в даному випадку, так як це суперечило б однієї з головних вимог проекту: повна незалежність INDE -IoT інфраструктури від енергосистеми.

Оскільки комунікації ліній електропередач не розглядаються далі, кручена пара також може бути відкинута. Нинішня тенденція рухається в напрямку повного replace-MENT з оптичним волокном по всій Європі. Хоча волокно для низької потужності та низької пропускної здатності в більшості випадків було б далеко не оптимальним через сприятливі витрати на встановлення, в особливих випадках Києва це може стати життєздатним вибором для вуличного освітлення. Щоб повністю зрозуміти це, подано короткий підсумок новітньої історії IT міста.

Висновок

Встановлення всюдисущої мережі з оптичного волокна не є життєздатним для більшості міст через непомірні витрати на її створення та виникаючий будівельний хаос. Щоправда, це може бути можливим правдоподібним рішенням у конкретному випадку якого небудь іншого міста завдяки вже розгалуженій мережі. В особистому інтерв'ю з Аке Сундіном, від дочірньої компанії Stokab AB від компанії ST Erik Kommunikation AB, він виступає за її життєздатність до тих пір, поки політики не досягнуть нового консенсусу і розгортання мережі охоплюватиме не лише освітлення, але й інші послуги Smart City.

3.2. Безпроводові рішення

- **Альянс LoRa**

LoRa Альянс є некомерційною галузевою асоціацією, основним продуктом є LoRaWAN специфікація, призначена для включення Інтернет речей на регіональному, національному або глобальному рівні. В основному це є поширенням про-

токолу від Microchip, Semtech і IBM, який вже досяг відносного міжнародного рівня. З розумінням цього поступово було розгорнуто створення таких операторів зв'язку, як Orange у Франції, Swisscom в Швейцарії або KPN в Нідерландах [21].

Фізичний шар

Фізичний шар є його найбільш інноваційною особливістю. використовується модуляція широкого спектру, що забезпечує великий опір, що забезпечує більшу стійкість до багатопроменевого і доплерівського ефекту навіть при низьких потужностях та усунення необхідності високоточного джерела синхронізації для синхронізації. Вибір різних факторів розповсюдження дає змогу здійснювати вибір між швидкістю передачі даних та покриттям, надійністю зв'язку або споживанням енергії. Загальна потужність багато в чому залежить від смуги частот і коефіцієнта розповсюдження, а також від розміру корисної навантаження.

Топологія

Базова архітектура мережі LoRaWAN, як правило, викладається в зірковій топології та включає три різні типи пристроїв.

- Кінцевий вузол: зондування пристроїв.
- Шлюз: ретрансляції, підключені до Інтернету, і повторно передача повідомлення на сервери та назад. Можливості синхронізації необхідна для планування передачі низхідній лінії зв'язку до кінцевих вузлів у попередньо визначених вікнах передачі, враховуючи, що затримка основної мережі невідома. На відміну від стільникових технологій, кінцеві пристрої не прив'язані або зареєстровані до певного шлюзу, тобто всі шлюзи, які бачать повідомлення, будуть повторно передавати його, і сервер вирішує, як з цим боротися.

- Сервер: збирає більшу частину інтелекту системи. Серед його основних завдань – декодування пакетів, генерація відповіді та вибір шлюзу. Незважаючи на те, що доступна інформація з відкритим вихідним кодом щодо його фактичної роботи не показує, що протокол надзвичайно чутливий до завантаження каналу. Таким чином, неправильна конфігурація сервера може легко погіршити продуктивність, і це слід ретельно враховувати, щоб забезпечити масштабованість.

Класифікація пристроїв

У LoRaWAN використовуються парадигми численних комунікацій за допомогою цих трьох класів пристроїв. У таблиці 3.1, адаптованій з, представлений огляд:

- Пристрої класу А мають найнижчий заряд акумулятора. Кожну передачу висхідної лінії зв'язку, заплановану у випадковому порядку як ALOHA, супроводжують два вікна низхідній лінії зв'язку. Будь-яка інша передача з сервера повинна зачекати, поки ці слоти знову стануть доступними.

- Пристрої класу В мають можливість планувати додаткові слоти прийому за допомогою сигнального сигналу, що надходить від шлюзу.

- Пристрої класу С використовують майже безперервне вікно прийому і зручні для програм, у яких передача низхідній лінії зв'язку є домінуючою. Це призводить до меншої затримки за рахунок більшого споживання ємності акумулятора.

Безпека в LoRaWAN також береться у співдружність з декількома шарами шифрування. Тим не менш, цей протокол не забезпечує QoS і, отже, не повинен використовуватися для критично важливих за часом програм [9].

- **Weightless рішення**

Група невагомих груп інтересів – це неприбуткова глобальна стандартна організація, орієнтована на розробку відкритого стандарту для LPWAN, спеціально розробленого для підключення IoT, використовуючи або ліцензійний, або неліцензійний спектр. Наразі опубліковано три різні стандарти для підтримки цілого ряду способів та випадків використання.

- Weightless -W працює на телебаченні білих просторів, чисту частину специфікації спектра автоіонізації з екстраординарними умовами поширення. На жаль, ця смуга зазвичай підпорядковується місцевим регуляціям. Підтримує кілька модуляційних схем, включаючи QAM та DBPSK.

- Weightless -N представляє собою ультра вузьку систему для симплексних Communicа кінцевих пристроїв до базової Statio. Це означає значну енергоефективність за рахунок обмеженої гнучкості. Працює в діапазонах ISM під ГГц.

- Weightless -P пропонує двосторонній зв'язок високої продуктивності з мо-

жливістю забезпечити QoS. Використання модифікацій GMSK та QPSK скорочує дальність експлуатації приблизно до 2 км, що все ще корисно для приватних мереж.

- **Альянс DASH7**

Це неприбуткова галузева корпорація, створена з метою розробки одного-менного стандарту для бездротових датчиків / приводів або мереж через неліцензовані діапазони субГГц (зазвичай 433 МГц). Стандарт має своє коріння у добре встановленому ISO / IEC 1800-7 і широко застосовується у військовій галузі, наприклад, Міністерстві оборони США або НАТО для моніторингу різноманітних логістичних процесів. Найпомітнішими його ознаками є наступне:

- Визначає повний мережевий стек (модель OSI), що підтримує декілька комунікаційних парадигм і адаптований для використання з іншими реалізаціями фізичного рівня.

- Більшість взаємодій між мережевими елементами здійснюється за допомогою дій доступу до файлів. Цими файлами або структурованими елементами даних та їх властивостями керується у файловій системі та їх можна будь-коли модифікувати, що дозволяє дуже налаштовувати поведінку.

- Представлена модель зв'язку на запит-відповідь, в якій адресація заснована на контексті, що дозволяє групувати пристрої в різних підмножинах відповідно до їх призначення. Крім того, запити можуть бути налаштовані як події, що дозволяє уникнути небажаних відповідей і зменшити трафік.

- Використовує систему пробудження малої потужності для оптимізації споживання енергії в кінцевих вузлах.

- **Проект партнерства третього покоління**

3GPP – всесвітньо відомий проект партнерства, орієнтований на стільникові телекомунікаційні технології. Найбільш відомими та розповсюдженими їх характеристиками є WCDMA та LTE, але організація постійно розвивається та просувається до мереж нового покоління. У цьому контексті нова парадигма, ініційована Інтернетом речей, вже була визнана, а специфікація випуску 13 включає в себе сукупність функцій, пристосованих для виконання її основних вимог, тобто роз-

ширення покриття, тривалий час роботи акумулятора та складне скорочення, зберігаючи певний ступінь зворотної сумісності. В результаті з'явилися три нові технології, які називаються EC-GSM, LTE-M та NB-IoT.

EC-GSM

Невелике впровадження потрібно для системи Глобальної мобільної комунікації та її наступних реалізацій розвитку GPRS та EDGE. Саме ця остання була широко комерціалізована та використана в комунікаціях M 2M завдяки своєму колишньому покриттю та доступним цінам, хоча спочатку не призначалася для цих цілей. З цієї причини було випущено нову версію, спеціально присвячену парадигмі IoT, і номіновану розширеним покриттям GSM IoT (EC-GSM-IoT). Вона заснована на eGPRS і пропонує високу потужність, дальність дії, низьку енергозатратність та низьку складність порівняно з попередніми. Однак, принаймні в Європі та Північній Америці, це не породжує стільки очікувань, як LTE Cat M або NB IoT. На жаль, у цьому плані важко знайти будь-який огляд цих технологій, реальну реалізацію чи документ.

LTE M

LTE (Long-Term Evolution) є стандартом для бездротового зв'язку на високій швидкості передачі даних для мобільних телефонів і терміналів передачі даних. Підвищена ємність та швидкість є можливим засобом удосконалення різного радіоінтерфейсу разом із покращенням базової мережі. На жаль, його висока складність робить його непридатним для зв'язку M 2M, отже, з цього виникає необхідність нової технології (LTE-M), яка могла б виконати наступні цілі:

- Тривалий час роботи акумулятора для цього був введений режим економії енергії (PSM), щоб впоратися із обмеженими ресурсами акумулятора. Таймер визначає, коли пристрій доступний (перевірка підкачки) та коли він знаходиться в режимі глибокого сну.

- Низька вартість Еволюція мобільних технологій була зосереджена на оптимізації продуктивності, тим самим збільшуючи складність кінцевих вузлів. Нові категорії пристроїв (Cat 0, Cat 1,4 МГц та Cat 200 кГц) були визначені для необхідних скорочень витрат.

Зменшення складності модему можна краще оцінити в табл. 3.2, де узагальнено основні характеристики різних категорій та підкреслено технологічний прогрес. Основні та необхідні спрощення були здійснені в таких сферах:

- Антена за допомогою телефону був зведений до однієї антени.
- Розмір транспортного блоку був обмежений до 1000 біт одноадресних даних на підкадр, зменшивши максимальну швидкість передачі даних до 1 Мбіт / с як у висхідній, так і в низхідній лінії зв'язку.
- Система зв'язок Половина дуплексу дозволила досягнути спрощень в РЧ перемикачах і дуплексерах, а також видалення другого контуру фазового автопідстроювання частоти для перетворення частоти, за рахунок більш високого рівня в рази передачею і прийомом анімації.

