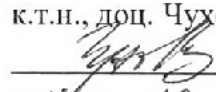


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

УДК 621.3

«Допущено до захисту»

В.о. завідувача кафедри
комп'ютерних технологій у
медицині та телекомунікаціях
к.т.н., доц. Чухов В.В.


« 16 » 12 2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему «Дослідження системи передачі інформації з використанням
електромережі »**

**за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»**

Виконавець роботи
студент 2 курсу, гр.ТРм-21-1


(дата, підпис)

А.О. Петруняк

Керівник роботи
к.т.н., доц.


(дата, підпис)

В.Г. Ципоренко

Житомир
2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної магістерської роботи

**на тему «Дослідження системи передачі інформації з використанням
електромережі»**

Виконав: студент 2 курсу,
групи ТРм-21-1 спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Петруняк А.О.

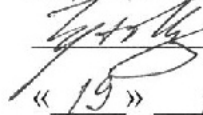
Керівник Ципоренко В.Г.

Рецензент Коломієць Р.О.

Житомир
2022

«Затверджено»

В.о. завідувача кафедри
комп'ютерних технологій у
медицині та телекомунікаціях

 В.В. Чухов
«19» 12 2022 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Петруняк Артем Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження системи передачі інформації з використанням електромережі» від «12» 10 2022 р. № 460/с

2. Мета дослідження: дослідження властивостей та характеристик оптичного кутоміра.

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.):

Дослідити систему передачі цифрових даних з використанням електромережі. Тип лінії передачі – двожильний провід.

5. Основні задачі дослідження:

5.1 Провести огляд і аналіз відомих методів побудови систем передачі даних з використанням електромережі.

5.2 Провести дослідження чинників завадостійкості ситеми.

5.3 Провести дослідження швидкодкості передачі.

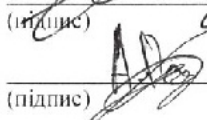
6. Термін подання роботи до захисту 12.12.2022 р.

7. Дата видачі завдання «10» 05 2022 р.

Науковий керівник

Завдання прийняв
до виконання

 В.Г. Ципоренко
(прізвище, ініціали)

 А.О. Петруняк
(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

В даній кваліфікаційній роботі була розглянута та проаналізована технологія передачі інформації з використанням електромережі. Ознайомились з широким набором стандартів передачі інформації, переглянули їх властивості та особливості. В ході дослідження оглянули ефективність застосування ортогональних гармонічних сигналів узагальненого класу в системах передачі. Також розглянемо порівняльну характеристику систем при використанні багатопозиційних сигналів.

ANNOTATION

In this qualification work, the technology of information transmission using the electric network was considered and analyzed. We got acquainted with a wide range of information transfer standards, reviewed their properties and features. In the course of the study, the efficiency of using orthogonal harmonic signals of the generalized class in transmission systems was reviewed. We will also consider the comparative characteristics of systems when using multi-position signals.

РЕФЕРАТ

В даній кваліфікаційній роботі було виконане дослідження системи передачі інформації з використанням електромережі

Кваліфікаційна робота складається з 3 розділів і займає 56 сторінок

В першому розділі проведено огляд літературних джерел, описані методи, переваги та недоліки технологій передачі інформації з використанням електромережі.

В другому розділі проведено аналіз властивостей та реалізації системи передачі інформації

В третьому розділі дослідили системи передач інформації з використанням електромережі, а саме ефективність застосування ортогональних гармонічних сигналів узагальненого класу в системах передачі. А також було досліджено порівняльну характеристику завадостійкості систем при використанні багатопозиційних сигналів

За результатами дослідження зроблено висновки.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	11
1.1 Загальні відомості	11
1.2 Енергоефективність в системах телекомунікації	13
1.3 Класифікації та застосування PLC технологій	15
1.4 Стандартизація передачі даних по електромережах	18
1.5 Міжнародні стандарти	25
2 АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ	30
2.1 Властивості технології PLC	30
2.2 IC Semtech для реалізації PLC-технології	34
3 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧ ІНФОРМАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ	40
3.1 Дослідження ефективності застосування ортогональних гармонічних сигналів узагальненого класу в системах передачі	40
3.2 Порівняльна характеристика завадостійкості систем при використанні багатопозиційних сигналів	47
ВИСНОВКИ	54
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	55

