

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра електронних комунікацій та Інтернету речей**

«До захисту допущено»

ВО завідувача кафедри

_____ Вячеслав НОСКОВ

«___» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

на тему: «Аналіз особливостей застосування PLC технологій»

Виконав:

студент IV курсу, групи ТС-11

Герасимчук Юрій Олександрович _____

Керівник:

Доцент кафедри ЕКІР, к.т.н., доцент

Максимов Володимир Васильович _____

Рецензент:

Доцент кафедри ІТТ, к.т.н.,

Правило Валерій Володимирович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Електронних комунікацій та Інтернету речей

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма – «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»

ЗАТВЕРДЖУЮ

ВО завідувача кафедри

_____ Вячеслав НОСКОВ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Герасимчуку Юрію Олександровичу

1. Тема роботи «Аналіз особливостей застосування PLC технологій», керівник роботи доцент кафедри електронних комунікацій та Інтернету речей НН ІТС Максимов Володимир Васильович, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету «26» травня 2025 р. №1755-С
2. Термін подання студентом роботи «30» травня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи
 1. Lampe L., Tonello A. M., Swart T. G. (Eds.). *Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid*. Wiley, 2016.
 2. HomePlug Powerline Alliance - HomePlug AV White Paper.
 3. HomePlug Powerline Alliance - HomePlug AV2 White Paper.
 4. EDN - Narrowband Powerline Communication—Applications and Challenges—Part I.
 5. ITU-T Rec. G.9902 (10/2012) Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for ITU-T G.hnem networks.
4. Зміст роботи
 - Збір та огляд наукової літератури по темі
 - Огляд PLC технологій

- Дослідження технічних особливостей та стандартизації PLC
- Аналіз застосування PLC технологій
- Побудова тестового стенду та вибір обладнання
- Експериментальні дослідження та оптимізація роботи PLC мережі

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

- Тема роботи, мета дослідження. Предмет дослідження
- Огляд PLC технологій, характеристик порівняння їх
- Огляд міжнародних стандартів, порівняння їх характеристик
- Проблеми та обмеження PLC
- Застосування PLC у побуті та розумних системах
- Застосування PLC у промисловості
- Побудова тестового стенду та вибір обладнання
- Дослідження та оптимізація роботи PLC мережі
- Висновки

6. Дата видачі завдання 10 березня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Видача завдання та узгодження теми дипломної роботи	10.03.25	Виконано
2.	Збір та огляд наукової літератури по темі	10.03.25 – 30.03.25	Виконано
3.	Огляд PLC технологій	01.04.25 – 14.04.25	Виконано
4.	Дослідження технічних особливостей та стандартизації PLC	15.04.25 – 22.04.25	Виконано
5.	Аналіз застосування PLC технологій	23.04.25 – 01.05.25	Виконано
6.	Побудова тестового стенду та вибір обладнання	02.05.25 – 10.05.25	Виконано
7.	Експериментальні дослідження та оптимізація роботи PLC мережі	11.05.25 – 19.05.25	Виконано
8.	Аналіз результатів	20.05.25 – 31.05.25	Виконано
9.	Оформлення роботи	01.06.25 – 08.06.25	Виконано

Студент _____ **Юрій ГЕРАСИМЧУК**

Керівник роботи _____ **Володимир МАКСИМОВ**

РЕФЕРАТ

Диплом містить 122 аркуши, 4 додатки, 13 таблиць та має 12 ілюстрацій з 85 використаними джерелами

Мета роботи – провести теоретичний і практичний аналіз технологій передачі даних через електромережі (PLC), визначити їхні можливості, обмеження та перспективи використання в телекомунікаційних системах.

Актуальність теми полягає в зростаючій потребі у створенні ефективних та економічно доцільних систем зв'язку, які можуть функціонувати без додаткової прокладки кабельної інфраструктури. Технології PLC дозволяють використовувати вже існуючі електричні мережі для передачі цифрових даних, що робить їх перспективними для використання у побуті, промисловості та енергетиці.

Об'єкт дослідження – технології передачі даних через електромережі.

Предмет дослідження – принципи роботи, технічні характеристики, стандартизація, переваги та недоліки PLC технологій, а також ефективність їх застосування в різних умовах.

Методи дослідження – аналіз технічної літератури, порівняльний аналіз, експериментальні дослідження, математичне моделювання, обробка результатів вимірювань.

Ключові слова: PLC, Power Line Communication, електромережа, передача даних.

ABSTRACT

The thesis consists of 122 pages, 4 apps, 13 tables and includes 12 illustrations with 85 sources used.

The purpose of the work is to conduct a theoretical and practical analysis of data transmission technologies through power grids (PLC), to determine their capabilities, limitations, and prospects for use in telecommunication systems.

The relevance of the topic lies in the growing need for creating efficient and economically viable communication systems that can function without additional cable infrastructure. PLC technologies allow the use of existing electrical networks for the transmission of digital data, making them promising for use in households, industry, and energy sectors.

The object of research is data transmission technologies through power grids.

The subject of research is the principles of operation, technical characteristics, standardization, advantages and disadvantages of PLC technologies, as well as the effectiveness of their application in various conditions.

Research methods include analysis of technical literature, comparative analysis, experimental research, mathematical modeling, and processing of measurement results.

Keywords: PLC, Power Line Communication, power grid, data transmission.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП	10
1 ОГЛЯД PLC ТЕХНОЛОГІЙ	12
1.1 Історія розвитку технологій Power Line Communication (PLC)	12
1.2 Основні принципи передачі даних через електромережу.....	15
1.2.1 Принцип накладання високочастотного сигналу	16
1.2.2 Методи модуляції сигналу	16
1.2.3 Подолання перешкод та шумів	18
1.2.4 Мережева топологія та доступ до середовища	20
1.2.5 Методи доступу:.....	21
1.2.6 Керування ресурсами.....	22
1.3 Класифікація PLC технологій.....	23
1.3.1 Вузькосмугові PLC (Narrowband PLC)	23
1.3.2 Широкосмугові PLC (Broadband PLC).....	24
1.4 Порівняння PLC з іншими технологіями передачі даних (Wi-Fi, Ethernet, 5G).....	26
1.4.1 Основні характеристики технологій передачі даних	26
1.4.2 Порівняльний аналіз ключових параметрів	28
1.5 Висновки до 1 розділу	33
2 ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА СТАНДАРТИЗАЦІЯ PLC.....	35
2.1 Фізичні та мережеві особливості PLC	35
2.2 Основні міжнародні стандарти	37
2.2.1 HomePlug (AV, AV2, Green PHY)	37
2.2.2 IEEE 1901	40
2.2.3 G.hn (ITU-T G.996x).....	42
2.2.4 PRIME та G3-PLC	44
2.3 Проблеми та обмеження PLC (завади, затухання сигналу, безпека).....	50
2.3.1 Завади та затухання сигналу в PLC-мережах.....	50
2.3.2 Безпека в PLC-мережах	52
2.4 Висновки до 2 розділу	53
3 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ PLC ТЕХНОЛОГІЙ	55

3.1 Застосування PLC у побуті та розумних системах (Smart Home, IoT).....	55
3.1.1 Опис системи (Smart Home, IoT).....	55
3.1.2 Технології на основі Інтернету речей для автоматизації.....	57
3.1.3 Архітектура Smart House.....	61
3.2 Застосування PLC у промисловості, енергетиці та транспорті.....	62
3.2.1 PLC Протоколи для автоматизації промислових потреб.....	62
3.2.2 PLC у промислових системах.....	65
3.3 Приклади практичного впровадження PLC технологій).....	66
3.4 Висновки до 3 розділу.....	67
4 ПРАКТИЧНИЙ АНАЛІЗ PLC МЕРЕЖІ.....	69
4.1 Побудова тестового стенду та вибір обладнання.....	69
4.1.1 Побудова схеми розміщення обладнання тестового стенду PLC-мережі.....	69
4.1.2 Опис взаємодії компонентів тестового стенду.....	71
4.1.3 Критерії вибору обладнання.....	72
4.1.4 Особливості експлуатації.....	73
4.1.5 Обране обладнання.....	74
4.1.6 Кошторис на обладнання.....	81
4.2 Експериментальні дослідження та оптимізація роботи PLC мережі.....	83
4.2.1 Вплив імпульсних завад (LED-освітлення, частотні приводи) на пропускну здатність NB-PLC.....	86
4.2.2 Типи шуму та їх мінімізація.....	88
4.2.3 Вибір техніки модуляції.....	89
4.2.4 Довжина лінії та пропускну здатність.....	92
4.3 Висновки до 4 розділу.....	93
ВИСНОВКИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	97
ДОДАТКИ.....	108
Додаток 1. Вплив імпульсних завад (LED-освітлення, частотні приводи) на пропускну здатність NB-PLC.....	108
Додаток 2. Типи шуму та їх мінімізація.....	111
Додаток 3. Вибір техніки модуляції.....	115
Додаток 4. Довжина лінії та пропускну здатність.....	120

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

PLC	Power Line Communication - Зв'язок по лініях електропередачі
NB-PLC	Narrowband Power Line Communication - Вузькосмуговий зв'язок по лініях електропередачі
BB-PLC	Broadband Power Line Communication - Широкопсмуговий зв'язок по лініях електропередачі
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Ортогональне частотне мультиплексування з розділенням
FSK	Frequency Shift Keying - Частотна маніпуляція
PSK	Phase Shift Keying - Фазова маніпуляція
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum - Розширення спектра прямою послідовністю
TDMA	Time Division Multiple Access - Множинний доступ з часовим розділенням
FDMA	Frequency Division Multiple Access - Множинний доступ з частотним розділенням
QoS	Quality of Service - Якість обслуговування
FEC	Forward Error Correction - Пряме виправлення помилок
LDPC	Low-Density Parity-Check - Код з малою щільністю перевірок на парність
AMI	Advanced Metering Infrastructure - Передова інфраструктура обліку

CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - Множинний доступ з контролем несучої та уникненням колізій
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector - Міжнародний союз електрозв'язку - Сектор стандартизації електрозв'язку
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers - Інститут інженерів з електротехніки та електроніки
G.hn	Gigabit Home Networking - Гігабітна домашня мережа
G3-PLC	Generation 3 Power Line Communication - Зв'язок по лініях електропередачі третього покоління
PRIME	Powerline Intelligent Metering Evolution - Інтелектуальна еволюція обліку по лініях електропередачі
HomePlug	- HomePlug Powerline Alliance
Wi-Fi	Wireless Fidelity - Бездротова точність
Ethernet	
5G Fifth Generation	Fifth Generation - П'яте покоління
SNR	Signal-to-Noise Ratio - Відношення сигнал/шум
BER	Bit Error Rate - Коефіцієнт бітових помилок
LC-фільтр	Low-Cut filter - Фільтр нижніх частот
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying - Квадратурно-фазова маніпуляція
16-QAM	16-Quadrature Amplitude Modulation - 16-квадратурно-амплітудна модуляція)

ВСТУП

Power Line Communication (PLC) – це технологія, яка дозволяє передавати голос і дані за допомогою накладання інформаційного сигналу поверх стандартного змінного струму частотою 50 Гц або 60 Гц через існуючі лінії електропередач [1, 2]. Він забезпечує широкосмугову передачу даних по провідниках, які вже використовуються для передачі електроенергії за допомогою модульного сигналу.

Ця технологія має довгу історію, починаючи з середини XIX століття, коли технології зв'язку по лініях електропередач застосовувалися для передачі телеграфних сигналів між енергетичними вузлами.

Згодом будуть створюватися стандарти та технології компаніями та організаціями, такими як HomePlug Powerline Alliance (неіснуюча) - HomePlug, PRIME Alliance (активна) – PRIME, G3-Alliance (активна) – G3-PLC, IEEE 1901 – стандарт, який є широкосмуговим зв'язком через лінії електропередач, та ITU-T розробила в рамках стандартизації електрозв'язку гігабітну домашню мережу G.hn, яка є специфікацією дротової домашньої мережі з підтримкою швидкості до 2 Гб/с. Схвалений стандарт цієї специфікації – G.9960 (Рекомендація ITU-T) [16].

Сучасні PLC-технології класифікуються, як вузькосмугові (Narrowband PLC) та широкосмугові (Broadband PLC). Вузькосмугові PLC використовуються для передачі даних на нижчих швидкостях і знаходять застосування в системах автоматизації, таких як «розумний дім» та дистанційне зчитування показників лічильників у низьковольтній мережі. Широкосмугові PLC забезпечують високошвидкісну передачу даних, що дозволяє використовувати їх для доступу до Інтернету та мультимедійних застосувань у високовольтній мережі.

Однією з ключових переваг PLC є використання існуючої електричної інфраструктури для передачі даних, що знижує витрати на розгортання мережі

та спрощує процес інтеграції нових пристроїв. Проте, слід враховувати, що якість сигналу може залежати від стану електромережі та наявності електромагнітних завад.

У цій дипломній роботі проведено детальний аналіз технологій PLC, їхніх стандартів, переваг і недоліків, а також розглянуто особливості застосування цієї технології в сучасних телекомунікаційних системах.

1 ОГЛЯД PLC ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Історія розвитку технологій Power Line Communication (PLC)

Середина XIX століття

Історія розвитку починається з 1838 року, коли Едвард Деві запропонував дистанційну електрику вимірювання постачання з метою перевірки рівня напруги акумуляторів на телеграфній системі Лондона.

Початок XX століття

У 1902 році Честер Торадсон з Чикаго розробив свою систему, яка дозволяє дистанційно зчитувати лічильники електроенергії за допомогою додаткового сигнального проводу. Він запатентував цю систему в 1905 році, однак її не прийняли із-за недостатньої економічної вигоди [3].

Згодом після видачі патентів почали з'являтися різні програми, пов'язані з керуванням, вимірюванням та захистом ліній електропередач. Дослідники зосередилися на застосуванні у захисті ліній електропередач середньої та високої напруги.

У 1914 році американська телекомунікаційна компанія AT&T розробила систему широкосмугового доступу по лініям електропередачі, яка базується на технології PLC. Суть цієї системи полягає в тому, що кожен канал використовує власну (несучу) частоту [8].

У 1920-х роках набуває популярності широке використання PLC за допомогою пульсаційного керування в області: розподілу ліній електропередач, голосового зв'язку, середньої та високої напруги лінії електропередачі [1].

У 1930 році німецька компанія Siemens побудувала перші системи пульсаційного контролю (СПК) для практичного застосування [7].

Система пульсаційного контролю (СПК) забезпечувала односторонній зв'язок із низькою швидкістю передачі даних, та використовує високопотужні та вузькосмугові сигнали PLC. СПК використовував сигнали в діапазоні 125

Гц – 3 кГц, що забезпечувало їх ефективне поширення через розподільні трансформатори до споживачів [4].

Середина - кінець XX століття

У 1954 році Американський інститут інженерів та електриків (АІЕ) опублікував канали та рекомендації щодо застосувань PLC, що сприяло збільшенню досліджень цієї галузі [6].

У 1979 році з'являється новий модуль X10 для комерційних рішень, які дозволяли передавати сигнали керування побутовими приладами через електричну мережу. Ця технологія використовувала імпульсну модуляцію на частоті 120 кГц і стала основою для ранніх систем домашньої автоматизації.

Початок – середина 1980 рр. Проводились дослідження з використанням електромережі для передачі даних у симплексному режимі та дослідження для реалізації двонаправлених систем PLC, які базувалися на системах, розроблених для автоматизації та програм автоматичного зчитування лічильників (АЗЛ). Для експерименту у симплексному режимі інженери використовували діапазон 5-500 кГц, що призвело до вдосконалення вузькосмугових PLC-систем.

У 1984 році була представлена Enermet Melko як двонаправлена система передачі даних. Ця система використовує більш ефективну систему модуляції та підвищені частоти носія від 3,025 до 4,825 кГц, що забезпечувало вищий відсоток передачі даних. Таке рішення застосувало більш складну комунікаційну електроніку та стало важливим роком у розвитку PLC для промислового застосування [4, 5, 7].

У 1990-х роках широкосмуговий доступ по лініям електропередачі стає засобом, який використовує поширеність енергетичної мережі для забезпечення високошвидкісного широкосмугового зв'язку. Працює ШСД на вищих рівнях частоти у діапазоні від 2 до 80 МГц. Метод модуляції для ШСД є ортогональне частотне мультиплексування (OFDM) [9].

Echelon представляє нову систему локальних операційних мереж – LonWorks. Local Operating Network – це протокол для мережевих платформ,

який використовується в автоматизації будівель і в багатьох різних програм, таких як вуличне світло, вентиляція, сигналізація метро та інтелектуальний облік електроенергії. Цей протокол вперше стандартизовано наприкінці 1990-х років [10].

У 1997 році в Європі були представлені основні Інтернет-додатки, пов'язані з доступом до Інтернету та наданням послуг через системи PLC.

Перші випробування дуплексної передачі даних через електропроводи та початок досліджень Ascom (компанія зі штаб-квартирою у Швейцарії) і Norweb (компанія зі штаб-квартирою у Великобританії). Отримані результати були негативними, ймовірно, через технічні проблеми та нормативні документи. Пізніше, польові випробування лінії зв'язку в громадських умовах низької напруги мережі дистрибуції здійснюються декількома дистриб'юторськими компаніями в Європі [4, 5, 7].

XXI століття – сьогодні

У 2001 році HomePlug Powerline Alliance випускає свій перший промисловий стандарт HomePlug 1.0. Основним методом передачі даних для HomePlug – OFDM. OFDM розвивав швидкість передачі даних до 14 Мбіт/с, що дозволило реалізувати базові функції домашніх мереж [12].

У 2004 році засновується IEEE Communications Society TC-PLC, який координує дослідження, розробку стандартів та просування технологій PLC у рамках IEEE [1].

У 2009 році першу специфікацію G3-PLC згідно технічних умов випускає компанія Enedis. G3-PLC – це міжнародний стандарт ITU, який підтримує частотні смуги по всьому світу (10 кГц до 490 кГц) та забезпечує комунікацію на дальньому діапазоні та ефективність витрат для середньої та низької напруги [14, 15].

Також у цьому році офіційно затверджується перша версія стандарту G.hn ITU-T G.9960 (фізичний рівень) та G.9961 (мережевий рівень) [16]. G.hn – це стандарт, який дозволяє передавати дані за допомогою будь-якого мережевого середовища та підтримує швидкість до 2 Гб/с. Використовує 4

основних типів проводів: телефонну проводку, коаксіальні кабелі, лінії електропередач і пластикове оптичне волокно [16].

У 2010 році ратифікований стандарт IEEE 1901, був першим глобальним стандартом для зв'язку по лінії електропередачі, розробленим для таких програм, як мультимедійні домашні мережі, аудіо-відео та інтелектуальна мережа. Він був змінений у IEEE 1901a-2019 з удосконаленнями фізичного рівня HD-PLC (wavelet) для додатків Інтернету речей і був переглянутий у 2020 році (IEEE 1901-2020) [11].

У 2011 році засновується компанія G3-Alliance, яка буде спрямована на стандартизацію та просування G3-технологій. З цього моменту почнуться польові експерименти, щоб можна було розвернути технологію G3-PLC в промислових масштабах. [14, 15].

У 2012 році затверджується стандарт G.9904 вузькосмугові трансивери з ортогональним частотним розділенням каналів електропередач для мереж PRIME. PRIME (PowerLine Intelligent Metering Evolution) – це специфікація для вузькосмугового зв'язку через електромережі PLC, розроблена компанією PRIME Alliance [13].

На сьогоднішній день PLC вдосконалюється за рахунок вищезгаданих стандартів, таких як G.hn (ITU-T), G3-PLC, PRIME та IEEE 1901. За допомогою штучного інтелекту (ШІ) PLC технологія зможе обробляти більше аналітичних даних для належного керування всією системою та оптимізувати маршрутизацію даних, виявлення та усунення несправностей, а також для запобігання збоїв у роботі системи.

1.2 Основні принципи передачі даних через електромережу

Передача даних через електромережу в технології PLC (Power Line Communication) базується на кількох ключових принципах, які дозволяють ефективно використовувати існуючу інфраструктуру електромереж для комунікаційних цілей.

1.2.1 Принцип накладання високочастотного сигналу

В принципі роботи PLC лежить техніка додавання високочастотного сигналу даних до звичайної низькочастотної напруги електричної мережі (50-60 Гц). Передача інформації відбувається на частотах, які варіюються від кілогерців до сотень мегагерців, що залежить від обраної технології:

Вузькосмугові PLC:

Ця технологія працює в діапазоні частот 3–500 кГц і за бітовою швидкістю даних від кількох кбіт/с до 500 кбіт/с.

Широкопсмугові PLC:

Ця технологія працює у високочастотному діапазоні 1,8–500 МГц, що дозволяє досягати значно вищих швидкостей передачі даних порівняно з вузькосмуговими рішеннями – від декількох Мбіт/с до 1 Гбіт/с на фізичному рівні [18].

1.2.2 Методи модуляції сигналу

У PLC-системах використовуються різні методи модуляції для кодування інформації в електричному сигналі. Вони поділяються на одноносійні та багатоносійні методи модуляції:

Одноносійні методи модуляції:

1) FSK (Frequency Shift Keying) — цифровий метод частотної модуляції, при якому цифрові дані передаються шляхом зміни частоти несучого сигналу. Широко використовується у вузькосмугових PLC-системах. Кожен двійковий стан — логічний 0 (низький) і 1 (високий) у двійковому ключовому механізмі зсуву частоти — представлено аналоговою формою сигналу [22, 23].

2) PSK (Phase Shift Keying) — це техніка цифрової модуляції, за якої фаза несучого сигналу змінюється зміною синусів і косинусів на вході в

певний момент часу. Є два типи фазової маніпуляції: Двійкова фазова маніпуляція (BPSK) та квадратурна фазова маніпуляція (QPSK).

BPSK – найпростіший із типів PSK через те, що синусоїдальний носій приймає дві зміни фази: 180° та 0° .

QPSK – тип PSK, у якого синусоїдальний носій має чотири інверсні фази: 0° , 90° , 180° та 270° [24].

3) DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) — метод, що поєднує переваги розширеного спектру з частотною маніпуляцією. Одна з перших технологій розширення діапазонів, яка легко керується в модуляції розширення та процедурах демодуляції. Широкопasmовий радіосигнал формується за допомогою методу, при якому вхідний двійковий сигнал трансформується в псевдовипадкову послідовність. Ця псевдовипадкова послідовність потім використовується для модуляції несучої частоти, розширюючи спектр сигналу та роблячи його менш сприйнятливим до перешкод. Цей процес, відомий як модуляція розширеним спектром, дозволяє сигналу займати значно більшу смугу пропускання, ніж це необхідно для передачі вихідної інформації [1, 25].

Багатonosійні методи модуляції:

1) OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) — технологія, яка реалізує частотне мультиплексування сигналів (FDM) та розподіляє спектральні ресурси між піднесучими для передачі даних. Замість використання єдиної високошвидкісної піднесучої передачі даних, OFDM застосовує підхід з безліччю близько розташованих ортогональних піднесучих, що працюють паралельно. Кожна з цих піднесучих піддається модуляції із застосуванням стандартної цифрової схеми, наприклад QPSK або 16QAM, але з відносно низькою швидкістю передачі символів. Тим не менш, за рахунок одночасного використання великої кількості піднесучих, досягається загальна швидкість передачі даних, порівнянна зі схемами

односійних методів модуляції при використанні схожої смуги пропускання [19, 20, 21].

2) Filtered Multitone (FMT): є еволюцією OFDM, спрямованою на мінімізацію побічних спектральних компонентів (out-of-band emissions). У традиційному OFDM кожен піднесучий сигнал має форму прямокутного імпульсу у частотній області, що призводить до значних бічних пелюсток у спектрі, які можуть створювати перешкоди для сусідніх частотних каналів. FMT використовує спеціальні фільтри для формування імпульсів кожного піднесучого таким чином, щоб їх спектральна щільність була більш концентрованою в межах виділеної смуги, значно зменшуючи рівень позасмугових випромінювань і підвищуючи спектральну ефективність системи.

3) DCT-OFDM, DWMT: є варіантами багатоносійної модуляції, розробленими з акцентом на зниження міжсимвольних перешкод (ISI). ISI виникають, коли затримані копії попередніх символів досягають приймача в той самий час, що й поточний символ, спотворюючи його. Застосування дискретного косинусного перетворення (DCT) замість дискретного перетворення Фур'є (DFT) в DCT-OFDM, або використання вейвлет-перетворення (Discrete Wavelet Multi-Tone - DWMT), дозволяє краще концентрувати енергію сигналу в часовій області та ефективніше боротися з багатопроблемним розповсюдженням сигналу, що є основною причиною виникнення міжсимвольних перешкод, особливо в каналах з великою дисперсією. [1]

1.2.3 Подолання перешкод та шумів

Типи шумів у PLC

Імпульсні шуми: Короткочасні, але сильні за амплітудою завади, викликані, наприклад, перемиканням навантаження, двигунами тощо. Імпульсивні шуми поділяються на три типи: періодичний імпульсивний

синхронний з частотою мережі, періодичний імпульсивний асинхронний з частотою мережі та неперіодичний імпульсивний.

1) Періодичний імпульсивний синхронний шум з частотою мережі – це перешкоди, які повторюються з частотою, кратною основній частоті електромережі (50/60 Гц) та виникають через роботу кремнієвих випрямлячів. Імпульси зазвичай мають дуже малу тривалість у часовій області та можуть досягати значної амплітуди, внаслідок чого вони можуть негативно впливати на широкий діапазон частот.

2) Періодичний імпульсивний асинхронний шум з частотою мережі – ці шуми викликані здебільшого імпульсними джерелами живлення і він показує частоту повторення між 50 кГц та 2 МГц. Вони мають спектральну щільність потужності, яка зменшується з частотою.

3) Неперіодичний імпульсивний шум – ці шуми мають несистематичний характер та виникають через випадкові проміжки часу. Вони можуть проявлятися у вигляді серії послідовних імпульсів у часовій області, які також називають сплесками.

Фонові шуми: це випадкові електромагнітні перешкоди, які зустрічаються в електромережі та впливають на якість передачі даних. Фонові шуми поділяються на 2 типи: вузькосмугові та кольорові.

1) Вузькосмугові шуми – це шуми, який зумовлені в основному через радіомовлення та телемовлення. Складається з модульованих синусоїдальних сигналів з рівними потужностями, які перевищують фоновий шум.