NB IoT

Вузкий діапазон Internet of Things – це також нова система, побудована з існуючих функцій LTE з тією ж метою, щоб розширити стільникові мережі нового покоління для підтримки величезної кількості низько складних пристроїв. Аналогічним чином було здійснено істотне спрощення та оптимізацію, але повторне використання дизайну LTE не тільки максимізувало сумісність у зворотному напрямку, але й мінімізувало зусилля розвитку та час виходу на ринок. Очевидно, що такі складні функції, як мобільність між RAT, передача даних, вимірювання чи послуги в режимі реального часу, серед інших не підтримуються, але вони все ще мають перевагу перед іншими застарілими або менш оптимізованими технологіями.

- Покращене покриття в приміщенні на 20 дБ порівняно зі старим GPRS.
- Підвищена енергоефективність за допомогою декількох методик.
- Призупинення / відновлення з'єднання RRC обмежує потребу встановлення нового RRC-з'єднання.
- Передача даних користувача через площину управління.
- Тривалий переривчастий прийом (eDRX) розбуджує пристрій протягом певного періоду часу, шукаючи повідомлення без необхідності знову налаштовувати всю сигналізацію.

-Режим енергозбереження для роботи в режимі глибокого сну.

- Затримка звітності на 10 секунд або менше.

Гнучкість розгортання можлива завдяки мінімальній пропускну здатності системи 180 кГц як для висхідної, так і для низхідної лінії зв'язку, сумісності з базовою мережею LTE, підтримки мережевих служб, тобто аутентифікації, безпеки, політики відстеження та зарядки, а також трьох різних режимів роботи залежно від оператора наявного спектру. Він може бути налаштований як окремий, на спеціальному носії, що замінює GSM-канал (200 кГц), або вхідний, в межах розподілу спектру LTE, або всередині існуючого носія або в його охоронній смузі. Ці три сценарії зображено на рис. 3.1. Особливо в конфігурації вхідного зв'язку, збереження нумерології та ортогональності є надзвичайно важливими для того, щоб продуктивність звичайних користувачів LTE не була компрометована. По суті, NB-IoT використовує в цьому режимі один LTE PRB в частотній області, тобто дванадцять піднесучих частот пропускну здатності 15 кГц загалом 180 кГц.

Ця система продовжує розвиватися і випуск 14 вже опублікований 3GPP. Він одержав важливі вдосконалення в таких сферах, як позиціонування, мобільність або пейджинг, і включав підтримку багатоадресної передачі та нові класи живлення.

Нарешті, NB-IoT та LTE M мають чітку спільну основу та мають багато характеристик, але не є конкуруючими технологіями. Рисунок 3.2 краще ілюструє чітку ринкову ціль та різні випадки використання, на які звертається кожен. У той час як NB-IoT (жовті смуги) зосереджені на низькій швидкості та високій затримці, LTE-M (сині смуги) орієнтований на більш критичні для часу застосування, хоча, звичайно, є спільні області.

Bluetooth

Bluetooth – це справді глобальний, багатопровідниковий та сумісний стандарт, який присутній у мільйонах портативних електронних пристроїв, як планшети, смартфони, комп'ютери тощо. У середині 2017 року Bluetooth SIG (група спеціальних інтересів) випустила та додала Bluetooth Mesh, яка була включена до нової специфікації Bluetooth 5, щоб розширити підтримку та охопити різні сегме-

нти на ринку IoT.

Bluetooth Mesh Networking побудований на основах низької витрати енергії Bluetooth, тому більшість наборів мікросхем можуть користуватися мережевою підтримкою за допомогою оновлення програмного забезпечення. Дві його найпривабливіші особливості – використання моделі публікації / підписки для обміну даними та обмеженого механізму затоплення, запобігаючи ретрансляції повідомлень у циклі. У специфікації передбачено кілька способів налаштування мережі в залежності від характеристик та вимог конкретної установки. Це значно впливає на його продуктивність і масштабованість при умові, що не існує якась -або централізована експлуатація, тобто після того, як пристрої були надані, немає потреби координатора. З цієї причини стандарт визначає кілька характеристик, якими може володіти вузол відповідно до його ролі в мережі:

- Реле повторно передає повідомлення, що розширюють максимальний діапазон.
- Друзі зберігають та пересилають повідомлення, адресовані асоційованому вузлу низької потужності від свого імені.
- Вузол низької потужності - вузол з обмеженою потужністю, що має надзвичайно скорочений робочий цикл, який може ефективно працювати в сітєвій мережі завдяки підтримці другого вузла.
- Проксі відіграє ключову роль для забезпечення безперебійної сумісності з немережевими пристроями BLE, адаптуючи та повторно передаючи повідомлення за допомогою застарілого Bluetooth-з'єднання.

IEEE 802.15.4

Це технічний стандарт, вперше опублікований IEEE у 2003 році, який спрямований на низькі виробничі витрати з технологічною простотою. Його місія полягає в тому, щоб надати простим пристроям надійну бездротову технологію, яка роками працює на стандартних батареях, і наблизити створення радіочастотних зв'язків до середніх користувачів.

Стандарт працює в діапазоні ISM 2,4 ГГц зі швидкістю до 250 кбіт / с і визначає схеми зв'язку з низьким режимом роботи, які дозволяють пристрою прово-

дити більшу частину свого часу в режимі наднизької потужності. Визначено лише два перших шари рамки стека протоколу OSI, тобто фізичний та MAC-шари. Отже, в останні кілька років з'явилися різні технічні характеристики та комерційні рішення, що комплектують верхні шари.

У цьому розділі узагальнено основні аспекти найбільш релевантних альтернатив.

Zigbee PRO

Zigbee PRO є торговою маркою альянсу Zigbee, організації, що складається з компаній, урядових установ та університетів. Стандарт є відкритим кодом і визначає важливі функції, такі як спеціальна мережа або відкриття сервісу, а також визначає прикладні та мережеві шари. Саме Zigbee Light Link є одним із таких профілів застосування та спеціально орієнтований на управління внутрішніми та зовнішніми елементами освітлення, такими як світлодіодні світильники, лампочки, пульти та вимикачі. Найбільш релевантними його ознаками є:

- Визначає спосіб введення в експлуатацію з назвою Touchlink, який усуває потребу координатора. Тим не менш, потрібно, щоб цільові пристрої були фізично близькими до пристрою управління, який називається ініціатором.

- Мережеві адреси мають 16 бітну довжину і призначаються ініціатором з виділеного діапазону можливостей. Також доступні групові ідентифікатори, що охоплюють різну кількість пристроїв.

- Захист на рівні мережі за допомогою 128-розрядного мережевого ключа шифрування AES. Його розподіл на початкових етапах забезпечується за допомогою головного ключа ZLL, попередньо встановленого на всіх сертифікованих ZLL пристроях.

- Як і інші специфічні протоколи освітлення, включає декілька заздалегідь визначених профілів, які можна застосувати для створення "сцени" для різних ситуацій.

ISA100 Wireless

Він забезпечує надійну та безпечну бездротову технологію для некритично-

го моніторингу, наглядового контролю та програм відкритого / закритого циклу із затримками порядку 100 мс. Розроблений ISA разом із WirelessHART стає особливо актуальним у галузі промислового Інтернету речей (ІоТ) завдяки своїй надійності та використанню IPv6. Фактично, рівень її прийняття за останні два роки перевищив 67%.

На відміну від усіх інших протоколів, представлених у цьому розділі, рівень MAC не повністю відповідає стандарту 802.15.4, оскільки реалізований дещо іншим чином. Канал стрибкоподібної перебудови, синхронізації тимчасових інтервалів зв'язку, і синхронізовані по часу CSMA які включені, щоб зменшити перешкоди і шуми. На щастя, деякі з цих ключових особливостей уже внесені до поправок до 802.15.4e. Серед найважливіших його характеристик: підтримка декількох протоколів та застосувань (наприклад, сумісність на рівні додатків з ModBus, HART та багатьма іншими промисловими провідними стандартами), гнучкість, топології зірок та сіток або більший адресний простір. Взагалі ISA100.11a є більш складним і дорогим порівняно з іншими технологіями, такими як Zigbee, оскільки втрата даних може бути дорогим для операторів в промисловій екосистемі. Очевидний доказ дає архітектура мережі, що складається з різних елементів: Менеджер безпеки, Менеджер систем, шлюз, магістральні маршрутизатори та польові пристрої.

6LoWPAN

Це термін, що відноситься до набору стандартів, створених IETF, щоб забезпечити ефективне використання IPv6 з обмеженою потужністю і розслаблену пропускну здатність бездротової мережі, що працює на простих вбудованих пристроях. Це досягається за допомогою нового адаптаційного шару, серії механізмів стиснення та оптимізації пов'язаних протоколів. Важливо не підкреслювати важливість Інтернет-протоколу, оскільки він є всюдисущим у нашому сучасному світі, як наслідок, безперервна взаємодія з іншими системами на базі IP може бути вирішальним фактором для успішних установок ІоТ.

Таким чином, 6LoWPAN забезпечує ідеальну інтеграцію за допомогою бездержавного, ефективного та прозорого пристосування, виконуваного крайовими

маршрутизаторами.

Стек протоколів наведено в таблиці 3.4. Оптимізація проводиться в малому адаптаційному шарі між мережевим та MAC-рівнем, який у цьому конкретному випадку є IEEE 802.15.4, хоча й інші підтримуються. Високі показники стиснення досягаються, виходячи з того, що загальна інформація загальновідома всіма вузлами. Тому ієрархічний адресний простір в IPv6 адресах може бути усунуто більшу частину часу хостом та маршрутизаторами в межах LoWPAN. Іншими словами, ні хости, ні внутрішні маршрутизатори не повинні працювати з повним стеком IPv6 або повними протоколами додатків.

Узагальнено деякі основні характеристики цього протоколу:

- UDP в основному використовується як транспортний протокол через його низькі енергетичні витрати та простоту порівняно зі складністю TCP.
- ICMPv6 використовується для керування повідомленнями та виявлення сусідів, які були перероблені та оптимізовані для ненадійних мереж.
- Немає необхідності у вирішенні адрес, є пряме відображення адреси шару посилання на 64-розрядний ідентифікатор інтерфейсу адреси IPv6.
- Визначено дві категорії маршрутизації, що виконуються на різних шарах : шар зв'язку (*mesh-нід*) та IP на основі (*маршрутизація*).
- Підтримка різних технологій шару зв'язку, головним чином IEEE 802.15.4, ліній електропередач та діапазонів ISM суб-ГГц.
- Можливості фрагментації та повторної збірки для адаптації IPv6 (максимум 1280 байт) до максимального розміру IEEE 802.15.4 (127 байт).
- Використовує RPL -алгоритм маршрутизації вектора відстані, розроблений для роботи на вузлах з обмеженою енергією.