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

PLC – PowerLine Communications

ІКТ – інформаційно-комунікаційних технологій

СП – системи передачі

NPL – вузькосмугові PLC

BPL – широкосмугові PLC

OFDM – сигнали з ортогональним частотним мультиплексуванням

TCC – згорткові турбо-коди

FDM – сигнали з частотним мультиплексуванням

FEC – обернені корегуючі коди

BPSK – двопозиційній фазовій маніпуляції

DBPSK – диференціальній двійковій фазовій маніпуляції

OPERA – Open PLC European Research Alliance

ОГС – ортогональні гармонічні сигнали

ВСТУП

В галузі сучасних телекомунікацій проблема «останньої пори» залишається однією з найактуальніших. Очевидно, що від вживаних рішень для побудови мереж доступу багато в чому залежить успіх бізнесу телекомунікаційних операторів, а також ефективне функціонування відомчих і корпоративних мереж зв'язку.

Волоконно-оптичні лінії зв'язку забезпечують передачу даних з великою швидкістю, але до масового користувача вони доки не доходять, знаходячи широке застосування, як правило, в корпоративному секторі.

На масовому ринку абонентського доступу сьогодні найбільш затребуваною вважається технологія xDSL, яка забезпечує користувачам доступ до мережі Інтернет і іншим інфокомунікаційним послугам по існуючим телефонним лініям. Певну долю в цьому сегменті займають також такі технології як широкосмуговий безпроводний радіодоступ і супутниковий доступ, доступ по мережах кабельного телебачення, пакетна передача даних в мережах стільникового зв'язку 2.5G/3G (GPRS/EDGE/UMTS, CDM CDMA 2000 1X/ EVDO), 4G.

Такі чинники, як широка поширеність електричних мереж, відсутність необхідності дорогого будівництва кабельної каналізації, пробивки стін і прокладення кабелів зв'язку і ін. стимулюють дослідження силових мереж як альтернативного середовища передачі даних і розвиток ще однієї технології широкосмугового доступу – по електромережах. Ця технологія дістала назву PLC – PowerLine Communications.

Мета дослідження: дослідження системи передачі інформації з використанням електромережі

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- Провести огляд і аналіз відомих методів побудови систем передачі даних з використанням електромережі.
- Провести дослідження чинників завадостійкості ситеми.
- Провести дослідження швидкодкості передачі.

Об'єкт дослідження – технологія передачі інформації із застосуванням проводової мережі електроживлення.

Предмет дослідження – методи передачі інформації по електричних мережах

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Загальні відомості

Ідеї використати для передачі інформації вже готову електричну інфраструктуру, що охоплює величезні території, на яких мешкає основна частина населення Землі, народилися в двадцятих роках ХХ сторіччя. У той час в декількох країнах світу почалися дослідження, пов'язані з передачею інформації по лініях електропередач. Ці роботи дозволили створити ряд технологій, що дозволяють передавати телеметричну і іншу низькошвидкісну інформацію по так званих технологічних каналах зв'язку. Донині такі системи успішно експлуатуються в енергетиці і на залізничному транспорті.

Спочатку перші застосування, що використовують передачу по лініях електропередач, були зроблені для управління, захисту ліній електропередач, обслуговування та зарядки. Пізніше кілька факторів, таких як дерегуляція ринку телекомунікацій у США, Європі та Азії, а також зародження та вибуховий ріст Інтернету, який супроводжувався більшим попитом на послуги цифрового зв'язку, зробили PLC технологією, що дозволяла закрити необхідність в термінових задачах забезпечення зв'язку для багатьох інших застосувань.

Перші патенти в цій галузі датуються початком 1900-х років. У 1913 році були виготовлені автоматичні електромеханічні ретранслятори лічильників, а в 1922 році розпочався вузькосмуговий пристрій, коли перші несучі частотні системи почали працювати по лініях високої напруги в діапазоні частот від 15 до 500 кГц для телеметричних систем обробки даних.