2) Кольорові шуми – це шуми, у яких спектральна щільність потужності зменшується зі збільшенням частоти та показує лише довгострокові коливання часу в масштабі хвилин або часу [26, 27].

Методи боротьби з шумом:

- Фільтрація та еквайзери: використання адаптивних еквайзерів для компенсації завад та багатошляховості.

- Модуляція з розширенням спектру (DSSS, FHSS): для збільшення завадостійкості сигналу.
- Модуляція з багатоканальним доступом (OFDM) + захист від імпульсного шуму: через блокування піднесій з найгіршими умовами.
- Forward Error Correction (FEC): корекція помилок, включаючи LDPC, Reed-Solomon.
- Інтерливінг: перестановка бітів для уникнення впливу імпульсного шуму на цілі блоки даних.

У книзі [1] також зазначено, що шум має циклостаціонарну природу, що дає можливість його передбачати та компенсувати.

1.2.4 Мережева топологія та доступ до середовища

Мережева топологія у PLC визначається електричною структурою мережі, що може включати:

- Деревоподібну топологію, яка використовується в розподільчих електромережах, де дані передаються ієрархічно від центрального вузла (підстанції) до споживачів. Вона ідеальна для Smart Metering та моніторингу мережі, оскільки використовує існуючу інфраструктуру, але якість зв'язку погіршується на віддалених гілках через загасання сигналу;
- Топологію точка-точка, яка найпростіша топологія для прямого зв'язку між двома пристроями через електропроводку. Часто застосовується для тимчасових з'єднань або простих домашніх рішень, де потрібна висока швидкість передачі, але вона не підходить для складних мереж через обмежену масштабованість;
- Зіркоподібну та шинну топологію, які домінують в побутових PLC-рішеннях, де пристрої підключаються до спільної лінії або центрального вузла (наприклад, PLC-адаптера). Вона проста у використанні (plug-and-play) і підходить для домашніх мереж та систем "розумний дім", але пропускна здатність ділиться між усіма пристроями.

- Сітчасту топологію — характерна для NB-PLC у Smart Grid, забезпечує надійність за рахунок множинних шляхів передачі даних. Кожен вузол може бути ретранслятором, що підвищує стійкість мережі до збоїв, але вимагає складнішого обладнання та керування, тому використовується переважно в промислових та комунальних мережах.

Оскільки електромережі не проектувалися для передачі даних, PLC-системи мають реалізовувати спеціальні протоколи доступу до середовища:

1.2.5 Методи доступу:

- CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance): в PLC-технологіях є методом доступу, при якому мережеві пристрої перед початком передачі даних аналізують стан електричної мережі, щоб визначити, чи є вона вільною. Якщо середовище передачі зайняте, пристрій відкладає передачу на випадковий проміжок часу, щоб уникнути колізій з іншими пристроями, які також можуть намагатися передати дані. Цей метод використовується в таких стандартах, як HomePlug AV та IEEE 1901, для забезпечення ефективного спільного використання електричної мережі без значних втрат продуктивності через зіткнення переданих пакетів.

- TDMA (Time Division Multiple Access): в PLC-системах передбачає поділ доступного частотного діапазону на дискретні часові інтервали, або тайм-слоти. Кожному підключеному пристрою виділяється певний часовий слот, протягом якого він має виключне право на передачу даних. Після закінчення його слоту, право передачі переходить до наступного пристрою відповідно до заданого порядку або розкладу. Такий підхід гарантує відсутність колізій, оскільки в будь-який момент часу лише один пристрій здійснює передачу, забезпечуючи впорядкований та прогнозований доступ до спільного середовища передачі.

- FDMA (Frequency Division Multiple Access): в контексті PLC-технологій, особливо при використанні модуляції OFDM, полягає у розділенні

загального доступного частотного спектра на безліч вузьких, ортогональних піднесучих частот (підканалів). Кожному користувачеві або для різних потоків даних виділяється певна кількість цих підканалів для одночасної передачі інформації. Завдяки ортогональності піднесучих, спектри сигналів у сусідніх підканалах частково перекриваються, але при цьому не створюють взаємних завад, що дозволяє ефективно використовувати доступний частотний ресурс та забезпечувати високу швидкість передачі даних.

1.2.6 Керування ресурсами

- Динамічний розподіл каналів є методом керування ресурсами в PLC-мережах, який передбачає гнучке призначення частотних каналів або часових слотів залежно від поточних потреб та умов у мережі. Замість фіксованого розподілу, система постійно відстежує завантаженість каналів, рівень перешкод та запити від підключених пристроїв, і на основі цієї інформації перерозподіляє доступні ресурси. Це дозволяє оптимізувати використання пропускну здатності, підвищити ефективність передачі даних та адаптуватися до змін у мережевому трафіку або характеристиках каналу зв'язку.;
- Механізми пріоритетів передачі (QoS) в PLC-технологіях використовуються для забезпечення різного рівня якості обслуговування для різних типів трафіку або для різних користувачів. Шляхом призначення пріоритетів певним даним (наприклад, голосовому або відео трафіку, що вимагає низької затримки та високої надійності), мережа може гарантувати їх своєчасну доставку навіть в умовах високого завантаження. Механізми QoS можуть включати в себе чергування пакетів, резервування пропускну здатності, обмеження затримок та втрат пакетів для трафіку з вищим пріоритетом, забезпечуючи таким чином кращий користувацький досвід для чутливих до якості сервісів.;

- Релеєві протоколи для передачі в складних топологіях (наприклад, Multi-hop) застосовуються в PLC-мережах для розширення зони покриття та забезпечення зв'язку між пристроями, які не можуть безпосередньо обмінюватися даними через велику відстань або наявність перешкод. У таких сценаріях проміжні пристрої (релеї) приймають та перенаправляють пакети даних від джерела до призначення, створюючи багатовузловий (multi-hop) шлях передачі. Ці протоколи забезпечують гнучкість у розгортанні мережі, дозволяючи обходити фізичні обмеження електричної проводки та встановлювати зв'язок у важкодоступних місцях.

Сучасні системи підтримують також кооперативну комунікацію, коли кілька пристроїв разом покращують передачу сигналу (Cooperative PLC) [1].

1.3 Класифікація PLC технологій

PLC технології можна розділити на два типи: вузькосмугові та широкосмугові. Цей розділ базується на частотному діапазоні, швидкості передачі, дальності передачі, типі модуляції, стійкості завад та основної сфери використання цих технологій.

1.3.1 Вузькосмугові PLC (Narrowband PLC)

NB-PLC — це технології, які здатні передавати дані по електромережах у діапазоні частот від 3 кГц до 500 кГц. Вузькосмугові застосування мережевого зв'язку надзвичайно різноманітні та прості у застосуванні для контролю і телеметрії електричного обладнання такого як лічильники, вимикачі, обігрівачі та побутові прилади.

NB-PLC класифікується на два типи:

Низька швидкість передачі даних (LDR): це технології, які використовують модуляцію однієї несучої (BPSK, FSK, DSSS) та швидкістю передачі даних кілька кбіт/с. Ці системи найбільше підходять для

інтелектуального обліку. Технології LDR NB-PLC також називають несучою лінією розподілу або несучою лінією електропередачі.

Висока швидкість передачі даних (HDR): це технології, які використовують модуляцію з кількома несучими (OFDM) зі швидкістю передачі даних від десятків до 500 Кбіт/с.

Найпоширеніші стандартизовані діапазони включають:

- Європейський CENELEC A (3–148.5 кГц)
- FCC (США): 9–500 кГц
- ARIB (Японія): 10–450 кГц
- Chinese band (Китай): 3-500 кГц [18, 28].

NB-PLC основні стандарти:

- ITU-T G.9902 – для G.hnem
- ITU-T G.9903 – для G3-PLC
- ITU-T G.9904 – для PRIME

IEEE 1901.2-2013 – загальний стандарт NB-PLC для Smart Grid систем [1, 18, 20, 32].

1.3.2 Широкополосні PLC (Broadband PLC)

BB-PLC або BPL (Broadband over power line) — це технології, які здатні передавати дані по електромережах у значно вищому діапазоні частот від 1.8 МГц до 500 МГц та мають швидкість передачі даних декількох Мбіт/с до 1 Гбіт/с на фізичному рівні. Розроблені та розгорнуті були для доступу в Інтернет та домашніх мультимедійних програм.

BPL ділиться на два основних типи:

Широкополосний доступ до інтернету (Broadband Internet Access) – це перспективною технологія, що дозволяє передавати високошвидкісний інтернет-сигнал через звичайну інфраструктуру електропостачання без необхідності прокладання окремих ліній зв'язку.

Домашня мережа (In-Home Networking) – використання для підключення домівок або офісних комп'ютерів, периферійних пристроїв чи іншої споживчої електроніки [18, 26].

OFDM є основною модуляцією, що застосовується у BPL, оскільки вона дозволяє боротися з багатошляховими завадами та високим рівнем шумів у мережі [28].

BB-PLC стандарти:

- IEEE 1901-2010 – використовує частоти передачі нижче 100 МГц. Застосовується в будівлях для локальних мереж (LAN), додатків Smart Energy, додатків транспортних платформ (автомобілів) та іншого розподілу даних [30].
- ITU-T G.9960 та G.9961 (G.hn) – зазвичай використовують лінії електропередач, телефонні лінії та коаксіальні кабелі. Забезпечують сумісність з іншими домашніми мережами (Wi-Fi, Ethernet).
- HomePlug AV та HomePlug AV2 – поширені стандарти для побутового використання з швидкістю передачі до 200 Мбіт/с та вище [1, 26].

Таблиця 1.1 Порівняльна характеристика двох типів PLC

Порівняльна характеристика		
Характеристика	NB-PLC	BB-PLC
Частотний діапазон	3 кГц – 500 кГц	1.8 МГц – 500 МГц
Швидкість передачі	до 500 кбіт/с	до 1 Гбіт/с (залежно від стандарту)
Дальність передачі	до кількох км	до кількох сотень метрів
Стійкість до завад	Висока	Нижча
Основні сфери	Smart Grid, AMI	Інтернет, мультимедіа
Тип модуляції	FSK, BPSK, OFDM	OFDM

1.4 Порівняння PLC з іншими технологіями передачі даних (Wi-Fi, Ethernet, 5G)

У сучасному світі існує широкий спектр технологій, які передають інформацію, та кожна технологія відрізняється швидкістю передачі даних, діапазоном частот, захистом і т.д., і має свої переваги та недоліки. PLC (Power Line Communication) має особливість користування, оскільки ця технологія вже використовує існуючу електромережу для передачі даних. Для повноцінного розуміння місця PLC у екосистемі комунікаційних технологій необхідно провести порівняльний аналіз із іншими поширеними технологіями, такими як Wi-Fi, Ethernet та мобільні мережі 5G.

1.4.1 Основні характеристики технологій передачі даних

1) PLC (Power Line Communication)

Принцип роботи: Передача даних здійснюється за допомогою існуючої електромережі шляхом накладання високочастотного сигналу на стандартний низькочастотний (50/60 Гц) струм.

Варіанти реалізації:

- Вузькосмуговий PLC (NB-PLC): 3-500 кГц, швидкість до 500 кбіт/с
- Широкопсмуговий PLC (BB-PLC): 1,8-500 МГц, швидкість до 1 Гбіт/с
- Стандарти: IEEE 1901, ITU-T G.hn, HomePlug AV/AV2, PRIME, G3-PLC [1, 18].

2) Wi-Fi

Принцип роботи: Бездротова передача даних через радіочастотні сигнали, переважно в діапазонах 2.4 ГГц та 5 ГГц.

Варіанти реалізації:

- Wi-Fi 4 (802.11n): до 600 Мбіт/с
- Wi-Fi 5 (802.11ac): до 3.5 Гбіт/с
- Wi-Fi 6 (802.11ax): до 9.6 Гбіт/с

- Wi-Fi 6E: розширення в діапазон 6 ГГц
- Wi-Fi 7 (802.11be): до 46 Гбіт/с (у розробці)

Стандарти: IEEE 802.11 та його варіації (a/b/g/n/ac/ax/be) [31].

3) Ethernet

Принцип роботи: Передача даних здійснюється за допомогою коаксіальних або волоконно - оптичних кабелів на основі технології комутації пакетів.

Варіанти реалізації:

- Fast Ethernet (100BASE-TX): 100 Мбіт/с
- Gigabit Ethernet (1000BASE-T): 1 Гбіт/с
- 2.5/5 Gigabit Ethernet: 2.5/5 Гбіт/с
- 10 Gigabit Ethernet (10GBASE-T): 10 Гбіт/с
- 40/100 Gigabit Ethernet: 40/100 Гбіт/с (переважно для центрів обробки даних)

Стандарти: IEEE 802.3 та його варіації [33, 34].

4) 5G

Принцип роботи: Бездротова передача даних через стільникові мережі п'ятого покоління з використанням різних частотних діапазонів.

Варіанти реалізації:

- Low-band 5G: діапазони нижче 1 ГГц, швидкість до 250 Мбіт/с
- Mid-band 5G: 1-7 ГГц, швидкість до 1 Гбіт/с
- High-band 5G (mmWave): 24-40+ ГГц, швидкість до 20 Гбіт/с

Стандарти: 3GPP Release 15, 16, 17 та подальші варіації [35, 36, 37].

1.4.2 Порівняльний аналіз ключових параметрів

Таблиця 1.2 - Швидкість передачі даних технологій передачі даних

Технологія	Типова швидкість	Максимальна теоретична швидкість
NB-PLC	10-500 кбіт/с	500 кбіт/с
BB-PLC	100-500 Мбіт/с	до 1.5 Гбіт/с (HomePlug AV2)
Wi-Fi 5	200-600 Мбіт/с	6.9 Гбіт/с
Wi-Fi 6	400-1000 Мбіт/с	9.6 Гбіт/с
Ethernet	100 Мбіт/с-1 Гбіт/с	до 100 Гбіт/с
5G	50-400 Мбіт/с	до 20 Гбіт/с (mmWave)

Проаналізувавши швидкість передачі даних кожної технології, можна побачити, що вузькосмуговий PLC (NB-PLC) значно поступається іншим сучасним технологіям за максимальною пропускнуою здатністю, що обмежує його застосування сценаріями з низькими вимогами до швидкості передачі даних, такими як системи автоматизованого обліку та Smart Grid. Широкопосмуговий PLC (BB-PLC) може конкурувати за швидкістю з типовими домашніми Wi-Fi мережами, але ще поступається (теоретично) максимумам новіших стандартів Wi-Fi та провідного Ethernet.

Реальна продуктивність BB-PLC сильно залежить від якості електромережі та відстані між пристроями, через що фактична швидкість часто становить приблизно 30-60% від теоретичної. Проте сучасні стандарти, такі як HomePlug AV2 з технологією MIMO, дозволяють досягти швидкостей, достатніх для більшості побутових застосувань, включаючи потокове відео у форматі 4K [1, 26, 38].

Таблиця 1.3 - Дальність передачі технологій передачі даних

Технологія	Типова дальність	Максимальна дальність	Обмежуючі фактори
NB-PLC	До 3 км	До 10 км (з повторювачами)	Трансформатори, шуми
BB-PLC	200-300 м	До 500 м	Затухання сигналу, шуми
Wi-Fi	30-50 м (всередині)	До 100 м (відкритий простір)	Стіни, перешкоди, завади
Ethernet	До 100 м	До 100 км (з оптикою)	Довжина кабелю
5G	100 м-10 км (залежить від частотного діапазону)	До 300 км (низькі частоти), до 300 м для mmWave	Перешкоди, частота, щільність базових станцій

Дальність передачі є однією з ключових переваг вузькосмугового PLC, особливо в контексті комунальних сервісів та Smart Grid. NB-PLC здатний забезпечити зв'язок на відстанях до кількох кілометрів, що робить його ідеальним для систем обліку в міських та приміських районах. Широкопasmовий PLC має меншу дальність, але все одно перевершує типовий Wi-Fi у складних умовах, таких як багатоповерхові будівлі з залізобетонними конструкціями.

Варто зазначити, що наявність трансформаторів у електромережі створює природні бар'єри для PLC сигналів, що може вимагати встановлення додаткових пристроїв сполучення або повторювачів для подолання цих перешкод. Це робить розгортання масштабних PLC мереж більш складним порівняно з бездротовими альтернативами, такими як 5G, які пропонують значно кращу масштабованість за рахунок оптимального розміщення базових станцій [1, 18, 26].

Таблиця 1.4 - Затримка та надійність технологій передачі даних

Технологія	Типова затримка	Стабільність з'єднання	Чутливість до завад
NB-PLC	100-500 мс	Висока	Середня до високої
BB-PLC	5-20 мс	Середня до високої	Висока
Wi-Fi	2-10 мс	Середня	Висока
Ethernet	< 1 мс	Дуже висока	Низька
5G	1-10 мс	Середня до високої	Середня

За параметрами затримок Ethernet залишається неперевершеним для критично важливих додатків, що вимагають мінімальних затримок. BB-PLC демонструє прийнятну затримку для більшості мультимедійних застосувань, включаючи потокове відео та онлайн-ігри з невисокими вимогами. Проте нестабільність електричної мережі та наявність імпульсних завад можуть призводити до тимчасових піків затримки, що обмежує використання PLC у додатках з критичними вимогами до часу відгуку.

Вузькосмуговий PLC характеризується відносно високою затримкою, що є прийнятним для систем збору даних та керування, де затримки в сотні мілісекунд не є критичними. NB-PLC демонструє високу надійність передачі даних у складних електромагнітних умовах завдяки використанню методів модуляції та корекції помилок [1].

Таблиця 1.5 - Інфраструктурні вимоги та вартість розгортання технологій передачі даних

Технологія	Необхідна інфраструктура	Початкові витрати	Експлуатаційні витрати	Масштабованість
PLC	Існуюча електромережа	Низькі до середніх	Низькі	Середня
Wi-Fi	Точки доступу, живлення	Низькі до середніх	Низькі	Середня
Ethernet	Спеціалізована кабельна система	Високі	Низькі	Обмежена
5G	Базові станції, спектр частот	Дуже високі	Середні до високих	Висока

Одна з найбільших переваг PLC технологій полягає у використанні існуючої інфраструктури електромереж, що значно знижує капітальні витрати на розгортання мережі. Вартість розгортання PLC рішень для автоматизованого збору даних з лічильників може бути на 30-50% нижчою порівняно з бездротовими альтернативами в густонаселених районах. Ця економічна ефективність робить PLC привабливим вибором для комунальних служб та операторів Smart Grid, особливо в районах з розвиненою електричною інфраструктурою.

Однак масштабованість PLC мереж може бути обмеженою через залежність від топології електромережі та необхідність встановлення повторювачів для подолання фізичних обмежень. На противагу цьому, технології 5G пропонують вищу гнучкість при розгортанні та масштабуванні, хоча і з суттєво вищими початковими інвестиціями у інфраструктуру базових станцій та ліцензування частотного спектру.

Таблиця 1.6 - Енергоефективність технологій передачі даних.

Технологія	Споживання енергії	Енергоефективні режими	Екологічний вплив
NB-PLC	Низьке	Так	Мінімальний
BB-PLC	Низьке до середнього	Так	Низький
Wi-Fi	Середнє	Так	Низький
Ethernet	Середнє	Так (Energy Efficient Ethernet)	Низький
5G	Високе (базові станції)	Так	Середній

За параметрами енергоефективності вузькосмуговий PLC демонструє найкращі показники серед порівнюваних технологій, особливо в системах, що вимагають автономної роботи. За дослідженнями тесту споживання NB-PLC модемів можемо побачити, що у активному режимі можуть споживати менше 100 мВт (0.8 Вт) та у статичному (режим очікування) – 0.25 Вт, що робить їх ідеальними для батарейних пристроїв у сенсорних мережах та Інтернеті речей [39].

Широкосмуговий PLC споживає більше енергії, але все одно залишається досить економічним, особливо в порівнянні з точками доступу Wi-Fi та мережевим обладнанням Ethernet. Технологія 5G, хоча і пропонує прогресивні механізми енергозбереження для кінцевих пристроїв, вимагає значних енергетичних витрат на рівні інфраструктури базових станцій, що збільшує загальний екологічний слід.

Таблиця 1.7 - Захист та безпека технологій передачі даних.

Технологія	Захист від перехоплення	Вразливість до атак	Стандарти шифрування
PLC	Середній	Середня	AES-128/256, RSA
Wi-Fi	Середній до високого	Середня	WPA2, WPA3
Ethernet	Високий	Низька	802.1X, MACsec
5G	Високий	Низька до середньої	Багаторівнева архітектура

Аспекти безпеки є критично важливими для будь-якої комунікаційної технології, і PLC не є винятком. Сигнали PLC можуть поширюватися за межі контрольованої території через електричну мережу, що створює потенційні ризики несанкціонованого доступу. Сучасні стандарти BB-PLC, такі як HomePlug AV2, G3-PLC та G.hn, включають надійні механізми шифрування на основі AES-128 та інші засоби захисту, але залишаються більш вразливими порівняно з фізично ізольованими мережами Ethernet [1].

У критичних інфраструктурних застосуваннях, таких як Smart Grid, захист PLC мереж вимагає додаткових заходів безпеки, включаючи сегментацію мережі, багатофакторну автентифікацію та постійний моніторинг аномалій. Комбінація фізичних та програмних засобів захисту може забезпечити прийнятний рівень безпеки для більшості промислових та комунальних застосувань PLC.

1.5 Висновки до 1 розділу

Перший розділ дипломної роботи присвячено аналізу особливостей PLC-технологій, їх історії, принципів роботи, класифікації та порівнянню з іншими сучасними технологіями передачі даних. Основні висновки можна сформулювати так:

PLC-технології пройшли довгий шлях від перших експериментів у XIX столітті до сучасних стандартів, таких як G.hn, PRIME та IEEE 1901. Цей розвиток був зумовлений потребою у ефективному використанні існуючої електромережі для передачі даних.

PLC базується на накладанні високочастотного сигналу на змінний струм, використовуючи методи модуляції (FSK, PSK, OFDM тощо) для подолання шумів та завад. Ключову роль у цьому відіграють технології фільтрації, корекції помилок та адаптивні протоколи доступу до середовища.

PLC поділяється на вузькосмугові (NB-PLC) та широкосмугові (BB-PLC) технології, кожна з яких має свої сфери застосування. NB-PLC ефективний для систем автоматизації, тоді як BB-PLC підходить для високошвидкісного доступу до Інтернету та мультимедійних застосувань.

PLC має значні переваги у використанні існуючої інфраструктури, енергоефективності та дальності передачі, але поступається іншим технологіям (Wi-Fi, Ethernet, 5G) у швидкості, затримки та масштабованості.

PLC залишається перспективною технологією, особливо для Smart Grid, Інтернету речей та побутових застосувань. Подальший розвиток може бути пов'язаний із вдосконаленням стандартів, інтеграцією з іншими технологіями та застосуванням штучного інтелекту для оптимізації роботи.

Таким чином, PLC-технології є важливим інструментом у сучасних телекомунікаційних системах, пропонуючи унікальні рішення для передачі даних через електромережі. Їх використання виправдане в умовах, де важливі економічна доцільність, простота інтеграції та стабільність зв'язку.

2 ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА СТАНДАРТИЗАЦІЯ PLC

2.1 Фізичні та мережеві особливості PLC

Технологія Power Line Communication (PLC) використовує існуючу електромережу як середовище передачі даних, демонструючи унікальні фізичні та мережеві характеристики. На фізичному рівні PLC працює у двох основних діапазонах: вузькосмуговому (3-500 кГц) для систем автоматизації та широкосмуговому (1.8-500 МГц) для високошвидкісного зв'язку. Передача даних відбувається шляхом модуляції сигналу, який накладається на змінний струм частотою 50 або 60 Гц. Ключовою особливістю є застосування OFDM-модуляції з адаптивним розподілом 128-2048 піднесучих, що дозволяє ефективно подолати багатопроменевого поширення та частотно-селективні завмирання.

Фізично електромережа є високошумним середовищем для передачі даних, тому для досягнення оптимального співвідношення сигнал/шум (SNR) необхідно мінімізувати втрати в сполучних пристроях шляхом точного узгодження імпедансів: порт лінії живлення повинен відповідати імпедансу електромережі, а порти ін'єкції - характеристикам підключеного кабелю та модему, для чого часто використовують стандартні коаксіальні кабелі 50Ω або 75Ω. Хоча для передачі критично важливі низькі втрати, для прийому вони менш суттєві, оскільки антропогенні перешкоди зазвичай значно перевищують тепловий шум, що дозволяє зберігати стабільне SNR навіть при помірних втратах. Оскільки кожен сполучник використовується як для передачі, так і для прийому, необхідно знаходити оптимальний баланс між вартістю компонентів та їх ефективністю, що є ключовим аспектом при проектуванні PLC-систем.

Іншою важливою особливістю каналу лінії електропередач є його змінна поведінка в часі. По-перше, передавальна функція каналу різко змінюється при зміні топології мережі - підключенні чи відключенні пристроїв, або при вмиканні/вимиканні електроприладів. По-друге, навіть за незмінної

конфігурації мережі спостерігаються постійні флуктуації параметрів каналу. Це пов'язано з тим, що високочастотні характеристики електрообладнання залежать від миттєвих значень напруги мережі, що викликає періодичні зміни імпедансів навантаження. Крім того, шуми, що генеруються підключеними приладами, також змінюються в залежності від миттєвої амплітуди напруги. Для компенсації цих ефектів використовуються адаптивні протоколи маршрутизації (наприклад, AODV для NB-PLC), механізми QoS для пріоритезації трафіку Smart Grid та алгоритми динамічного розподілу ресурсів.

Мережевою особливістю є те, що PLC системи реалізують як точка-точка, так і точка-багато (point-to-multipoint) комунікацію. У вузькосмугових PLC застосовується деревоподібна або меш-топологія, у широкосмугових — частіше зіркоподібна. Передача даних може бути організована за допомогою протоколів MAC-рівня (наприклад, CSMA/CA, TDMA), а також може включати функції повторювачів або маршрутизаторів для покращення покриття.