IoT парадигма часто відноситься до *Autonomous* пристроїв, що працюють в само-достатніх мережах. Цей протокол має декілька механізмів автоматичної конфігурації деяких фізичних параметрів, параметрів рівня каналу зв'язку та мережі (наприклад, налаштування каналів, ключі захисту, адреси тощо) та мінімізувати втручання людини; це також номінальне *завантаження*. Оптимізована вер-

сія покриття *сусіда Dis*, ключова функція IPv6, відповідальна за основні завантажувальні роботи та технічне обслуговування, визначена в стандарті, щоб виконувати певні завдання, такі як розкриття інших вузлів на тому ж посиланні, визначати рівень їх зв'язку адреси, знайти маршрутизатори або підтримувати інформацію про доступність щодо шляхів до активних сусідів. Нарешті, *Neighbor Discovery* встановлює три різні ролі відповідно до можливостей пристрою:

- Хост – це кінцевий вузол, як правило, датчики або пускачі з обмеженими ресурсами.
- Маршрутизатор може бути або краще обладнаним кінцевим вузлом, або додатковим агентом, спеціально присвяченим ролі пересилання IP-пакетів у межах 6LoWPAN.
- Маршрутизатор Edge є основою для мережі. Окрім маршрутизації трафіку, він виконує необхідні методи адаптації та стиснення для спілкування із зовнішніми мережами IP.

LoWPAN можна розуміти як сукупність вузлів, що мають загальну IPv6 префікс (перші 64 біти адреси IPv6). Завдяки сітчастим т OPOL OGY і мульти-хоп експедиції, мережа може подолати фізичне покриття

Обмеження в зв'язку з несприятливою навколишнім середовищем і розширення без необхідності в дорогої інфраструктури. Тим не менше, ці мережі діють не як транзит до інших мереж, а як кінцеве місце призначення. У зв'язку з цим у стандарті визначено три види мереж малої потужності:

- Спеціальна мережа повністю ізольована; не підключено до Інтернету чи інших мереж. Тим не менш, спрощений крайовий маршрутизатор потрібен для того, щоб виконувати генерацію локальної адреси та обробляти пошук сусіда.
- Проста мережа, підключена до іншої мережі, лише за допомогою одного маршрутизатора. Це пізніше вивчено в цій роботі.
- Розширена мережа включає кілька крайових маршрутизаторів, з'єднаних між собою за допомогою магістральної лінії в межах одного LoWPAN.

Нарешті, стосовно безпеки, з'єднання на рівні зв'язку захищені 128-бітним шифруванням AES. Однак шифрування в кінці повністю необхідне на рівні про-

грами, оскільки раніше заявлені мережеві обмеження перешкоджають використанню повного набору IPsec або складних брандмауерів у вузлах. Це може призвести до вразливості, коли інформація потрапляє за крайовий маршрутизатор

Thread

Thread – це відкритий бездротовий мережевий протокол, побудований на основі існуючої IEEE.

Стандарти 802.15.4 та 6LoWPAN (IETF). Основна його мета – поліпшити сумісність різних пристроїв постачальників, забезпечивши просту та безпечну установку та експлуатацію мережі. Він розроблений для економічно вигідних і малопотужних комунікацій, головним чином, в середовищі Smart Home, але одночасно передбачає більші сценарії.

Він був розроблений Thread Group, консорціумом приватних компаній, включаючи Silicon Labs, Schneider Electric, Google, ARM або Qualcomm, що сприяє використанню Thread та пропонує сертифікацію продукту, що відсутнє в 6LoWPAN.

Перша відповідна відмінність із 6LoW PAN стосується архітектури мережі. На додаток до категорій, представлених у попередньому розділі, Thread визначає три інші:

- Leader управляє реєстром ідентифікаторів маршрутизаторів і вирішує, який REED може стати маршрутизатором. У разі невдачі обирається інший керівник без втручання людини.
- REED (Придатні для маршрутизатора кінцеві пристрої) можуть стати маршрутизаторами в залежності від мережевих умов. Тим часом вони є кінцевим хостом, тобто вони не можуть ретранслювати повідомлення, а також не надавати послуги приєднання або безпеки до інших вузлів.
- Сонні пристрої - це кінцеві хости, які спілкуються лише зі своїм батьківським маршрутизатором і не можуть передавати повідомлення.

Друга явна невідповідність – це реалізація алгоритму маршрутизації RIP, відомого протоколу вектора відстані. Однак специфічні формати повідомлень для створення мережевих посилань, розроблені IETF, використовуються альтернатив-

но. Деякі його основні функції полягають у встановленні та налаштуванні послань, виявленні сусідніх пристроїв та підтриманні витрат на маршрутизацію. Крім того, MLE несе відповідальність за розподіл загальних значень конфігурації, що поділяються по всій мережі, і забезпечення того, щоб асиметричні витрати враховувалися при розрахунках витрат маршрутизації.

Існують й інші суттєві розбіжності з 6LoWPAN, які, для простоти, будуть представлені разом з іншими ключовими особливостями цього протоколу в укороченому порядку:

- DHCPv6 використовується замість версії 6LoWPAN для призначення IP-адрес.
- Прикладний рівень не визначений (див. табл. 3.5). Натомість пристрої пропонують загальний спосіб спілкування, а додатки можуть бути спеціально розроблені залежно від вимог.
- Підтримується лише IEEE 802.15.4 маршрутизація на основі IP-адреси (перенесення *маршруту*).
- Мережа обмежена 32 активними маршрутизаторами через обмежену кількість маршрутизації та інформацію про вартість зв'язків, що вкладаються в пакети IEEE 802.15.4.
- Повністю сумісний з більшістю існуючих модулів IEEE 802.15.4, лише оновлення програмного забезпечення.

3.3. Якісний аналіз протоколів

Цей підрозділ присвячений ретельному аналізу та судженням пояснених вище протоколів. Відповідно до контексту "Розумного міста", встановлюється система порівняння, щоб вирішити цю тему з об'єктивного та точного положення. Потім подається порівняльне порівняння, що стосується різних протоколів та їх характеристик.

Суворе порівняння вимагає встановлення узгодженого набору загальних правил і метрик. Тим не менш, відсутність міжнародно визнаної конвенції ще більше перешкоджає процесу вибору протоколів, оскільки ця цифра є особливо

складною для узгодження і в основному підпорядковується конкретним деталям проекту. Як результат, на цей тип аналізу часто впливають інші фактори, такі як особисті схильності та ділові інтереси. Прагнучи уникнути цих недоліків, обрані нижче метрики впливають із поєднання власних критеріїв. Слід зауважити, що порядок появи тривіальний і не відповідає його актуальності.

- Наявність обладнання на ринку є надзвичайно важливим. Для великих розгортань потрібна підтримка багатьох постачальників, щоб уникнути можливих ситуацій блокування.

- Масштабованість Розширення масивної інфраструктури повинно бути передбачуваним, автоматичним і не мати жодних збоїв. Протокол повинен забезпечувати за допомогою гнучкої топології, що охоплення мережі та кількість пристроїв легко розширюються, в той час як тривалість роботи підтримується в межах допустимих меж.

- Надійність Мережа реалізує здатність до самолікування, тобто може контролювати її компоненти та, що ще важливіше, відновлюватись від збоїв та діяти під час катастрофічних подій.

- Безпека в IoT зараз є однією з найбільш домінуючих тем. Враховуючи відсутність галузевих стандартів та потенційний згубний ефект від кібератак, цілісність та автентичність повинні будуватися в кожному компоненті екосистеми з першого етапу проекту; повністю від фізичного рівня до рівня програми.

- Моделі витрат на бізнес відрізняються залежно від постачальника та типу зруйнованої структури. Це не враховує вартість розгортання.

- Безкоштовні відкриті стандарти та платформи, що працюють у групах ISM та безоплатно.

- Оплата за вузол на основі передплати. Типовий для LPWAN, наприклад, GSM, NB-IoT або LoRaWAN.

Порівняння протоколів

При різноманітності протоколів IoT деякі загальноприйняті протоколи, коли апаратне забезпечення легко доступне для розробників, досягають надзвичайних

успіхів. Тим часом, іншим не вдається вийти за межі стадії загальноприйнятої стандартизації та бракує релевантних розгортань, які можна визнати серйозними альтернативами. Це справа у вазі. Незважаючи на перспективний потенціал з трьома різними стандартами та кількома реалізаціями, на ринку на даний момент є лише один постачальник обладнання. Це не відповідає першому пункту даної порівняльної бази та одній із основних вимог цього проекту. Тому невагомі пропозиції не можна вважати підходящим варіантом.

Ще один приклад протоколу, який не підтримував значного моменту, - DASH7. На жаль, не вдалося е Ind transcen Dent досягти успішних комерційних реалізацій. Тим не менш, його близьке майбутнє може бути не надто недосяжним завдяки IDLab, спільній дослідницькій ініціативі між Університетом Антверта та Університетом Гента. Стек з відкритим кодом, названий OSS-7, був випущений таким чином, щоб забезпечити еталонну реалізацію та сприяти її розширенню. В даний час підтримується кілька платформ, і пропонується практична допомога для розширення поставок. DASH7 може стати серйозним конкурентом, але невідомість робить його непридатним для проектів такого масштабу зараз.

З іншого боку, не завжди бажано, щоб у масових державних установах ця технологія набула глобального поширення, оскільки це може становити великі ризики для безпеки. Наприклад, Bluetooth, присутній у мільйонах персональних пристроїв, може бути не найкращим вибором, оскільки вуличні ліхтарі не повинні бути ні видимими, ні налаштованими з портативного електронного пристрою громадянина. Bluetooth Mesh – це великий крок вперед в IoT, але в основному розроблений для домашньої автоматизації та з серйозними обмеженнями, що виходять за межі цієї області. Більше того, сумісність може бути не такою гладкою, як рекламована через необхідність адаптаційного вузла для з'єднання зі застарілими пристроями. Це робить мережу не чисто координаторною і може спричинити додаткові проблеми масштабування. Нарешті, в основному протоколі було виявлено кілька недоліків у безпеці, які в основному впливали на конфіденційність та цілісність даних.