Перші системи передачі даних по електричних мережах з'явилися ще в 1930-х роках, в основному вони використовувалися для сигналізації в енергосистемах і на залізницях, характеризуючись дуже низькою пропускною спроможністю. У кінці 1990-х років ряд компаній здійснили перші великі проекти в цій області, проте в процесі експлуатації були виявлені серйозні проблеми, основною з яких була слабка завадозахищеність.

Дослідження в PLC активізувались і набули більшої популярності за останні два десятиліття, оскільки були запропоновані нові методи модулювання та кодування контролю помилок, а також нові стандарти галузевих альянсів та органів стандартизації. Сьогодні нові технології PLC стають перспективними як для споживачів, так і для постачальників енергії. Тому інтерес до PLC охоплює декілька важливих програм, таких як широкосмуговий доступ до Інтернету, програми Smart Grid (вдосконалене вимірювання та контроль, ціноутворення енергії в режимі реального часу, пікове гоління, моніторинг електромережі, розподілене виробництво енергії тощо), внутрішні дротові локальні Районні мережі (ЛВС) для житлових та ділових приміщень, передачі даних у транспортному засобі, літаків, управління світлофорами та вуличного освітлення.

Технологія передачі даних по електромережах отримала належне комерційне застосування тільки на початку поточного століття, а її впровадження і широке поширення обумовлене появою відповідної елементної бази, у тому числі високопродуктивних мікроконтролерів і швидких DSP-процесорів (цифрових сигнальних процесорів), що дозволяють реалізувати складні методи модуляції сигналу і сучасні алгоритми шифрування даних. Це забезпечило не лише високий рівень достовірності при передачі інформації, але і її захист від несанкціонованого доступу. Також важливе значення мало вирішення проблеми стандартизації різних аспектів технології.

Нині основними організаціями і співтовариствами, що регламентують вимоги до PLC пристроями є IEEE, ETSI, CENELEC, OPERA, UPA і HomePlug Powerline Alliance. Остання з них є міжнародним альянсом, що об'єднує близько 80 відомих на ринку телекомунікацій компаній, серед яких Siemens, Motorola, Samsung і Philips. Діяльність альянсу, організованого в 2000 році, спрямована на проведення наукових досліджень і практичних випробувань сумісності облаштувань різних виробників, що використовують

цю технологію, а також на підтримку і просування єдиного стандарту під назвою HomePlug.

1.2 Енергоефективність в системах телекомунікації

Енергоефективність сьогодні визнана однією з найважливіших проблем, з якою наука вже зіткнулася найближчим часом. Так, дійсно, енергія відіграє важливу роль у нашому повсякденному житті, забезпечуючи опалення, освітлення, мобільність та спілкування. Однак, незважаючи на те, що вона може багато в чому покращити наші умови життя, існує різноманітний екологічний, економічний та соціальний негативний вплив, пов'язаний з великим та неефективним використанням енергії, наприклад, викидами парникових газів, забрудненням повітря або високим рівнем забруднення. експлуатаційні витрати на енергію. Для вирішення цих проблем останніми роками були спрямовані цінні зусилля щодо підвищення енергоефективності, тобто зменшення кількості енергії, необхідної для надання продуктів та послуг, з основною метою економії грошей та захисту навколишнього середовища.

На частку сектору інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) припадає приблизно від 2% до 10% річного споживання електроенергії у світі, зростаючи з 16% до 20% на рік, і становить близько 2% загальної кількості викидів вуглецю. Крім того, підраховано, що телекомунікаційні мережі відповідають за велику кількість цих відсотків.. Усвідомлюючи важливий вплив сектору ІКТ на споживання енергії та викиди парникових газів, різні співпраці та ініціативи урядових та наукових кіл вживають заходів для підвищення енергоефективності мереж ІКТ. Ці ініціативи охоплюють кілька бездротових та дротових технологій, серед яких є технологія Power Line Communications (PLC). Технологія PLC, яка використовує електричну мережу як середовище передачі, є телекомунікаційною технологією з довгою історією виникнення, широким спектром застосувань та реалізацій. До теперішнього часу більше уваги приділяється збільшенню швидкості передачі даних у ПЛК, тоді як енергоефективність досі не вивчалася дуже

сильно. Завдяки швидкому розвитку технології PLC, енергетична ефективність, безсумнівно, є пріоритетом для проектування майбутніх систем PLC.

