

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-69-1-3>

УДК 004.78

Тетяна СМІРНОВА, Юрій МОТОРІН, Костянтин БУРАВЧЕНКО

Центральноукраїнський національний технічний університет

Тетяна БОЧУЛЯ

Державний біотехнологічний університет

Олександр КОВАЛЕНКО

Центральноукраїнський національний технічний університет

## ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ ХМАРНОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

*Дана робота присвячена удосконаленню існуючих та розробці нових методів побудови сучасної хмарної інформаційно-комунікаційної інфраструктури підприємств з метою її подальшого використання для автоматизації виробничих процесів. Об'єктом дослідження є процес побудови хмарної інформаційно-комунікаційної системи автоматизації виробничих процесів. Предметом дослідження є метод вибору оптимальної технології побудови хмарної інформаційно-комунікаційної системи автоматизації виробничих процесів. Метою даної роботи є проведення дослідження та здійснення відповідного вибору оптимальної технології побудови хмарної інформаційно-комунікаційної системи для оптимізації виробничих процесів. Дослідження, проведені в даній роботі дозволили провести аналіз та здійснити відповідний вибір оптимальної технології для використання її з метою оптимізації виробничих процесів. Для цього було розроблено модель багатокритеріальної оптимізації, визначено пул комунікаційних технологій, які можуть бути використані для оптимізації виробничих процесів. В результаті, проведений багатокритеріальний аналіз дозволив впевнитись в доцільності розгортання стільникових мереж 5G для автоматизації виробничих процесів. Також було запропоновано методику вибору оптимальних проектних рішень технологій мобільного зв'язку 5G.*

*Ключові слова: оптимальна технологія, хмарна інформаційно-комунікаційної система, автоматизація виробничих процесів.*

Tetiana SMIRNOVA, Yurii MOTORIN, Kostiantyn BURAVCHENKO

Central Ukrainian National Technical University

Tetiana BOCHULIA

State Biotechnological University

Oleksandr KOVALENKO

Central Ukrainian National Technical University

## SELECTION OF OPTIMAL TECHNOLOGY OF CONSTRUCTION OF CLOUD INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEM OF AUTOMATION OF PRODUCTION PROCESSES

*This work is devoted to the improvement of existing and development of new methods of building a modern cloud information and communication infrastructure of enterprises in order to further use it to automate production processes. The object of research is the process of building a cloud information and communication system for automation of production processes. The subject of research is the method of choosing the optimal technology for building a cloud information and communication system for automation of production processes. The purpose of this work is to conduct research and implement the appropriate choice of optimal technology for building a cloud information and communication system to optimize production processes. The research conducted in this work allowed to analyze and make the appropriate choice of the optimal technology for its use in order to optimize production processes. To do this, a model of multicriteria optimization was developed, a pool of communication technologies that can be used to optimize production processes was identified. As a result, the multicriteria analysis allowed us to see the feasibility of deploying 5G cellular networks to automate production processes. A method for selecting optimal design solutions for 5G mobile technologies was also proposed.*

*Keywords: optimal technology, cloud information and communication system, automation of production processes.*

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

Науково обґрунтоване планування й оптимізація інформаційних мереж, які забезпечують надання запитуваних послуг із заданими показниками ефективності функціонування, є дуже складною науково-технічною й економічною проблемою, без вирішення якої неможливе створення хмарної інформаційної інфраструктури підприємства, що відповідає всім потребам та сформованим вимогам [1-3]. Тому, дана робота присвячена саме удосконаленню існуючих та розробці нових методів побудови сучасної хмарної інформаційно-комунікаційної інфраструктури підприємств з метою її подальшого використання для автоматизації виробничих процесів.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДЖЕРЕЛ

У роботі [4] визначено поняття ефективності інформаційно-комунікаційної мережі. Опис існуючих технологій бездротового зв'язку, які можливо застосувати для побудови хмарної інформаційно-

комунікаційної системи автоматизації виробничих процесів наведено у роботах [5-13]. У роботах [5, 6] розглянута специфікація LoRaWAN, у роботі [7] розглянута специфікація мережі IEEE 802.15.4-2011, у роботі [8] розглянута специфікація IEEE 802.15 WPAN, у роботах [9, 10] розглянута специфікація Wi-Fi 6, у роботах [11-13] розглянута специфікація 5G. При цьому було враховано, що однією з головних проблем розгортання сучасних безпроводових мереж зв'язку є більш ефективне планування, що дозволить з одного боку забезпечити необхідну якість обслуговування (цільову ефективність) та з іншого підвищити економічну ефективність використання мережевих ресурсів [4-13].

#### ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Методи дослідження. Основні теоретичні положення роботи отримані з використанням методів теорії оптимізації, теорії складних систем, теорії телекомунікацій.

Об'єктом дослідження є процес побудови хмарної інформаційно-комунікаційної системи автоматизації виробничих процесів.

Предметом дослідження є метод вибору оптимальної технології побудови хмарної інформаційно-комунікаційної системи автоматизації виробничих процесів.

Тому метою даної роботи є проведення дослідження та здійснення відповідного вибору оптимальної технології побудови хмарної інформаційно-комунікаційної системи для оптимізації виробничих процесів.

#### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Узагальнена модель оцінки ефективності інформаційно-комунікаційних мереж

Ефективність інформаційно-комунікаційної мережі – це її здатність досягати поставленої мети у заданих умовах функціонування з певним рівнем якості, тобто це характеристика, що відображає ступінь відповідності мережі своєму призначенню, технічну досконалість та економічну доцільність [4]. Поняття ефективності пов'язані з отриманням деякого корисного результату – ефекту використання інформаційно-комунікаційних мереж, який досягається ціною витрат певних ресурсів, тому ефективність мережі можна розглядати як співвідношення між ефектом (виграшем) і витратами.

Показник ефективності мережі – кількісна характеристика інформаційної мережі, що розглядається стосовно певних умов її функціонування. Оцінюючи ефективність інформаційної мережі необхідно враховувати характеристики праці людини, взаємодіючого з комп'ютерною технікою та іншим технічними засобами мережі (засобами автоматизації).

Будемо визначити показник ефективності інформаційної мережі процесом її функціонування та відповідно функціоналом від цього процесу.

Загалом  $W = W(t, L_k, L_{TP}, L_A, L_D, L_Y)$ , де  $W$  – множина показників ефективності мережі,  $t$  – час;  $L_k, L_{TP}, L_A, L_D, L_Y$  – множина параметрів відповідно до вхідних потоків запитів на обслуговування користувачів ( $L_k$ ), технічних та програмних засобів мережі ( $L_{TP}$ ), алгоритмів обробки та передачі інформації в мережі ( $L_A$ ), діяльності користувачів ( $L_D$ ), умов функціонування мережі ( $L_Y$ ).