Стандартизація PLC-технологій (IEEE 1901.2, ITU-T G.9903) враховує ці особливості, визначаючи вимоги до фізичного та MAC-рівнів. Сучасні PLC-системи досягають пропускної здатності до 1 Гбіт/с у ідеальних умовах, проте реальна продуктивність сильно залежить від стану електромережі. Перспективними напрямками розвитку є впровадження MIMO-технологій, машинного навчання для прогнозування стану каналу та інтеграція з 5G-мережами, що дозволить подолати існуючі обмеження [1].

2.2 Основні міжнародні стандарти

2.2.1 HomePlug (AV, AV2, Green PHY)

HomePlug – це галузевий стандартний метод передачі даних через лінії електропередач під назвою HomePlug, кожна з яких має унікальні можливості та сумісність з іншими специфікаціями HomePlug. Він може передавати аудіо, відео, сигнали керування тощо. Давайте розглянемо 3 із них:

HomePlug AV. Основи технології та ключові характеристики.

HomePlug AV (HRAV) є стандартом для передачі даних через електромережі, розробленим альянсом HomePlug Powerline Alliance. Він використовує технологію OFDM (ортогональне частотне мультиплексування) у діапазоні частот 2–28 МГц, забезпечуючи фізичну швидкість передачі до 200 Мбіт/с та ефективну швидкість до 150 Мбіт/с. Ключовою особливістю є адаптивна модуляція (від BPSK до 1024 QAM) для кожного підканалу, що забезпечує стабільний зв'язок у шумних умовах. Для захисту даних використовується 128-бітне AES-шифрування з динамічною зміною ключів, що підвищує безпеку мережі.

Мережева архітектура та протоколи передачі

На MAC-рівні HomePlug AV поєднує два методи доступу: TDMA для потоків із гарантованою якістю обслуговування (QoS) та CSMA/CA для звичайного трафіку. Центральний координатор (CCo) керує розподілом часу між цими методами, забезпечуючи ефективне використання ресурсів. Синхронізація з циклом лінії змінного струму покращує адаптацію до шумів. Протокол також підтримує функції проксі-координатора (PCO) для роботи з прихованими вузлами та механізми енергозбереження.

Сфери застосування та сумісність

HomePlug AV ідеально підходить для домашніх мереж, де потрібна передача HD-відео, аудіо та даних через існуючу електропроводку. Він забезпечує зворотну сумісність із HomePlug 1.0 та підтримує режими співіснування з іншими технологіями, такими як BPL. Незважаючи на появу новіших стандартів, HomePlug AV залишається надійним рішенням завдяки своїй гнучкості, високій якості обслуговування та можливості роботи в складних умовах [40].

HomePlug AV2. Інноваційний стандарт для високошвидкісних PLC-мереж.

HomePlug AV2 є революційним розвитком технології Powerline Communications, що забезпечує до 1.5 Гбіт/с пропускну здатність через звичайну електропроводку. Ключовою перевагою стандарту є суттєве розширення робочого частотного діапазону до 1.8-86.13 МГц, що дозволяє значно збільшити швидкість передачі даних. Незважаючи на обмеження потужності вище 30 МГц (-25...-30 дБм/Гц), ця інновація забезпечує стабільну роботу на більшості каналів. Важливим технічним рішенням є Power Back-Off - механізм динамічного регулювання потужності передачі, який оптимізує роботу високочастотних діапазонів і покращує загальну якість зв'язку.

Технологічні прориви на фізичному рівні

Стандарт впроваджує кілька революційних технологій, що кардинально підвищують продуктивність. MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) з підтримкою роботи з двома парами проводів (лінія-нейтраль і лінія-земля) значно покращує стабільність з'єднання. Effective Notching замість жорстких вимог до глибини виїмок пропонує гнучкі рішення на основі фільтрів FIR/PIR, що збільшує кількість доступних піднесучих. Короткий роздільник (Short Delimiter) скорочує накладні витрати на 50% (з 110.5 мкс до 55.5 мкс), а

відкладене підтвердження (Delayed Acknowledgement) оптимізує TCP-ефективність, наближаючи її до показників UDP.

Оптимізація мережевої продуктивності

На MAC-рівні HomePlug AV2 пропонує інноваційні рішення для підвищення ефективності. Негайне повторення (Immediate Repeating) дозволяє ретрансляцію трафіку через проміжні вузли без збереження даних, що знижує затримки на 30-40%. Польові випробування демонструють вражаючі результати: система забезпечує стабільну пропускну здатність 90 Мбіт/с (3 потоки по 30 Мбіт/с) для 99% тестових мереж. Особливу увагу приділено енергоефективності - реалізовано гнучкі режими енергозбереження з адаптивним налаштуванням періодів активності, що критично для сучасних IoT-рішень та систем Smart Grid.

Інтеграційні переваги та сфери застосування

HomePlug AV2 повністю зворотносумісний з попередніми стандартами (HomePlug AV та Green PHY), що спрощує модернізацію існуючих мереж. Його інтеграція з IEEE 1901 та IEEE 1905.1 забезпечує безпроблемну взаємодію з Wi-Fi, Ethernet та іншими мережевими технологіями. Стандарт ідеально підходить для реалізації складних мультимедійних рішень (4K/3D-відео, IPTV, онлайн-ігри), систем домашньої автоматизації та інфраструктурних проєктів Smart City. Комбінація високої продуктивності, низьких затримок та енергоефективності робить HomePlug AV2 одним з найперспективніших рішень для сучасних мережевих інфраструктур [1, 41].

HomePlug Green PHY. Основні характеристики.

HomePlug Green PHY (GP) — це стандарт для побудови енергоефективних мереж Smart Grid через існуючу електропроводку. Він базується на технології HomePlug AV, але оптимізований для низького енергоспоживання та вартості. GP використовує частотний діапазон 2–30 МГц

та модуляцію OFDM, обмежуючись QPSK для спрощення архітектури. Пікова швидкість передачі становить 10 Мбіт/с, що достатньо для потреб Smart Grid, таких як керування енергоспоживанням або зарядка електромобілів.

Архітектура та енергоефективність

HomePlug GP спрощує MAC-рівень, відмовляючись від адаптивного завантаження бітів і тональних карт, що зменшує складність і енерговитрати. Він підтримує режими ROBO (Robust OFDM) для надійного зв'язку в умовах шуму. Спеціальний алгоритм контролю пропускнуої здатності (DBC) гарантує, що пристрої GP не заважають роботі HomePlug AV. Також реалізовано режим енергозбереження, який зменшує споживання енергії до 97% за рахунок циклів активності та сну.

Сфери застосування та сумісність

HomePlug GP ідеально підходить для Smart Grid, включаючи управління електромережами, інтеграцію відновлюваних джерел енергії та зарядку електромобілів (PEV). Він повністю сумісний з HomePlug AV та стандартом IEEE P1901, що забезпечує взаємодію з мільйонами існуючих пристроїв. GP також інтегрований із профілем Smart Energy для сумісності з бездротовими технологіями, такими як ZigBee, що робить його ключовим рішенням для майбутніх «зелених» мереж [42].

2.2.2 IEEE 1901

Архітектура та основні компоненти

Протокол IEEE 1901 був розроблений робочою групою IEEE P1901 у 2005 році з метою стандартизації високошвидкісного зв'язку по лініях електропередач (PLC) зі швидкістю понад > 100 Мбіт/с у смузі частот до 100 МГц. Він включає дві технології фізичного рівня (PHY): FFT-OFDM (на основі швидкого перетворення Фур'є) та Wavelet-OFDM (на основі вейвлет-

перетворення), які забезпечують зворотну сумісність із комерційними продуктами HomePlug AV та HD-PLC відповідно. Стандарт також визначає спільний рівень контролю доступу до середовища (MAC), який керує взаємодією між різними РНУ через спеціальний протокол конвергенції фізичного рівня (PLCP). Ця модульна архітектура дозволяє адаптуватися до різних умов роботи в електромережах.

Доступ до середовища та QoS

IEEE 1901 використовує гібридний механізм доступу до середовища, що поєднує TDMA (доступ з часовим поділом) для гарантованого QoS та CSMA/CA (множинний доступ з виявленням носія та уникненням колізій) для трафіку з найкращими зусиллями. MAC-рівень організований у циклічні періоди, які включають періоди без конкуренції (CFP) для критичного трафіку та конкурентні періоди (CP) для звичайних даних. Центральний координатор (CCo) керує розподілом ресурсів, резервує часові слоти для потоків із низькою затримкою (наприклад, аудіо/відео) та забезпечує пріоритетний доступ на основі восьми категорій трафіку (UP). Додатково реалізовано функції фрагментації кадрів, групового підтвердження (Group ACK) та адаптивного планування для ефективного використання пропускної здатності.

Безпека та співіснування

Стандарт IEEE 1901 реалізує розширені механізми безпеки, включаючи автентифікацію на основі IEEE 802.1X та шифрування даних за допомогою алгоритму AES-128 у режимі CCMP (Counter Mode with CBC-MAC Protocol). Для забезпечення співіснування різних технологій PLC введено обов'язковий протокол міжсистемної взаємодії (ISP), який дозволяє IEEE 1901 сумісно працювати як з власними різнорідними РНУ, так і з пристроями ITU-T G.hn. Цей протокол, також стандартизований ITU-T як G.9972, використовує методи частотного (FDM) та часового поділу (TDM) для справедливого розподілу

ресурсів між несумісними технологіями, запобігаючи деградації продуктивності через взаємні перешкоди.

Застосування та перспективи

IEEE 1901 призначений для широкого спектра застосувань, включаючи домашні мережі, Smart Grid, широкосмуговий доступ "останньої милі" та промислові системи автоматизації. Він ефективно підтримує програми з високими вимогами до якості обслуговування, такі як IPTV, VoIP та потокове передавання високої чіткості. Незважаючи на політичні причини включення двох РНУ (що ускладнює реалізацію), стандарт забезпечує стабільну роботу через єдиний MAC та ISP. Це створює основу для майбутнього розвитку подвійних режимів роботи, які можуть повністю вирішити проблеми несумісності між різними поколіннями PLC-технологій. Перспективи розвитку включають інтеграцію з мережами 5G та інтернетом речей (IoT) для створення універсальних інфраструктурних рішень [1, 43].

2.2.3 G.hn (ITU-T G.996x)

ITU-T G.9960. Архітектура та фізичний рівень

ITU-T G.9960 є основним стандартом у сімействі G.hn, розробленим для уніфікованого високошвидкісного зв'язку (до 2 Гбіт/с) через різні типи домашніх провідок: лінії електропередач, телефонні лінії, коаксіальні кабелі та кабелі Cat 5. Він використовує модульовану OFDM-технологію з програмованими параметрами (кількість піднесучих, інтервали між ними, частота), що адаптуються до характеристик кожного типу середовища. Для забезпечення надійності передачі застосовується потужний код корекції помилок QC-LDPC (Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check) з п'ятьма рівнями кодування (від 1/2 до 20/21), що дозволяє ефективно працювати в умовах високого рівня шумів.

Організація мережі та управління доменами

Мережа G.9960 організована у *домени* — групи пристроїв, які можуть безпосередньо взаємодіяти або створювати перешкоди один одному. Кожен домен керується *Domain Master (DM)*, який відповідає за адміністрування, резервування ресурсів та синхронізацію MAC-циклів. Для покращення покриття використовуються ретранслятори та *DM-проксі*, що забезпечують зв'язок із прихованими вузлами. Мережі можуть включати кілька доменів (наприклад, окремо для PLC, коаксіальних ліній), які зв'язуються через *міждоменні мости*. Для координації роботи кількох доменів призначений *Global Master (GM)*, який оптимізує параметри передачі (потужність, частотні плани) для мінімізації взаємних перешкод.

Механізми співіснування та безпека

G.9960 підтримує кілька механізмів співіснування з іншими мережами, включаючи *Inter-System Protocol (ISP)* для взаємодії з IEEE 1901, частотну агільність (перехід на інший канал при виявленні перешкод) та обмеження спектральної щільності потужності (PSD). Безпека реалізована через автентифікацію на основі алгоритму Діффі-Хеллмана та шифрування AES-128 у режимі CCM, а також *попарні ключі* для захисту від внутрішніх атак. Це забезпечує рівень захисту, порівнянний із IEEE 802.11n.

ITU-T G.9961. Канальний рівень та методи доступу

G.9961 визначає канальний рівень (MAC) G.hn, який базується на синхронізованих *MAC-циклах*, що можуть бути прив'язані до частоти мережі електропостачання для подолання циклічних перешкод. Доступ до середовища організований через *TXOP (Transmission Opportunities)* — часові інтервали, що призначаються DM для конкретних вузлів. Виділяють три типи TXOP:

- *CFTXOP* (бесконфліктний TDMA) — для трафіку з гарантованим QoS (наприклад, відео);

- *STXOP* (керований CSMA/CA) — для сервісів із гнучкою пропускнуою здатністю (VoIP, ігри);
- *CBTXOP* (конкурентний доступ) — для трафіку з пріоритезацією.

Віртуальний Carrier Sensing та QoS

Для запобігання колізіям у режимі *CBTXOP* використовується *пріоритетна сигналізація (PRS)*: вузли з найвищим пріоритетом отримують право передачі, інші відкладають свої спроби. Додатково реалізовані механізми *RTS/CTS* (аналогічно IEEE 802.11) для роботи з прихованими вузлами. Кожен кадр містить інформацію про свою тривалість, що дозволяє вузлам уникати непотрібного очікування. Підтримка QoS забезпечується через динамічне планування *TXOP* на основі запитів від вузлів та аналізу стану мережі.

Ретрансляція та MIMO (G.9963)

G.9961 дозволяє використання *ретрансляторів* для розширення покриття, особливо в умовах сильної атенюації сигналу. Рекомендація G.9963 розширює можливості G.hn, додаючи підтримку *MIMO (Multiple Input Multiple Output)* для передачі через три провідники лінії електропередач (фаза, нейтраль, земля). Це підвищує пропускну здатність і стабільність зв'язку, що критично для сучасних мультимедійних застосувань. MIMO-режим особливо ефективний у середовищах з багатопроменевим поширенням сигналу, характерним для електромереж [1, 43].

2.2.4 PRIME та G3-PLC

PRIME

PRIME (Powerline Intelligent Metering Evolution) — це вузькосмуговий протокол передачі даних через лінії електропередачі (PLC), розроблений PRIME Alliance та стандартизований ITU-T як G.9904. Він призначений для

автоматичного зчитування показників лічильників (AMR) та інших завдань smart grid. Основна перевага PRIME полягає у використанні існуючої електромережі, що дозволяє уникнути додаткового прокладання кабелів. Протокол підтримує роботу в діапазоні частот CENELEC-A (3–95 кГц) та розширеному діапазоні до 500 кГц (для версії 1.4), забезпечуючи швидкість передачі від 5,4 Кбіт/с до 1028,8 Кбіт/с залежно від конфігурації каналів та модуляції.

Фізичний рівень (PHY)

На фізичному рівні PRIME використовує модуляцію OFDM з 96 піднесучими для даних та однією пілотною піднесучою. Інтервал між піднесучими становить 488,28125 Гц, а тривалість символу OFDM — 2,24 мс (з циклічним префіксом 0,192 мс). У версії 1.4 впроваджено два типи кадрів: Type A (для зворотної сумісності з PRIME v1.3.6) та Type B (з підвищеною надійністю). Type B включає довшу преамбулу (8,192 мс), повторюване кодування символів і розширений CRC (12 біт), що зменшує ймовірність помилок у 16 разів. Для покращення стійкості до шумів використовуються надійні режими модуляції (Robust DBPSK/DQPSK), які забезпечують вигреш до 14,5 дБ у порівнянні з попередніми версіями.

Рівень MAC

На рівні MAC PRIME використовує комбінацію методів доступу до каналу: CSMA/CA для періодів спільного доступу (SCP) та TDM для періодів без конфліктів (CFP). Кадр MAC має гнучку структуру з можливістю зміни довжини (276, 552, 828 або 1104 символів). Для підтримки динамічної адаптації до умов каналу введено механізм керування надійністю (RM), який вибирає схему модуляції на основі інформації про якість зв'язку. Також оптимізовано процедуру ALIVE для зменшення накладних витрат і підвищення стабільності мережі.

Зворотна сумісність

PRIME v1.4 забезпечує повну зворотну сумісність з v1.3.6 завдяки механізму ВС-кадрів (Backward Compatible Frames). Ці кадри містять префікс у форматі v1.3.6, який інкапсулює кадр Type B, що дозволяє пристроям старої версії ігнорувати нові формати. Для змішаних мереж визначено режим сумісності, де базовий вузол керує використанням надійних режимів, забезпечуючи плавний перехід.

Безпека та масштабованість

Протокол підтримує шифрування AES-128 для конфіденційності та автентифікації. Мережа PRIME будується як дерево з базовим вузлом у корені та сервісними вузлами (терміналами або комутаторами). Комутатори динамічно змінюють свою роль для розширення покриття, а базовий вузол керує ресурсами, реєстрацією пристроїв і розподілом пропускної здатності. Максимальна кількість вузлів у мережі обмежується часом життя ALIVE-пакетів, які в v1.4 збільшені для підтримки більшої кількості пристроїв.

Застосування та перспективи

PRIME широко використовується в Європі (Іспанія, Португалія, Польща) для smart metering. Версія 1.4 розширює сферу застосування за рахунок підтримки глобальних частотних діапазонів (FCC/ARIB) та нових режимів передачі, що робить її придатною для автомобільного зв'язку та інших галузей. Завдяки відкритості стандарту та підтримці великої кількості постачальників PRIME залишається конкурентоспроможним рішенням для майбутніх розгортань smart grid [1, 44, 45]

G3-PLC

G3-PLC є низькорівневим протоколом, розробленим для розумних мереж електропостачання, який підтримується розподільчими компаніями та виробниками. Він стандартизований ІТУ як рекомендація G.9903 (ITU-T

G.9903) і використовується як основа для інших стандартів, таких як ITU-T G.9902 (G.hnem) та IEEE 1901.2. Протокол призначений для забезпечення зв'язку через лінії електропередач (PLC) у низьковольтних та середньовольтних мережах, що робить його ідеальним для застосувань у системах інтелектуального обліку (AMI), домашніх мережах (HAN) та інших сценаріях Smart Grid.

Фізичний рівень (PHY)

На фізичному рівні G3-PLC використовує OFDM (ортогональне частотне мультиплексування) для ефективного використання обмеженої смуги пропускання. Протокол підтримує роботу в діапазонах CENELEC A (35.938–90.625 кГц), FCC-1 (154.6875–487.5 кГц), FCC-1a (154.687–262.5 кГц), FCC-1b (304.687–487.5 кГц) та ARIB (154.7–403.1 кГц). Для боротьби з шумами та перешкодами застосовуються схеми корекції помилок: код Ріда-Соломона (RS), згорткове кодування та двовимірне інтерліювання. Також доступні різні режими роботи, такі як Normal, Robust та Super-ROBO, які забезпечують різні рівні захисту від помилок.

MAC-рівень та маршрутизація

На MAC-рівні G3-PLC використовує механізм CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) для доступу до каналу, що дозволяє уникнути колізій у мережі. Для маршрутизації застосовується протокол LOADng (Lightweight On-demand Ad hoc Distance-vector Routing Protocol — Next Generation), який підтримує mesh-топологію та забезпечує надійність у мережах з петлями. Кожен вузол зберігає таблицю сусідів і таблицю маршрутів, що дозволяє адаптуватися до змін у топології мережі.

Адаптаційний рівень та безпека

G3-PLC використовує адаптаційний рівень 6LoWPAN для передачі IPv6-пакетів через PLC-мережу, що забезпечує сумісність з інтернет-протоколами.

Безпека реалізована за допомогою AES-128 шифрування у режимі CCM* (Counter with CBC-MAC), який забезпечує конфіденційність, цілісність та автентифікацію даних. Ключі розподіляються через координатор мережі, що дозволяє контролювати доступ до мережі.

Продуктивність та оптимізація

Максимальна швидкість передачі даних у G3-PLC може досягати 300 кбіт/с залежно від використовуваної модуляції (DBPSK, DQPSK, D8PSK або 16-QAM) та частотного діапазону. Для підвищення надійності протокол підтримує адаптивне відображення тонів (tone mapping), яке дозволяє вимикати субносії з низьким SNR. Також G3-PLC включає механізми співіснування з іншими PLC-мережами, такі як частотне розділення, вирізання субносіїв (notching) та використання преамбул для синхронізації.

Застосування та перспективи

G3-PLC активно використовується у великомасштабних проектах, таких як французька програма Linky, де розгорнуто понад 30 мільйонів інтелектуальних лічильників. Протокол також застосовується в системах вуличного освітлення, залізничній автоматизації та інших сценаріях IoT. З розвитком 5G та інших телекомунікаційних технологій G3-PLC залишається актуальним як доповнення до бездротових рішень, забезпечуючи стабільність та енергоефективність у Smart Grid [1, 46].

Таблиця 2.1 - Порівняльна характеристика основних міжнародних стандартів

Порівняльна характеристика							
Характеристика	HomePlug AV	HomePlug AV2	HomePlug Green PHY	IEEE 1901	G.hn (ITU-T G.996x)	PRIME	G3-PLC
Рік розробки	~2005	~2012	~2010	~2010	2009–2010	~2012	~2009
Частотний діапазон	2–28 МГц	1.8–86 МГц	2–30 МГц	До 100 МГц	До 100 МГц	42–89 кГц	35–91 кГц (середнє)
Макс. швидкість	до 200 Мбіт/с	до 1.5 Гбіт/с	до 10 Мбіт/с	до 500 Мбіт/с+	до 2 Гбіт/с	до 128 кбіт/с	до 300 кбіт/с
Модуляція	OFDM (BPSK–1024QAM)	OFDM, MIMO	OFDM (QPSK)	FFT-OFDM, Wavelet-OFDM	OFDM	OFDM (DBPSK, DQPSK)	OFDM
MAC-рівень	TDMA + CSMA/CA	TDMA + CSMA/CA	Спрощений, ROBO	TDMA + CSMA/CA	TDMA, CSMA	TDMA	CSMA, адаптивний
QoS	Так	Покращений	Мінімальний	Так	Так	Обмежено	Так
Енергоефективність	Середня	Висока	Дуже висока	Середня	Залежить від реалізації	Висока	Висока
Зворотна сумісність	з HomePlug 1.0	з HomePlug AV/GP	з HomePlug AV	з HomePlug/H-D-PLC	Немає (окрема екосистема)	Обмежено	Обмежено
Основне призначення	Домашні мережі	Домашні мережі, мультимедіа, Smart Grid	Smart Grid, енергооблік	Загальні широкосмугові PLC	Універсальна проводова мережа	Smart Metering	Smart Grid, IoT

2.3 Проблеми та обмеження PLC (завади, затування сигналу, безпека)

2.3.1 Завади та затування сигналу в PLC-мережах

Технологія Power Line Communication (PLC), що використовує електромережі для передачі даних, стикається зі значними проблемами через притаманні характеристикам електропроводки. Електромережі, призначені для передачі електроенергії, а не високочастотних сигналів, створюють несприятливе середовище для надійного зв'язку. На якість сигналу в PLC-мережах впливають різноманітні фактори, включаючи структуру електромережі, динамічні зміни навантаження та зовнішні електромагнітні впливи, що призводять до виникнення "електромагнітного сміття".

Основними джерелами завад є імпульсні перешкоди від комутації приладів, широкопasmовий шум від електронних пристроїв, вузькосmгові радіоперешкоди та затування сигналу на відстані. Ці фактори призводять до зниження швидкості передачі даних, збільшення кількості помилок та зниження стабільності з'єднання. Для пом'якшення їх впливу застосовуються різні методи, зокрема адаптивні методи модуляції, корекція помилок, фільтрація шуму та оптимізація топології мережі, що дозволяє частково компенсувати негативний вплив завад та підвищити надійність зв'язку.

Основні джерела завад можна поділити на дві категорії:

1) Імпульсні завади: Виникають через комутаційні процеси в електроприладах, таких як двигуни, зварювальне обладнання, НВЧ-пристрої та інші пристрої з імпульсними навантаженнями. Наприклад, імпульсні завади можуть досягати амплітуди в сотні мілівольт і тривалості в мікросекунди, особливо під час роботи двигунів або гальмування. Також іскри від свічок запалювання в автомобілях генерують періодичні імпульси, частота яких залежить від обертів двигуна [1, 49]

2) Вузькосmгові завади: Викликані радіосистемами, такими як АМ/ФМ-радіо, які проникають у електромережу через електромагнітне

випромінювання. Ці завади мають вузький спектр і можуть сильно впливати на певні частоти, використовувані PLC-системами [48].

Затухання сигналу в PLC-мережах є серйозною проблемою, особливо в низьковольтних мережах (LV). Воно залежить від таких факторів:

1) Імпеданс мережі: Низький імпеданс електромережі призводить до високого затухання сигналу. Імпеданс також змінюється в залежності від навантаження, що робить затухання часово-залежним.

2) Частота сигналу: Затухання зростає зі збільшенням частоти. Наприклад, для частот вище 100 кГц затухання може збільшуватися на 0.25 дБ/кГц.

3) Відстань: У ідеальних умовах затухання лінійно залежить від відстані, але на практиці наявність навантажень між передавачем і приймачем може призводити до значного збільшення затухання (до 100 дБ/км).

4) Фази мережі: Затухання між двома точками на одній фазі зазвичай менше, ніж між точками на різних фазах [50].

Методи боротьби з завадами та затуханням

Для забезпечення надійної передачі даних у PLC-мережах використовуються такі методи:

1) Придушення завад на приймачі: Для боротьби з вузькосмуговими завадами використовуються багатонасінні системи (наприклад, OFDM), які ігнорують сильно заваджені частоти. Втрачені дані відновлюються за допомогою кодів корекції помилок [49].

2) Ретрансляція даних: Для компенсації імпульсних завад застосовуються повторні передачі пакетів даних, що особливо важливо для критичних до часу додатків [1].

3) Оптимізація імпедансу: Використання відповідних фільтрів і узгодження імпедансу між передавачем, мережею та приймачем допомагає зменшити затухання.

4) Використання надійних кодів: Застосування кодів з корекцією помилок, таких як LDPC або коди з повторенням, підвищує стійкість системи до завад [49].

2.3.2 Безпека в PLC-мережах

Однією з ключових проблем PLC-технологій є забезпечення безпеки передачі даних. Оскільки PLC використовує електричні мережі для передачі інформації, існує ризик прослуховування або перехоплення даних третіми особами. На відміну від традиційних дротових мереж, де фізичний доступ обмежений, електрична проводка є більш відкритою для потенційних атак. Це робить необхідним використання надійних механізмів шифрування та автентифікації для захисту конфіденційності та цілісності даних.