Zigbee вже міцно встановлений як протокол IoT, адекватний екосистемі

Smart City.. Тим часом Zigbee Light Link було схвалено декількома виробниками в галузі освітлення і забезпечує безперебійну сумісність з іншими продуктами Zigbee. На жаль, він в основному орієнтований на кінцевих споживачів та дрібно-масштабні підключення установки у зоні домашньої автоматизації.

І навпаки, Zigbee PRO може бути прийнятним рішенням, однак він потребує належного планування мережі та не підтримує IP. Для подолання цього було введено Zigbee IP на основі 6LoWPAN [18], але ціною втрати сумісності з іншими технологіями Zigbee, не кажучи вже про інші протоколи. Ще одним незначним недоліком Zigbee є вартість інтелектуальної власності та сертифікації, властива виробництву інтегральних схем.

Наявність усіх датчиків та приводів, що працюють над останньою версією протоколу IP, та безперебійної інтеграції з існуючими мережами, передбачає величезну перевагу, щоб подолати епоху островів IoT. Домен IP швидко розширюється поза межами локальної мережі та стає новим ринковим сектором. Існують різні рішення, що це дозволяють; ті, що базуються на IEEE 802.15.4 (6LoWPAN і Thread) та ISA100.

ISA100.11a характеризується високою стійкістю до перешкод (наприклад, шум машин), підвищеними технологіями впровадження, величезною гнучкістю, структурною складністю та ідеальною обробкою для автоматизації процесів. Ще одним вирішальним елементом є використання серії заздалегідь запрограмованих стрибкових моделей, які дозволяють співіснувати з IEEE 802.11. Незважаючи на індустріальну орієнтацію, цей протокол може бути сильним конкурентом, який слід ретельно розглянути для всієї екосистеми Smart City, особливо, якщо Smart Lighting розгорнеться разом з іншими послугами, які вимагають підтримки більш надійних та детермінованих передач. В іншому випадку можливості, запропоновані ISA100.11a, випереджають реальні потреби в системі освітлення, віддаючи перевагу більш простим та економічним альтернативам.

Останнім часом нитка набула значних обертів завдяки підтримці лідерів галузі таких як Google, чи Samsung. Він народився для подолання розбіжності установок 6LoWPAN, пропонування сертифікованих продуктів IoT та спрощення

конфігурації мережі в зоні домашньої автоматизації. Незважаючи на те, що зараз він є відкритим стандартом, він викликав певні занепокоєння і в даний час ставляться до цього скептично.

До публічного виходу проекту OpenThread стандартні специфікації були доступні лише членам альянсу, які вимагали дорогої підписки. Крім того, той факт, що мережа підтримує обмежену кількість активних маршрутизаторів може ускладнити свою масштабованість в великому розгортанні. Нарешті, його новизна також включає ризики; це ще недостатньо доведено, його програми не визначені конкретно, до того ж критичні помилки є у проекті OpenThread.

6LoWPAN – це стандарт, на якому базуються інші протоколи для включення IP через мережі з низькою потужністю та втратами. Були розроблені різні рішення, наприклад, представлені вище, щоб оптимізувати його роботу до конкретної області застосування та вирішити деякі, що стосуються питань, наприклад, загроз безпеці.

Тим не менш, правильна реалізація 6LoWPAN сама дозволяє досягти значних ступенів налаштування, ключового чинника майбутніх удосконалень та включення інших сервісів, які ще не розглядаються. Ще один аргумент на користь 6LoWPAN успішно тестується в реальних масових реалізаціях, таких як Smart Santander.

Мобільна індустрія підтримала стандартизацію різних технологій LP-WAN, розуміючи, що не існує єдиного рішення, яке б ідеально підходило для всіх різних потенційних масових застосувань IoT.

Таким чином, GSM (або EC-GSM) та NB-IoT можуть доповнювати один одного відповідно до конкретних вимог проекту. У випадку інтелектуального освітлення GSM використовувались у різних конфігураціях, головним чином у зворотному зв'язку, але це багато в чому залежить від архітектури системи. Незважаючи на більш високу потужність, більш складних модемів і тривалих затримок синхронізації, це добре відомий і доведений стандарт з великим міжнародним охопленням. Тим часом, NB-IoT спеціально розроблений для пристроїв IoT наднизького рівня, тобто стосується надзвичайних умов покриття (наприклад, підземних

сенсорів) або мінімальних швидкостей передачі. Масштабованість гарантується кожен носій 200 кГц може підтримувати до 200 000 абонентів і пропонує різні способи збільшення цієї суми.

Незважаючи на те, що на даний момент покриття обмежене, оператори телекомунікацій інвестують значні кошти в розгортання мережі, і це, мабуть, буде кращим рішенням для міських районів у недалекому майбутньому (разом з LTE-M). Обмежуючим фактором може бути той факт, що мережа належить оператору і, найчастіше, вона забезпечує власну платформу управління.

Нарешті, вартість визначається на основі передплати за розміром системи, і це, мабуть, її головний мінус, враховуючи масштабність установки громадського освітлення.

На відміну від NB-IoT, LoRaWAN – це зріла екосистема з великою кількістю доступних компонентів на ринку. Її застосовність до Smart Lighting вже підтверджена та можлива завдяки простій конфігурації мережі та відмінному покриттю, що могло б забезпечити обслуговування невеликої європейської країни лише з кількох шлюзів. Однак слід враховувати, що рекламована ефективність була досягнута в ізольованих мережах і ставиться під сумнів. Так для невеликих ланок мережі продуктивність визначається обмеженням робочого циклу, характерним для діапазонів ISM, тоді як у великих конгломераціях розгортаннях відсутність координації між шлюзами гальмує масштабність через збільшення кількості зіткнень. Багато операторів пропонують рішення LoRa щорічно за підпискою. І все-таки LoRa знаходиться в явному недоліку в порівнянні з стільниковими мережами в цій області, які можуть запропонувати QoS внаслідок абсолютно непередбачуваного використання різних інтерференційних технологій в ISM-діапазонах.

Відомий і широко прийнятий протокол, **Sigfox**

- Sigfox – це власне технологія, що забезпечує повне рішення питань мереж IoT, якими можна керувати лише за допомогою власної хмари та інструментів управління.

- Підтримка двосторонніх комунікацій не зовсім зрозуміла через відсутність відкритого стандарту. З цього приводу різні джерела наводять протилежні факти.

- Незважаючи на те, що радіоінтерфейси виробляються багатьма виробниками за відносно недорогою ціною, Sigfox вже налагодив партнерство з різними операторами, що надають ексклюзивні права на певну територію. Це робить неможливим розгортання приватних мереж і створює залежність від однієї структури для надання послуг.

- Його бізнес-модель базується на основі оплати за вузол та на основі підписки.

Однак наголосимо на тому, що саме хмарна інфраструктура значно збільшує витрати.

Підсумки нашого дослідження з питань цього розділу свідчать про відсутність ідеальної відповідності платформ як для цифровізації в цілому, так і до IoT проекту. Існуватимуть способи компромісу між вартістю, гнучкістю та складністю, і вирішувати, хто буде вирішувати що обрати найбільш підходящим.

На закінчення цього розділу, технічне порівняння між найбільш релевантними характеристиками протоколів узагальнено показано в таблиці 3.6. Крім того, інша таблиця стосується технологій, заснованих на IEEE 802.15.4, тобто Zigbee, Thread та 6LoWPAN, щоб виділити її відмінності в інших якісних вимірах.

4 . КОНЦЕПТУАЛЬНА АРХІТЕКТУРА РОЗУМНОГО МІСТА

4.1. Вимоги на архітектурному рівні Smart City

У попередньому розділі було представлено безліч бездротових протоколів, організованих у три основні групи: широкополосна мережа низької потужності, бездротова персональна мережа та стільникові системи. У цій главі зосереджено опис різних альтернатив на архітектурному рівні та викладені початкові оцінки майбутнього розгортання. По-перше, набір послуг, пов'язаних із Smart Lighting, пропонується для побудови гіпотези про необхідність мережі. Потім було обрано репрезентативний протокол від кожної групи, проведено розрахунки розмірності мережі та викладено ілюстративний приклад архітектури.

Інфраструктура Smart Lighting надає представникам влади й суспільства корисну інформацію, зібрану з різних типів датчиків, розташованих у світильниках, рознесених по місту. Для виявлення базового набору послуг, необхідних для цього проекту, було проведено поглиблений аналіз фактичних обчислень необхідності. Додатково технічні аспекти, що стосуються періодичності, розрахункового корисного навантаження та потреби підтвердження сегментів для кожної послуги, описані в таблиці 4.1.

Густі мережі дуже складні для моделювання, особливо в популярних діапазонах ISM та міських сценаріях, де є багато джерел перешкод. З цієї причини були зроблені наступні припущення щодо зниження трудомісткості, маючи на увазі, що це може призвести до надмірного навантаження мережі та жорсткої верхньої межі його максимального розміру.

- Таймери ініціалізуються випадковим чином, щоб уникнути постійних зіткнень та проблем із повторною передачею.
- Передані дані є результатом прямого відображення виводу датчика на корисне навантаження рівня MAC. Накладні витрати з протоколів рівня додатків не досліджувалися. Значення, показані в Таблиці 4.1, були отримані з таблиць даних комерційно доступних датчиків.

- Збірка даних з різних джерел не передбачається.
- Датчики інтенсивності руху присутні приблизно в 10% встановлених світильників. Цей показник виходить з аналізу кількості світильників на шафі, їх розташування на звичайній вулиці та міркувань за аналогічними критеріями.
- Аперіодичні події, такі як зменшення вимоги або спрацьовування тривоги (виявлення аварій та відкриття шафи), не будуть досліджені в цьому розділі, оскільки вони не мають значення для загального аналізу потужностей. Проте, відомо, що повідомлення цього роду слід використовувати як підтвердження внаслідок його спорадичного характеру.

Таблиця 4.1.

Гіпотеза щодо запитів на дані установки.