В свою чергу  $L_D = \{L_T, L_{TM}, L_H\}$ , де  $L_T, L_{TM}, L_H$  – множина вихідних показників діяльності вузлів інформаційної мережі відповідно до точнісних ( $L_T$ ), часових ( $L_{TM}$ ), надійнісних ( $L_H$ ). Значення компонентів множин  $L_T, L_{TM}, L_H$  визначаються конкретними процесами діяльності вузлів у розглянутій інформаційно-комунікаційній мережі, засобами, які є в їхньому розпорядженні для виконання своїх функцій та умовами роботи.

Відповідно до конкретизації поняття ефективності, показники множини можна розділити на три групи:  $W = \{W_C, W_T, W_E\}$ , де  $W_C$  – показники цільової ефективності інформаційно-комунікаційної мережі або ефективності використання (цільового застосування) цієї мережі, це кількісний показник відповідності мережі своєму призначенню;  $W_T$  – показники технічної ефективності інформаційно-комунікаційної мережі, це кількісна міра, що відображає технічну досконалість мережі;  $W_E$  – показники економічної ефективності інформаційно-комунікаційної мережі, це кількісний показник економічної доцільності розгортання мережі.

#### Оцінка основних показників ефективності безпроводових технологій для оптимізації виробничих процесів

В рамках даного підрозділу проведемо багатокритеріальний аналіз безпроводових технологій, які можуть бути використані для підтримки автоматизації виробничих процесів великих підприємств.

Для цього будемо користуватись переліком показників цільової (Пропускна здатність  $R$ , Затримка  $t_{zamp}$ , Ємність мережі  $C$ , Щільність підключення пристроїв  $\nu$ ) та технічної (Енергетична ефективність  $e$ , Безпека мережі  $IS$ ) ефективності.

В даний час існує безліч безпроводових технологій, найчастіше відомих користувачам за їх маркетинговими назвами. Використовуючи безпроводові рішення, є можливість створювати надійні та високопродуктивні корпоративні мережі, використання яких значно розширює можливості підприємства для доступу до мережі Інтернет, економічного телефонного зв'язку (IP-телефонії), охорони приміщень та об'єктів з використанням відеоспостереження та інших засобів охоронної та пожежної сигналізації, систем контролю та автоматизації технологічних процесів промислових підприємств, систем моніторингу показників довкілля та інших цілей, пов'язаних з телеметричною передачею даних. Сучасні рішення для

безпроводових мереж забезпечують високу керованість, автоматизацію та захищеність IT-інфраструктури. Кожна технологія має певні характеристики, які визначають її сферу застосування.

Далі проведено дослідження основних безпроводових технологій, а також здійснено систематизацію параметрів цих мереж (таблиця 1), які використовуються для ухвалення рішення щодо вибору варіанту побудови інформаційно-комунікаційних систем великих підприємств з метою підтримки автоматизації виробничих процесів.

**LoRaWAN** – це протокол рівня керування доступом до середовища (MAC), який управляє зв'язком між пристроями LPWAN та шлюзами.

Специфікація LoRaWAN є широкосмуговим мережевим протоколом малої потужності, призначена для безпроводового підключення пристроїв IoT (речей), до регіональних, національних або глобальних мереж і орієнтована на основні вимоги до Інтернету, такі як двонаправлений зв'язок, наскрізна безпека, мобільність та послуги локалізації.

Модуляція LoRa [5] відбувається на фізичному рівні, а LoRaWAN (Long Range Wide-Area Networks, LoRaWAN) це MAC-протокол для високоємних мереж з великим радіусом дії та низьким власним споживанням потужності, який організація LoRa Alliance стандартизувала для малопотужних глобальних радіальних мереж. Протокол LoRaWAN [6] оптимізований для малобюджетних сенсорів і включає різні класи вузлів, забезпечуючи компроміс між швидкістю доставки інформації і часом роботи пристроїв при використанні живлення від батарей/акумуляторів. Протокол забезпечує повний двосторонній зв'язок, а архітектура (за допомогою спеціальних методів шифрування) забезпечує загальну надійність та безпеку всієї системи. Архітектура LoRaWAN також була розроблена з метою полегшення виявлення мобільних об'єктів для відстеження активів підприємств, що є однією із найбільш швидко зростаючих програм на рівні Інтернету речей. Протокол LoRaWAN розробляється для використання у загальнонаціональних мережах великих операторів зв'язку. З цією метою організація LoRa Alliance стандартизує свій протокол LoRaWAN з урахуванням сумісності та взаємодії з усіма основними глобальними операторами зв'язку.

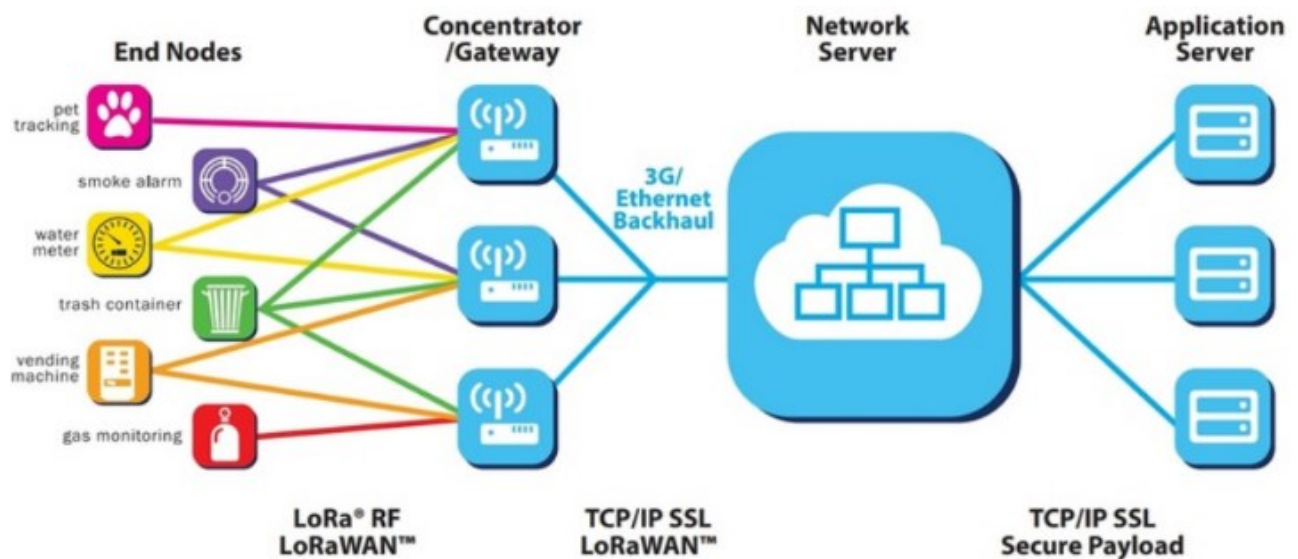


Рис. 1. LoRaWAN

Мережа LoRaWAN (рис.1) має топологію «зірка», що складається із менших зірок, включає кінцеві пристрої, які через шлюзи, що утворюють прозорі мости, спілкуються із центральним сервером мережі. За такого підходу зазвичай передбачається, що шлюзами і центральним сервером володіє оператор мережі, а кінцевими пристроями – абоненти. Абоненти мають можливість прозорої двонаправленої та захищеної передачі даних до кінцевих пристроїв.