Криптографічні механізми

Для захисту даних у PLC-мережах використовуються сучасні криптографічні алгоритми, такі як AES (Advanced Encryption Standard) із 128-бітним ключем або 3DES (Triple Data Encryption Standard). Наприклад, у стандарті HomePlug AV для шифрування використовується NEK (Network Encryption Key), який забезпечує безпеку передачі даних. Крім того, технології, такі як UPA, використовують RADIUS для автентифікації пристроїв, що дозволяє контролювати доступ до мережі та запобігати несанкціонованому підключенню.

Вразливості та атаки

PLC-мережі піддаються різним типам атак, включаючи пасивні (наприклад, прослуховування) та активні (наприклад, спроби змінити або видалити дані). Особливу загрозу становить відмова в обслуговуванні (DoS), коли зловмисник намагається порушити роботу мережі. Відсутність фізичних

меж, як у бездротових мережах, робить PLC більш вразливим до таких атак, тому важливо використовувати багаторівневі системи захисту.

Автентифікація та контроль доступу

Для запобігання несанкціонованому доступу PLC-мережі використовують механізми автентифікації, такі як IEEE 802.1x із протоколами EAP (Extensible Authentication Protocol). Ці технології дозволяють ідентифікувати пристрої перед їх підключенням до мережі. Наприклад, у HomePlug AV використовується NMK (Network Membership Key), який забезпечує, що лише авторизовані пристрої можуть отримати доступ до мережі та отримати NEK для шифрування даних.

Використання IDS для захисту

Для підвищення безпеки PLC-мереж пропонується використовувати системи виявлення вторгнень (IDS). Ці системи дозволяють оперативно виявляти підозрілу активність і реагувати на потенційні загрози. Оскільки традиційні схеми безпеки не завжди можуть повністю усунути вразливості, IDS стають важливим доповненням до криптографічних методів [1, 26, 47].

2.4 Висновки до 2 розділу

У другому розділі було проведено комплексне дослідження технічних особливостей та стандартів PLC-технологій, які визначають можливості та обмеження їх використання в телекомунікаційних системах. У межах роботи було детально проаналізовано фізичний рівень передачі сигналу через електромережу, враховуючи характерні параметри каналу, такі як імпеданс, завадостійкість, багатопроменевість та нестабільність електричного середовища.

Особливу увагу приділено способам забезпечення надійної передачі даних у складному середовищі електромереж, зокрема розглянуто

застосування методів модуляції (OFDM, BPSK, QPSK тощо), технік доступу до середовища (CSMA/CA, TDMA) та алгоритмів корекції помилок (FEC, інтерлівінг). Проаналізовано вплив типів шумів на стабільність сигналу та ефективність різних підходів до боротьби з ними.

У межах підрозділу 2.2 здійснено огляд та порівняльний аналіз основних міжнародних стандартів PLC: HomePlug (AV, AV2, Green PHY), IEEE 1901, G.hn (G.996x), PRIME та G3-PLC. Для кожного з них було розглянуто архітектуру, частотний діапазон, швидкісні можливості, модуляцію, енергоспоживання, протоколи MAC-рівня та цільові сфери застосування.

Результатом аналізу стало створення узагальненої порівняльної таблиці, що дозволяє оцінити сильні та слабкі сторони кожного стандарту з позицій технічної ефективності, енергоефективності, сумісності та придатності до використання в певних умовах (домашні мережі, Smart Grid, промислові системи тощо).

Таким чином, у другому розділі дипломної роботи було систематизовано та проаналізовано ключові технічні характеристики PLC-технологій, що дозволяє зробити обґрунтовані висновки щодо вибору відповідного стандарту для конкретних задач у сфері електронних комунікацій та Інтернету речей.

3 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ PLC ТЕХНОЛОГІЙ

3.1 Застосування PLC у побуті та розумних системах (Smart Home, IoT)

3.1.1 Опис системи (Smart Home, IoT)

Передавання даних із використанням електропроводів (або зв'язком лініями електропередач, PLT або PLC) може використовуватися для доступу локальної мережі до зовнішніх або для домашньої мережі. Пропускна здатність описується як «широкосмугова». Це означає близько 10 Мбіт/с для домашньої мережі і від 1 до 10 Мбіт/с для доступу. Ці системи зв'язку можуть бути дуже корисними, але є потенційна проблема: передача даних за допомогою кабеля, який не призначений спеціально для передачі радіосигналів, означає, що існує ймовірність виникнення випромінювання, яке може спричинити перешкоди для радіосистем.

Взаємозв'язок сенсорних вузлів через Інтернет-технології призвів до виникнення IoT [51]. Завдяки технології IoT усіма речами та пристроями можна керувати дистанційно, наприклад кіберфізичні системи (CPS), які з'єднують фізичний та кіберсвіт за допомогою телекомунікацій.

Застосування IoT в системах домашньої автоматизації призвело до розвитку так званого сектору Smart Home [52]. У розумних будинках системи, керовані вручну, такі як опалення, охолодження, освітлення та інші прилади, можна контролювати та керувати дистанційно. Кіберфізична система, проводить вимірювання, що стосуються температури, вологості та споживання енергії, які можуть бути надані користувачеві, що не знаходиться безпосередньо в будинку, надаючи йому можливість ініціювати дії через мережу без особистого втручання.

Найпоширенішим прикладом домашнього керування є система опалення, вентиляції та кондиціонування повітря за допомогою смартфона, планшета або ПК. Температуру в будинку можна регулювати з віддаленого місця до оптимальної для мешканців.

Наведемо деякі основні функції розумного дому [66]:

1) Розумний дім може реалізовувати взаємодію між користувачем і підприємством, що займається електромережею, отримувати інформацію про споживання електроенергії та ціну на електроенергію, встановлювати план споживання електроенергії тощо, керувати науковим і раціональним використанням електроенергії та підтримувати свідомість родини щодо енергозбереження та захисту навколишнього середовища.

2) Розумний дім може підвищити комфорт, безпеку, зручність та інтерактивність дому.

3) Розумний дім може підтримувати дистанційну оплату.

4) Розумний дім може контролювати та взаємодіяти з домом через телефон, мобільний телефон і віддалену мережу, виявляти ненормальну та своєчасну обробку.

5) Розумний дім реалізує зчитування лічильників у режимі реального часу та службу безпеки лічильників води, лічильників електроенергії та газу, що забезпечує більш зручні умови для високоякісного обслуговування.

6) Підтримка бізнесу «потрійних мереж» та ідеального інтелектуальний сервіс

З початком зростання IoT багато компаній розробили датчики, виконавчі механізми та системи керування, сумісні з IoT [53]. Потреба в їх взаємозв'язку з датчиками, реалізованими іншими постачальниками, призвела до розробки та зростання багатьох стандартних комунікаційних технологій. BACnet, Duple, Ethernet і KNX [54, 55, 56] були першими, які були використані для автоматизації дому та створення так званого домену Smart Home. Пізніше були представлені нові технології, наприклад, Bluetooth [57], Wi-Fi [58]. Також використовуються такі технології, як LoRA, mioty, Sigfox, LTE (5G) і NB-IoT, але вони спрямовані на покриття більших відстаней. В останні роки великими компаніями, наприклад, Apple (HomeKit), Google (Alexa) і Samsung (SmartThings), було зроблено зусилля, щоб представити споживчі продукти, націлені на розумні будинки та об'єднавши їх з одним додатком, незалежно

від використовуваної технології зв'язку малого радіусу дії (BLE, Wi-Fi, ZigBee).

3.1.2 Технології на основі Інтернету речей для автоматизації

Технології домашньої автоматизації на основі IoT тепер доступні для кожного дому. Є ті, які можна застосувати за допомогою існуючої дротової інфраструктури (кабелі електропередач або Ethernet), підключивши датчики, контролери та інші пристрої, а інші використовують бездротові технології. Далі в цьому розділі буде описано найбільш широко використовувані технології даного типу представлені в трьох основних категоріях: дротові, бездротові та дворезимні.

Технології дротового зв'язку

Дротові технології є найдавнішими, оскільки перші впровадження розумного дому базувалися на існуючій домашній інфраструктурі (лінії електропередач). Вони забезпечують більш безпечний зв'язок з обмеженими перешкодами.

VACnet

Ця технологія добре відома і використовується в США. Це специфікація, заснована на трьох основних характеристиках. Вона може забезпечити підключення за допомогою різних технологій дротового зв'язку та є бездротовим за допомогою технології EnOcean [59].

Dupline

Dupline — це дротова технологія домашньої автоматизації, відома в основному в ЄС. Вона використовує лінії електропередач або виті пари для обміну інформацією. Максимальна кількість пристроїв, які можна підключити

до цієї системи, становить 128, тоді як її розмір пакету дуже малий (14 байт), досягаючи швидкості передачі даних до 9,6 Кбіт/с [59, 60].

Ethernet

Ethernet є однією з найвідоміших технологій, представлених Бобом Меткалфом і його командою. Ця технологія відома тим, що з'єднує мережеві пристрої, такі як комп'ютери та PLC, через порт RS586. Це запатентована технологія, стандартизована із зворотною сумісністю. Використовує виту пару або волоконну оптику як середовище обміну даними, досягаючи дуже високих швидкостей передачі даних [59, 61].

Технології дворежимного зв'язку

Ці технології використовують переваги як дротових, так і бездротових технологій домашньої автоматизації завдяки резервуванню зв'язку та забезпечують високу доступність.

X10 Protocol

Це вузькосмуговий протокол PLC для зв'язку для домашньої автоматизації. Надає зв'язок між передавачем і приймачем через електропроводи будинку. Дані сигнали являють собою короткі радіочастотні хвилі, які передають інформацію та виконують контроль та керування пристроями. Його швидкість складає 60 біт/с [1].

KNX

KNX (він же KONNEX) є дуже популярною у всьому світі відкритою стандартною технологією. Він підтримує кабелі електропередач і Ethernet для дротового зв'язку, а також забезпечує бездротове підключення. Крім того, він може співпрацювати з іншими відомими бездротовими технологіями, такими як EnOcean, WiFi і Zigbee. Відповідно до використовуваного середовища, він

може забезпечувати швидкість передачі даних від 9,6 Кбіт/с до 100 Гбіт/с із розміром пакета 16 байт [1, 59, 62].

Insteon

Ця технологія є наступником X10; він забезпечує зворотну сумісність з усіма існуючими пристроями, що підтримують цю технологію, працює на частоті 132 кГц. Його мережа складається як з дротових, так і з бездротових з'єднань, що забезпечує MESH-з'єднання між ними та забезпечує резервування з'єднання [63].

Технології бездротового зв'язку

Ці технології застосовуються, щоб вирішити потребу у взаємодії з існуючою домашньою інфраструктурою та забезпечити недороге та високоефективне рішення для зв'язку пристроїв. Їх можна розділити на дві великі категорії залежно від відстані, на яку вони долають.

Короткий радіус дії

Технології малого радіусу дії можуть використовуватися в основному в невеликих будівлях і будинках, забезпечуючи високу швидкість і високу доступність з'єднань між пристроями.

6LowPAN

IPv6 через малопотужні бездротові персональні мережі використовується для систем домашньої автоматизації та характеризується своєю простотою та низькою вартістю. Він забезпечує бездротове підключення там, де потрібні серйозні обмеження живлення. Він використовує стандарт IEEE 802.15.4 на найнижчих рівнях OSI-7 і протокол IPv6 (IP версія шоста) для зв'язку [64].

Можливо автоматизувати різні функції в нашому повсякденному житті, вставивши малих розмірів контролер з обмеженими можливостями зберігання

та зв'язку у об'єкти навколо нас для їх контролю. Мережа цих інтелектуальних об'єктів або речей, що використовують Інтернет-протокол (IP), називається 6LoWPAN або IPv6 через малопотужні бездротові персональні мережі, а взаємозв'язок мереж 6LoWPAN з Інтернетом утворює Інтернет речей (IoT). IPv6, потенційно, пропонує необмежений адресний простір для підключення до Інтернету мільярдів розумних речей, які можна унікально ідентифікувати. 6LoWPAN — це технологія IoT, яка дає змогу запускати важкий протокол IPv6 на пристроях з обмеженими ресурсами, пропонуючи можливості стиснення та фрагментації[65].

Ця технологія характеризується як бездротова персональна мережа (WPAN), яка обмінюється пакетами даних розміром 100 біт, при цьому досягаючи швидкості передачі даних до 250 Кбіт/с та радіус дії до 200 м.

Bluetooth

Bluetooth — це одна із найпопулярніших мережевих технологій малого радіусу дії, яка в основному використовується в комп'ютерах, смартфонах і периферійних з'єднаннях. Вона розкрила свій потенціал в забезпеченні зв'язку між пристроями в мережі, одночасно покращуючи термін служби акумулятора та швидкість передачі даних [57, 65].

Wi-Fi

Ця мережева технологія дуже популярна, оскільки відома для з'єднання різноманітних побутових пристроїв. Стандарт 802.11ac (випущений у 2013 році) працює в частотних діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц, досягаючи швидкості передачі даних від 600 Мбіт/с до 6,93 Гбіт/с. З появою 802.11ax у 2016 році (Wi-Fi 6) і використанням M.I.M.O. (Multiple Input, Multiple Output) технологія може працювати з декількома підключеними пристроями, забезпечуючи при цьому швидкість передачі даних 866,6 Мбіт/с, 15 Гбіт/с, 3466 Гбіт/с до 9,6 Гбіт/с. Для зв'язку використовується набір протоколів TCP/IP (версії 4 і версії

б), які забезпечують механізми QoS (якість обслуговування) з 32-розрядним CRC і безпеку з шифруванням AES128.

Як добре відома і використовувана технологія для пристроїв кінцевих користувачів, постачальники забезпечують підключення майже до всіх відомих технологій домашньої автоматизації.

Дальній радіус дії

LTE (5G/NB-IoT)

LTE (Long Term Evolution) — це дуже популярна мережева технологія, добре відома як мобільний телефонний зв'язок, який використовується в усьому світі. Він був представлений 3GPP у 2008 році та базується на вже існуючих мережах GSM/EDGE та UMTS/HSPA, головною метою якого є підвищення швидкості передачі даних для мобільних мережевих пристроїв. Для цього були впроваджені нові методи цифрової обробки сигналів.

3.1.3 Архітектура Smart House

Завдяки будівництву внутрішньої комунікаційної мережі ми реалізуємо домашню мережу кондиціонування повітря та іншу розумну побутову техніку за допомогою з'єднання волоконно-оптичної мережі. За допомогою інтелектуальних інтерактивних терміналів, розумних розеток, розумних приладів тощо ми досягаємо того, щоб побутові прилади автоматично збирали інформацію про електроенергію, аналізували, керували; і побутова техніка досягає економічності в експлуатації та контролю над енергією. За допомогою інтелектуальних інтерактивних терміналів ми також забезпечуємо виявлення диму, виявлення витoku газу, захист від крадіжок, надзвичайну допомогу та інші функції домашньої безпеки, а також здійснюємо автоматичний збір і керування інформацією про лічильники води, газові лічильники та головну мережу осередків центру підтримки та управління майном, а також

забезпечуємо авторизовану односторонню передачу інформації про домашню безпеку та інші послуги.

Щоб надавати такі послуги, системи allsmart home будуються за базовою структурою, яка включає три фази:

- 1) Рівень датчиків: збір інформації за допомогою датчиків, камер, мікрофонів та іншої побутової техніки;
- 2) Рівень обробки: зберігання та обробка зібраної інформації за допомогою основного процесора (наприклад, Raspberry Pi);
- 3) Рівень сервісів: генерування результатів і надання послуг залежно від обробленої інформації; інтеграція з мобільними додатками (наприклад, Google Home).

3.2 Застосування PLC у промисловості, енергетиці та транспорті

3.2.1 PLC Протоколи для автоматизації промислових потреб

Специфікація фізичного рівня:

Стандарт ISO 10368:2006(E) застосовується для дистанційного контролю температури у рефрижераторних контейнерах. Передбачено два варіанти передачі даних через електромережу: з низькою та високою швидкістю, що використовують різні частотні діапазони: від 53,9 до 56,1 кГц. Має модуляцію FSK із швидкістю 1200 символів/с.

Висока швидкість передачі даних:

- діапазон частот: від 140 до 400 кГц.
- Використовується антисиметрична хвильова форма, що модулюється BPSK.
- Швидкість передачі: 134,4 кбіт/с.
- максимальна вихідна потужність: 100 мВт на 10 кГц.
- Передача здійснюється між трьома фазами та землею.

Передача даних

Забезпечує два режими роботи: із низькою і високою швидкістю. Низькошвидкісний (асинхронна передача повідомлень зі старт-стоп-бітами без кодування) і високошвидкісний (використання блокового коду для виправлення помилок, що забезпечує швидкість 33,6 кбіт/с за рахунок швидкості кодування 1/4). Кадри даних містять резерв в 5 байт для синхронізації пристрою, а їх розмір залежить від режиму роботи. Для унікальної передачі використовується протокол зупинки та очікування: пакети з максимальним корисним навантаженням у 5 байтів надсилаються послідовно з підтвердженням (ACK), а при отриманні NACK або втраті пакета відбувається до 3 повторних передач. Широкомовна передача не передбачає підтвердження, але для підвищення надійності заголовки кадру повторюються 8 разів, а дані повторюються 4 рази. Протокол забезпечує баланс між швидкістю та надійністю завдяки виправленню помилок, синхронізації через резерв та механізмам повторення [1].

AMIS CX1-Profile

Використовується комунікаційний протокол AMIS CX1-Profile компанії Siemens AG PLC через розподільну мережу низької напруги між кінцевими вузлами, такими як лічильники, вимикачі, контроль блоків і концентраторів даних на центральних станціях. Це частина інтегрованого управління даними система для комунальних послуг і класичний додаток CENELEC A-Band (9–95 кГц) відповідно до EN 50065-1.

Профіль AMIS CX1 описує рівні з 1 по 4 (тобто від фізичного до транспортного рівня) Модель OSI. Протокол тісно пов'язаний із програмами та не передає IP-пакети.

Фізичний рівень

Має наступну структуру пакету: преамбула та PHY-заголовок із швидкістю передачі 600 біт/с; PHY-Data 16 режимів передачі та частотний

діапазон 39-90 кГц. Протокол забезпечує високу стійкість до вузькосмугових перешкод та розподіляє біти між частотами за часом, чим зменшує вплив імпульсних перешкод.

Передача даних і функції управління

Має архітектуру з централізованим керуванням ресурсами та механізм часових кредитів для рівномірного розподілу пропускну здатності при перевантаженні. Здійснює регулярні запити для виявлення збоїв та має централізовану БД для керування станом мережі. Синхронізує всі вузли.

Modbus

Протокол обміну повідомленнями прикладного рівня, розташований на рівні 7 моделі OSI. Забезпечує зв'язок клієнт/сервер між пристроями, підключеними до різних типів автобуси або мережі.

MODBUS — це протокол запиту/відповіді, який пропонує послуги, визначені функціональними кодами [73].

Modbus визначає клієнта, як об'єкт, який ініціює транзакцію для запиту будь-якої задачі від свого одержувача запиту. «Отримувач запиту» клієнта, з яким клієнт ініціював транзакцію, потім називається сервером. Наприклад, коли мікроконтролерний блок (MCU) підключається до датчика для зчитування його даних за допомогою Modbus у провідній мережі, наприклад, шині RS485, MCU у цьому контексті є клієнтом, а датчик - сервером. У колишній термінології клієнт називався провідним, а сервер введеним.

Modbus визначає блок даних протоколу незалежно від протоколів нижнього рівню у своєму стеку протоколів. Відображення протоколу MODBUS на певних шинах або мережах вимагає додаткових полів, які визначаються як блок даних програми (ADU). ADU формується клієнтом у мережі Modbus, коли клієнт ініціює транзакцію [73].

3.2.2 PLC у промислових системах

У сучасних обробних галузях промисловості, зокрема у виробництві, автоматизація на основі SCADA та PLC впроваджується для підвищення продуктивності, зменшення помилок і заміни ручної праці.

Наявні яскраві приклади успішної використання системи у промислових умовах наприклад: розроблена система автоматизує сортування тари (металевої/неметалевої за допомогою індуктивного датчика), наповнення (металевої - три види рідин в рівних пропорціях, неметалевої - два види), закриття, маркування та підрахунок продукції. Використання фотоелектричних датчиків на кожному етапі (наповнення, закриття, маркування) забезпечує точність і узгодженість операцій [74]; або використання PLC-контролю у лінії виготовлення продуктів харчування для підвищення ефективності.

Яскравим прикладом також є впровадження PLC у для автомобілів. Чітко визначений процес зв'язку між електромобілем, обладнанням для електропостачання (EVSE) і центральною системою керування (CMS) важливий для плавної, ефективної та надійної зарядки електромобіля. Розробка програмного симулятора зв'язку EV-EVSE-CMS та обмін повідомленнями між EV та EVSE здійснюється завдяки ISO 15118 через мережу живлення. Зв'язок EVSE-CMS здійснюється через Ethernet за протоколом Open Charge Point Protocol (OCPP) [76].

Управління розподілом електричної енергії, виробленої з відновлюваних джерел, таких як сонце та вітер, також потребує автоматизації і підвищення ефективності в роботі. PCL-управління дозволяють покращити продуктивність і стабільність загального процесу передачі енергії. Є дослідження що описують розподілену архітектуру для керування паралельними фотоелектричними та/або датчиками вітру, підключеними до шини постійного струму високої напруги (HVDC) та зв'язку з використанням лінії електроживлення як вектора зв'язку (PLC). Система дозволяє

здійснювати моніторинг і передачу інформації щодо локальної потужності, що надається, та її варіацій разом із усією інформацією (температура, зона затінення...), необхідною для оптимізації виробництва енергії. Ця робота також підкреслюють ефективність використання PCL із IoT [77].

3.3 Приклади практичного впровадження PLC технологій)

PLC впроваджується на різних рівнях у різних країнах по всьому світу. На даний момент у світі вже розгорнуто багато проектів із використанням даних систем.

У Німеччині послуги PLC надаються під брендами: «Vure» (Мангейм), «Piper-Net» (Хамельн), «PowerKom» (Дрезден), «EVOpowerline» (Оффенбах). В інших країнах: «Speed-Web» (Лінц, Австрія), «Broadband» (Шотландія, Кріфф та Кампбелтаун), ENkom (Швеція), Digistroom (Нідерланди)[71].

Перераховані вище технології забезпечують синхронну роботу системі наприклад, Ethernet використовується для мереж відеоспостереження та керування приладами[67]; KNX відповідає за інтеграцію із сенсорами EnOcean для автоматизації освітлення і опалення[68]; для підключення датчиків температури і вологості через IPv6 може використовуватись 6LoWPAN[69].

Мережі PLC забезпечують доступ до Інтернету в багатоквартирних будинках, готелях, школах та інших будівлях, де потрібне гнучке розгортання широкопasmового зв'язку. Серед найбільших проектів – 60-поверховий хмарочос у Гонконзі, оснащений технологією Ascom. Ці мережі також встановлені в рибальських селах Норвегії та Ісландії. У Німеччині та Ірландії реалізовано освітні проекти під назвою «Електронна школа» на основі інфраструктури PLC. [71].

За взаємодію між смартфоном і основними контролерами відповідає Bluetooth або Wi-Fi. Dupline використовується для моніторингу енергоспоживання в промислових будівлях через лінії електропередачі [70]. Протокол X10 застосовується для контролю за освітленням, аудіо та

відеообладнанням, а AMIS CX1-Profile застосовується для систем тривоги та керуванням обладнанням [1]. Для контролю заряду батареї машин використовується стандарт ISO/IEC15118 [71].

Ще одним прикладом із промисловості є ISO 10368:2006(E) використання для контролю потоку рефрижераторних контейнерів, який відбувається через збільшення кількості товарів, які потребують особливих умов транспортування. ПЛК дозволяє віддалено та в режимі реального часу відстежувати та контролювати холодильне обладнання на борту контейнеровозів. Міжнародний стандарт ISO 10368:2006(E) (вантажні термоконтейнери-дистанційний стан моніторинг) регулює спосіб обміну інформацією з однієї центральної станції моніторингу інформації за допомогою силових кабелів з рядом блоків зв'язку та модемів, які встановлюються в холодильні контейнери на борту суден [1].

3.4 Висновки до 3 розділу

Технологія Power Line Communication довела свою корисність і ефективність у різних сферах — від побутових систем до промислових комплексів. У розумних будинках PLC забезпечує стабільний зв'язок між пристроями через існуючу електромережу, чим спрощує автоматизацію опалення, вентиляції, освітлення, безпеки та іншого. Використання стандартів, таких як KNX, BACnet та Ethernet дозволяє інтегрувати як дротові технології, так бездротові, забезпечуючи гнучкість та масштабованість систем.

У промисловості та енергетиці PLC відіграє ключову роль у підвищенні продуктивності та надійності. Протоколи типу Modbus та AMIS CX1-Profile забезпечують передачу даних у реальному часі для управління виробничими лініями, моніторингу енергоспоживання та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Наприклад, автоматизація контролю холодильних установок за стандартом ISO 10368 демонструють, як PLC оптимізує складні процеси, зменшуючи людський фактор. Також, практичне використання PLC у

Німеччині, Норвегії, Гонконгу та інших регіонах підкреслює його глобальну значимість. Технологія використовується для широкопasmового зв'язку в багатоповерхових будинках, освітніх проектах («Електронна школа») та навіть у рибальських селах, де традиційні мережі недоступні. Перспективи PLC пов'язані з розвитком Інтернету речей (IoT) та Smart Grid. Інтеграція з хмарними платформами, edge-обчисленням та AI може відкрити нові можливості для енергоефективності, зменшення економічних витрати, поліпшення умов праці та збільшити виробничий потенціал у промисловості і побуті.

4 ПРАКТИЧНИЙ АНАЛІЗ PLC МЕРЕЖІ

4.1 Побудова тестового стенду та вибір обладнання

4.1.1 Побудова схеми розміщення обладнання тестового стенду PLC-мережі

Схема розміщення обладнання тестового стенду для PLC-мережі сортувального терміналу базується на електромережі 220В, яка виступає центральним вузлом для передачі даних через Power Line Communication (PLC) технологію.