Назва	Повідомлення	Період (години)	Корисне навантаження (байти)	АСК
Увімкнено вимкнено	2	24	1	Так
Статус	1	1	2	Так
Інтенсивність світла	1	1	3	Так
Інтенсивність руху	4	0,02	8	Немає
Температура	1	1	5	Немає
Вимірювання потужності	1	1	2	Немає
Затемнення	-	-	1	Так
Детектор аварій	-	-	1	Так
Відкрито кабінет	-	-	1	Так

Наступні розділи розширюють розмірне значення k для трьох різних технологій, точніше IEEE 802.15.4, LoRa та NB-IoT (хоча цей останній дещо відрізнятиметься). Для цього аналізу було побудовано два різних режими руху для спостереження за роботою в різних ситуаціях та отримання реалістичних меж пропускну здатності.

- **Найгірше:** пристрої надсилають один тип вимірювань на пакет, в результаті чого в середньому їх кількість становить 28 пакетів на годину з максималь-

ним завантаженням MAC 8 байт. Світільники містять усі датчики, згадані в таблиці 4.1, за винятком вимірювачів інтенсивності руху, які розподіляються, як згадувалося вище.

- **Оптимістично:** пристрої можуть агрегувати інформацію з різних датчиків в один і той же пакет. Не всі світільники обов'язково містять повний набір датчиків; температура, світло та інтенсивність руху розподіляються відповідно до специфіки плану розгортання. Отже, звичайний світільник надсилає лише одне повідомлення за годину, тоді як світільники з трафіком у вимірювачах напруженості передають 15 повідомлень на годину в IEEE 802.15.4 і вдвічі більше в LoRa через залежність розміру пакету від коефіцієнта розповсюдження. У середньому це призводить приблизно до 3 та 4 повідомлень (відповідно) на годину з максимальним корисним навантаженням, де підтверджуються всі передачі. У будь-якому разі, дані про непризану справу включаються також заради повноти.

Зауважте, що це середні значення, що поєднують швидкість генерації пакетів від пристроїв з датчиками руху та без них, враховуючи його щільність. Наміром є надання загальної ідеї, а не закритих визначених меж.

Види датчиків

Модель, розроблена в даному, ґрунтується на припущеннях різного характеру. Був проведений швидкий ринковий та технічний аналіз, щоб визначити найбільш відповідні датчики, що використовуються в Smart Lighting, та встановити кількість байтів, що генеруються при кожному вимірюванні. Інформація з кожної специфікації сенсора використовувалася в більшості випадків, однак для служб, що застосовуються для конкретних програм, не вдалося знайти надійних джерел, тому викладаються обґрунтовані припущення.

Послуги, передбачені цим проектом, були такими:

- **On / Off :** Одного байта повинно бути достатньо, щоб забезпечити цю функціональність.

- **Статус :** На це також немає великого попиту. Виходячи з заголовків керуючих повідомлень у протоколі додатків MQTT, можна оцінити, що для повідомлення про цю метрику потрібно буде 2 байти.

- **Інтенсивність світла** : MAX44009 -це звичайний датчик навколишнього світла, має широкий динамічний діапазон 22 біт. Вимірювання передаються загалом 12 біт через інтерфейс I²C .

- **Інтенсивність руху** : Є кілька методів, доступних в Мар-кет для визначення характеристик трафіку, а саме, відеокамер, індуктивних петель, магнітометри, ультразвук і лазер. Це останнє досить поширене і не вимагає встановлення на дорозі, а збоку. Модель UTM-30LX-EW також була розглянута в цій роботі. 8 байт вимірювань надсилаються через кабель Ethernet.

- **Температура** : всюдисущий датчик температури і вологості в DIY-проектах DHT22 був обраний для його невеликих розмірів, низького споживання та адекватної ціни на продуктивність. Він виробляє 40 біт інформації за вимірювання.

- **Вимірювання потужності** : для надання цієї послуги було обрано роз'ємний стрижневий трансформатор SCT-013 завдяки зменшеному розміру та оптимальній характеристиці. Він дає вимірювання в 2 байти агрегованим способом, тобто абсолютне споживання передається в кожному повідомленні, а платформа відповідає за обробку відмінностей.

4.2. Технологія IEEE 802.15.4

Присутній у багатьох розгортаннях IoT у формі багатьох його варіантів, IEEE 802.15.4 – це налагоджена технологія, яка характеризується максимальною продуктивністю. Досліджувана мережа налаштована в деревній топології (рис. 4.2), використовує режим роботи без маяка з технікою доступу CSMA / CA і містить єдиний координатор PAN, що обслуговує невідому кількість пристроїв з характеристиками, згаданими в розділі 4.1. Окрім зондування, пристрої можуть виконувати завдання маршрутизації [22].

Дослідження в цій галузі включають математичні методології, такі як, яка вивчає найгірший сценарій для топології дерев кластерів за допомогою теорії мережевого обчислення, застосованої в детермінованих системах черги, та інших експериментальних процедур, наприклад, в якій використовуються кілька Мет

RICS для характеристики тренажера. Аналіз, представлений у цій тезі, можна вважати підходом на півдорозі, що поєднує їх найбільш релевантні аспекти і, головним чином, ґрунтується на.

Спочатку продуктивність оцінювали як функцію корисного навантаження та присутності АСК для передачі за один хоп. У мультихопних мережах цей максимум розподіляється між вузлами, розташованими на відстані, що перешкоджає передавачу (вважається R_{INT}), як показано на рис.4.3. Ця кількість визначається параметром ω , щоб підтримувати послідовність з, і змінює загальну пропускну здатність наступним чином.

$$T_{\text{проп.зд.}} = \frac{n \cdot 8}{\omega \cdot T_{tx}} \quad (4.1)$$

де n позначає розмір корисного навантаження в байтах, а T_{tx} - тривалість часу передачі одного хоп-пакету. Для простоти передбачається, що існує мінімальний показник зворотного відхилення для алгоритму CSMA / CA, тобто $T_{\text{випадк}} = 0,32$ мс, а час поширення (τ) незначний. Ці та інші параметри узагальнені в таблиці 4.2 разом з їх визначеннями.

Розрахунок часу передачі для обох випадків був проведений за обґрунтуваннями, шляхом сортування та додавання різних часових інтервалів, що складають кадрову передачу. Для нормальних умов роботи міжкадровий час T_{IFS} перекривається з CSMA / CA і поглинається часом відключення.

$$T_{tx-N_{ACK}} = T_{\text{Данних}} + (T_{IFS}, T_{\text{випадк.}} + T_{CCA} + T_{s\omega TX}) \quad (4.2)$$

$$T_{tx-ACK} = 2\tau + T_{tx-N_{ACK}} + T_{ACK} \quad (4.3)$$

де $T_{\text{Данних}}$ і T_{ACK} означають тривалість часу інформаційного пакету і АСК відповідно, , обчислюються наступним чином:

$$T_{ACK} = T_{s\omega TX} + \frac{11 \cdot 8}{250} = 0.544 \text{ м} \quad (4.4)$$

$$T_{\text{Данних}}(n) = T_{TXhdr} + T_{TX\text{данних}} + T_{TXftr} = \frac{(31+n) \cdot 8}{250} \text{ мс} \quad (4.5)$$

Формат пакету даних

Розрахунок тривалості часу пакета, залучає в досконале розуміння його

структури. Попередні формули представляють набір полів, які графічно пояснені на рис. 4.4.

Як і будь-яка інша громадська інфраструктура, Smart Lighting має бути забезпечений певним ступенем безпеки, особливо з огляду на поточний ріст кіберзлочинності. Служби, що передбачаються, повинні робити компроміс між захистом та протоколом, але завжди забезпечувати конфіденційність та достовірність даних. Це були критерії, застосовувані для вибору значень параметрів, описаних нижче, незалежно від послуги. Тим не менш, конфігурація може бути легко адаптована навіть до кадру за рамкою, якщо потрібно.

- Допоміжний заголовок безпеки. І конфіденційність даних і Authenticity забезпечується механізмом безпеки. Ключ визначається неявно від ініціатора та одержувача, в результаті чого довжина поля становить 5 байт.

- Зашифрований MAC. Безпека знаходиться на рівні 5 згідно з класифікацією. Таким чином, MIC вводить 4 байти накладних витрат.

- Адресація полів. Передбачається, що в контрольованому середовищі сукупність адрес не перевищує 2^{16} . Загальна довжина становить 6 байт, де кожна адреса займає 2 байти, а вихідний PAN-ідентифікатор пригнічується завдяки активації стиснення PAN ID в полі управління кадром.

Максимальний розмір пакета, зазначений у стандарті, становить 133 байти. Отже, максимально можливе корисне навантаження з урахуванням накладних витрат, введених рівнями безпеки, MAC та PHY, становить 102 байти.

Розподіл світильників

Київ загальною площею 847,7 км², що спричиняє велику складність через досить нерегулярний розподіл споруд.

Для визначення кількості та розподілу світильників навколо випадкового блоку, який позначений червоним кольором, було обрано центральну частину міста (див. рис. 4.5). Можна припустити, що відстань між послідовними світильниками в одному тротуарі становить приблизно 20 метрів і 30 метрів між підвісними світильниками, присутніми посеред головних вулиць.

Модель поширення журналу відстані використовується для характеристики радіорозповсюдження та оцінки перешкод комбінованого каналу. Ця модель прогнозування, заснована на наступному емпіричному математичному формулюванні.

$$PL = PL(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (4.6)$$

де $PL(d_0)$ - втрата потужності вільного простору на еталонній відстані (d_0), один метр у цьому дослідженні, n - коефіцієнт втрат тракту, а d - відстань між передавачем і приймачем. У цій моделі коефіцієнт являє собою вплив перешкод, наявних у сценарії, і чинить значний вплив на результат. Її значення було обрано ($n=3$) виходячи з запису симуляцій, представлених у [20], для зовнішнього розповсюдження між будівлями.

Площа покриття передавача повинна бути достатньою, щоб дістатися до вузлів на рідко щільних вулицях, наприклад, на рис. 4.5, при цьому мінімально імітуючи перешкоди каналу, спричинені для інших вузлів. Припускаючи середню відстань у 25 метрів, втрата шляху дорівнює приблизно 72 дБ. Відомий стандартний приймач Xbee Pro, що має чутливість -100 дБм, повинен бути налаштований при потужності передачі щонайменше -28 дБм. Майже 10 вузлів потраплять в цю зону перешкод (зображена колом на рис. 4.5), що матиме значний негативний вплив на роботу мережі. В інших районах, наприклад, парки, туристичні вулиці чи університети, ця кількість може різко відрізнятись.