Відомі формати безпроводового зв'язку WiFi/GSM/3G/LTE/5G орієнтовані на «живого користувача», LoRaWAN же орієнтований на «користувачів-машин» – пристрої та датчики, які працюють у спектрі, що не ліцензується.

LoRaWAN має три різні класи кінцевих пристроїв для задоволення різних потреб, відображених у широкому спектрі додатків.

До переваг технологій LoRaWAN можна віднести наступні:

- велика дальність передачі радіосигналу в порівнянні з іншими бездротовими технологіями, сягає 10-15 км;
- низьке енергоспоживання кінцевих пристроїв, завдяки мінімальним витратам енергії на передачу невеликого об'єму даних;

– висока проникна здатність радіосигналу в міській забудові при використанні частот субгігагерцового діапазону;

– висока масштабованість мережі на великих територіях;

– відсутність необхідності отримання частотного дозволу та плати за радіочастотний спектр, внаслідок використання неліцензованих частот (ISM band);

– висококонкурентний ринок постачальників обладнання та повна сумісність пристроїв різних виробників;

– відкритість стандарту також є для споживача гарантією того, що розробник або постачальник не зможе в односторонньому порядку змінити умови співпраці, користуючись відсутністю альтернативи у зв'язку з пропріетарністю запропонованих ним рішень.

Водночас, LoRaWAN властиві і деякі недоліки:

– відносно низька пропускна здатність, що варіюється в залежності від використовуваної технології передачі даних на фізичному рівні, становить від декількох сотень біт/с до декількох десятків кбіт/с;

– затримка передачі даних від датчика до кінцевого додатка, пов'язана з часом передачі радіосигналу, може досягати від кількох секунд до кількох десятків секунд;

– відсутність єдиного стандарту, який визначає фізичний шар та керування доступом до середовища для безпроводових LPWAN-мереж;

– ризики зашумлення спектру неліцензованого діапазону частот;

– пропріетарна технологія модуляції LoRa, "закрита" патентом Semtech;

– обмеження потужності сигналу.

**Bluetooth 5** використовує бездротове з'єднання з фізичною швидкістю передачі даних до 2 Мбіт/с, ефективна швидкість обміну даними залежить не тільки від фізичної пропускної спроможності каналу передачі, а й від співвідношення службової та корисної інформації в пакеті, а також від супутніх «накладних» витрат, наприклад, затримки між пакетами.

У версії Bluetooth 5 збереглася підтримка LE Data Length Extension, що разом із зростанням фізичної пропускної здатності до 2 Мбіт/с дозволяє досягати швидкості обміну даними до 1,4 Мбіт/с.

Як показує практика, таке прискорення передачі не є межею. Покращення Bluetooth 5 насамперед стосуються безпроводової технології «Bluetooth Low Energy» (BLE). Максимальний радіус дії таких пристроїв чотириразово збільшився з 10 до 40 метрів. Аналогічно і швидкість передачі даних у новому стандарті Bluetooth зросла майже вдвічі.

Покращення мереж Bluetooth дає можливість розвитку Інтернету речей.

Зі збільшенням радіусу дії, з'єднання між IoT-пристроями має поширитися далі стін будинку, тоді як збільшення швидкості обміну даними покращить їхню взаємодію та прискорить оновлення програмного забезпечення пристроїв.

Bluetooth використовує адаптивну стрибкоподібну перебудову частоти під час підключення. Цей алгоритм, який визначає радіоканал для передачі та прийому включає часту зміну обраного каналу, так що дані передаються з використанням широкого вибору каналів. Bluetooth 5 представив новий алгоритм вибору каналу, який називається алгоритмом вибору каналу №2. Послідовності стрибкоподібної перебудови відтепер мають псевдовипадковий характер, а різні можливі послідовності є дуже великими.

Покриття будівлі забезпечується за допомогою нового рівня РНУ з кодуванням LE з далеким радіусом дії. Вища символна швидкість покращує спектральну ефективність і підтримує нові варіанти використання, наприклад, у спорті, фітнесі та медичному обладнанні. Стають можливими нові промислові програми, а також деякі програми для розумних міст та розумних фабрик.

Bluetooth 5 може мати істотний вплив в багатьох секторах і надалі позиціонується як краща безпроводова технологія з низьким енергоспоживанням для Інтернету речей.

**Z-Wave** – це безпроводовий протокол, розроблений спеціально для дистанційного керування. Z-Wave працює в діапазоні частот до 1 ГГц (908.42 МГц у США та 868.42 МГц у Європі) – вибір такого діапазону обумовлений малою кількістю джерел перешкод, на відміну від завантаженого діапазону в 2.4 ГГц.

Кожна мережа Z-Wave має основний контролер-координатор, з якого починається побудова мережі (рис. 2), на який покладено обов'язки додавання нових пристроїв у мережу та видалення старих, складання карт маршрутизації, забезпечення безпечного підключення, можливості створювати сценарії автоматизації та інших функцій щодо організації та контролю роботи мережі. У мережі також є один або кілька вторинних контролерів-маршрутизаторів, які для нормальної роботи запитують інформацію про топологію мережі та кінцеві пристрої у основного контролера.

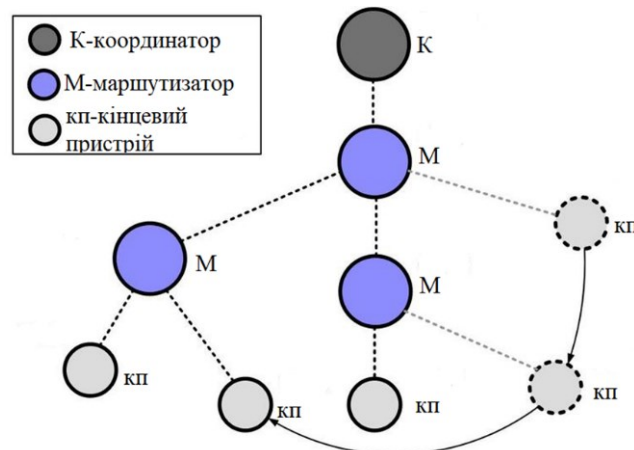


Рис. 2. Архітектура мережі Z-Wave

Z-Wave використовує концепцію mesh-мережі. Протокол розроблений таким чином, що вузли мережі, що виконують роль ретрансляторів, мали можливість перенаправляти через себе повідомлення, доки воно не дістанеться адресата. Такий підхід дозволяє значно розширити радіус дії безпроводової мережі та підвищує її надійність. У разі виходу з ладу будь-якого вузла мережа не буде паралізована, а продовжить роботу в штатному режимі, повідомлення почнуть автоматично прямувати через вузли мережі, в обхід тих, що вийшли з ладу.