Для побудови схеми тестового стенду використаємо програму Mermaid, яка дозволить створити нам схему розміщення обладнання тестового стенду для PLC-мережі з текстових описів, розроблений на основі JavaScript. Код виглядає наступним чином:

```

```mermaid
graph TD
 %% Центральний вузол
 Сервер[Siemens S7-1200
Центральний сервер] -->|PLC-адаптер
TP-Link TL-PA7017| Мережа[Електромережа 220В]

 %% Підключені пристрої
 Мережа -->|PLC-модем ST8500| SM1[Сортувальна машина 1]
 Мережа -->|PLC-модем ST8500| SM2[Сортувальна машина 2]
 Мережа -->|PLC-модем ST8500| CV1[Конвеєр 1]
 Мережа -->|PLC-модем ST8500| SC1[Сканер штрих-кодів 1]

 %% Система моніторингу
 Мережа --> Маршрутизатор[PLC-маршрутизатор Netgear PLP2000]
 Маршрутизатор --> Моніторинг[Станція моніторингу
Wireshark + STEP 7]

 %% Джерела перешкод
 LED[LED-освітлення] -.->|ЕМ перешкоди| Мережа
 Інвертор[Частотний привод] -.->|ЕМ перешкоди| Мережа

```

...

У результаті маємо:

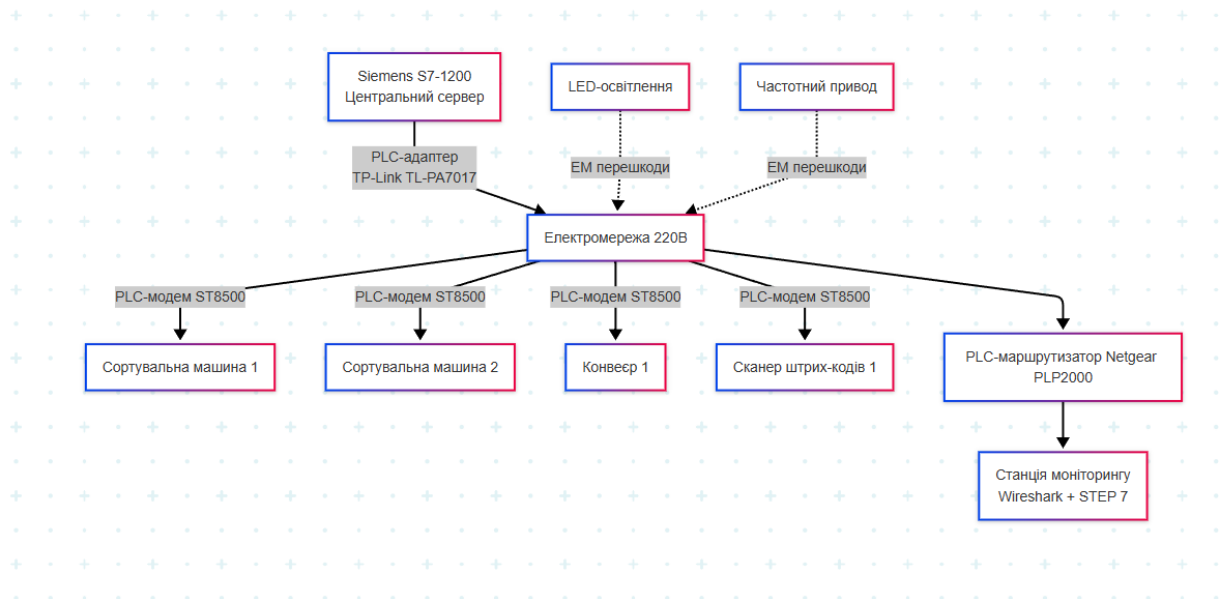


Рисунок 4.1 - Схема розміщення обладнання тестового стенду для PLC-мережі

На рисунку 4.1 показані такі основні компоненти: центральний сервер, PLC-модеми, PLC-маршрутизатор, система моніторингу та набір промислових пристроїв, до яких входять конвеєри, сортувальні машини та сканери штрих-кодів. Всі ці елементи об'єднані в єдину систему, яка функціонує на базі електромережі, забезпечуючи як електроживлення, так і передачу даних між пристроями в реальному часі.

Логічна структура схеми побудована з урахуванням зонального поділу терміналу: кожна зона (вимірювання, сортування, контроль) має свої підключені пристрої, які взаємодіють між собою через PLC-мережу. Це дозволяє створити умовно децентралізовану, але координовану систему, в якій дані з промислових пристроїв надходять на центральний сервер, а управління здійснюється через маршрутизовані канали зв'язку.

При проектуванні схеми враховано електричну топологію приміщення та можливі перешкоди для сигналу, які можуть впливати на якість зв'язку.

Тестовий стенд розроблений таким чином, щоб максимально відтворити умови реального функціонування логістичного комплексу, з можливістю масштабування мережі та підключення додаткових модулів без втрати стабільності або швидкодії системи.

#### 4.1.2 Опис взаємодії компонентів тестового стенду

*Центральний сервер.* Виконує роль головного управлінського вузла. Через PLC адаптер підключається до електромережі 220В, що слугує фізичним середовищем для передачі даних. Сервер отримує інформацію від кінцевих пристроїв (сортувальних машин, конвеєрів, сканерів), обробляє її та відправляє команди.

*PLC-модеми.* Забезпечують інтерфейс між промисловими пристроями та PLC-мережею. Кожен пристрій (наприклад, сортувальна машина) підключається до електромережі через модем, який модулює цифровий сигнал у аналоговий для передачі по силовим лініям.

*PLC-маршрутизатор.* Керує трафіком між сервером і кінцевими пристроями. Забезпечує стабільний зв'язок, пріоритезацію критичних даних (наприклад, сигналів від сканерів) і фільтрацію перешкод.

*Система моніторингу.* Складається з промислового ПК та програмного забезпечення. Відстежує параметри мережі (затримки, втрати пакетів), відображає статус пристроїв і зберігає логи операцій.

##### *Промислові пристрої:*

- Сортувальні машини: Виконує команду сервера, сортує посилку в потрібний контейнер і надсилає підтвердження (наприклад, "посилка #456 відсортована").
- Конвеєри: Передає дані про свій стан (наприклад, "швидкість: 2 м/с" або "зупинка через перевантаження") на сервер.

- Сканери штрих-кодів: Читає штрих-код (наприклад, EAN-128) і надсилає дані (наприклад, "посилка #456, напрямок: Київ") через PLC-модем до сервера.

*Джерела перешкод:*

LED-освітлення може створювати електромагнітні перешкоди через пульсації струму, пов'язані з роботою драйверів. У промислових умовах світлодіодні панелі (наприклад, потужністю 100 Вт) часто працюють на високих частотах (1–3 кГц), що генерує гармоніки в електромережі. Ці гармоніки можуть спотворювати PLC-сигнали, особливо якщо освітлення підключено до тієї ж фази, що й PLC-пристрої. Для мінімізації впливу рекомендують використовувати світлодіодні драйвери з коефіцієнтом пульсацій <5% та встановлювати фільтри (наприклад, LC-фільтри) між джерелом освітлення та мережею.

Частотні приводи (наприклад, Siemens G120P) створюють значні перешкоди через швидкі перемикання напруги (ШІМ) для регулювання швидкості електродвигунів. Робота в діапазоні 0–400 Гц супроводжується викидами високочастотних гармонік у мережу, які можуть заважати передачі PLC-сигналів. Особливо небезпечні перешкоди на частотах 10–150 кГц, де працюють вузькосмугові PLC-системи (наприклад, стандарти PRIME або G3-PLC). Для запобігання проблемам використовують екрановані кабелі, рознесення трас електропроводки ( $\geq 50$  см від PLC-ліній) та встановлення синфазних дроселів на виходах приводів.

#### 4.1.3 Критерії вибору обладнання

1. *Сумісність зі стандартами:*
  - Підтримка протоколів IEC 61334 Narrowband-PLC, G3-PLC та PRIME для NB-PLC, а також IEEE 1901.1 для BPL-мереж.
  - Сумісність із Modbus TCP та PROFINET для інтеграції з SCADA-/MES-системами.

- Відповідність EMC (EN 55022, EN 61000-6-2) та наявність сертифікатів CE/UL.

2. *Технічні параметри:*

- Робочий діапазон частот NB-PLC: 35–90 кГц (CENELEC A/B); для широкосмугових рішень — до 30 МГц.

- Затримка передачі пакета  $\leq 10$  мс для режиму реального часу.

- Пропускна здатність:  $\geq 100$  кбіт/с для NB-PLC, до 500 Мбіт/с для VPL-адаптерів.

- Ступінь захисту корпусу: IP65 (мінімум IP54 для внутрішніх пристроїв).

3. *Надійність та експлуатаційні характеристики:*

- Температурний діапазон експлуатації:  $-25$  °C ...  $+60$  °C (зовнішні модулі),  $+5$  °C ...  $+45$  °C (внутрішні приміщення).

- Відносна вологість: до 95 % без конденсації.

- EMC-стійкість: екрановані кабелі, дотримання відстані  $\geq 50$  см між силовими та PLC-лініями.

4. *Економічна доцільність:*

- Загальна вартість володіння (TCO): обладнання, монтаж, обслуговування, запасні частини.

- Наявність сервісних центрів в Україні.

- Модульна архітектура для масштабування без значного збільшення витрат.

#### 4.1.4 Особливості експлуатації

*Електроживлення:*

- Напруга  $220$  В  $\pm 10$  %, частота  $50$  Гц  $\pm 1$  %.

- Використання стабілізаторів напруги та захист від коротких замикань.

*Кліматичні умови:*

- Температура +5 °C ... +45 °C, відносна вологість 20 % ... 80 %.

*Електромагнітна сумісність:*

- Відстань між силовими та PLC-лініями  $\geq 50$  см.
- Використання екранованих кабелів та установки синфазних дроселів у місцях виявлених завод.

#### 4.1.5 Обране обладнання

##### 1) Центральний сервер (Siemens S7-1200)

Центральний сервер у промислових системах управління виконує роль головного обчислювального та керуючого вузла. Він забезпечує збір даних з підключених пристроїв (сенсорів, PLC-модемів, промислового обладнання), їх аналіз, прийняття рішень та відправку управляючих команд. У контексті PLC-мережі сервер також координує передачу інформації через силові лінії, інтегруючи різні компоненти (сортувальні машини, конвеєри, сканери) в єдину систему. Для цього використовуються спеціалізовані протоколи (наприклад, Modbus TCP, PROFINET), що забезпечують сумісність з промисловими стандартами [78].

#### Характеристика програмованого контролера Siemens S7-1200



Рисунок 4.2 - Контролер Siemens S7-1200

Контролер Siemens S7-1200 є компактним рішенням для автоматизації середнього рівня складності. Серед ключових параметрів:

- Процесор: ARM Cortex-M з тактовою частотою до 1.5 ГГц;
- Пам'ять: 50–75 КБ для програм та даних (залежно від моделі);
- Інтерфейси: 2×Gigabit Ethernet, RS-485, 4×USB 3.0;
- Підтримка протоколів: Modbus TCP, PROFINET, Ethernet/IP;
- Аналогові/цифрові входи-виходи: 6–14 DI, 4–10 DO, 2 AI (0–10 В);
- Ступінь захисту: IP65 (пиле- та водонепроникний корпус);
- Додаткові функції: вбудований апаратний фаєрвол, підтримка OPC UA

для інтеграції з SCADA-системами, можливість гарячої заміни модулів [80, 81].

## 2) PLC-адаптер (TP-Link TL-PA7017KIT)

PLC-адаптери — це пристрої, які дозволяють передавати інтернет-трафік через звичайну електричну мережу, перетворюючи її на комунікаційний канал. Вони ідеальні для розширення мережі в приміщеннях, де прокладання додаткових кабелів неможливе або недоцільне, наприклад, у промислових зонах, старих будівлях або великих офісах. Принцип роботи базується на модуляції цифрового сигналу в аналоговий, який передається по силовим лініям, а потім демодулюється на приймальному кінці. Ця технологія забезпечує стабільність зв'язку, але може бути вразливою до електромагнітних перешкод від інших пристроїв, підключених до тієї ж мережі.

## Характеристика PLC-адаптера TP-Link TL-PA7017KIT



Рисунок 4.3 - Адаптер TP-Link TL-PA7017KIT

Адаптер TP-Link TL-PA7017KIT — це сучасне рішення для побудови PLC-мережі з високою пропускнуою здатністю. Основні параметри:

- Стандарт: HomePlug AV2 з підтримкою MIMO (2x2), що підвищує стабільність та дальність передачі;
- Швидкість: до 1000 Мбіт/с (реальна швидкість — до 500 Мбіт/с);
- Дальність роботи: до 300 метрів по електричній проводці;
- Інтерфейси: 1 порт Gigabit Ethernet для підключення ПК, Smart TV, ігрових консолей;
- Безпека: 128-бітне AES-шифрування, кнопка Pair для захищеного зв'язку між адаптерами;
- Додаткові функції:
  - QoS — автоматична пріоритезація трафіку (відео, онлайн-ігри);
  - Plug-and-play — не потребує додаткового налаштування;
  - Фільтр перешкод — зменшує вплив ЕМ-шумів від інших пристроїв.

Комплект включає два адаптери, що дозволяє створити точку доступу та приймач. Модель підходить для стрімінгу 4К-відео, онлайн-ігор і роботи з IoT-пристроями. Ступінь захисту від перегріву та коротких замикань робить її надійним вибором для домашніх і офісних мереж [78, 79].

### 3) PLC-модеми (STMicroelectronics ST8500)

PLC-модеми— це пристрої, які перетворюють звичайну електричну мережу на комунікаційний канал для передачі даних. Вони модулюють цифровий сигнал у аналоговий, який поширюється по силовим лініям, і демодулюють його на приймальному кінці. Ця технологія особливо корисна в умовах, де традиційні методи (Wi-Fi, Ethernet) неефективні: у промислових приміщеннях, старих будівлях або на великих відстанях. PLC-модеми дозволяють інтегрувати управління обладнанням, передачу даних та моніторинг через єдину інфраструктуру, зменшуючи витрати на прокладання додаткових кабелів.

#### Характеристика PLC-модему STMicroelectronics ST8500



Рисунок 4.4 - Модем ST8500

Модем ST8500 розроблений для вузькосмугових PLC-мереж (NB-PLC) і відповідає стандартам G3-PLC та PRIME 1.4. Основні параметри:

- Діапазон частот: 35–90 кГц (CENELEC A/B), що забезпечує сумісність з європейськими нормами;
- Швидкість передачі: до 300 кбіт/с (OFDM з 36/72 тонами);
- Чутливість приймача: -120 дБм для стабільного зв'язку в умовах перешкод;
- Інтерфейси: SPI, UART, GPIO для інтеграції з промисловими контролерами;
- Енергоефективність: споживає менше 1 Вт у режимі очікування;

- Захист: Вбудований DSP-процесор для фільтрації шумів та корекції помилок.

Модем підтримує адаптивну модуляцію, що дозволяє автоматично регулювати параметри передачі залежно від якості лінії. Він призначений для систем автоматизації (AMI, Smart Grid), управління вуличним освітленням та промислових IoT-рішень. Ступінь інтеграції робить його ідеальним для масштабних проектів з високими вимогами до надійності [83].

#### 4) PLC-маршрутизатор (Netgear PLP2000)

PLC-маршрутизатори поєднують функції звичайного маршрутизатора та PLC-адаптера, забезпечуючи передачу даних через електричну мережу. Вони ідеальні для розширення інтернет-покриття в приміщеннях, де Wi-Fi слабкий або прокладання Ethernet-кабелів неможливе. Такі пристрої перетворюють електричну проводку на високошвидкісну мережу, дозволяючи підключати кілька пристроїв (ПК, Smart TV, камери) через розетки. Ключові переваги — стабільність зв'язку, простота інтеграції та можливість масштабування мережі додатковими адаптерами.

## Характеристика PLC-маршрутизатора Netgear PLP2000



Рисунок 4.5 - Маршрутизатор Netgear PLP2000

Маршрутизатор Netgear PLP2000 є потужним рішенням для побудови PLC-мережі з підтримкою сучасних стандартів.

Основні параметри:

- Стандарт: HomePlug AV2 з технологією MIMO (2x2), що забезпечує швидкість до 2000 Мбіт/с;
- Порти: 2×Gigabit Ethernet для підключення пристроїв;
- Безпека: 128-бітне AES-шифрування, фаєрвол, фільтрація MAC-адрес;
- Додаткові функції:
  - Якість обслуговування (QoS) — автоматична пріоритезація трафіку (ігри, відео);
  - Plug-and-play — не потребує додаткового налаштування;
  - Режим енергозбереження — знижує споживання енергії при відсутності активності.

Пристрій сумісний з будь-якими HomePlug AV2-адаптерами, що дозволяє створювати мережі з кількома точками доступу. Він підтримує роботу з IoT-пристроями, потокове 4K-відео та онлайн-ігри. Для зручності

управління доступний мобільний додаток Netgear Powerline, який дозволяє моніторити стан мережі та налаштовувати параметри [82, 85].

#### 5) Система моніторингу

Система моніторингу — це комплекс технічних та програмних засобів, призначених для відстеження, аналізу та управління промисловими процесами в режимі реального часу. Вона дозволяє збирати дані з датчиків, контролерів (PLC), обладнання та візуалізувати їх для оперативного прийняття рішень. Основна мета — забезпечити стабільність роботи системи, виявляти аномалії (наприклад, перегрів, перевантаження) та запобігати аваріям. В промислових умовах моніторинг часто інтегрується з SCADA-системами, що забезпечує централізований контроль над різними зонами виробництва.

#### Склад системи моніторингу (промисловий ПК)

Промисловий ПК — ключовий компонент системи, який відрізняється підвищеною надійністю та стійкістю до екстремальних умов (пил, вологість, коливання температури). До його складу входять:

- Апаратна частина:
  - Процесор (наприклад, Intel Core i5/i7);
  - Оперативна пам'ять (8–16 ГБ);
  - Мережеві інтерфейси (Ethernet, Wi-Fi, RS-485);
  - Спеціалізовані плати вводу/виводу для підключення датчиків.
- Програмне забезпечення:
  - Драйвери для інтеграції з PLC;
  - Інструменти для аналізу даних (наприклад, Wireshark, власні програми).

Такий ПК зазвичай працює 24/7 і підтримує роботу з критично важливими системами.

## Характеристика програмного забезпечення SIMATIC STEP 7

SIMATIC STEP 7 — це професійне ПЗ від Siemens для програмування та управління PLC-контролерами (наприклад, серії S7-1200, S7-1500). Основні функції:

- Створення логіки управління: Підтримка мов програмування LAD (ледер-діаграми), FBD (функціональні блоки), STL (структурний текст);
- Діагностика: Моніторинг стану контролера, виявлення помилок у реальному часі;
- Інтеграція: Сумісність з SCADA-системами (наприклад, WinCC), OPC UA для обміну даними;
- Симуляція: Вбудований емулятор для тестування програм без фізичного контролера;
- Ліцензування: Basic.

Програмне забезпечення дозволяє розробляти складні алгоритми управління промисловими процесами, налагоджувати PLC-мережі та забезпечувати безперебійну роботу системи. Воно є стандартом у галузі промислової автоматизації завдяки своїй гнучкості та надійності [84].

### 4.1.6 Кошторис на обладнання

Для оцінки витрат я припускаю, що сортувальний термінал маленького розміру має 2 сортувальних машин, 1 конвеєр, 1 сканер штрих-кодів, 1 систему моніторингу з програмним забезпеченням STEP 7 для управління PLC-мережею та 1 центральний сервер. Кожен пристрій (2 сортувальні машини, 1 конвеєр та 1 сканер штрих-кодів) потребує PLC-модему, а центральний сервер — контролер (PLC). Для системи моніторингу потрібен PLC-маршрутизатор.

Важливо зазначити, що у майбутньому сортувальний термінал можна масштабувати, залишаючи частину обладнання.

Таблиця 4.1 - Кошторис на обладнання

Обладнання	Опис/Характеристики	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Загальна ціна, грн
PLC-модеми (STMicroelectronics ST8500)	Програмоване рішення для вузькосмугової PLC, до 500 кГц	4	250	1000
PLC-адаптер (TP-Link TL-PA7017)	Для підключення сервера, швидкість до 1000 Мбіт/с	1	2300	2300
PLC-маршрутизатор (Netgear PLP2000)	Для управління мережею, до 2000 Мбіт/с	1	6300	6300
PLC (Siemens S7-1200)	Для управління сортувальними машинами	1	13838	13838
Програмне забезпечення	Для управління PLC-мережею, SIMATIC STEP 7	1	96012	96012
Монтаж та налаштування	Інтеграція з існуючими системами	-	-	2000
Доставка обладнання	-	-	-	6000
Загалом				124550

## 4.2 Експериментальні дослідження та оптимізація роботи PLC мережі

Оскільки проведення повномасштабних експериментів на реальному обладнанні сортувального терміналу є складним та ресурсовитратним процесом, для дослідження впливу різних факторів на продуктивність PLC-мережі та розробки рекомендацій з її оптимізації було використано метод комп'ютерного моделювання. Симуляції, реалізовані мовою програмування Python, дозволяють відтворити ключові аспекти функціонування Narrowband PLC (NB-PLC) систем та моделі черги M/M/1 в контрольованому середовищі.

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено загальну модель симуляційного стенду за допомогою програми Mermaid, яка лягла в основу всіх подальших експериментів. Ця модель дозволяє імітувати ключові фізичні процеси в PLC-каналі та оцінювати вплив різних факторів на його продуктивність.

На рис. 4.6. наведено загальну схему експерименту, що ілюструє логіку взаємодії компонентів у симуляції.

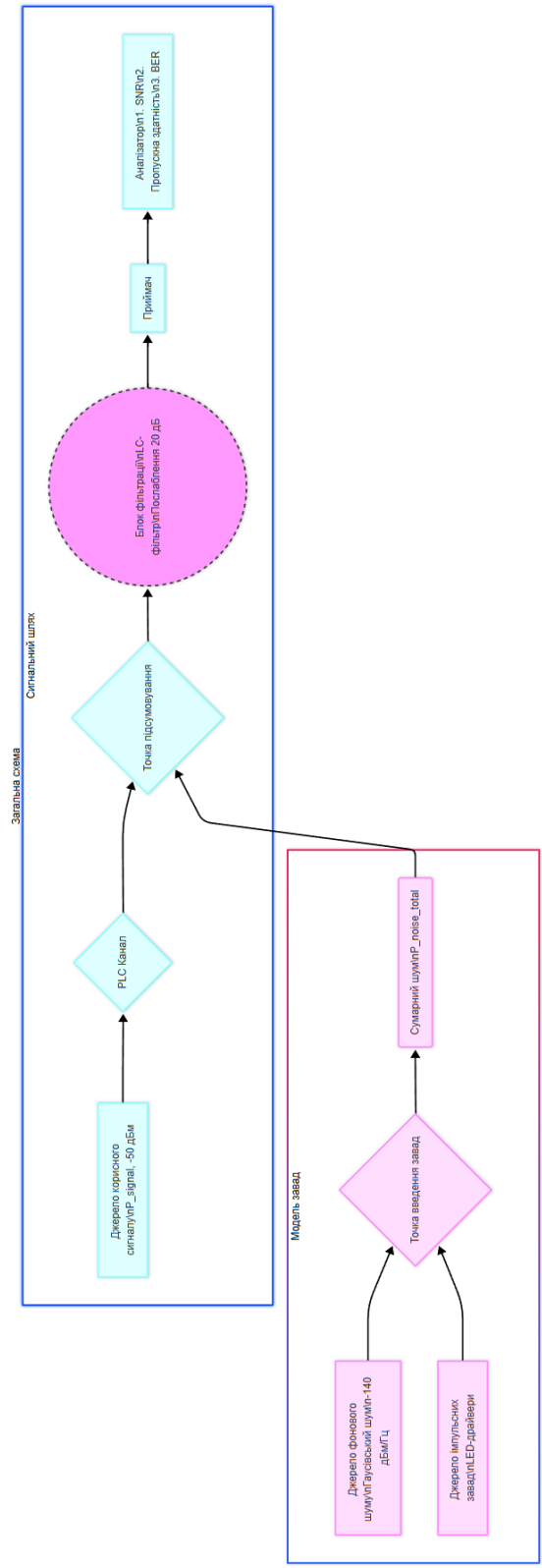


Рисунок 4.6 - Загальна модель симуляційного стенду

Опис схеми експерименту:

- 1) Джерело корисного сигналу: Генерує сигнал із фіксованою потужністю (-50 дБм) у смузі частот NB-PLC (у симуляції прийнято 150 кГц).
- 2) Модель завад: Складається з двох джерел: базового гаусівського шуму та імпульсних завад, що імітують вплив LED-освітлення та частотних приводів. Потужності цих шумів підсумовуються.
- 3) PLC Канал: У цій точці корисний сигнал змішується із сумарним шумом.
- 4) Блок фільтрації: Опційний блок (позначений пунктиром), який імітує роботу LC-фільтра шляхом зменшення потужності імпульсних завад. Цей блок активується в експерименті 4.2.2.