На щастя, у сценаріях Smart Lighting існуюча відносна узгодженість вищезазначених показників полегшує конфігурацію радіопараметрів, щоб підтримувати цей небажаний ефект під контролем.

Аналіз та результати

По-перше, максимальна пропускна здатність для одноконтурної конфігурації отримана і зображена на рис. 4.6 для ілюстрації ефекту корисного навантаження та використання передачі знань.

Пропускна здатність збільшується з розміром корисного навантаження,

який становить від 1 до 102 байт. Найвище значення для не підтверджених передач становить 166,7 кбіт / с і відповідає використанню в каналі близько 67% від можливої фізичної швидкості. У разі визнаної зв'язку, максимум 155,5 кбіт з в використанні потужності каналу близько 62%.

По-друге, максимальна пропускна здатність була проаналізована як функція корисного навантаження, так і параметра ρ , пов'язаного з кількістю пристроїв, що знаходяться в інтерференційному просторі радіо для передачі з декількома скачками. Результати представлені на рис. 4.7, що демонструє експоненціальне зниження продуктивності із збільшенням перешкоджаючих вузлів і доводить необхідність мати план розгортання мережі для зменшення цього ефекту.

Нарешті, оцінка кількості пристроїв, розгорнутих у топології дерева кластерів та обслуговуваних одним координатором PAN, може бути обчислена шляхом ділення максимальної пропускної здатності мережі на необхідну швидкість на пристрій. Результати представлені в таблиці 4.3 і на диво показують зменшення штрафу, спричиненого використанням АСК з більш сприятливими умовами (15% у гіршому випадку, а 7% в оптимістичній моделі). Імовірно пояснення цього результату полягає в тому, що при такому розмірі мережі вплив АСК на насичення вже не може бути незначним.

$$N_{\text{Пристроїв}} = \frac{\text{Максимальна пропускна здатність}}{\text{Пропускна здатність}_{\text{пристрою}}} \quad (4.7)$$

Практична максимальна потужність

Щодо потужності, IEEE 802.15.4 виявився більш ніж здатним обробляти всю систему громадського освітлення міста з кількома координаторами PAN. Тим не менш, це може бути неможливим з огляду на бажаний рівень затримки та надійності в реальному сценарії, хоча це значно зменшить складність розгортання. Наприклад, якщо координатор не зможе відпрацювати повідомлення, значна частина світильників залишиться без служби зв'язку, але все ще буде функціонувати. Тому фізична надмірність є правильним рішенням, але й при цьому бажано обмежувати розмір дерева згідно певних специфікацій QoS, щоб зменшити цей ризик.

Точний розрахунок затримки й PER – це важке для виконання завдання,

особливо у кількох мережах стрибків. У науковій літературі існує декілька пропозицій щодо пристрою без маяка IEEE 802.15.4, хоча більшість робіт було зосереджено на режимі включення маяка d завдяки його передбачуваності.

Пропонується ітеративний алгоритм обрізки для пошуку максимальної кількості стрибків у дереві за певних обмежень QoS. Хоча повна і детальна математична характеристика повинні бути вирішені також аналітично. Для цього завдання було розроблено звичайну програму MATLAB, яка все ще не має успіху, оскільки результат дає узгоджені результати. З цієї причини було проведено оцінку меж затримки менше 50 мс та PER близько 20% за результатами моделювання в. На наш погляд, необхідно провести більше досліджень, або комп'ютерне моделювання, або реальне тестування справжніх можливостей цієї технології, щоб її повністю охарактеризувати.

Ймовірність доставки пакетів є відповідним показником, оскільки чим глибше дерево, тим більше шансів, що пакет не в змозі досягти кореневого вузла. Обґрунтованим припущенням є те, що IEEE 802.15.4 зможе переносити PER від 1 до 10%, особливо якщо використовуються спроби рівня застосування без істотного впливу на час автономної роботи. Тим не менш, високий рівень втручання, присутній у міських сценаріях робить результат рівня 20% більш правильною оцінкою. Крім того, ймовірність помилок в АСК є на порядок меншою, ніж в пакетах даних, тому спочатку нею можна знехтувати.

Консервативною стратегією було б вимагати, щоб коефіцієнт доставки пакетів становив 90% (p_{del}). Отже, максимальна кількість переходів у шляху обмежена:

$$h \leq \frac{\ln(p_{del})}{\ln(1-q)} \quad (4.8)$$

де q - вірогідність відкидання пакетів, задана $q = p^{r+1}$ понижуючими залежностями:

- r - максимальне число повторних спроб після збою передачі, встановлене за замовчуванням 3 в стандарті.
- p - коефіцієнт помилок пакетів у кожному посиланні.

Максимальна глибина трьох може бути 65 стрибків за допомогою цього методу. Відомо, що найгірший сценарій може зазнати більш жорсткого обмеження через частішу передачу пакетів. В принципі це не впливає на попередні значення розміру мережі, але, нам здається, що тестування та валідація цієї аналітичної розробки була б зручною у майбутніх дослідженнях.

4.3. Технологія LoRaWAN

Головною перевагою LoRa перед попередньою технологією є її великий діапазон, простота мережі та відносно легке масштабування. На відміну від традиційних технологій стільникового зв'язку, у LoRaWAN переважає трафік висхідної лінії зв'язку та розміщується за потребою, отже, не завжди найбільш ефективно та впорядковано. Як результат, потенціал LoRa може впоратися з міжклітинними втручаннями у щільних розгортаннях є важливою справою, яка зараз вивчається.

У цьому випадку досліджувана мережа була налаштована у зірковій топології та містить єдиний шлюз, що обслуговує невідоме число пристроїв класу A із характеристиками, згаданими у розділі. Вузли рівномірно розподілені навколо шлюзу. Модель Окумура-Хата була використана для обліку втрат на поширення у міському середовищі. Для простоти використовувалися лише три обов'язкові канали на 868 МГц (смуга пропускання 125 кГц), що природно характеризується обмеженням робочого циклу на 1 відсоток для цієї смуги.

У цьому розділі представлено два наближення. Перший підхід розробляє аналітичну модель з використанням загальних показників. На відміну від цього, другий метод є суто математичним, і він вже був розроблений як визнання стійкості до перешкод, тому не потребує подальшого перегляду.

Формат пакету

Кадр LoRa складається з преамбули зі словом синхронізації, фізичного заголовка з додатковими CRC, корисного навантаження та контрольної суми CRC. Структура визначена та проілюстрована на рис.4.8. Заголовок його не є обов'язковим і може бути відключений, коли довжина корисного навантаження, швидкість кодування та наявність CRC заздалегідь відомі (неявний режим). Загальний

час у ефірі в значній мірі змінюється залежно від часу символу та тривалості корисного навантаження, які визначаються вибраною швидкістю передачі даних, як показано в таблиці 4.4, і задається рівнянням 4.9.

Преамбула	Фізичний заголовок	PHDR CRC	корисне навантаження	корисне навантаження CRC
Лише явний режим				

Рисунок 4.8. Формат кадру LoRa.

$$T_{oA} = T_{\text{Преамбули}} + T_{\text{Корисн.Навант.}} \quad (4.9)$$

Конфігурація преамбули є загальною для всіх модемів, і її тривалість задається:

$$T_{\text{преамбули}} = (n_{\text{преамбули}} + 4,25) * T_{\text{символу}} \quad (4.10)$$

Де $n_{\text{преамбули}}$ -це кількість запрограмованих символів преамбули і за замовчуванням встановлюється 8. Тривалість корисного навантаження та заголовка обчислюється з:

$$T_{\text{Корисн.Навант.}} = T_{\text{символу}} * \left[8 + \max \left(\left\lceil \frac{8PL-4S+28+16-20H}{4(SF-2DE)} \right\rceil (CR + 4), 0 \right) \right] \quad (4.11)$$

З такими залежностями:

- PL позначає кількість байтів корисного навантаження. У цьому випадку це буде 8 байт, як зазначено в вимогах, плюс додаткові 13 байт для накладних шарів MAC.

- SF - коефіцієнт поширення. Тільки ті, що показані в таблиці 4.4, створюють зону покриття, показану на рис. 4.9. Числові значення для радіусу кожної області можна знайти в таблиці 4.5. Значення чутливості трансивера HOPERF RFM95w були використані, оскільки цей модуль LoRa буде використовуватися в експерименті.

- H означає наявність необов'язкового заголовка. Явний режим враховується, тому його вимкнено.

- DE стосується низької оптимізації швидкості передачі даних LoRa. Він є

обов'язковим для двох перших швидкостей передачі даних ($SF = 12, 11$), тоді як для інших він відключений.

- CR - це застосована швидкість кодування, яка становить від 1 до 4. Використовується зазначений мінімум.

4.3.2. Наближення на основі метрик

Цей перший підхід базується на тому, що оцінюється максимальна кількість пристроїв, що обслуговуються однією базовою станцією для різних випадків використання МТС. Розрахунок екстраполюється з дослідження одного пристрою за припущеннями чистого доступу до каналу ALOHA, відсутності АСК та наявності обмежень регулювання частоти.

Для наочності покрита територія була поділена на кілька секторів, як показано на рис. 4.9, відповідно до використовуваного коефіцієнта поширення за моделлю поширення Окумури Хата в мегаполісах та вищезгаданому трансивері. Кількість пристроїв у кожному з них було обчислено за наступною формулою, а результати наведені в таблиці 4.5.

$$N_{\text{Пристроїв}} = \lfloor \sum_{i=1}^6 \frac{n_{i,k} * T * \eta}{T_{oA_i}} \rfloor \quad (4.12)$$

де $n_{i,k}$ позначає кількість каналів на швидкість передачі даних (є 3 обов'язкові канали на 868 МГц), T - звітний період вузла (дорівнює оберненій швидкості передачі даних пристрою $T = \frac{1}{\lambda_D}$), а η означає загальну ефективність LoRa, яка через схожість схеми доступу з чистою ALOHA може вважатися 18,4%. Нагадаємо, що пристрій може передавати на будь-якому каналі та швидкості передачі даних у будь-який час.