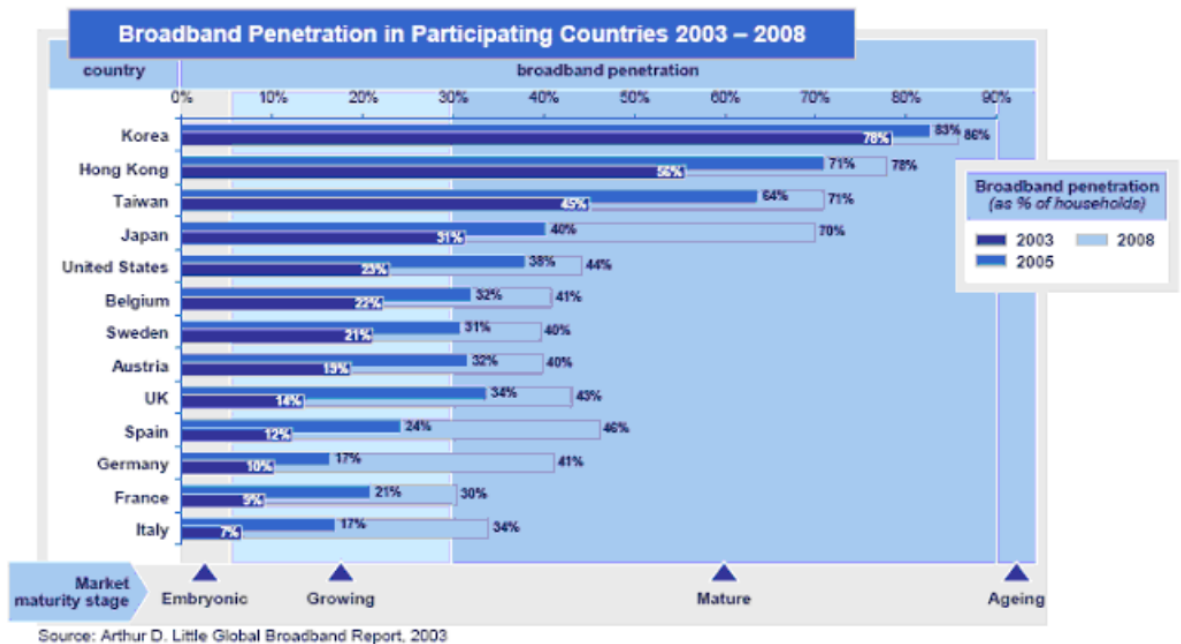


Рисунок 1 – Проникнення широкосмугового доступу 2003-2008 роки

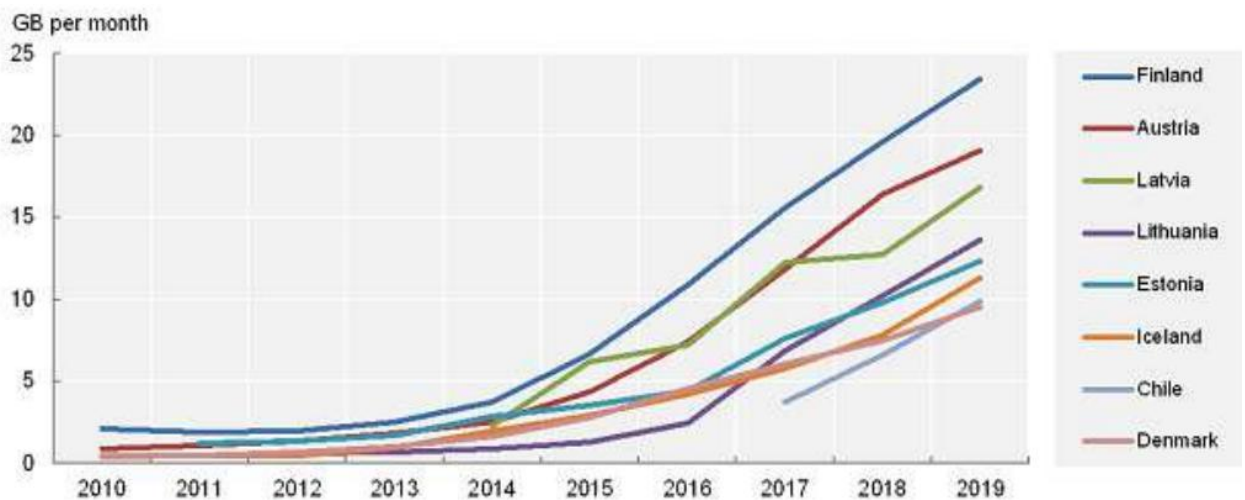


Рисунок 2 – Фактичне проникнення широкосмугового доступу 2010-2019 роках

Як видно на рисунках 1 та 2, в світі (2003-2008 роки та 2010-2019 роки) має місце стрімке насичення ринку послугами широкосмугового доступу. Причому є країни, як Корея, Тайвань де зростання вже наблизилось до свого максимуму по насиченню, так є країни, які тільки почали входити в процес насичення телекомунікаційними мережами – Чілі, Ісландія, Естонія.

Передача інформації і організація живлення по одних і тих же дротах досить ефективно використовується в різних застосуваннях. Приміром, можна згадати стандартні телефонні лінії або Ethernet-мережі, що виконують підключення видалених вузлів за допомогою технології PoE (Power over Ethernet), при якій живлення здійснюється по окремих жилах кабелю зв'язку.

Проте у більшості таких рішень є очевидний недолік: усі вони в загальному випадку вимагають проведення монтажних робіт, витрати на які нерідко складають велику частину вартості наладки мережі. Більше того, є ряд ситуацій, при яких прокладення нових кабелів укряй небажане або навіть неможливе, — прикладом таких ситуацій є нещодавно закінчений ремонт, після якого несподівано з'ясовується, що необхідно прокладати додаткові дроти для комп'ютерних мереж, або орендований офіс з непередбаченим каналом виходу в Інтернет.