Характерною особливістю Z-Wave є жорстка стандартизація від фізичного рівня до рівня додатків. Тобто стек протоколу Z-Wave покриває всі рівні класифікації OSI, що дозволяє забезпечувати сумісність пристроїв різних виробників при створенні гетерогенних мереж.

До переваг протоколу відносять:

- використання шифрування за 128-бітним алгоритмом AES для запобігання клонуванню та злому мережі;

- гарантія сумісності із усіма пристроями від різних виробників, що входять до Z-Wave Alliance;

- масштабованість мережі.

Водночас, до недоліків протоколу відносять:

- швидкості в 100 кбіт/с вистачає лише для передачі команд, тобто немає можливості передавати графічні зображення чи звук;

- через обмежений радіус дії безпроводових пристроїв великі мережі вимагають використання повторювачів і навіть кабелів.

**Протокол Zigbee** здатний формувати різноманітні види мережевих з'єднань. Найбільш поширені топології мережі – зірка, дерево кластерів і mesh-мережа (рис. 3).

Кожна мережа Zigbee може становити суперпозицію всіх трьох типів, розподіляючи в мережі ролі кінцевого пристрою, маршрутизаторів і координаторів. Координатор відповідає за створення мережі і за маршрутизацію трафіку через неї. Мережа може мати лише одного координатора. Маршрутизатор відповідає за переспрямування трафіку, а кінцевий пристрій є просто прийомо-передавальною ланкою.

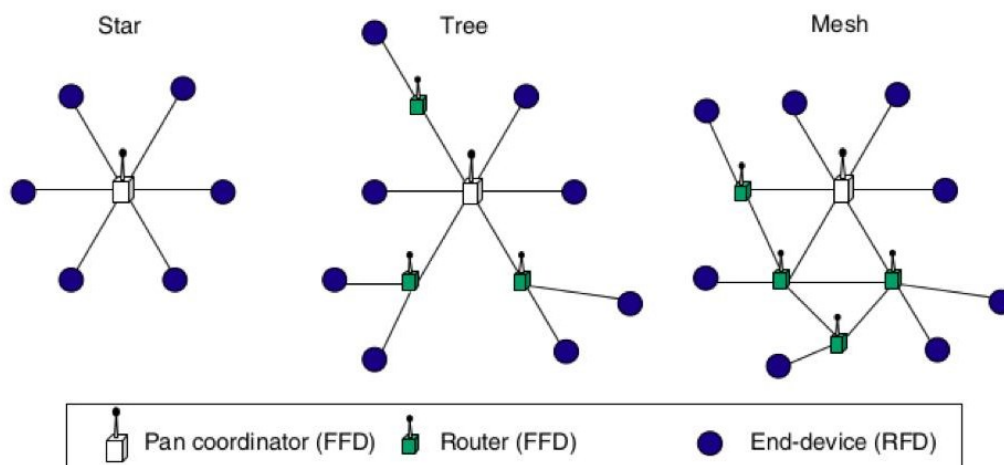


Рис. 3. Архітектура мережі ZigBee

Специфікація мережі IEEE 802.15.4-2011 [7] забезпечує двосторонню напівдуплексну передачу даних у низькошвидкісних безпроводових персональних мережах (Low-Rate Wireless Personal Area Networks – LR-WPANs), підтримуючи при цьому шифрування AES-128. Передбачається використання 7 видів модуляції у різних частотних діапазонах. Всі доступні діапазони радіочастот поділені на канали, пропускна здатність яких може відрізнятися. Мережевий рівень стека протоколу ZigBee/ZigBee PRO використовує функції підрівня управління доступом до середовища (Media Access Layer – MAC) і забезпечує інтерфейс для вищого рівня програми (Application Layer – APL). На цьому рівні реалізована підтримка різних мережевих топологій: зіркова топологія (Star Network), дерево кластерів (Cluster Tree Network) та пориста топологія (Mesh Network). І саме на мережному рівні відбувається початкове створення мережі, підключення до неї нових пристроїв, їх виключення та пошук мережі. Специфікація ZigBee Green Power (ZGP) була розроблена спеціально для підтримки автономних пристроїв, які взагалі не мають батарейок. Такі пристрої одержують енергію для короткочасного спрацьовування зі свого оточення або якихось дій з ними: як результат руху, освітлення, п'єзоефекту при натисканні, термоелектричного ефекту Пельтьє і т.п. Найбільш очевидне застосування подібних пристроїв – це вимикачі світла, в яких натисканням кнопки виробляється електроенергія, необхідна для надсилання сигналів, що управляють (увімкнення/вимкнення).

Перевагами технології є висока відмовостійкість та масштабованість, завдяки пористій топології мережі, низьке енергоспоживання.

Недоліками є проблеми з безпекою через недотримання виробниками вимог сертифікації, використовує діапазон 2,4 ГГц, де є сильні перешкоди.

**UWB (Ultra Wideband)** – надширокосмуговий зв'язок являє собою спосіб передачі інформації, що використовує високочастотні імпульси з малою енергією. UWB має великий потенціал, оскільки інформаційна місткість UWB значно більша в порівнянні з іншими існуючими конкуруючими технологіями, що розвиваються, що дозволяє реалізовувати більш швидкодійні безпроводові мережі з великою пропускною здатністю.

UWB – безпроводова технологія зв'язку, яка фундаментально відрізняється від інших радіочастотних комунікаційних систем. Унікальність полягає в тому, що вона забезпечує безпроводові комунікації без використання радіочастотної несучої. Натомість вона використовує модульовані імпульси енергії тривалістю менше однієї наносекунди. Безпроводові широкосмугові радіостанції посилають короткі імпульси сигналу в широкому спектрі, які передаються кількома частотними каналами відразу. Широкий канал дозволяє UWB зазвичай підтримувати високу швидкість безпроводової передачі даних від 480 Мбіт/с до 1,6 Гбіт/с на відстані до декількох метрів. На великих відстанях швидкість передачі значно знижується. Обмеження на відстані виникає саме через широку корисну смугу пропускання, тобто, щоб не заважати пристроям, що працюють на тих чи інших частотах, потужність сигналу повинна бути дуже маленькою (в середньому не більше -41,3 дБм).