Протокол унеможливорює передачу пристроями даних даних, встановлюючи більш жорсткі вимоги в робочому циклі, ніж ті, які встановлені регулятором спектру. Час очікування після передачі пропорційний часу пакету в ефірі до наступної спроби в тому ж підканалі.

$$T_{off_{\text{піддіапазону}}} = T_{oA} * \left(\frac{1}{\text{Робочий цикл}} - 1 \right) \quad (4.13)$$

Є позитивом, що середній період повідомлення відповідає цьому обмежен-

ню, і він не обмежує максимальну кількість пристроїв. Проте слід зауважити, що датчики інтенсивності руху мають більш високі вимоги швидкості передачі, і, отже, на етапі впровадження не підходять для розподілу у трьох кільцях внаслідок цього обмеження.

Максимальне корисне навантаження для MAC LoRa змінюється залежно від фактора розповсюдження, див. табл. 4.4. Однак для простоти обчислень було враховано, що максимальне корисне навантаження є рівномірним для всіх режимів і дорівнює 51 байту (найбільш обмежувальним), з 8 байтами накладних витрат від мережевого та MAC-шарів. Це є причиною таких низьких значень пропускної здатності, представлених у таблиці 4.5, спеціально для останнього коефіцієнта розповсюдження.

На закінчення, максимальна кількість пристроїв з урахуванням умов, викладених у розділі 4.1, вищезгаданих припущень та з урахуванням обмежень робочого циклу, становить 2412 для найгіршого випадку та 11231 для оптимістичної моделі без будь-яких втручань.

Математична модель

Математична методологія використовується для оцінки максимальної кількості вузлів, які могли б підтримуватися одним шлюзом LoRa. Це вже враховує ефект захоплення, тобто можливість правильного отримання пакету, незважаючи на те, що він перетинався з іншими пакетами. Іншими словами, власницький рівень PHY LoRa може бути здатний успішно декодувати прийнятий пакет навіть у випадку втручання, але залежно від RSSI інтерфейсу та частини пакета, на який впливає. Для спрощення розрахунків моделі були зроблені наступні припущення:

- Нехтуємо завмиранням при використанні моделі втрат шляху Окумура - Хата.
- Потужність сигналу АСК шлюзу більша за загальну потужність інших одночасних передач ($W_{i,k}^{Mote} = 1$).
- Пристрій не може отримати кадр, якщо йому заважають два або більше кадрів одночасно ($W_{i,k}^{GW}, W_{i,k}^{Один}, W_{i,k}^{Mote} = 0 \quad \forall k > 1$)
- Імовірність повторної передачі в результаті нового зіткнення дорівнює

ймовірності вибору того ж коефіцієнта розповсюдження та одного каналу ($P_c = \frac{1}{F} \frac{1}{DR} = 0.556$)

• Значення чутливості HOPERF RFM95w та відхилення комбінованого каналу використовувались для визначення областей покриття та рівня перешкод.

Модель оцінює як функцію мережевого навантаження швидкість помилки пакетів, що є оберненою ймовірністю успішної передачі.

$$P_s = \sum_i p_i (P_{1,i} P_i^{S,1} + (1 - P_{1,i}) P_i^{S,Rc}), \quad (4.14)$$

де $P_{1,i}$ - це ймовірність успіху першої спроби передачі і зворотна до середньої кількості спроб на кадр, а $P_i^{S,1}, P_i^{S,Re}$ - ймовірність успішних передач як для першої спроби, так і для повторної передачі відповідно. Вони визначаються:

$$P_i^{S,1} = P_i^{\text{Данних}} P_i^{\text{Ack}} \quad P_i^{S,Re} = P_{i,Rc}^{\text{Данних}} P_i^{\text{Ack}} \quad (4.15)$$

Перша спроба передачі може бути описана процесом Пуассона, однак це не стосується повторної передачі. Тому вони визначаються як поєднання різних ймовірностей події ($W^{GW}, W^{\text{Один}}, W^{\text{Обидва}}$).

$$P_{i,Re}^{\text{Данних}} = \frac{W_i^{\text{Один}} + W_i^{\text{Обидва}} (1 - P_i^c)}{1 - W_{i,1}^{GW}} P_i^{\text{Данних}} \quad (4.16)$$

Вірогідність успішної передачі висхідної лінії зв'язку в обох випадках визначається:

$$P_i^{\text{Данних}} = e^{-(2T_i^{\text{Данних}} + P_i T_i^{\text{Ack}}) r_i} + \sum_{k=1}^{N-1} \frac{(2r_i T_i^{\text{Данних}})^k}{k!} e^{-2r_i T_i^{\text{Данних}}} W_{i,k}^{GW} \quad (4.17)$$

$$P_{i,Re}^{\text{Данних}} = \frac{W_i^{\text{Один}} + W_i^{\text{Обидва}} (1 - P_i^c)}{1 - W_{i,1}^{GW}} P_i^{\text{Данних}} \quad (4.18)$$

І, нарешті, коефіцієнт пакетних помилок може бути обчислений як зворотній до P_s .

$$PER = 1 - P_s \quad (4.19)$$

Проведено аналіз продуктивності моделі для різних значень корисного навантаження шару та навантаження в двох сценаріях, наведених у Розділі 4.1. Найгірші результати представлені на рис. 4.10 і відображають постійну швидкість зміни до тих пір, поки мережа не насититься, коли навантаження приблизиться до

одного повідомлення за секунду. На рис. 4.11 показано співвідношення між кількістю вузлів і мережею через пробірку та її форма чітко нагадує форму продуктивності ALOHA. В оптимістичному випадку насичення відбувається, коли навантаження наближається до 10 повідомлень в секунду, тому підтримується більша кількість вузлів. Графіки показують подібні тенденції і для інших сценаріїв, і тому вони були опущені. Значення пропускної здатності були отримані за допомогою наступного виразу:

$$\text{Пропускна здатність} = \lambda_N * P_S \quad (4.20)$$

де λ_N -загальне навантаження мережі, яке приймає значення між 10^{-2} та 100 повідомленнями в секунду. Кількість пристроїв виходить як із цього значення, так і від генерованого трафіку на кожному пристрої:

$$N_{\text{Пристроїв}} = \frac{\lambda_N}{\lambda_D} \quad (4.21)$$

Максимальна кількість пристроїв, які можуть обслуговуватися одним шлюзом, враховуючи швидкість передачі даних та умови навантаження, встановлені в Розділі 4.1, становить приблизно 3424 для найгіршого випадку та 17910 для оптимістичної моделі. Ця оцінка була отримана, враховуючи, що система працює на максимально можливій пропускній здатності з даними корисного навантаження, див. рис. 4.10. Ця точка де визначає максимальне навантаження, що підтримується системою до насичення, яке характеризується погіршенням продуктивності.

Висновки. У даному підрозділі роботі були використані дві різні методики : математична модель та оцінка, заснована на метриках та оцінках. Таблиця 4.6 свідчить про значну різницю в їх результатах. Що стосується LoRa як чистої схеми доступу до каналу ALOHA, явно недооцінюється її фактична ємність, точніше 42% в гіршому випадку і близько 60% в оптимістичній моделі. Міцний фізичний шар LoRa та явище захоплення пакетів мають суттєвий вплив на результат обчислення.

4.4 Технологія NB -IoT

По мірі того, як масовий IoT стає реальністю, оператори мобільної мережі (ОММ) починають з досить вигідного становища. Інфраструктура здебільшого

вже розгорнута, скорочуючи час на ринок і вводячи в дію без затримки створення нових потоків доходу, забезпечення належного управління пристроями (активація / деактивація, моніторинг споживання, статистика тощо) та приведення необхідної технологічної зрілості. Такі види розгортання викликають великі очікування у ЗМІ, однак про конкретні плани ОММ щодо України мало відомо.

В усьому світі ОММ пропонують невелику підтримку NB-IoT та LTE-M у певних місцях на основі попиту. Вони були в основному задумані як демонстрація ВГД в потенціал для залучення інвестицій. Тим не менше, наміри таких операторів, як Telia, - якнайшвидше розширити його охоплення в межах усієї площі, в цьому випадку країн Балтії та Північних країн. Схожа ситуація і в Україні. В Іспанії та решті Європи ситуація схожа, оскільки ОММ перебуває у жорсткій конкуренції за те, щоб спочатку розгорнути стільникові рішення IoT. На сьогоднішній день оператори зосереджуються та впроваджують лише одну технологію - LTE-M або NB-IoT. Відмінності суттєві, як і цільові ринки, але обидві підпадають під парасольку Розумного міста та мають спільну позицію, див. рис. 3.2. Технічне порівняння представлено в таблиці 4.7.

Характеристики послуги Smart Lighting, запропонованої у цій роботі, краще вписуються у функції, запропоновані NB-IoT. Тим не менш, розроблений далі аналіз не стосується важливих технічних можливостей і може бути застосований для обох технологій.

Розміри даних

Отримати оцінку максимальної кількості пристроїв на осередку NB-IoT було б досить складно і мало цікаво, оскільки це повністю залежить від кожного розгортання 4G оператора. Ці дані є конфіденційними, однак, враховуючи прекрасне покриття стільникового зв'язку в Києві та потужність, яку пропонує ця технологія, це, безумовно, не призведе до жорстких обмежень. Більше того, місто Київ як замовник зацікавило б не експлуатацію та обслуговування інфраструктури, а загальну кількість даних, що генеруються установкою, що є показником зарядки. У цій роботі оцінюється об'єм даних для двох моделей, представлених вище, та додатковий сценарій, спрямований на зниження швидкості передачі пакетів.

Для розрахунків передбачається, що інформація інкапсульована в пакети IPv6 за допомогою протоколу обмеженого застосування (CoAP). Це спеціальний-протокол передачі веб-додатків, розроблений і оптимізований для роботи в пристроях і мережах. Він спирається на архітектуру представницької державної передачі (REST), яка надає інформацію доступною за допомогою ідентифікаторів, названих URI, та визначає знайомі чотири методи запиту: GET, PUT, POST та DELETE. Крім того, CoAP працює над транспортним протоколом UDP, який вводить мінімальні накладні витрати.

Найгірші випадки та оптимістичні моделі були розроблені без будь-яких інших вимог, ніж ті, що є важливими для надання послуг (див. Розділ 4.1). Використання IPv6 та CoAP приносить додаткові 53 байти накладних даних через заголовки протоколів та контрольні суми, що робить ці сценарії абсолютно непридатними для цієї реалізації. Корисні навантаження всього 8 або 102 байти могли б припустити, що великі накладні коефіцієнти будуть дуже неефективними. Тим не менш, вони були включені в аналіз, щоб підтримувати узгодженість з попередніми розділами та представляти справедливе порівняння. Варто зазначити, що ці два пристрої моделюються за середніми значеннями руху, отже, коливання можуть зменшити точність представлених вичислених цифр.