У цих випадках майже завжди можна обмежитися існуючою інфраструктурою, а саме скористатися наявною практично в кожному приміщенні електропроводкою для організації порівняно швидкого і надійного каналу зв'язку, розгалуженого по усій будівлі.

Телекомунікаційна технологія PLC, що базується на застосуванні силових електромереж для інформаційного обміну шляхом накладення корисного сигналу поверх стандартного змінного струму частотою 50 або 60 Гц, відрізняється простотою реалізації і оперативністю монтажу пристроїв на її основі.

1.3 Класифікації та застосування PLC технологій

В залежності від використовуваної смуги частот, технології PLC поділяються на вузькосмугові (NPL (Narrowband PLC)) (9...140 кГц) і широкосмугові (BPL (Broadband PLC)) (1,8...100 МГц).

Вузькосмугові PLC (Narrowband PLC (NPL)).

Системи передачі (СП) за технологіями NPL функціонують у діапазоні частот 9...140 кГц. Цей діапазон ділиться на три групи: А (9...95 кГц), В (95...125 кГц) та С (125...140 кГц).

Діапазон А призначений для використання підприємствами електроживлення та, як правило, застосовується для реалізації так званих енергетичних послуг, зокрема, для організації сервісів віддаленого контролю за кількістю електроенергії, використаної домогосподарством.

Діапазони В (95...125 кГц) та С (125...140 кГц) призначені для приватного використання, в основному, для керування «розумним будинком».

Швидкість передавання даних, яку здатні забезпечити СП NPL на сьогодні, сягає кількох сотень кілобіт на секунду. Максимальна відстань між модемами може досягати 1 км.