Перевага UWB полягає у стійкості до багатопроменевого замирання, проте такі сигнали схильні до міжсимвольної інтерференції, що виправляється спеціальними методами кодування.

Обмеження доступності ВЧ-спектру перешкоджають еволюції та розростанню безпроводових технологій. Технологія UWB не використовує ВЧ-несучі, що дає безліч нових переваг і можливостей.

Пристрій UWB можна масштабувати за критерієм швидкості у величезному діапазоні, що просто необхідно для додатків з дуже низькою швидкістю (обумовленою необхідністю підтримки низької потужності), таких як, наприклад, кишенькові вимірювальні прилади.

UWB [8] може одночасно підтримувати сотні каналів. Технологія UWB може функціонувати як персональна мережа (Personal Area Network, PAN), локальна та глобальна обчислювальна мережа (Wide Area Network, WAN) одночасно. Пристрої UWB, які працюють на рівнях нижче рівня шумів традиційних радіосистем, малопотужні, невибагливі до параметрів обладнання та потребують лише кількох зовнішніх компонентів.

**Стандарт WiFi 6 (IEEE 802.11ax) [9]** – це нове покоління безпроводового з'єднання, яке пропонує безліч сучасних рішень порівняно з технологією WiFi 5 (IEEE 802.11ac), WiFi 4 (IEEE 802.11n).

Wi-Fi 6 забезпечує:

- множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів (OFDMA) висхідної та низхідної ліній зв'язку, що підвищує ефективність та знижує затримку у середовищах з високими вимогами;
- технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output), забезпечує поліпшення продуктивності для мереж з великою кількістю користувачів;
- новий режим модуляції забезпечує пікові гігабітні швидкості для нових випадків використання з інтенсивною смугою пропускання;
- збільшена тривалість символу робить роботу мережі більш надійною;
- покращена сигналізація управління доступом до середовища (MAC) – збільшує пропускну здатність і ємність, зменшення часу затримки.

Побудований на ключових елементах, визначених стандартом IEEE 802.11ax [10], Wi-Fi 6 пропонує



високоєфективну роботу в щільних мережах, зберігаючи при цьому зворотну сумісність та співіснування із застарілими пристроями IEEE 802.11. Працюючи в діапазонах 2,4 ГГц та 5 ГГц, стандарт 802.11ax включає широкий спектр фізичних (PHY) підрівнів.

Технологія множинного доступу OFDMA ділить канали між кількома несучими, що дозволяє вести передачу до кількох приймачів (кінцевих пристроїв) одночасно. Технологія Wi-Fi 6 дозволяє надсилати різні сигнали у межах одного вікна передачі. Завдяки цьому маршрутизатор може взаємодіяти з кількома пристроями в рамках одного циклу передачі, так що окремим пристроям не потрібно чекати своєї черги.

Набір базових послуг (OBSS) – ще одна особливість Wi-Fi 6, яка може покращити ситуацію в перевантажених мережах.

OBSS дозволяє точці доступу використовувати так звані кольори для унікальної ідентифікації мережі. Якщо ви знайдете на каналі іншого трафіку, колір, який відрізняється від кольору локальної мережі, пристрої можуть ігнорувати його та продовжувати передачу. За рахунок цього підвищується надійність та скорочується час затримки.

Поєднання OFDMA та OBSS підвищує загальну ефективність передачі даних у завантажених мережах.

Формування променів (beamforming) – ще одна покращена в Wi-Fi 6 технологія, що дозволяє підвищити швидкість передачі. Замість передачі даних у всіх напрямках маршрутизатор визначає місцезнаходження запитуючого пристрою і направляє більш локалізований потік даних в цьому напрямку.

Для безпечної передачі даних широко використовується протокол безпеки WPA 3 (Wi-Fi Protected Access).

**Мережі 5G** формуються відповідно до таких технічних вимог до них [11]:

- забезпечення швидкості передачі даних в лінії вниз (DL) до 20 Гбіт/с і 5 Гбіт/с лінії вгору (UL);
- можливість зростання обсягу переданих даних більш ніж у 1000 разів у кожній області обслуговування за рахунок підвищення спектральної ефективності, використання нових радіочастотних діапазонів та використання гетерогенних мереж;
- питома пропускна здатність на одиницю площі покриття ASE = 1,5 ... 60 Гбіт / с / кв. км;
- збільшення від 10 до 100 разів кількості приєднаних абонентських пристроїв (до 300 тис. на соту або до 1 млн. пристроїв на кв. км.);
- збільшення від 10 до 100 разів типових швидкостей передачі даних у користувача;
- зниження в 10 разів затримки в ланцюжку «End-to-End» (менше 1 мс у мережі радіодоступу 5G порівняно з 10 мс у LTE).

Викладені вище вимоги щодо радіоінтерфейсу повинні забезпечити:

- множинний доступ на фізичному рівні (PHY);
- використання нових ділянок сантиметрового та міліметрового діапазонів частот;
- застосування радіоканалів зі значною шириною: від 100 МГц до 2 ГГц;
- дуже короткі затримки мережі радіодоступу: час перепиту для алгоритму HARQ RTT менше 1 мс;
- низьку вартість вузлів доступу та низьку вартість абонентських пристроїв;
- доступ у мережу та багатовузлову маршрутизацію на основі універсального радіоінтерфейсу та використання загального спектру;
- "безшовну" мобільність між інфраструктурою 5G (UDN) та стільниковими системами для великих зон покриття LTE/2G-3G;

– досягнення в радіоінтерфейсі 5G швидкостей передачі даних понад 20 Гбіт/с вимагатиме суттєвого розширення спектрів сигналів за рахунок застосування неортогонального множинного доступу NOMA та необхідного 4-кратного збільшення спектральної ефективності в радіоінтерфейсі RAN 5G до 5 – 10 Біт/с /Гц. Частотні діапазони приймачів і передавачів базових (БС) та абонентських (АС) станцій мережі радіодоступу 5G поділені на два піддіапазони, до 6 ГГц – піддіапазон FR1 (450 – 6000 МГц) і понад 6 ГГц – піддіапазон FR2 (24,25 – 52,6) ГГц, міліметровий діапазон;

– технологія 5G передбачає використання масивних MIMO антен, які складаються з сотень антенних елементів, що працюють узгоджено та адаптивно. Використання масивних MIMO-антен дозволяє адаптивно формувати безліч вузьких пучків діаграми спрямованості антени в напрямку кожного абонента мережі. Таким чином, кілька абонентів, що знаходяться в одній зоні обслуговування, можуть отримувати свій унікальний просторово-часовий сигнал від антени базової станції, що дозволяє знизити рівень соканальних перешкод, збільшити пропускну здатність мережі радіодоступу 5G і ємність стільника, підвищити ефективність використання потужності базової станції. Крім того, використання адаптивних MIMO-антен дає можливість ефективно зменшити перешкоди з небажаних напрямків у мережі радіодоступу, підвищуючи перешкодозахисність мережі 5G;

– мережі 5G повинні, з одного боку, забезпечувати більш високу продуктивність порівняно з існуючими мережами мобільного зв'язку, з іншого – мати нижчі капітальні та операційні витрати. В іншому випадку, інвестиційна привабливість мереж 5G буде невисокою;

– мережі 5G обслуговуватимуть пристрої та програми з суттєво різними характеристиками

трафіку – від низькошвидкісних M2M датчиків (лічильників) до сервісів віртуальної та доповненої реальності з високими вимогами до швидкості передачі даних та високонадійних систем керування транспортним рухом з високими вимогами до мережових затримок. Тому мережі 5G повинні ефективно управляти мережевими ресурсами залежно від потреб додатків та вимог щодо якості надання послуг.