Нова запропонована модель визнає вартість передачі даних і оптимізується за рахунок мінімізації кількості пакетів, максимізуючи її вміст інформації, тобто використовуючи максимально можливе корисне навантаження. Стандартний Ethernet MTU (1500 байт) використовується для уникнення марної фрагментації в основній мережі. Передбачається, що світильник з датчиком інтенсивності руху генерує 1932 байт на годину, тоді як звичайний світильник виробляє 12 байт за стільки ж часу. Крім того, два повідомлення на годину з половиною корисного навантаження (966 байт) та одне повідомлення кожні шість годин із сукупною інформацією (72 байти) надсилаються для кожного типу відповідно.

Цей режим був позначений *мінімальним випадком*, і він порівнюється з іншими двома в Таблиці 4.8. Для наочності розрахунки проводилися окремо для світильників з датчиками руху та без них. Нарешті, за даних умов, безумовно, що

будь-який вузол незалежно від сценарію матиме споживання даних менше 1,5 Мб на місяць.

4.5. Порівняння витрат

Ні NB-IoT, ні LTE-M поки офіційно не продаються у Києві, а ціни на компоненти LoRa та IEEE 802.15.4 значною мірою залежать від особливостей розгортання, надаючи цьому розділу досить спекулятивний смак. Представлені тут міркування та дані базуються на таких гіпотезах:

- Кількість світильників у місті становить приблизно 140000 і з'єднані з 1160 шафами рівномірно.

- ОММ можуть взагалі продовжувати діючий метод стягнення для NB-IoT, тобто виставляти рахунки клієнтам за кількість даних. Це цілком обґрунтоване припущення, оскільки основна мережа MNO була побудована та розроблена для монетизації таким чином, і ця схема вже використовується у широко розгорнутих послугах МТС на базі GSM.

- Усі пристрої зовнішні для світильників. Хоча можливо, що він міг би бути вже включений до нещодавно придбаних світильників, старе обладнання також слід враховувати таким чином, щоб гарантувати плавний перехід.

З одного боку, у стільникових рішеннях інфраструктура належить оператору, тому вони, ймовірно, стягуватимуть активацію та щомісячну плату за з'єднання. Крім того, вони можуть запропонувати додаткові послуги, такі як догляд за клієнтами, аналіз даних, управління платформою тощо, які не включаються до звичайної ціни підписки, а також політика знижок за роки прихильності до послуги. Знайти наявні ресурси для поточної ціни послуг GSM M2M було дуже трудомістко. У таблиці 4.9 узагальнено тарифи, придбані двома відповідними європейськими операторами -Movistar (Іспанія) та Telenor (Швеція), які містяться в декількох злегка застарілих документах. Стає зрозуміло, що пропонований обсяг даних набагато перевершує потреби в установці, показані в таблиці 4.8, тому оцінки витрат слід сприймати з певним скепсисом. Крім того, очікується, що вартість модемів NB-IoT перевищить поточну ціну GSM і буде аналогічною в порівнянні з

іншими рішеннями.

З іншого боку, у LoRa та IEEE 802.15.4 інфраструктура належить муніципалітету, що є етапом розгортання та скороченням експлуатаційних витрат на управління та обслуговування. Взявши LoRa та враховуючи передбачувану кількість світильників, все місто могло б бути покрито щонайменше 42 та 8 шлюзами для найгіршої та оптимістичної моделі відповідно, тоді як у випадку IEEE 802.15.4, було б потрібно лише 26 та 7 шлюзів для кожного сценарію.

Нарешті, було проведено поверхневе дослідження існуючих ринкових можливостей, щоб отримати уявлення про загальну інфраструктурну вартість у кожному конкретному випадку. По-перше, вартість LoRaWAN коливається від 100 € (лише для одного каналу) до 1200 €. Для кожного бюджету на ринку можна знайти різні варіанти у різних постачальників, але, ймовірно, дешевші варіанти не відповідають раніше сформульованим вимогам такої великої реалізації. Для досить репрезентативного списку див.

Крім того, адекватна оцінка може становити 100 євро за кінцевий пристрій, включаючи його розміщення. Те ж саме можна припустити для IEEE 802.15.4 як кінцевих вузлів, так і шлюзів, що мають останні розширені обчислювальні можливості. Для завершення аналізу в таблиці 4.10 представлений якісний підсумок відмінностей між кожним підходом. Слід зауважити, що NB-IoT враховує лише вартість пристроїв, тоді як дорогі шлюзи LoRa значно збільшують ціну в порівнянні з IEEE 802.15.4.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі спочатку проведено знайомиться з потребами додатків Розумного міста та поточною розробкою мікроконтролерів, бездротового зв'язку, датчиків та інших технологій. Потім він аналізує важливість IoT для реалізації додатків Smart City.

Другий розділ посвячено порівнянню та аналізу характеристик багатьох різних додатків Smart City, які залежать від досліджень різних послань. Це є результатом попереднього дослідження, щоб досліджувати, які комунікаційні технології будуть адаптовані до різних додатків.

У розділі 3 описано, як створити цю розумну платформу IoT для міста за допомогою технології LoRaWAN. Сюди входять системні компоненти, функції, реалізація та результати. Основна увага приділяється використанню характеристик технології LoRaWAN для оптимізації роботи розумних міських додатків, а також дає деякі рішення та пропозиції.

В останньому розділі запропоновано три програми, що працюють у цій системі. Це для того, щоб представити продуктивність та особливості системи. Додатки - це Системи інтелектуального паркування, Системи моніторингу навколишнього середовища міської забудови та Системи контролю за переливом каналізації. Вони є представниками загальних програм для розумних міст.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Умный город [Электронный ресурс]. Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Умный_город (01.12.2019 р.).
2. Stockholm stad. Smart & Connected Brochure, 2017 [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://international.stockholm.se/globalassets/ovriga-bilder-och-filer/smart-city/brochure-smart-and-connected.pdf> (25.11.2019 р.).
3. Richard Duggan. Chelmsford is now home to Britain's _rst 'smart' streetlights which can create Wi-Fi hotspots, 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа : URL <http://www.essexlive.news/chelmsford-is-now-home-to-britain-s-first-smart-streetlights-which-can-create-wi-fi-hotspots/story-30405956-detail/story.html> (28.11.2019 р.).
4. Wam. RTA con_rms success of smart LED lighting technology experiment, 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.emirates247.com/news/emirates/rta-confirms-success-of-smart-led-lighting-technology-experiment> (04.12.2019 р.).
5. Міська ініціатива Kyiv Smart City [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.kyivsmartcity.com> (28.11.2019 р.).
6. Василенко И. А. "Умный город" XXI века: возможности и риски смарт-технологий в городском ребрендинге / Василенко И. А., Василенко Е. В., Люлько А. Н. – М. : Международные отношения. 2018. – 256 с.
7. MCKINSEY CENTER FOR GOVERNMENT. Технологии умных городов: что влияет на выбор горожан? [Электронный ресурс]. Режим доступа : https://www.mckinsey.com/ru/~/_/media/McKinsey/Industries/Public%20Sector/Our%20Insights/Smart%20city%20solutions%20What%20drives%20citizen%20adoption%20around%20the%20globe/smartcitizenbook-rus.ashx. (19.03.2019 р.).
8. Умный город. Концепция, стандартизация и реализация смарт сити, Портал о современных технологиях мобильной и беспроводной связи [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://1234g.ru/novosti/smart-city>. (12.09.2019 р.).
9. Стратегия 00:09 «Умный город - 2030». Вводные материалы и общие

принципы. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.mos.ru/upload/alerts/files/StrategiyaYmniigorod2030.pdf>. (20.11.2019 г.).

10. Jaakko Kooroshy, Derek R. Bingham, Aaron Ibbotson, Brian Lee, and Warwick Simons. The Low Carbon Economy, 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.goldmansachs.com/insights/pages/new-energy-landscape-folder/report-the-low-carbon-economy/report.pdf> (17.10.2019 г.).

11. Chepesiuk Ron. Missing the dark: Health effects of light pollution. Environmental Health Perspectives [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2627884/> (19.09.2019 г.).

12. Seppo Erik Einari Kivimäki. Assessing LED street lighting as a tool for sustainable development in São José dos Campos. PhD thesis, Universiteit Utrecht, 2013.

13. Glasgow City Council. Intelligent Street Lighting, 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://futurecity.glasgow.gov.uk/intelligent-street-lighting/>.

14. Teena Maddox. How LA is now saving \$9M a year with LED streetlights and converting them into EV charging stations, 2016. . [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.techrepublic.com/article/how-la-is-now-saving-9m-a-year-with-led-streetlights-and-converting-them-into-ev-charging-stations/> (03.12.2019 г.).

15. Mark Halper. London connects 28,000 streetlights to IoT, 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://luxreview.com/article/2017/08/london-installs-28-000-iot-streetlights> . (03.12.2019).

16. Alliander. Flexible switch system for public lighting, maximising market mechanisms through the use of a smart grid system/ [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://amsterdamsmartcity.com/projects/flexible-street-lighting>. (03.12.2019).

17. Chicago is undertaking one of the largest street lighting modernization programs in the country [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://chicagosmartlighting-chicago.opendata.arcgis.com>. (14.03.2019).

18. SmartSantander. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.smartsantander.eu/>. (04.12.2019)/

19. Ouerhani Nabil. IoT-based dynamic street light control for smart cities use cases / Nabil Ouerhani, Nuria Pazos, Marco Aeberli, Michael Muller. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7746112/>. (22.10.2019).
20. Brian Ray. What Is Weightless?, 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.link-labs.com/blog/what-is-weightless>. (22.10.2019).
21. Townsend Kevin. Introduction to Bluetooth Low Energy. . [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://learn.adafruit.com/introduction-to-bluetooth-low-energy>. (13.11.2019).
22. Пунин Igor. How to Choose Your IoT Platform — Should You Go Open-Source? - Should You Go Open-Source?, 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://medium.com/iotforall/how-to-choose-your-iot-platform-should-you-go-open-source-23148a0809f3>. (15.08.2019).
23. Zigbee IP and 920IP. Zigbee innovation connects simple and high-tech devices for consumers and businesses. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://zigbee.org/zigbee-for-developers/network-specifications/zigbeeip/>. (17.09.2019).