Сферою застосування СП NPL є централізований контроль за пристроями домашньої або офісної автоматизації, підключеними до електромережі, на кшталт систем освітлення, сигналізації, опалення, кондиціювання повітря, ліфтів, електричних замків, а також контроль за показниками різноманітних датчиків, розташованих у будівлі (автоматичне зчитування показів лічильників, підключених до електромережі; отримання інформації від датчиків освітленості, руху, задимленості приміщення).

Варіант реалізації мережі NPL показано на рисунк 3.

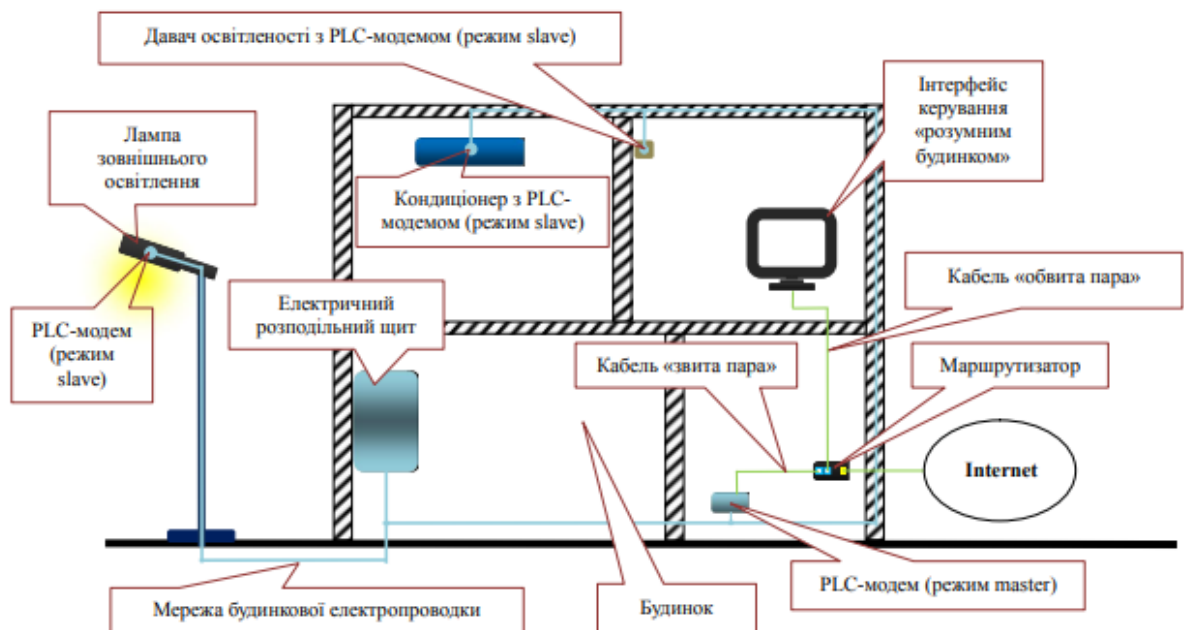


Рисунок 3. – Приклад реалізації мережі NPL

До специфікацій NPL належать: специфікація X-10, стандарт CE-Bus PLC (сучасна назва ANSI/EIA-600); LonWorks PLC (стандарти ANSI/IEC 709-1,2; ISO/IEC 14908-1,3); HomePlug Command and Control, IEEE 1901.2; Рекомендації G.9901, G.9902, G.9903 та G.9904 MCE-T.

Широкопasmові PLC (Broadband PLC (BPL))

СП BPL завдяки використанню широкої смуги частот (1,8...100 МГц) дозволяє організувати передавання даних зі швидкістю до 1 Гбіт/с. Згідно зі стандартом, можуть використовуватися три частотні діапазони: 25 MHz – PB (0...25 МГц); 50 MHz – PB (0...50 МГц) та 100 MHz – PB (0...100 МГц).

Технологія BPL успішно застосовується при розгортанні концепції «розумного будинку». Окрім цього, СП BPL є ефективними при побудові домашніх та офісних комп'ютерних мереж, а також системи відеомоніторингу, забезпеченні високошвидкісного передавання аудіо- і відео.