В якості основних підходів до побудови мереж 5G, які забезпечують високий рівень гнучкості мережевої архітектури, пропонуються технології програмно-визначених мереж [12] (Software Defined Networking – SDN) та віртуалізації мережових функцій (Network Functions Virtualization – NFV). За допомогою цих технологій мережа поділяється на логічні сегменти, кожен із яких налаштовується відповідно до параметрів, необхідних для роботи певних груп послуг.

З урахуванням того, що мережі 5G будуть обслуговувати крім традиційних мобільних телефонів велику кількість різних пристроїв M2M та IoT, які мають специфічні характеристики та вимоги, використання технології Network Slicing дозволить підвищити ефективність роботи мобільних мереж зв'язку та якість послуг, що надаються. При віртуалізації мережових функцій мережі радіодоступу основна функціональність базових станцій 5G, що відповідає за цифрову обробку сигналу, синхронізацію та управління, розміщуватиметься у хмарі (Software Defined Radio – SDR) окремо від радіоголовок (RRH) та антен, дозволяючи реалізовувати переваги когнітивного радіо та знижувати капітальні та операційні витрати на мережу радіодоступу. Застосування концепції мереж, що самоорганізуються, радіодоступу (Self Organizing Networks – SON) забезпечить підвищення ефективності розподілу, якості обслуговування користувачів та SDN), у якій рівень управління мережею відокремлений від пристроїв передачі і реалізується програмними засобами, дозволить перерозподіляти апаратні ресурси залежно від навантаження, підвищуючи ефективність їх використання, скорочення операційних витрат за рахунок автоматизації процесів формування радіопокриття та координації роботи сусідніх базових станцій різного рівня (мікро та макробазових). Архітектура мережі 5G (SDR і SDN), у якій рівень управління мережею відокремлений від пристроїв передачі і реалізується програмними засобами, дозволить перерозподіляти апаратні ресурси залежно від навантаження, підвищуючи ефективність їх використання.

Проведемо порівняння характеристик технологій безпроводових мереж (табл. 1).

До показників ефективності застосуємо багатокритеріальний аналіз.

Таблиця 1

**Порівняльна характеристика технологій безпроводових мереж**

Параметри ефективності	Технології для порівняння						
	Bluetooth 5,0	WiFi 6	5G	UWB	LoRaWan	ZWave	ZigBee
Пропускна здатність	2 Мбіт/с	600-9600 Мбіт/с	20 Гбіт/с	480 Мбіт/с	0,3-50 Кбіт/с	42-100 Кбіт/с	20- 250 Кбіт/с
Затримка, мсек	3-100	<10	1	10	20-100	10	10
Ємність мережі, Мбіт/с/ кв.м	до 1	до 1	10	до 5	до 0,1	30 од.в мережі	65000
Щільність підключення пристроїв на кв. км	до 100	до 1000	10 <sup>6</sup>	до 100	до 10000	до 100	до 100
Енергетична ефективність	Технол. BLE	Технол. TWT	Енерго-ефект.	Енерго-ефект.	До 10років	До 1року	Декілька років
Безпека мережі	128-біт AES	WPA-3	256-біт SEAE	DRM	128-біт AES	128 біт AES	128-біт AES
Частотні діапазони, МГц	2402-2480	2400-5000	FR1 600-6000 FR2 24> ГГц	3000-10000	2400, 869,433 169.	868-926	915-2400
Радіус дії, м	200	100	100-1500 Баз.станція	3-10	(2-5)км -місто 15км сел.міс.	30-120	10-100

Спочатку за допомогою експертного оцінювання проведемо вибір вагових коефіцієнтів для формування інтегрального показника оцінки доцільності розгортання технологій для визначених показників ефективності систем (табл. 2).

При цьому,  $\sum(k_i)=1$ .

Надалі, для таблиці 1 проведемо нормування показників ефективності для різних технологій. Ці результати представимо у таблиці 3.



Таблиця 2

**Матриця вибору оптимального готового технічного рішення**

$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$
Пропускна здатність $R$	Затримка $t_{затр}$	Ємність мережі $C$	Щільність підключення пристроїв $\nu$	Енергетична ефективність $e$	Безпека мережі $IS$
0,1	0,2	0,15	0,2	0,15	0,2

Таблиця 3

**Нормовані оцінки ефективності технологій безпроводових мереж**

Параметри ефективності	Технології для порівняння						
	Bluetooth 5.0	WiFi 6	5G	UWB	LoRaWan	ZWave	ZigBee
Пропускна здатність	2	9	10	5	1	1	1
Затримка, мсек	8	9	10	1	1	1	1
Ємність мережі, Мбіт/с/ кв.м	2	2	10	5	1	1	3
Щільність підключення пристроїв на кв. км	3	3	10	3	7	3	3
Енергетична ефективність	7	5	5	3	10	8	9
Безпека мережі	5	10	10	5	5	5	5

Застосувавши формулу  $k_{int} = \sum(k_n \cdot x_n)$  отримаємо інтегральний показник ефективності для кожної оцінюваної технології (таблиця 4).

Таблиця 4

**Нормовані оцінки ефективності технологій безпроводових мереж**

Технології для порівняння						
Bluetooth 5,0	WiFi 6	5G	UWB	LoRaWan	ZWave	ZigBee
4,75	6,35	9,25	3,5	4,35	3,25	3,7

Таким чином, виходячи з результатів багатокритеріального аналізу показників ефективності оцінюваних технологій (таблиця 3), можна зробити висновки про те, що сфера використання технологій сучасних безпроводових мереж є досить фрагментованою. При цьому, лідируючу позицію посідає технологія 5G, але жодна технологія підключення не має повсюдне покриття та здатна вирішити всі проблеми для всіх потенційних вертикальних випадків використання. Кожен варіант підключення до мережі передбачає компроміс між споживаною потужністю, діапазоном та смугою пропускання.