- 5) Приймач та Аналізатор: На цьому етапі розраховується фінальне співвідношення сигнал/шум (SNR), на основі якого обчислюються ключові метрики: теоретична пропускна здатність за теоремою Шеннона-Гартлі та ймовірність бітової помилки (BER).

#### 4.2.1 Вплив імпульсних завад (LED-освітлення, частотні приводи) на пропускну здатність NB-PLC

Методика симуляції: Для оцінки впливу імпульсних завад, таких як ті, що генеруються LED-освітленням та частотними приводами, на пропускну здатність NB-PLC мережі, ми симулюємо додавання імпульсного шуму до базового рівня фонового шуму. Частотні приводи, що використовуються для керування двигунами конвеєрів, сортувальних механізмів та іншого обладнання на терміналі, є потужними джерелами електромагнітних перешкод, здатних суттєво впливати на PLC-сигнали. Пропускна здатність каналу розраховується за допомогою теореми Шеннона-Гартлі.

Таблиця 4.2 - Вплив імпульсного шуму на пропускну здатність NB-PLC каналу

	Потужність імпульсного шуму (дБм)	Пропускна здатність (кбіт/с)	% від теоретичного максимуму
1	-90.0	1794.92	94.2
2	-85.0	1660.1	87.12
3	-80.0	1464.87	76.88
4	-75.0	1236.41	64.89
5	-70.0	995.54	52.25
6	-65.0	753.18	39.53
7	-60.0	518.62	27.22

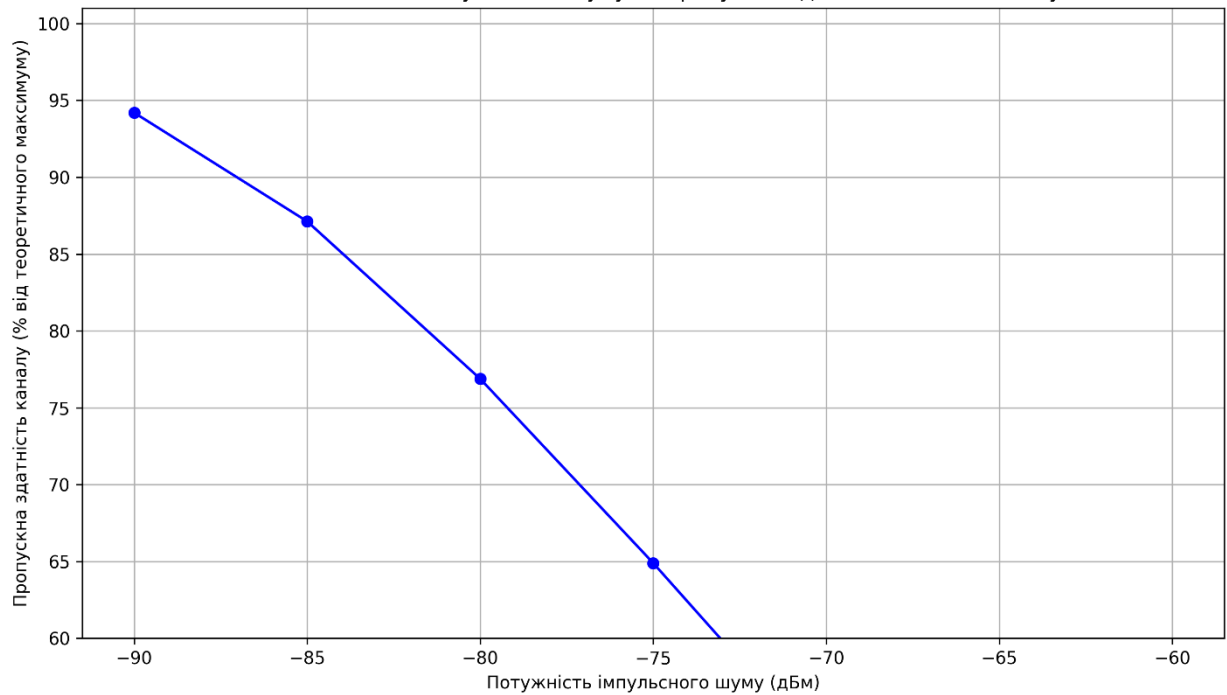


Рисунок 4.7 - Графік впливу імпульсного шуму на пропускну здатність NB-PLC каналу

Код симуляції та детальне пояснення його елементів і використаних формул наведено в *Додаток 1*. Вплив імпульсних завад (LED-освітлення, частотні приводи) на пропускну здатність NB-PLC.

Результати симуляції: При збільшенні потужності імпульсного шуму від -90 дБм до -60 дБм, що характерно для джерел, таких як LED-драйвери та частотні приводи, сумарна потужність шуму зростає, що призводить до зменшення відношення сигнал/шум (SNR) та зниження пропускну здатності каналу. Зокрема, при рівні шуму -90 дБм пропускна здатність становить 94.2% від теоретичного максимуму, однак при -60 дБм — лише 27.22%, що вказує на критичний вплив високих рівнів імпульсних завад.

## 4.2.2 Типи шуму та їх мінімізація

Методика симуляції: Моделюється вплив фільтрації (LC-фільтр) на Bit Error Rate (BER) та пропускну здатність каналу в умовах наявності як фонового (гаусового), так і імпульсного шуму. Фільтр симулюється шляхом зменшення потужності шуму в певній смузі частот.

Таблиця 4.3 - Вплив фільтрації на пропускну здатність каналу та BER для NB-PLC

	Імпульсний шум (дБм)	Пропускна здатність без фільтра (кбіт/с)	BER без фільтра	Пропускна здатність з фільтром (кбіт/с)	BER з фільтром
1	-90	1794.92	0.0e+00	1904.01	0.0e+00
2	-87	1722.42	0.0e+00	1902.59	0.0e+00
3	-84	1625.11	0.0e+00	1899.78	0.0e+00
4	-81	1507.47	0.0e+00	1894.28	0.0e+00
5	-78	1376.02	5.5e-253	1883.71	0.0e+00
6	-75	1236.41	1.2e-133	1864.05	0.0e+00
7	-72	1092.55	1.3e-69	1829.48	0.0e+00
8	-69	946.93	2.6e-36	1773.6	0.0e+00
9	-66	801.37	2.9e-19	1692.6	0.0e+00
10	-63	657.74	1.4e-10	1587.84	0.0e+00
11	-60	518.62	3.9e-06	1464.87	0.0e+00

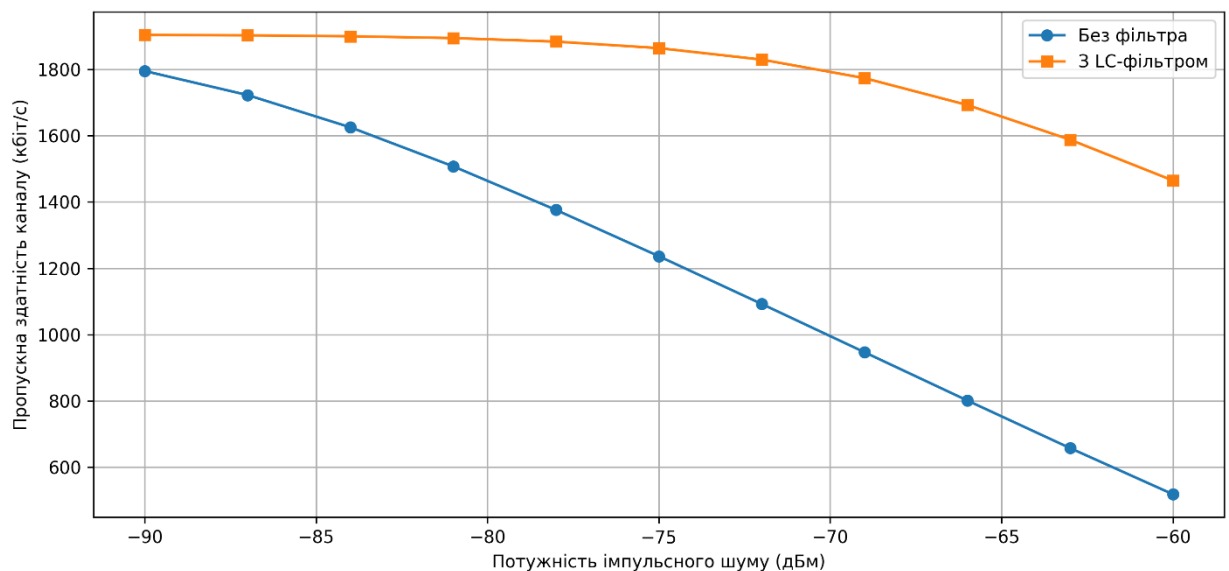


Рисунок 4.8 - Вплив фільтрації на пропускну здатність каналу та BER для NB-PLC

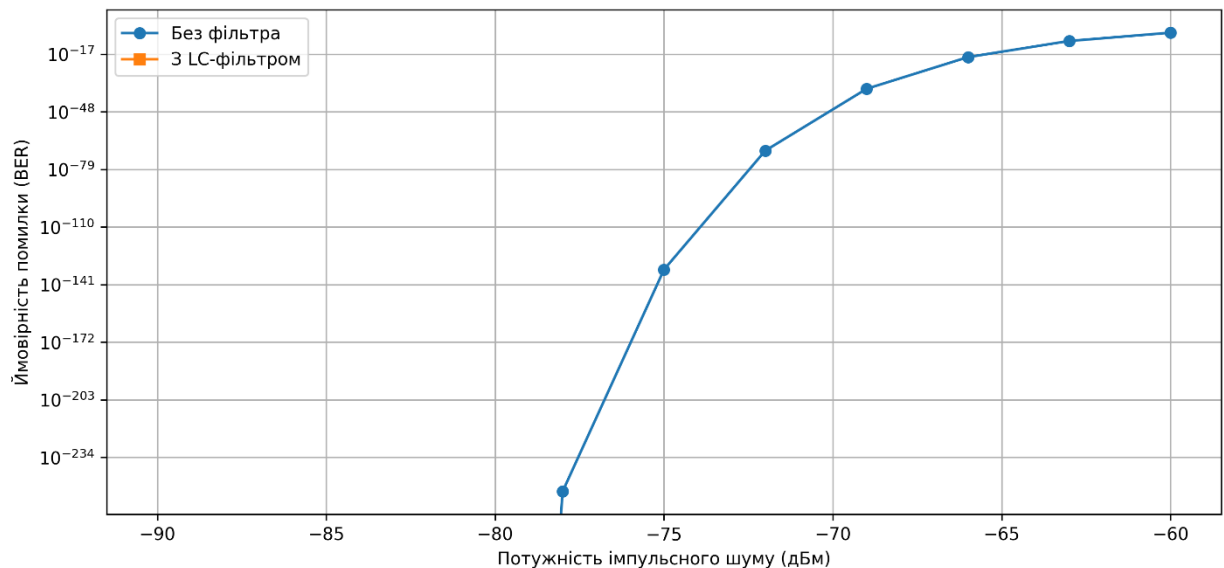


Рисунок 4.9 - BER для BPSK при різних рівнях імпульсного шуму

Код симуляції та детальне пояснення його елементів і використаних формул наведено в *Додаток 2*. Типи шуму та їх мінімізація.

Результати симуляції показують, що без фільтрації  $BER \approx 3.9 \times 10^{-6}$  при імпульсному шумі -60 дБм, після фільтрації  $BER \approx 0.0$  (менше  $1 \times 10^{-300}$ ). Після застосування LC-фільтра, який послаблює імпульсний шум на 20 дБ, пропускна здатність зростає з  $\approx 519$  до  $\approx 1465$  кбіт/с, що становить близько 81% від максимальної теоретичної пропускної здатності без імпульсних перешкод ( $\approx 1794$  кбіт/с).

#### 4.2.3 Вибір техніки модуляції

Методика симуляції: Оцінюється пропускна здатність та BER для трьох типів модуляції (BPSK, QPSK, 16-QAM) в залежності від відношення сигнал/шум (SNR). Це дозволяє визначити оптимальну модуляцію для різних умов каналу.

Таблиця 4.4 - Залежність BER та пропускної здатності від SNR

SNR (dB)	Modulation	BER	Throughput (kbps)
0	BPSK	7.86e-02	0.00
0	QPSK	1.59e-01	0.00
0	16-QAM	5.00e-01	0.00
5	BPSK	5.95e-03	1.00
5	QPSK	3.77e-02	0.00
5	16-QAM	5.00e-01	0.00
10	BPSK	3.87e-06	1.00
10	QPSK	7.83e-04	2.00
10	16-QAM	5.00e-02	0.00
15	BPSK	9.12e-16	1.00
15	QPSK	9.36e-09	2.00
15	16-QAM	1.84e-07	4.00
20	BPSK	1.04e-45	1.00
20	QPSK	7.62e-24	2.00
20	16-QAM	1.40e-19	4.00

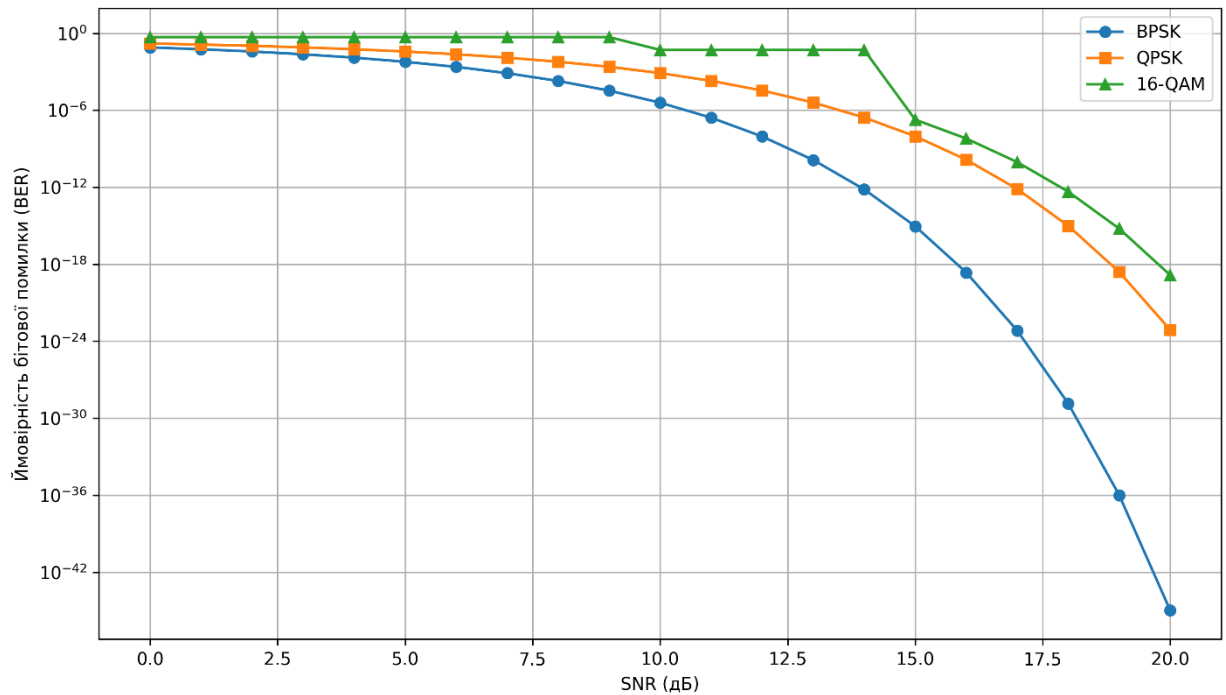


Рисунок 4.10 – BER для BPSK, QPSK та 16-QAM залежно від SNR

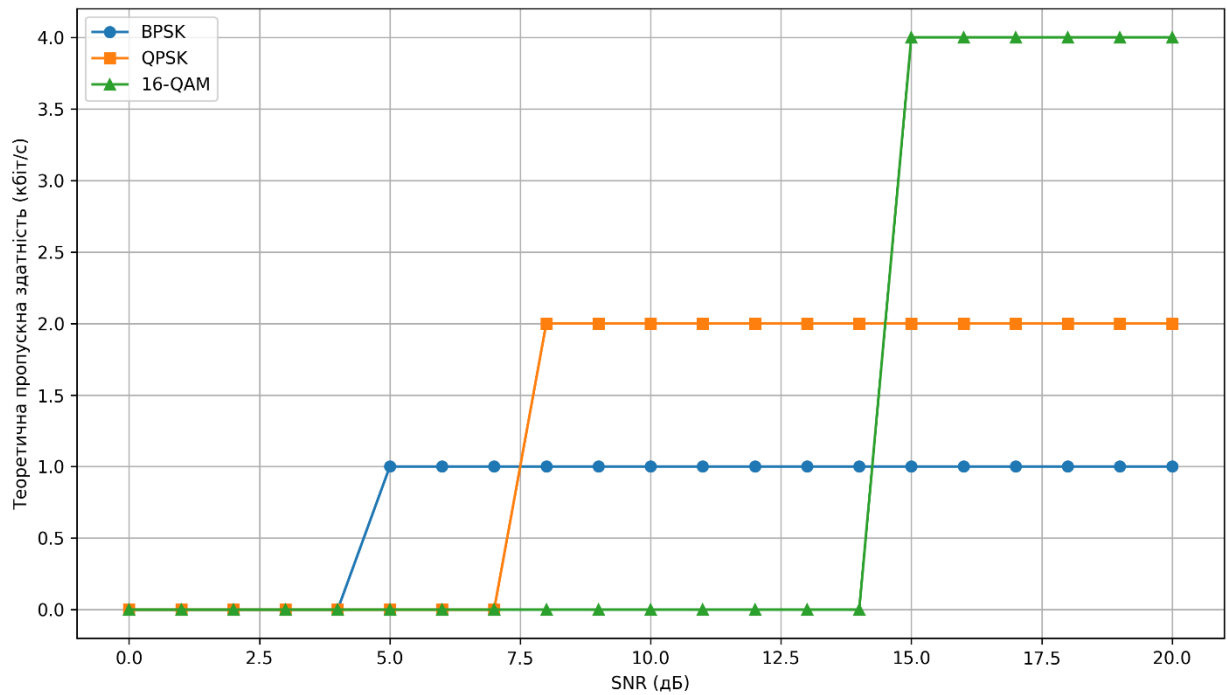


Рисунок 4.11 – Пропускна здатність для BPSK, QPSK та 16-QAM

Код симуляції та детальне пояснення його елементів і використаних формул наведено в *Додаток 3*. Вибір техніки модуляції.

Результати симуляції: Симуляція показує, що BPSK є найстійкішою до шуму і забезпечує низький BER навіть при низьких SNR ( $\geq 5$  дБ), але має найнижчу пропускну здатність (1 кбіт/с при символній швидкості 1 ксимвол/с). QPSK пропонує вищу пропускну здатність (2 кбіт/с) при помірних SNR ( $\geq 10$  дБ). 16-QAM дає найвищу пропускну здатність (4 кбіт/с), але вимагає високого SNR ( $\geq 17$  дБ) для підтримки низького BER. При нижчих SNR, BER для 16-QAM різко зростає.

#### 4.2.4 Довжина лінії та пропускна здатність

Методика симуляції: Моделюється залежність пропускної здатності NB-PLC від довжини лінії передачі. Збільшення довжини лінії призводить до більшого загасання сигналу, що знижує SNR на приймачі і, відповідно, зменшує пропускну здатність каналу.

Таблиця 4.5 - Залежність BER та пропускної здатності від SNR

Довжина лінії (м)	Загасання (дБ)	Сигнал (дБм)	Пропускна здатність (кбіт/с)
50	0.50	-50.50	3213.97
100	1.00	-51.00	3189.05
150	1.50	-51.50	3164.14
200	2.00	-52.00	3139.22
250	2.50	-52.50	3114.31
300	3.00	-53.00	3089.39

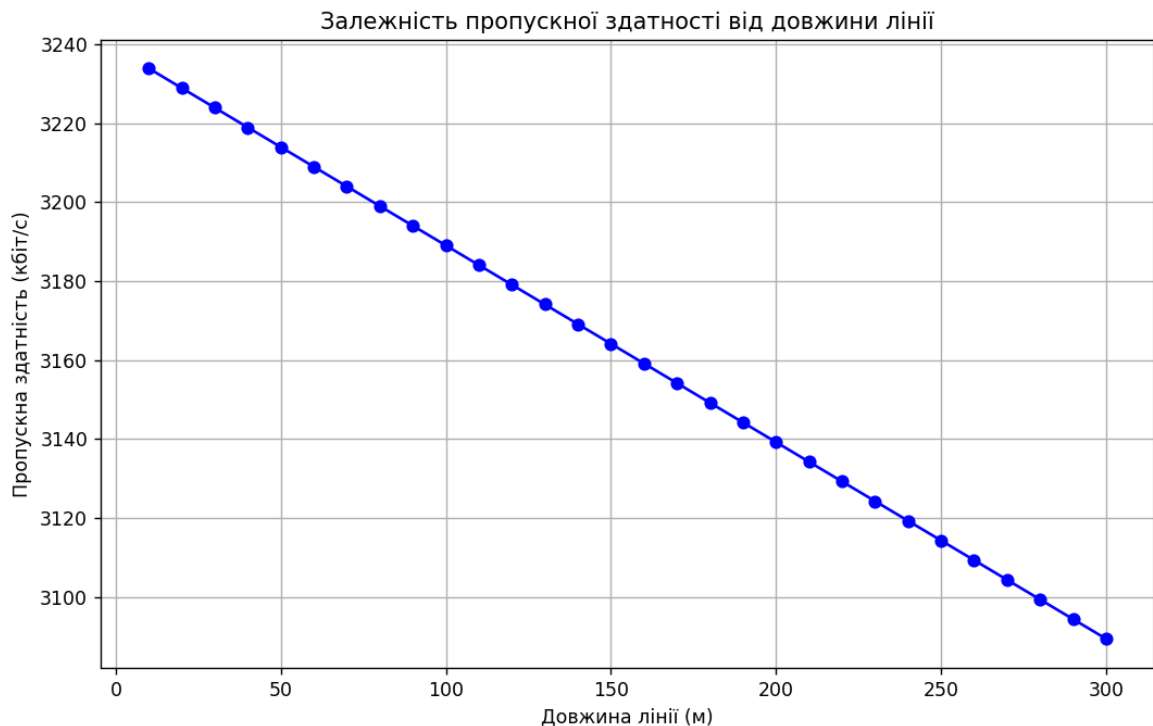


Рисунок 4.12 - Залежність пропускної здатності від довжини лінії

Код симуляції та детальне пояснення його елементів і використаних формул наведено в *Додаток 4. Довжина лінії та пропускна здатність*.

Результати симуляції: Симуляція показує плавне зменшення пропускної здатності зі збільшенням довжини лінії. Наприклад, при довжині 10 м пропускна здатність може бути близькою до максимальної для заданих параметрів сигналу/шуму 3233 кбіт/с, тоді як при 300 м вона знизиться до 3089 кбіт/с через накопичене загасання.

#### 4.3 Висновки до 4 розділу

У ході моделювання NB-PLC мережі сортувального терміналу та черг у системі керування було отримано такі результати:

##### 1. Вплив імпульсного шуму:

За результатами симуляцій, при потужності імпульсного шуму  $-90$  дБм пропускна здатність становить  $\approx 1794$  кбіт/с. При  $-60$  дБм – пропускна здатність знижується до  $\approx 519$  кбіт/с (падіння на  $\approx 72\%$ ). Після застосування LC-фільтра (ослаблення шуму на 20 дБ) пропускна здатність відновлюється до  $\approx 1464$  кбіт/с, а BER  $\approx 0.0$  (менше  $1 \times 10^{-300}$ ).

##### 2. Ефективність фільтрації:

LC-фільтр зменшив вплив імпульсного шуму, дозволивши відновити понад 81% теоретичної пропускної здатності ( $\approx 1794$  кбіт/с) та знизивши BER на понад 20 порядків (з  $\approx 10^{-6}$  до практично нуля).

##### 3. Вибір модуляції:

- BPSK забезпечує BER  $< 10^{-2}$  при SNR  $\geq 7$  дБ і дає пропускну здатність 1 кбіт/с.
- QPSK досягає 2 кбіт/с при SNR  $\geq 10$  дБ та BER  $\approx 2.7 \times 10^{-3}$ .
- 16-QAM дає 4 кбіт/с при SNR  $\geq 17$  дБ, але BER перевищує  $5 \times 10^{-2}$  дБ, але BER перевищує  $5 \times 10^{-2}$  при SNR  $< 15$  дБ. Висновок: на ділянках із шумом доцільно використовувати BPSK або QPSK.

4. Залежність від довжини лінії: При довжині кабелю 10 м пропускна здатність становить  $\approx 3233$  кбіт/с, при 300 м –  $\approx 3089$  кбіт/с (падіння на  $\approx 140$

кбіт/с або 4.4%). Рекомендовано використовувати репітери або розділяти мережу на сегменти до 150 м.

Симуляції підтвердили вплив електромагнітних завад, модуляції, довжини лінії та трафіку на ефективність PLC-мережі. Рекомендації щодо використання фільтрів, вибору модуляції, сегментації мережі та управління трафіком сприятимуть створенню надійної та ефективної PLC-архітектури для сортувального терміналу. Теоретичне моделювання, узгоджене з реальними даними, є важливим для проектування комунікаційних систем.

## ВИСНОВКИ

У представленій дипломній роботі проведено комплексне дослідження технологій передачі даних силовими лініями електропередач (PLC), що охоплює їх теоретичні основи, технічні аспекти, практичне застосування та моделювання продуктивності в конкретних умовах.

Було простежено еволюцію PLC-технологій від ранніх експериментів до сучасних стандартизованих рішень (G.hn, PRIME, IEEE 1901). Визначено фундаментальні принципи роботи, що базуються на накладанні високочастотного сигналу на змінний струм із застосуванням різноманітних методів модуляції (FSK, PSK, OFDM) та технологій для боротьби з шумами та завадами. Проведена класифікація на вузькосмугові (NB-PLC) та широкосмугові (BB-PLC) технології дозволила окреслити їх специфічні сфери застосування, від систем автоматизації до високошвидкісного доступу до Інтернету. Незважаючи на поступки деяким сучасним технологіям (Wi-Fi, Ethernet, 5G) у швидкості та масштабованості, PLC зберігає переваги у використанні існуючої інфраструктури, енергоефективності та дальності передачі.

Здійснено поглиблений аналіз технічних особливостей та стандартів PLC. Детально розглянуто фізичний рівень передачі сигналу, враховуючи імпеданс, завадостійкість, багатопроменевість та нестабільність електричного середовища. Досліджено ключові методи забезпечення надійності передачі даних, такі як модуляція OFDM, BPSK, QPSK, методи доступу до середовища CSMA/CA, TDMA та алгоритми корекції помилок FEC. Проведено огляд та порівняльний аналіз провідних міжнародних стандартів (HomePlug, IEEE 1901, G.hn, PRIME, G3-PLC), що систематизовано у порівняльній таблиці для оцінки їх ефективності, сумісності та придатності до конкретних завдань.

Продемонстровано практичну значущість та ефективність PLC-технологій у різноманітних сферах. У "розумних будинках" PLC забезпечує стабільний зв'язок для автоматизації, тоді як у промисловості та енергетиці

(зокрема, Smart Grid) відіграє важливу роль у моніторингу, управлінні та інтеграції відновлюваних джерел енергії, що підтверджується прикладами впровадження у Німеччині, Норвегії та Гонконгу. Окреслено перспективи розвитку PLC у контексті Інтернету речей (IoT), інтеграції з хмарними платформами, граничними обчисленнями та штучним інтелектом.

Для підтвердження теоретичних положень та оцінки ефективності PLC-технологій було проведено моделювання NB-PLC мережі сортувального терміналу. Результати моделювання кількісно оцінили вплив імпульсного шуму на пропускну здатність та коефіцієнт бітових помилок (BER), підтвердивши ефективність застосування LC-фільтрів (зниження BER понад 20 порядків: з  $\approx 10^{-6}$  до практично нуля, - відновлення до 81% пропускну здатності). Досліджено ефективність різних типів модуляції (BPSK, QPSK, 16-QAM) за різних співвідношень сигнал/шум, що дозволило сформулювати рекомендації щодо їх вибору. Також визначено залежність пропускну здатності від довжини лінії (падіння на 4.5% при 300 м) та запропоновано шляхи оптимізації.

Таким чином, дипломна робота всебічно дослідила PLC-технології, підтвердивши їх актуальність та практичну цінність для сучасних телекомунікаційних систем та Інтернету речей. Отримані теоретичні та практичні результати, включно з рекомендаціями за підсумками моделювання, можуть бути використані для проектування та оптимізації надійних та ефективних PLC-мереж в умовах, де економічна доцільність, простота інтеграції та стабільність зв'язку є пріоритетними.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lampe L., Tonello A. M., Swart T. G. (Eds.). *Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid*. Wiley, 2016.
2. Powerline – itel ltd. URL: <https://itel.ua/articles/powerline?srsltid=AfmBOoq2ebpB51MzpwBgue02YckszZ8cLWx44-LGADWG-788mEJrClmc> (дата звернення: 10.03.2025).
3. Brown P. A. Power Line Communications - Past Present and Future. URL: [https://plcdocsearch.uma.es/Proceedings/1999/pdf/0566\\_001.pdf](https://plcdocsearch.uma.es/Proceedings/1999/pdf/0566_001.pdf) (дата звернення: 11.03.2025).
4. Kabalci E., Kabalci Y. From Smart Grid to Internet of Energy. 2019. Chapter 4. Power line communication technologies in smart grids. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/power-line-communication> (дата звернення: 12.03.2025).
5. Ahola J. Applicability of power-line communications to data transfer of on-line condition monitoring of electrical drives. URL: [https://www.researchgate.net/publication/35461530\\_Applicability\\_of\\_power-line\\_communications\\_to\\_data\\_transfer\\_of\\_on-line\\_condition\\_monitoring\\_of\\_electrical\\_drives](https://www.researchgate.net/publication/35461530_Applicability_of_power-line_communications_to_data_transfer_of_on-line_condition_monitoring_of_electrical_drives) (дата звернення: 12.03.2025).
6. Innovative Communication for Power Lines - Aktif Elektroteknik. URL: <https://aktif.net/en/innovative-communication-for-power-lines/> (дата звернення: 13.03.2025).
7. Ferreira H. C. Power Line Communications (PLC) Technology: More Than 20 Years of Intense Research. URL: [https://www.researchgate.net/publication/330485829\\_Power\\_Line\\_Communications\\_PLC\\_Technology\\_More\\_Than\\_20\\_Years\\_of\\_Intense\\_Research](https://www.researchgate.net/publication/330485829_Power_Line_Communications_PLC_Technology_More_Than_20_Years_of_Intense_Research) (дата звернення: 13.03.2025).

8. Schwartz Mischa. Telephony over Power Lines (Early History). URL: [https://web.archive.org/web/20191003213736/https://ethw.org/Telephony\\_over\\_Power\\_Lines\\_\(Early\\_History\)](https://web.archive.org/web/20191003213736/https://ethw.org/Telephony_over_Power_Lines_(Early_History)) (дата звернення: 13.03.2025).
9. Trull Bruce R. An Overview of Broadband Over Power Line (BPL). URL: <https://www2.rivier.edu/journal/ROAJ-2006-Spring/J30-TRULL.pdf> (дата звернення: 14.03.2025).
10. Metroid Electrical Engineering - Protocol Series: What is Lonworks? URL: <https://www.metroid.net.au/knowledge-centre/protocol-series-what-is-lonworks/> (дата звернення: 14.03.2025).
11. ITU-T G.9905. URL: <https://nessum.org/standards/itu-t-g-9905/> (дата звернення: dd.mm.yyyy).
12. HomePlug 1.0 Technology White Paper. URL: [https://www.solwise.co.uk/downloads/files/hp\\_1.0\\_technicalwhitepaper\\_final.pdf](https://www.solwise.co.uk/downloads/files/hp_1.0_technicalwhitepaper_final.pdf) (дата звернення: 14.03.2025).
13. PRIME Alliance. URL: <https://www.prime-alliance.org/alliance/> (дата звернення: 15.03.2025).
14. Lavenu C., Chauvenet C., Treffiletti P., Varesio M., Hueske K. Standardization Challenges, Opportunities and Recent Evolutions for the G3-PLC Technology. URL: [https://www.researchgate.net/publication/350533852\\_Standardization\\_Challenges\\_Opportunities\\_and\\_Recent\\_Evolutions\\_for\\_the\\_G3-PLC\\_Technology/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/350533852_Standardization_Challenges_Opportunities_and_Recent_Evolutions_for_the_G3-PLC_Technology/figures?lo=1) (дата звернення: 16.03.2025).
15. G3-Alliance. URL: <https://g3-alliance.com/g3-alliance/> (дата звернення: 16.03.2025).
16. ITU-T G.hn. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9960-200910-T/en> (дата звернення: 16.03.2025).
17. Mangunkusumo K. G. H. Narrow Band Power Line Communication (NBPLC) frequency band review under residential load noise. URL: [https://www.researchgate.net/publication/356541794\\_Narrow\\_Band\\_Power\\_Line\\_Communication\\_NB-](https://www.researchgate.net/publication/356541794_Narrow_Band_Power_Line_Communication_NB-)

[PLC frequency band review under residential load noise/fulltext/638cebdd2c563722f23a6af9/Narrow-Band-Power-Line-Communication-NB-PLC-frequency-band-review-under-residential-load-noise.pdf](#) (дата звернення: 17.03.2025).

18. Mlýnek P., Rusz M., Beneš L., Sláček J., Musil P. Possibilities of Broadband Power Line Communications for Smart Home and Smart Building Applications. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/1/240#B5-sensors-21-00240> (дата звернення: 18.03.2025).

19. Слюсар В. Неортогональное частотное мультиплексирование (N-OFDM) сигналов. URL: [https://web.archive.org/web/20160406042824/http://www.slyusar.kiev.ua/TSS\\_part1.pdf](https://web.archive.org/web/20160406042824/http://www.slyusar.kiev.ua/TSS_part1.pdf) (дата звернення: 18.03.2025).

20. Concepts of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN. URL: [https://helpfiles.keysight.com/csg/89600B/Webhelp/Subsystems/wlan-ofdm/content/ofdm\\_basicprinciplesoverview.htm](https://helpfiles.keysight.com/csg/89600B/Webhelp/Subsystems/wlan-ofdm/content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm) (дата звернення: 18.03.2025).

21. The Basics of Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM). URL: <https://blog.minicircuits.com/the-basics-of-orthogonal-frequency-division-multiplexing-ofdm/> (дата звернення: 19.03.2025).

22. Tutotialspoint - Frequency Shift Keying in Digital Communication. URL: [https://www.tutorialspoint.com/digital\\_communication/digital\\_communication\\_frequency\\_shift\\_keying.htm](https://www.tutorialspoint.com/digital_communication/digital_communication_frequency_shift_keying.htm) (дата звернення: 25.03.2025).

23. Watson B. FSK: Signals and Demodulation. URL: [https://web.archive.org/web/20120907031840/http://www.xn--stencpa.se/share/text/tektext/digital-modulation/FSK\\_signals\\_demod.pdf](https://web.archive.org/web/20120907031840/http://www.xn--stencpa.se/share/text/tektext/digital-modulation/FSK_signals_demod.pdf) (дата звернення: 16.03.2025).

24. StandardDigital Communication - Phase Shift Keying. URL: [https://www.tutorialspoint.com/digital\\_communication/digital\\_communication\\_phase\\_shift\\_keying.htm](https://www.tutorialspoint.com/digital_communication/digital_communication_phase_shift_keying.htm) (дата звернення: 26.03.2025).