В подальшому технологія 5G, яка націлена на реалізацію додатків з низькою затримкою і високою пропускнуною спроможністю, становитимуть більшу частину величезного простору IoT, очолюваного операторами мобільного зв'язку, операторами неліцензованого спектру та підприємствами через власні приватні мережі.

При цьому, однією з ключових технологій, що може бути використана в мережах 5G для забезпечення виробничих процесів є MEC (Mobile Edge Computing). MEC [13] передбачає розміщення IT-функціоналу та пов'язаного функціоналу хмарних обчислень.

Периферійні сервери можуть підвищити продуктивність та зменшити затримку в будь-якому контексті, максимально наблизивши обчислювальні та інші ресурси до місця, де вони потрібні. Оскільки 5G – це висока швидкість та низька затримка, ці дві технології добре поєднуються. Більше того, взаємозв'язок між ними набагато глибший: широка доступність мереж 5G, величезна кількість обладнання та ПЗ, яке підключатиметься до цих мереж, не обійдеться без MEC.

У поєднанні з архітектурою периферійних обчислень 5G зазвичай розглядається як технологія, яка вирішить одну з найнагальніших проблем мережної затримки при одночасному забезпеченні високої пропускнуої здатності.

Таким чином, застосувавши багатокритеріальний аналіз до даних із таблиці 1, а також проаналізувавши потреби підприємств, на яких необхідно проводити підтримку процесів автоматизації виробничих процесів, можна зробити висновок, що оптимальним рішенням для великих підприємств є розгортання мережі 5G. Тому подальший розгляд буде стосуватись саме цієї технології.

**Вибір оптимальних проектних рішень технологій мобільного зв'язку 5G**

Кожне виробниче підприємство повинно очікувати отримання максимального ефекту від вкладання власних коштів у свої власні проекти інформатизації. Величину цього ефекту можна відобразити на величині прибутку підприємства від реалізації проекту інформатизації. Виходячи із цих тверджень, можна проводити вибір оптимального проектного рішення, використовуючи критерій оптимальності Байєса-

Лапласа (BL-критерій) [14]. Доцільно також обґрунтувати використання, як оціночної функції оптимальності – чистого приведеного ефекту за проектом інформатизації, як інтегрального показника ефективності проектних рішень.

Зазвичай, прийняття рішень щодо потенційного інвестування може відбуватись у ситуації невизначеності, при цьому така формальна схема припускає обов'язкову наявність [15]:

1) множини  $D(\vec{X})$  альтернативних рішень у розпорядженні виробничого підприємства. Тоді йому необхідно прийняти одне із цих наявних рішень:  $\vec{X}_i \in D(\vec{X}), i = 1, \dots, n$ ;

2) оточуючого середовища з множиною взаємовиключних станів  $Z_j \in D(\vec{Z}), j = 1, \dots, m$ . При цьому, Підприємству не відомо, в якому конкретно стані знаходиться (або буде знаходитись) це оточуюче середовище. В нашому конкретному випадку під зовнішніми станами для виробничого Підприємства, що прагне оптимізувати виробничі процеси шляхом інформатизації, будемо мати на увазі можливість розгортання різних підвидів радіомереж 5G;

3) оціночної функції оптимальності  $E_{ij}$ , яка характеризує прибуток (отриману перевагу) виробничого Підприємства під час вибору проектного рішення  $\vec{X}_i \in D(\vec{X})$  у ситуації, коли оточуюче середовище знаходиться (або вже знаходиться) у стані  $Z_j \in D(\vec{Z})$ , що означає, що конкретного значення оціночної функції оптимальності для проектного рішення  $X_i$  і стану оточуючого середовища  $Z_j$ . В такому випадку, ситуацію щодо прийняття рішення щодо можливості інвестування в нову інформаційно-комунікаційну інфраструктуру можна охарактеризувати матрицею проектних рішень (табл. 5). Тоді, елементи матриці  $E_{ij}$  – оціночні функції оптимальності, які є кількісною оцінкою критерію оптимальності для кожного проектного рішення  $X_i \in D(\vec{X})$  за умови, що оточуюче середовище знаходиться у стані  $Z_j \in D(\vec{Z})$ .

Оціночною функцією оптимальності, яка є кількісною оцінкою критерію оптимальності, є прибуток (ефект) від реалізації проекту інформатизації.

Таблиця 5

Матриця проектних рішень

Альтернатива $D(\vec{X})$	Стан оточуючого середовища, який очікується $D(\vec{Z})$				
	$\vec{Z}_1$	...	$\vec{Z}_j$	...	$\vec{Z}_m$
$\vec{X}_1$	$E_{11}$	...	$E_{1j}$	...	$E_{1m}$
...	...	...	...	...	...
$\vec{X}_i$	$E_{i1}$	...	$E_{ij}$	...	$E_{im}$
...	...	...	...	...	...
$\vec{X}_n$	$E_{n1}$	...	$E_{nj}$	...	$E_{nm}$

За критерієм Байеса-Лапласа, оптимальним рішенням  $X^* \in D(\vec{X})$  вважають те, для якого математичне очікування результуючої оціночної функції оптимальності досягає найбільшого можливого значення [16]:

$$E_{BL} = \max_{\vec{X} \in D(\vec{X})} E_{jr} = \max_{\vec{X} \in D(\vec{X})} \sum_{j=1}^m p_j \cdot E_{ij}.$$

Множина оптимальних варіантів згідно з BL-критерієм визначають таким чином:

$$\vec{X}^* = \left\{ \vec{X}_i : \vec{X}_i \in D(\vec{X}) \wedge E_{BL} = \max_{\vec{X}_i \in D(\vec{X})} \sum_{j=1}^m p_j \cdot E_{ij} \right\}.$$

Коли апіорні ймовірності щодо стану середовища – рівноймовірні, BL-критерій обертається у критерій Бернуллі-Лапласа:

$$E_{BL} = \frac{1}{m} \cdot \max_{\vec{X}_i \in D(\vec{X})} \sum_{j=1}^m E_{ij}.$$

Тому для вибору оптимальної комунікаційної технології для підтримки автоматизації процесів виробництва підприємств необхідно сформувати множину можливих проектних рішень для побудови мережі 5G, які будуть впроваджуватись  $D(X)$  та множину станів навколишнього середовища, який очікується в майбутньому  $D(Z)$ , до якої віднесемо, як приклад, можливі частотні діапазони для розгортання різних технологій на доступному радіочастотному спектрі (табл. 5). Також можна віднести технології мікро та макростільників. Слід відзначити, що значення чистого приведенного ефекту розраховано за допомогою наданих експертних оцінок та до таблиці 6 вводиться в умовних одиницях. Як критерій оптимальності для першого інформаційного стану можна використати: мінімум дисперсії оціночної функції або максимум ентропії математичного очікування оціночної функції [16].