25. Технології мереж - DSSS (Direct Sequence Spectrum Spread). URL: <https://nettech.ua/news/dsss-direct-sequence-spectrum-spread> (дата звернення: 27.03.2025).
26. Iniewski K. *Convergence of Mobile and Stationary Next Generation Networks*. Wiley, 2010. Pp. 289–311, 313–324.
27. Di Bert L., Caldera P., Schwingshackl D., Tonello Andrea M. On Noise Modeling for Power Line Communications. URL: [https://www.andreatonello.com/wp-content/uploads/PAPERS/CONFERENCES/ISPLC2011\\_5.pdf](https://www.andreatonello.com/wp-content/uploads/PAPERS/CONFERENCES/ISPLC2011_5.pdf) (дата звернення: 27.03.2025).
28. EDN - Narrowband Powerline Communication—Applications and Challenges—Part I. URL: <https://www.edn.com/narrowband-powerline-communication-applications-and-challenges-part-i/> (дата звернення: 28.03.2025).
29. ITU-T Rec. G.9902 (10/2012) Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for ITU-T G.hnem networks. URL: [https://wiki.oevsv.at/w/nsfr\\_img\\_auth.php/9/99/T-REC-G.9902-201210-I%21%21PDF-E\\_%282%29.pdf](https://wiki.oevsv.at/w/nsfr_img_auth.php/9/99/T-REC-G.9902-201210-I%21%21PDF-E_%282%29.pdf) (дата звернення: 28.03.2025).
30. IEEE Standards Association - IEEE 1901-2010. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/1901/4953/> (дата звернення: 29.03.2025).
31. Dell - Wi-Fi Standards: IEEE 802.11ac, 802.11ax, and Wireless Internet Standards. URL: <https://www.dell.com/support/contents/en-ke/article/product-support/self-support-knowledgebase/networking-wifi-and-bluetooth/wi-fi-network-standards-overview> (дата звернення: 29.03.2025).
32. Current Power Line Communication Systems: A Survey. URL: <https://hal.science/hal-01066411/document> (дата звернення: 30.03.2025).
33. Spiceworks - What Is Ethernet? Definition, Types, and Uses. URL: <https://www.spiceworks.com/tech/networking/articles/what-is-ethernet/> (дата звернення: 30.03.2025).
34. Ethernet Alliance - 40 Gigabit Ethernet and 100 Gigabit Ethernet Technology Overview. URL: <https://www.ethernetalliance.org/wp->

[content/uploads/2011/10/document\\_files\\_40G\\_100G\\_Tech\\_overview.pdf](content/uploads/2011/10/document_files_40G_100G_Tech_overview.pdf) (дата звернення: 31.03.2025).

35. 5G-Acia – 5G for Connected Industries and Automation. URL: [https://5g-acia.org/?jet\\_download=4c265cf3ecd64cfd9324278bc0460deedc788d5](https://5g-acia.org/?jet_download=4c265cf3ecd64cfd9324278bc0460deedc788d5) (дата звернення: 02.04.2025).

36. 3GPP – 5G System Overview. URL: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview> (дата звернення: 04.04.2025).

37. VentureBeat - The definitive guide to 5G low, mid, and high band speeds. URL: <https://venturebeat.com/mobile/the-definitive-guide-to-5g-low-mid-and-high-band-speeds/> (дата звернення: 06.04.2025).

38. ChipEstimate - HomePlug Powerline Alliance Announces Revolutionary Advancements for Next-Generation Powerline Networks. URL: <https://www.chipestimate.com/HomePlug-Powerline-Alliance-Announces-Revolutionary-Advancements-for-Next-Generation-Powerline-Networks/Semiconductor-IP-Core/news/5442> (дата звернення: 10.04.2025).

39. Biblioteka Nauki - Design of broadband power line communication module for automatic meter reading. URL: <https://bibliotekanauki.pl/articles/949869.pdf> (дата звернення: 10.04.2025).

40. HomePlug Powerline Alliance - HomePlug AV White Paper. URL: [https://www.solwise.co.uk/downloads/files/hpav-white-paper\\_050818.pdf](https://www.solwise.co.uk/downloads/files/hpav-white-paper_050818.pdf) (дата звернення: 10.04.2025).

41. HomePlug Powerline Alliance - HomePlug AV2 White Paper. URL: <https://content.codico.com/fileadmin/media/download/datasheets/powerline-communication/homeplug-av-av2/homeplug-av2-whitepaper.pdf> (дата звернення: 11.04.2025).

42. HomePlug Powerline Alliance - Home Plug Green PHY The Standard For In-Home Smart Grid Powerline Communications. URL: <https://content.codico.com/fileadmin/media/download/datasheets/powerline->

[communication/plc-homeplug-green-phy/homeplug\\_green\\_phy\\_whitepaper.pdf](#)

(дата звернення: 11.04.2025).

43. Md. Mustafizur Rahman, C. Seon Hong, S. Lee, J. Lee. Medium Access Control for Power Line Communications: An Overview of the IEEE 1901 and ITU-T G.hn Standards. URL: [https://www.researchgate.net/publication/224240258\\_Medium\\_access\\_control\\_for\\_power\\_line\\_communications\\_an\\_overview\\_of\\_the\\_IEEE\\_1901\\_and\\_ITU-T\\_Ghn\\_standards](https://www.researchgate.net/publication/224240258_Medium_access_control_for_power_line_communications_an_overview_of_the_IEEE_1901_and_ITU-T_Ghn_standards) (дата звернення: 12.04.2025).

44. PRIME Alliance - PRIME 1.3 White Paper. URL: [https://www.prime-alliance.org/media/2020/04/MAC\\_Spec\\_white\\_paper\\_1\\_0\\_080721.pdf](https://www.prime-alliance.org/media/2020/04/MAC_Spec_white_paper_1_0_080721.pdf) (дата звернення: 13.04.2025).

45. PRIME Alliance - PRIME 1.4 White Paper. URL: [https://www.prime-alliance.org/media/2020/04/whitePaperPrimeV1p4\\_final.pdf](https://www.prime-alliance.org/media/2020/04/whitePaperPrimeV1p4_final.pdf) (дата звернення: 13.04.2025).

46. Lavenu<sup>1</sup> C., Chauvenet C., Treffiletti P., Varesio M., Hueske K. Standardization Challenges, Opportunities and Recent Evolutions for the G3-PLC Technology, Energies 2021. URL: <https://g3-alliance.com/download/99/map/6559/2021-standardization-challenges-opportunities-and-recent-evolutions-for-the-g3-plc-technology-energies-14-01937.pdf> (дата звернення: 14.04.2025).

47. Mohamed Elkhalfa A. Security issues of Power line Communications. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. e-ISSN: 2250-3021, p-ISSN: 2278-8719. Vol. 3, Issue 12 (December. 2013), V3. Pp. 01–06. URL: [https://www.iosrjen.org/Papers/vol3\\_issue12%20\(part-3\)/A031230106.pdf](https://www.iosrjen.org/Papers/vol3_issue12%20(part-3)/A031230106.pdf) (дата звернення: 15.04.2025).

48. Paz Penagos H., Castellanos G. Noise and Interference in Power Line channels. URL: [https://www.researchgate.net/publication/224085046\\_Noise\\_and\\_Interference\\_in\\_Power\\_Line\\_channels](https://www.researchgate.net/publication/224085046_Noise_and_Interference_in_Power_Line_channels) (дата звернення: 16.04.2025).

49. Komarovskiy M. M. Signal Attenuation of Data Transmission by Power Lines: Використання лінії електропередач в якості каналу зв'язку. Способи зменшення спотворень при передачі сигналів по лініям електропередач. Технологія PLC. URL: [https://www.researchgate.net/publication/357263247\\_Signal\\_Attenuation\\_of\\_Data\\_Transmission\\_by\\_Power\\_Lines\\_Vikoristanna\\_linii\\_elektroperedac\\_v\\_akosti\\_kanalu\\_zv\\_azku\\_Sposobi\\_zmensenna\\_spotvoren\\_pri\\_peredaci\\_signaliv\\_po\\_liniam\\_elektroperedac\\_Tehnologia\\_P](https://www.researchgate.net/publication/357263247_Signal_Attenuation_of_Data_Transmission_by_Power_Lines_Vikoristanna_linii_elektroperedac_v_akosti_kanalu_zv_azku_Sposobi_zmensenna_spotvoren_pri_peredaci_signaliv_po_liniam_elektroperedac_Tehnologia_P) (дата звернення: 16.04.2025).

50. NOISE MODELING FOR STANDARD CENELEC A-BAND POWER LINE COMMUNICATION CHANNEL. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/39671606.pdf> (дата звернення: 18.04.2025).

51. Farooq M.U., Waseem M., Mazhar S., et al. A review on Internet of Things (IoT). *Int J Comput Appl.* 2015. Vol. 113(1). Pp. 135–144. URL: [https://www.researchgate.net/publication/273693976\\_A\\_Review\\_on\\_Internet\\_of\\_Things\\_IoT](https://www.researchgate.net/publication/273693976_A_Review_on_Internet_of_Things_IoT) (дата звернення: 18.04.2025).

52. Pirbhulal S., Zhang H., Alahi M.E.E., et al. A novel secure IoT-based smart home automation system using a wireless sensor network. *Sensors.* 2017. Vol. 17(1). P. 69. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/1/69> (дата звернення: 18.04.2025).

53. Koshy S.N., Kamsin I.F.B., Zainal N.K. A comprehensive review on smart IoT applications. *AIP Conf Proc.* 2021. Vol. 4. Pp. 548–553. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37631731/> (дата звернення: 19.04.2025).

54. BacNET BACnet—The New Standard Protocol BACnet International; 2022. URL: <https://bacnet.org/wp-content/uploads/sites/4/2022/06/BACnet-The-New-Standard-Protocol-1.pdf> (дата звернення: 19.04.2025).

55. Carlo Gavazzi automation components Carlo Gavazzi S.A. URL: <http://gavazziautomation.com> (дата звернення: 19.04.2025).

56. KNX Association KNX Association Webpage. URL: <http://www.knx.org/knx-en/index.php> (дата звернення: 16.03.2025).

57. Bluetooth.com Medical|Bluetooth Technology Website [Internet]. URL: <https://www.bluetooth.com/> (дата звернення: 20.04.2025).
58. Gratton D. A. WiFi Alliance [Internet]. URL: <http://www.wi-fi.org/certification/programs> (дата звернення: 20.04.2025).
59. Orfanos V.A., Kaminaris S.D., Piromalis D., Papageorgas P. Smart Home Automation in the IoT Era: A Communication Technologies Review. *AIP Conf. Proc.* 2020. Vol. 2307. 020054. URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2307/1/020054/698491/Smart-home-automation-in-the-IoT-era-A?redirectedFrom=fulltext> (дата звернення: 20.04.2025).
60. Marinakis V., Doukas H., Karakosta C., Psarras J. An Integrated System for Buildings' Energy-Efficient Automation: Application in the Tertiary Sector. *Appl. Energy.* 2013. Vol. 101. Pp. 6–14. URL: [https://www.researchgate.net/publication/257157424\\_An\\_integrated\\_system\\_for\\_buildings'\\_energy-efficient\\_automation\\_Application\\_in\\_the\\_tertiary\\_sector](https://www.researchgate.net/publication/257157424_An_integrated_system_for_buildings'_energy-efficient_automation_Application_in_the_tertiary_sector) (дата звернення: 21.04.2025).
61. Feldman D., Oliva V. Overview of 802.3bt—Power over Ethernet Standard. 2018, 6. URL: [https://ethernetalliance.org/wp-content/uploads/2018/04/WP\\_EA\\_Overview8023bt\\_FINAL.pdf](https://ethernetalliance.org/wp-content/uploads/2018/04/WP_EA_Overview8023bt_FINAL.pdf) (дата звернення: 21.04.2025).
62. Orfanos V., Kaminaris S.D., Piromalis D., Papageorgas P. Trends in Home Automation Systems and Protocols. *AIP Conf. Proc.* 2019. Vol. 2190. 020049. URL: [https://www.researchgate.net/publication/337913009\\_Trends\\_in\\_home\\_automation\\_systems\\_and\\_protocols](https://www.researchgate.net/publication/337913009_Trends_in_home_automation_systems_and_protocols) (дата звернення: 21.04.2025).
63. Singh P., Chotalia K., Pingale S., Kadam S. A Review Paper on Smart GSM Based Home Automation System. *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2016. Vol. 3. Pp. 1838–1843. URL: <https://www.irjet.net/archives/V3/i4/IRJET-V3I4364.pdf> (дата звернення: 21.04.2025).

64. Alliance E. TEF 2013—'The Future of Ethernet' Keynote Videos—Ethernet Alliance. URL: <http://ethernetalliance.org/tef-2013-the-future-of-ethernet-keynote/> (дата звернення: 22.04.2025).
65. Raza S., Misra P., He Z., Voigt T. Building the Internet of Things with Bluetooth Smart. *Ad. Hoc. Netw.* 2017. Vol. 57. Pp. 19–31. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1570870516302050> (дата звернення: 22.04.2025).
66. Chan M., Campo E., Estève D., & Fourniols J. Y. Smart homes - current features and future perspectives. *Maturitas.* 2009. Vol. 64(2). P. 90. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19729255/><sup>2</sup> (дата звернення: 23.04.2025).
67. Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials.* 2015. Vol. 17, no. 4. Pp. 2347–2376. DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7123563> (дата звернення: 24.04.2025).
68. Jiang H.; Zhang, X.; Gao, J.; Guo, N. Dielectric and AC Breakdown Properties of SiO<sub>2</sub>/MMT/LDPE Micro–Nano Composites. *Energies* 2021, 14, 1235. URL: <https://doi.org/10.3390/en14051235> (дата звернення: 24.04.2025).
69. Kushalnagar N., et al. "IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, and Problem Statement." RFC 4919, IETF, 2007. URL: RFC 4919.
70. Ferreira H.C., et al. *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines.* ISBN: 978-1-119-95628-0.
71. Nedashkivskyi O.L., Zhurakovskiy B.Yu., Tarbaiev S.I. *Tekhnolohiia PLC ta yii perspektyvy na rynku shyrokosmuhovoho abonentskoho dostupu [PLC technology and its prospects in the broadband subscriber access market]*. Kyiv: State University of Telecommunications; 2014. 32.973.202.
72. Hänsch K. et al. An ISO/IEC 15118 conformance testing system architecture. *2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition*, National

Harbor, MD, USA, 2014. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM.2014.6938863. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6938863> (дата звернення: 25.04.2025).

73. MODBUS Application Protocol Specification. URL: [https://modbus.org/docs/Modbus\\_Application\\_Protocol\\_V1\\_1b3.pdf](https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf)<sup>3</sup> (дата звернення: 25.04.2025).

74. Tomar B., Kumar N. PLC and SCADA based Industrial Automated System. *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, Bangluru, India, 2020. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/INOCON50539.2020.9298190. URL: [https://www.researchgate.net/publication/385189359\\_PLC\\_Scada\\_Based\\_Automation\\_for\\_Smart\\_Juice\\_Manufacturing\\_Process](https://www.researchgate.net/publication/385189359_PLC_Scada_Based_Automation_for_Smart_Juice_Manufacturing_Process) (дата звернення: 25.04.2025).

75. Guo Y.P., Cui Q. PLC-based automatic control of food production line. *Adv Mater Res.* 2012. Vol. 482-484. Pp. 2214–2217. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.482-484.2214.

76. M. S and P. Sivraj, "Development of Communication Simulator for Electric Vehicle Charging following ISO 15118," *2022 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference (NKCon)*, Vijaypur, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/NKCon56289.2022.10126833. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10126833> (дата звернення: 27.04.2025).

77. Nguyen T.V., Petit P., Maufay F., Aillerie M., Charles J.P. Powerline communication (PLC) on HVDC bus in a renewable energy system. *Energy Procedia.* 2013. Vol. 36. Pp. 657–666. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.076. URL: [https://www.researchgate.net/publication/275533679\\_Powerline\\_communication\\_PLC\\_on\\_HVDC\\_bus\\_in\\_a\\_renewable\\_energy\\_system](https://www.researchgate.net/publication/275533679_Powerline_communication_PLC_on_HVDC_bus_in_a_renewable_energy_system) (дата звернення: 27.04.2025).

78. URL: [https://rozetka.com.ua/ua/tp-link-tl-pa7017-kit/p337199449/?gad\\_source=1&gad\\_campaignid=16901254244&gclid=0AAAAADIXhI6tw10yqHhMPJDVGdK3LFta9&gclid=Cj0KCQjw0LDBBhCnARIsAMpYlApKDqxVLJW0HSfzvDv9-](https://rozetka.com.ua/ua/tp-link-tl-pa7017-kit/p337199449/?gad_source=1&gad_campaignid=16901254244&gclid=0AAAAADIXhI6tw10yqHhMPJDVGdK3LFta9&gclid=Cj0KCQjw0LDBBhCnARIsAMpYlApKDqxVLJW0HSfzvDv9-)

[J0uDMIV\\_uQBuD7sAIPKerwdDYR5uLxQXgIaAqIuEALw\\_wcB](#) (дата звернення: 27.04.2025).

79. URL: <https://ntools.com.ua/uk/tp-link-tl-pa7017-kit-adaptery> (дата звернення: 27.04.2025).

80. URL: [https://privod.kiev.ua/programmiruemyj\\_kontroller\\_siemens\\_simatic\\_s7-1200\\_cpu\\_1211c\\_6di\\_4do\\_2ai\\_0-10v\\_dc\\_20\\_4-28\\_8v\\_dc\\_program\\_data\\_memory\\_50\\_kb](https://privod.kiev.ua/programmiruemyj_kontroller_siemens_simatic_s7-1200_cpu_1211c_6di_4do_2ai_0-10v_dc_20_4-28_8v_dc_program_data_memory_50_kb) (дата звернення: 01.05.2025).

81. URL: <https://abr.com.ua/ru/simatic-s7-1200-kompaktnoe-tspu-cpu-1214c-dc-dc-rlj-vstroennyye-vhodyi-vyihodyi-14-di-24-v-10-do-rele-2-a-2-ai-0-10-v-blok-pytanyya-20-4-28-8-v-pamyat-programmyi-dannyih-75-kb-6es7214-1hg40-0xb0-ru> (дата звернення: 01.05.2025).

82. URL: <https://www.netgear.com/images/datasheet/networking/powerline/plp2000.pdf> (дата звернення: 05.05.2025).

83. URL: <https://estore.st.com/en/products/interfaces-and-transceivers/power-line-transceivers/st8500.html> (дата звернення: 09.05.2025).

84. URL: <https://topcity.com.ua/shop/programne-zabezpechennya-step-7/153314> (дата звернення: 09.05.2025).

85. URL: [https://www.amazon.com/dp/B0778Y6K6N?th=1&linkCode=sll&tag=netgear017-20&linkId=c86586852d25f05699051f13c201c04a&language=en\\_US&ref=as\\_li\\_ss\\_tl](https://www.amazon.com/dp/B0778Y6K6N?th=1&linkCode=sll&tag=netgear017-20&linkId=c86586852d25f05699051f13c201c04a&language=en_US&ref=as_li_ss_tl) (дата звернення: 10.05.2025).

## ДОДАТКИ

Додаток 1. Вплив імпульсних завад (LED-освітлення, частотні приводи)  
на пропускну здатність NB-PLC

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

def dbm_to_watts(dbm):
 return 10 ** ((dbm - 30) / 10)

def shannon_capacity(bandwidth_hz, signal_power_watts, noise_power_watts):
 snr = signal_power_watts / noise_power_watts
 return 0 if snr <= 0 else bandwidth_hz * np.log2(1 + snr)

Параметри
bandwidth = 150_000 # 150 кГц
signal_power_dbm = -50
noise_power_dbm_per_hz = -140
signal_power_w = dbm_to_watts(signal_power_dbm)
noise_power_w_per_hz = dbm_to_watts(noise_power_dbm_per_hz)
total_gaussian_noise_w = noise_power_w_per_hz * bandwidth

capacity_max_bps = shannon_capacity(bandwidth, signal_power_w,
total_gaussian_noise_w)

impulse_noise_dbm = np.arange(-90, -59, 5)
capacity_kbps = []
capacity_relative_percent = []

for noise_dbm in impulse_noise_dbm:
 impulse_noise_w = dbm_to_watts(noise_dbm)
 total_noise_w = total_gaussian_noise_w + impulse_noise_w
 capacity_bps = shannon_capacity(bandwidth, signal_power_w, total_noise_w)
 capacity_kbps.append(capacity_bps / 1000)
 capacity_relative_percent.append((capacity_bps / capacity_max_bps) * 100)

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(impulse_noise_dbm, capacity_relative_percent, marker='o', color='blue')
plt.xlabel('Потужність імпульсного шуму (дБм)')
plt.ylabel('Пропускна здатність каналу (% від теоретичного максимуму)')
plt.title('Рис. 4.6 – Вплив імпульсного шуму на пропускна здатність NB-PLC каналу')
plt.grid(True)
plt.ylim(60, 101)
plt.tight_layout()
plt.savefig("Рисунок_4_6_Capacity_vs_Noise_Percent_UPDATED.png", dpi=300)

```

```

plt.close()

table_data = pd.DataFrame({
 "Потужність імпульсного шуму (дБм)": impulse_noise_dbm,
 "Пропускна здатність (кбіт/с)": np.round(capacity_kbps, 2),
 "% від теоретичного максимуму": np.round(capacity_relative_percent, 2)
})
table_data.index = [f"{i+1}" for i in range(len(table_data))]

Збереження таблиці як зображення
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 3))
ax.axis('off')
tbl = ax.table(
 cellText=table_data.values,
 colLabels=table_data.columns,
 rowLabels=table_data.index,
 loc='center',
 cellLoc='center'
)
tbl.scale(1, 1.5)
plt.title("Таблиця 4.2 – Вплив імпульсного шуму на пропускну здатність NB-PLC",
fontsize=10)
plt.tight_layout()
plt.savefig("Таблиця_4_2_ImpulseNoiseTable_UPDATED.png", dpi=300)
plt.close()

```

Пояснення елементів коду та формул:

- `dbm_to_watts(dbm)` та `watts_to_dbm(watts)`: Функції для конвертації потужності між логарифмічною шкалою дБм та лінійною шкалою Ватт. Формула:  $P_W = 10^{((P_{dBm}-30)/10)}$ .

- `shannon_capacity(bandwidth_hz, signal_power_watts, noise_power_watts)`: Реалізує теорему Шеннона-Гартлі для розрахунку теоретичної максимальної пропускну здатності каналу:  $C=B \cdot \log_2(1 + S/N)$  де:

- C – пропускна здатність каналу (біт/с),
- B – ширина смуги пропускання каналу (Гц),
- S – середня потужність прийнятого сигналу (Ватт),
- N – середня потужність шуму в каналі (Ватт).

- `signal_power_dbm, base_noise_dbm`: Вхідні параметри, що визначають потужність корисного сигналу та базовий рівень шуму.

- `impulse_noise_powers_dbm`: Список значень потужності імпульсного шуму, що імітує вплив драйверів LED та частотних приводів.
- `total_noise_w = base_noise_w + impulse_noise_w`:  
Ключовий момент – потужності шумів у Ваттах додаються для отримання сумарної потужності шуму, яка потім використовується для розрахунку SNR.

## Додаток 2. Типи шуму та їх мінімізація

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
from scipy.special import erfc

--- Функції ---
def dbm_to_watts(dbm):
 return 10 ** ((dbm - 30) / 10)

def q_function(x):
 return 0.5 * erfc(x / np.sqrt(2))

def calculate_ber_bpsk_awgn(snr_linear):
 return q_function(np.sqrt(2 * snr_linear))

def shannon_capacity(bandwidth_hz, signal_power_watts, noise_power_watts):
 snr = signal_power_watts / noise_power_watts
 return 0 if snr <= 0 else bandwidth_hz * np.log2(1 + snr)

--- Початкові параметри ---
bandwidth = 150_000 # Гц
signal_power_dbm = -50
noise_power_dbm_per_hz = -140
filter_attenuation_db = 20

--- Перетворення потужностей ---
signal_power_w = dbm_to_watts(signal_power_dbm)
noise_power_w_per_hz = dbm_to_watts(noise_power_dbm_per_hz)
total_gaussian_noise_w = noise_power_w_per_hz * bandwidth

--- Діапазон імпульсного шуму ---
impulse_noise_levels_dbm = np.arange(-90, -59, 3)

--- Списки для зберігання результатів ---
ber_list = []
capacity_list = []
filtered_ber_list = []
filtered_capacity_list = []
data_rows = []

--- Розрахунок ---
for noise_dbm in impulse_noise_levels_dbm:
 impulse_noise_w = dbm_to_watts(noise_dbm)
 total_noise_w = total_gaussian_noise_w + impulse_noise_w
 snr = signal_power_w / total_noise_w
 ber = calculate_ber_bpsk_awgn(snr)
 capacity = shannon_capacity(bandwidth, signal_power_w, total_noise_w)

```

```

З фільтром
impulse_filtered_w = dbm_to_watts(noise_dbm - filter_attenuation_db)
total_filtered_noise_w = total_gaussian_noise_w + impulse_filtered_w
snr_filt = signal_power_w / total_filtered_noise_w
ber_filt = calculate_ber_bpsk_awgn(snr_filt)
capacity_filt = shannon_capacity(bandwidth, signal_power_w,
total_filtered_noise_w)

Збереження в списки
ber_list.append(ber)
capacity_list.append(capacity / 1e3)
filtered_ber_list.append(ber_filt)
filtered_capacity_list.append(capacity_filt / 1e3)

Дані для таблиці
data_rows.append([
 noise_dbm,
 round(capacity / 1e3, 2),
 f"{ber:.1e}",
 round(capacity_filt / 1e3, 2),
 f"{ber_filt:.1e}"
])

--- Побудова графіків ---
plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(impulse_noise_levels_dbm, capacity_list, label='Без фільтра',
marker='o')
plt.plot(impulse_noise_levels_dbm, filtered_capacity_list, label='З LC-фільтром',
marker='s')
plt.xlabel('Потужність імпульсного шуму (дБм)')
plt.ylabel('Пропускна здатність каналу (кбіт/с)')
plt.title('Рис. 4.7 – Вплив імпульсного шуму на пропускну здатність NB-PLC
каналу')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("Рисунок_4_7_Capacity_vs_ImpulseNoise.png", dpi=300)

plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.semilogy(impulse_noise_levels_dbm, ber_list, label='Без фільтра', marker='o')
plt.semilogy(impulse_noise_levels_dbm, filtered_ber_list, label='З LC-фільтром',
marker='s')
plt.xlabel('Потужність імпульсного шуму (дБм)')
plt.ylabel('Ймовірність помилки (BER)')
plt.title('Рис. 4.8 – BER для BPSK при різних рівнях імпульсного шуму')
plt.grid(True, which='both')
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("Рисунок_4_8_BER_vs_ImpulseNoise.png", dpi=300)

```

```

--- Таблиця результатів (збереження у PNG) ---
df_table = pd.DataFrame(data_rows, columns=[
 "Імпульсний шум (дБм)",
 "Пропускна здатність без фільтра (кбіт/с)",
 "BER без фільтра",
 "Пропускна здатність з фільтром (кбіт/с)",
 "BER з фільтром"
])
df_table.index = [f"{i+1}" for i in range(len(df_table))]

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 4))
ax.axis('off')
table = ax.table(
 cellText=df_table.values,
 colLabels=df_table.columns,
 rowLabels=df_table.index,
 cellLoc='center',
 loc='center'
)
table.scale(1.2, 1.5)
plt.title("Таблиця 4.2 – Вплив фільтрації на пропускну здатність каналу та BER для NB-PLC", fontsize=10)
plt.tight_layout()
plt.savefig("Таблиця_4_2_Capacity_and_BER_Filtered_vs_Unfiltered.png", dpi=300)
plt.close()

```

Пояснення елементів коду та формул:

- `q_function(x)` та

`calculate_ber_bpsk_awgn(snr_linear)`: Розраховують Bit Error Rate (BER) для модуляції BPSK в каналі з адитивним білим гаусовим шумом (AWGN). Формула для BER BPSK:  $BER = Q\sqrt{(2 \cdot SNR_{lin})}$  де  $Q(x)$  - це Q-функція, а  $SNR_{lin}$  - відношення сигнал/шум в лінійному масштабі.

- `base_gaussian_noise_dbm_per_hz`: Спектральна щільність потужності гаусового шуму. Загальна потужність гаусового шуму

$$N_g = N_0 \cdot B.$$

- `impulse_noise_power_dbm_unfiltered`: Потужність імпульсного шуму до фільтрації.

- Моделювання фільтра: У коді фільтр симулюється шляхом зменшення потужності імпульсного шуму на `filter_attenuation_db`

(наприклад, 20 дБ).  $\text{impulse\_noise\_w\_filtered} = \text{dbm\_to\_watts}(\text{impulse\_noise\_power\_dbm\_unfiltered} - \text{filter\_attenuation\_db})$ . Це спрощення; реальний фільтр мав би частотну характеристику.

- $\text{total\_noise\_unfiltered\_w}$  та  $\text{total\_noise\_filtered\_w}$ : Сумарна потужність шуму розраховується як сума потужності гаусового та (відфільтрованого або невідфільтрованого) імпульсного шуму.

- Знову використовується теорема Шеннона-Гартлі для оцінки ємності каналу.

## Додаток 3. Вибір техніки модуляції

```

import numpy as np
from scipy.special import erfc
import matplotlib.pyplot as plt

def q_function(x):
 return 0.5 * erfc(x / np.sqrt(2))

def ber_bpsk(eb_n0_linear):
 """BER для BPSK."""
 return q_function(np.sqrt(2 * eb_n0_linear))

def ber_qpsk(eb_n0_linear):
 return q_function(np.sqrt(2 * eb_n0_linear))

def ber_16qam(es_n0_linear):
 if es_n0_linear < 10:
 return 0.1
 elif es_n0_linear < 20:
 return 1e-3
 return 3/4 * q_function(np.sqrt((4/5) * es_n0_linear)) # Дуже грубе
наближення

snr_db_range = np.arange(0, 21, 1)
symbol_rate = 1000

print(f"{'SNR (dB)':<10} | {'Modulation':<10} | {'BER':<12} | {'Throughput
(kbps)':<20}")
print("-" * 65)

for snr_db in snr_db_range:
 snr_linear = 10**(snr_db / 10)

 eb_n0_bpsk = snr_linear
 ber_b = ber_bpsk(eb_n0_bpsk)
 throughput_b = symbol_rate * 1 / 1000
 if snr_db < 5 and ber_b > 0.01:
 throughput_b = 0
 print(f"{'snr_db':<10} | {'BPSK':<10} | {'ber_b':<12.2e} |
{throughput_b:<20.2f}")

 eb_n0_qpsk = snr_linear / 2
 ber_q = ber_qpsk(eb_n0_qpsk)
 throughput_q = symbol_rate * 2 / 1000
 if snr_db < 10 and ber_q > 0.01:

```

```

 throughput_q = 0
 print(f"{snr_db:<10} | {'QPSK':<10} | {ber_q:<12.2e} |
{throughput_q:<20.2f}")

 es_n0_16qam = snr_linear

 if snr_db < 10: ber_16 = 0.5
 elif snr_db < 15: ber_16 = 5e-2
 else: ber_16 = ber_16qam(es_n0_16qam)

 throughput_16 = symbol_rate * 4 / 1000
 if snr_db < 15 and ber_16 > 0.01:
 throughput_16 = 0
 print(f"{snr_db:<10} | {'16-QAM':<10} | {ber_16:<12.2e} |
{throughput_16:<20.2f}")
 print("-" * 65)

 import numpy as np
 import matplotlib.pyplot as plt
 from scipy.special import erfc

=== Допоміжні функції ===

def q_function(x):
 return 0.5 * erfc(x / np.sqrt(2))

def ber_bpsk(eb_n0_linear):
 return q_function(np.sqrt(2 * eb_n0_linear))

def ber_qpsk(eb_n0_linear):
 return q_function(np.sqrt(2 * eb_n0_linear))

def ber_16qam(es_n0_linear):
 if es_n0_linear < 10:
 return 0.5
 elif es_n0_linear < 15:
 return 5e-2
 return 3/4 * q_function(np.sqrt((4/5) * es_n0_linear))

=== Параметри ===
table_data = []
column_headers = ['SNR (dB)', 'Modulation', 'BER', 'Throughput (kbps)']
symbol_rate = 1000
snr_db_range_table = np.arange(0, 21, 5)
snr_db_range = np.arange(0, 21, 1)
symbol_rate = 1000 # 1 ксимвол/с

ber_bpsk_list, ber_qpsk_list, ber_16qam_list = [], [], []
tp_bpsk_list, tp_qpsk_list, tp_16qam_list = [], [], []

```

```

for snr_db in snr_db_range:
 snr_linear = 10**(snr_db / 10)

 # BPSK
 eb_n0_bpsk = snr_linear
 ber_b = ber_bpsk(eb_n0_bpsk)
 ber_bpsk_list.append(ber_b)
 tp_bpsk_list.append(symbol_rate * 1 / 1000 if ber_b < 0.01 else 0)

 # QPSK
 eb_n0_qpsk = snr_linear / 2
 ber_q = ber_qpsk(eb_n0_qpsk)
 ber_qpsk_list.append(ber_q)
 tp_qpsk_list.append(symbol_rate * 2 / 1000 if ber_q < 0.01 else 0)

 # 16-QAM
 es_n0_16qam = snr_linear
 if snr_db < 10: ber_16 = 0.5
 elif snr_db < 15: ber_16 = 5e-2
 else: ber_16 = ber_16qam(es_n0_16qam)
 ber_16qam_list.append(ber_16)
 tp_16qam_list.append(symbol_rate * 4 / 1000 if ber_16 < 0.01 else 0)

for snr_db in snr_db_range_table:
 snr_linear = 10**(snr_db / 10)

 # BPSK
 eb_n0_bpsk = snr_linear
 ber_b = ber_bpsk(eb_n0_bpsk)
 throughput_b = symbol_rate * 1 / 1000
 if snr_db < 5 and ber_b > 0.01: throughput_b = 0
 table_data.append([snr_db, 'BPSK', f'{ber_b:.2e}', f'{throughput_b:.2f}'])

 # QPSK
 eb_n0_qpsk = snr_linear / 2
 ber_q = ber_qpsk(eb_n0_qpsk)
 throughput_q = symbol_rate * 2 / 1000
 if snr_db < 10 and ber_q > 0.01: throughput_q = 0
 table_data.append([snr_db, 'QPSK', f'{ber_q:.2e}', f'{throughput_q:.2f}'])

 # 16-QAM
 es_n0_16qam = snr_linear
 if snr_db < 10: ber_16 = 0.5
 elif snr_db < 15: ber_16 = 5e-2
 else: ber_16 = ber_16qam(es_n0_16qam)
 throughput_16 = symbol_rate * 4 / 1000
 if snr_db < 15 and ber_16 > 0.01: throughput_16 = 0
 table_data.append([snr_db, '16-QAM', f'{ber_16:.2e}',
f'{throughput_16:.2f}'])

```

```

fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 6))
ax.axis('tight')
ax.axis('off')
table = ax.table(cellText=table_data, colLabels=column_headers, cellLoc='center',
loc='center')
table.auto_set_font_size(False)
table.set_fontsize(10)
table.scale(1.2, 1.2)

fig.suptitle('Залежність BER та пропускної здатності від SNR', fontsize=16)
plt.show()
=== Побудова графіків ===

Графік 1: BER vs SNR
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.semilogy(snr_db_range, ber_bpsk_list, label='BPSK', marker='o')
plt.semilogy(snr_db_range, ber_qpsk_list, label='QPSK', marker='s')
plt.semilogy(snr_db_range, ber_16qam_list, label='16-QAM', marker='^')
plt.xlabel('SNR (дБ)')
plt.ylabel('Ймовірність бітової помилки (BER)')
plt.title('Рис. 4.9 – BER для BPSK, QPSK та 16-QAM залежно від SNR')
plt.grid(True, which='both')
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("Рисунок_4_9_BER_vs_SNR.png", dpi=300)

Графік 2: Пропускна здатність (Throughput) vs SNR
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(snr_db_range, tp_bpsk_list, label='BPSK', marker='o')
plt.plot(snr_db_range, tp_qpsk_list, label='QPSK', marker='s')
plt.plot(snr_db_range, tp_16qam_list, label='16-QAM', marker='^')
plt.xlabel('SNR (дБ)')
plt.ylabel('Теоретична пропускна здатність (кбіт/с)')
plt.title('Рис. 4.10 – Пропускна здатність для BPSK, QPSK та 16-QAM')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig("Рисунок_4_11_Throughput_vs_SNR.png", dpi=300)

```

Пояснення елементів коду та формул:

- `ber_bpsk(eb_n0_linear)`, `ber_qpsk(eb_n0_linear)`,  
`ber_16qam(es_n0_linear)`: Функції для розрахунку BER для BPSK,  
QPSK та 16-QAM.

- BPSK:  $BER = Q(\sqrt{2 \cdot E_b/N_0})$

○ QPSK: BER часто апроксимують схожою формулою або  $BER \approx \approx 2Q(\sqrt{E_s/N_0})$  де  $E_b/N_0 = 2E_b/N_0$ . Для простоти, іноді використовують

$Q(\sqrt{2 \cdot E_b/N_0})$ , де  $E_b/N_0 = SNR \left( \frac{\text{біт}}{\text{символ}} \right)$ .

○ 16-QAM: Для M-QAM, BER приблизно  $SER/\log_2(M)$ , де SER (Symbol Error Rate) залежить від  $E_s/N_0$ . У коді наведено дуже грубе наближення для демонстрації тренду: для 16-QAM потрібен значно вищий SNR для досягнення прийняттого BER. Наприклад,  $SER \approx 3Q(\sqrt{SNR_{sym}/5})$  для 16-QAM, де  $SNR_{sym}$  це  $E_s/N_0$ .

- `snr_db_range`: Діапазон значень SNR в децибелах, для яких проводиться симуляція.

- `symbol_rate`: Символьна швидкість передачі.

- Пропускна здатність (Throughput): Розраховується як  $R = \text{SymbolRate} \cdot k$ , де  $k$  – кількість біт на символ (1 для BPSK, 2 для QPSK, 4 для 16-QAM). У коді також є коментар про можливість розрахунку ефективної пропускної здатності  $R_{\text{eff}} = R \cdot (1 - BER)$ , але для спрощення часто розглядають теоретичну  $R$  за умови, що BER є достатньо низьким. У симуляції, якщо BER стає занадто високим для певного SNR, пропускна здатність умовно вважається нульовою, що відображає непридатність модуляції.

- Важливо:  $E_b / N_0$  (відношення енергії на біт до спектральної щільності потужності шуму) пов'язане з SNR (відношення потужності сигналу до потужності шуму) через кількість біт на символ  $k$ :  $SNR = (E_s / N_0) = k \cdot (E_b / N_0)$ .

## Додаток 4. Довжина лінії та пропускна здатність

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def dbm_to_watts(dbm):
 return 10**((dbm - 30) / 10)

def shannon_capacity(bandwidth_hz, signal_power_watts, noise_power_watts):
 snr = signal_power_watts / noise_power_watts
 if snr <= 0: return 0
 capacity_bps = bandwidth_hz * np.log2(1 + snr)
 return capacity_bps

bandwidth = 150000
initial_signal_power_dbm = -50
noise_power_dbm = -115

attenuation_per_100m_db = 5

initial_signal_power_w = dbm_to_watts(initial_signal_power_dbm)
noise_power_w = dbm_to_watts(noise_power_dbm)

line_lengths_m = np.arange(10, 301, 10)

print(f"{'Довжина лінії (м)':<20} | {'Загасання (дБ)':<18} | {'Сигнал на прийм. (дБм)':<25} | {'Пропускна здатність (кбіт/с)':<25}")
print("-" * 100)

capacities_for_plot = []
lengths_for_plot = []
table_data = []
column_headers = ['Довжина лінії (м)', 'Загасання (дБ)', 'Сигнал (дБм)', 'Пропускна здатність (кбіт/с)']
line_lengths_table = np.arange(50, 301, 50)

for length_m in line_lengths_table:
 total_attenuation_db = (length_m / 100) * attenuation_per_100m_db
 received_signal_power_dbm = initial_signal_power_dbm - total_attenuation_db
 received_signal_power_w = dbm_to_watts(received_signal_power_dbm)
 capacity_bps = shannon_capacity(bandwidth, received_signal_power_w, noise_power_w)
 capacity_kbps = capacity_bps / 1000
 table_data.append([
 length_m,
 f'{total_attenuation_db:.2f}',
 f'{received_signal_power_dbm:.2f}',
 f'{capacity_kbps:.2f}'
])
]

```

```

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 4))
ax.axis('tight')
ax.axis('off')
table = ax.table(cellText=table_data, colLabels=column_headers, cellLoc='center',
loc='center')
table.auto_set_font_size(False)
table.set_fontsize(10)
table.scale(1.1, 1.3)

fig.suptitle('Залежність пропускної здатності від довжини лінії', fontsize=16)
plt.show()

for length_m in line_lengths_m:

 total_attenuation_db = (length_m / 100) * attenuation_per_100m_db

 received_signal_power_dbm = initial_signal_power_dbm - total_attenuation_db
 received_signal_power_w = dbm_to_watts(received_signal_power_dbm)

 capacity_bps = shannon_capacity(bandwidth, received_signal_power_w,
noise_power_w)
 capacity_kbps = capacity_bps / 1000

 capacities_for_plot.append(capacity_kbps)
 lengths_for_plot.append(length_m)

 print(f"{length_m:<20} | {total_attenuation_db:<18.2f} |
{received_signal_power_dbm:<25.2f} | {capacity_kbps:<25.2f}")

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(lengths_for_plot, capacities_for_plot, marker='o', linestyle='-',
color='b')
plt.title('Залежність пропускної здатності від довжини лінії')
plt.xlabel('Довжина лінії (м)')
plt.ylabel('Пропускна здатність (кбіт/с)')
plt.grid(True)
plt.show()

print("\nСимуляція для довжин згідно з текстом:")
length_10m_attenuation = (10 / 100) * attenuation_per_100m_db
rx_sig_10m_dbm = initial_signal_power_dbm - length_10m_attenuation
rx_sig_10m_w = dbm_to_watts(rx_sig_10m_dbm)
cap_10m = shannon_capacity(bandwidth, rx_sig_10m_w, noise_power_w) / 1000
print(f"На 10 м: ≈ {cap_10m:.0f} кбіт/с (при загасанні {attenuation_per_100m_db}
дБ/100м)")

length_300m_attenuation = (300 / 100) * attenuation_per_100m_db
rx_sig_300m_dbm = initial_signal_power_dbm - length_300m_attenuation

```

```
rx_sig_300m_w = dbm_to_watts(rx_sig_300m_dbm)
cap_300m = shannon_capacity(bandwidth, rx_sig_300m_w, noise_power_w) / 1000
print(f"На 300 м: ≈ {cap_300m:.0f} кбіт/с (при загасанні
{attenuation_per_100m_db} дБ/100м)")
```

Пояснення елементів коду та формул:

- `initial_signal_power_dbm`: Потужність сигналу на передавачі.
- `noise_power_dbm`: Потужність шуму на вході приймача (припускається постійною для спрощення, хоча шум також може залежати від довжини лінії).
- `attenuation_per_100m_db`: Модель загасання сигналу в кабелі, виражена в дБ на 100 метрів. Це ключовий параметр, що визначає, як швидко слабшає сигнал. Реальне загасання залежить від частоти та типу кабелю.  $A_{total}(L) = A_{unit} \cdot (L / L_{unit})$  де  $A_{total}$  - загальне загасання,  $A_{unit}$  - загасання на одиницю довжини  $L_{unit}$ ,  $L$  - довжина лінії.
- `total_attenuation_db = (length_m / 100) * attenuation_per_100m_db`: Розрахунок загального загасання для заданої довжини лінії.
- `received_signal_power_dbm = initial_signal_power_dbm - total_attenuation_db`: Розрахунок потужності сигналу на вході приймача.
- Знову використовується теорема Шеннона-Гартлі для розрахунку пропускної здатності на основі отриманої потужності сигналу та потужності шуму.