Таблиця 6

Матриця вибору проектного рішення для стільникового оператора

Альтернативне рішення $D(\vec{X})$ (технологія стільникових мереж)	Розподіл ймовірностей						Результуюча оціночна функція $E_{BL} = \sum_{j=1}^m P_j \cdot E_{ij}$
	$P_1(0)$	$P_2(0)$	$P_3(0,25)$	$P_4(0,25)$	$P_5(0,25)$	$P_6(0,25)$	
	Стан навколишнього середовища $D(\vec{Z})$ (частотний діапазон, МГц)						
	$\vec{Z}_1$	$\vec{Z}_2$	$\vec{Z}_3$	$\vec{Z}_4$	$\vec{Z}_5$	$\vec{Z}_6$	
	700	800	900	1800	2100	2600	
Макростільники	0	0	2	0	1,8	0	0,95
Мікростільники	3	3	0	3	0	2,7	1,425
$E_{BL} = 1,425$							

Таким чином, за аналізом результатів, наведених у таблиці 6, можна зробити висновок про необхідність розгортання на підприємствах саме мікростільникової структури мережі із використанням радіочастот у діапазонах 700, 800 або 2600 МГц.

### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Дослідження, проведені в даній роботі дозволили провести аналіз та здійснити відповідний вибір оптимальної технології для використання її з метою оптимізації виробничих процесів. Для цього було розроблено модель багатокритеріальної оптимізації, визначено пул комунікаційних технологій, які можуть бути використані для оптимізації виробничих процесів. В результаті, проведений багатокритеріальний аналіз дозволив впевнитись в доцільності розгортання стільникових мереж 5G для автоматизації виробничих процесів. Також було запропоновано методику вибору оптимальних проектних рішень технологій мобільного зв'язку 5G.

### ЛІТЕРАТУРА

- Смірнова Т.В., Солових Є.К., Смірнов О.А., Дресв О.М., «Побудова хмарних інформаційних технологій оптимізації технологічного процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей», *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. № 1(32). с. 184-194, 2019.
- Смірнова, Т.В., Смірнов, С.А., Минайленко, Р.М., Доренський, О.П., Сисоєнко С.В. «Хмарна автоматизована система інтелектуальної підтримки прийняття рішень для технологічних процесів». *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*. №4, 2020, С. 84-92.
- Смірнова Т.В., Столяренко М.П., Янков М.О., Грудік В.В., Моторін Ю.Ю. «Модель реалізації структури технологічного процесу у хмарному сервісі». *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2021. № 4(70). С. 132-142.
- <http://bourabai.ru/telecom/nets21.htm>
- AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics, 2015 Semtech Corporation
- LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1.0, 2015 January
- IEEE 802.15.4-2011 – IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs).
- IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4zEnhanced Impulse Radio
- © 2018 Wi-Fi Alliance. Wi-Fi 6: High performance, next generation Wi-Fi®
- <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/wireless/wi-fi-6-series.html>
- ITU towards “IMT for 2020 and beyond” – IMT-2020 standards for 5G
- White paper. Cisco public.Reimagining the End-to-End Mobile Network in the 5G Era
- <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/internet-veschej-internet-of-things-iot>
- Критерій Байеса-Лапласа: веб-сайт. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B9\\_%D0%91%D0%B0%D0%B9%D1%94%D1%81%D0%B0\\_%E2%80%94%D0%9B%D0%B0%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B9_%D0%91%D0%B0%D0%B9%D1%94%D1%81%D0%B0_%E2%80%94%D0%9B%D0%B0%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%B0)
- Жижор О.Б., Коваль Р.А. Вибір оптимального проектного рішення у ситуації невизначеності. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22.5. С. 178-182
- Гамидов Г.С. Основы инноватики и инновационной деятельности / Гамидов Г.С., Колосов В.Г., Османов Н.О. и др. – СПб : Изд-во "Политехника". 2000. – 323 с

## REFERENCES

1. Smirnova T.V., Solovykh E.K., Smirnov O.A., Dreev O.M., «Pobudova khmarnykh informatsiynykh tekhnolohiih optimizatsii tekhnolohichnoho protsesu vidnovlennia ta zmitsnennia poverkhon detalei». [Construction of cloud information technologies to optimize the technological process of restoration and strengthening of surfaces of parts], Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences. № 1 (32). pp. 184-194, 2019.
2. Smirnova, T.V., Smirnov, S.A., Minailenko, R.M., Dorensky, O.P., Sysenko S.V. «Khmarna avtomatyzovana systema intelektualnoi pidtrymky pryiniattia rishen dlia tekhnolohichnykh protsesiv». [Cloud automated system of intelligent decision support for technological processes]. Bulletin of Cherkasy State Technological University. Technical sciences. №4, 2020, pp. 84-92.
3. Smirnova T.V., Stolyarenko M.P., Yankov M.O., Grudik V.V., Motorin Yu.Yu. «Model realizatsii struktury tekhnolohichnoho protsesu u khmaromomu servisi». [Model of realization of structure of technological process in cloud service]. Collection of scientific works of Kharkiv National University of the Air Force. 2021. № 4 (70). pp. 132-142.
4. <http://bourabai.ru/telecom/nets21.htm>
5. AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics, 2015 Semtech Corporation
6. LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1.0, 2015 January
7. IEEE 802.15.4-2011 – IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs).
8. IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4zEnhanced Impulse Radio
9. © 2018 Wi-Fi Alliance. Wi-Fi 6: High performance, next generation Wi-Fi®
10. <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/wireless/wi-fi-6-series.html>
11. ITU towards “IMT for 2020 and beyond” – IMT-2020 standards for 5G
12. White paper. Cisco public.Reimagining the End-to-End Mobile Network in the 5G Era
13. <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/internet-veschej-internet-of-things-iot>
14. Bayes-Laplace test: website. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B9\\_%D0%91%D0%B0%D0%B9%D1%94%D1%81%D0%B0\\_%E2%80%94%D0%9B%D0%B0%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B9_%D0%91%D0%B0%D0%B9%D1%94%D1%81%D0%B0_%E2%80%94%D0%9B%D0%B0%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%B0)
15. Zhikhov O.B., Koval R.A. «Vybir optimalnogo proektnoho rishennia u sytuatsii nevyznachenosti». [Choosing the optimal design solution in a situation of uncertainty]. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. 2012. Vip. 22.5. Pp. 178-182
16. Gamidov G.S. «Osnovi ynnovatyky u ynnovatsyonnoi deiatelnosti». [Fundamentals of innovation and innovation] / Gamidov GS, Kolosov VG, Osmanov NO etc. - St. Petersburg: Polytechnic Publishing House. 2000. - 323 p.