Варіант реалізації мережі BPL показано на рисунку 4.

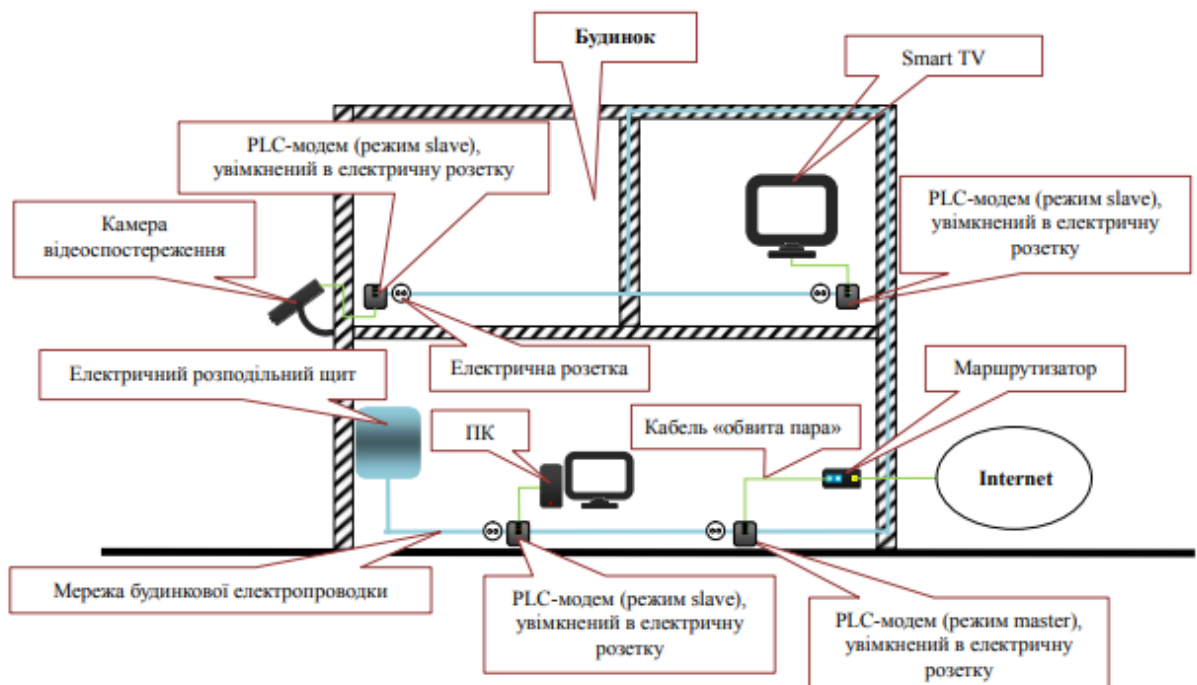


Рисунок 4 – Приклад реалізації мережі BPL

Важливою є можливість спільного використання PLC технології з іншими широкосмуговими технологіями передачі даних, наприклад PLC + WiMAX, PLC + WLAN кт. п.

1.4 Стандартизація передачі даних по електромережах

Єдиного уніфікованого стандарту передачі даних по електромережах досі не існує. Проте, зацікавлені сторони, в першу чергу виробники електронного устаткування, створили організації, покликані врегулювати і упорядкувати ситуацію на ринку PLC устаткування.

Існує кілька міжнародних стандартів, що регулюють PLC. Домінуючими стандартами PLC на ринку є IEEE1901 та (Сектор стандартизації телекомунікацій Міжнародного союзу телекомунікацій) ITU-T G.hn.

З одного боку, готові до продажу продукти, що відповідають IEEE 1901, були сертифіковані або HomePlug Powerline Alliance [HomePlug], в США та Європі, або альянсом HD-PLC, переважно в Японії. З іншого боку, готові до продажу продукти, що відповідають ITU-T G.hn, були сертифіковані альянсом HomeGrid Forum.

Стандарти групи IEEE 1901 розроблено робочою групою IEEE P1901 і визначає технологію високошвидкісного зв'язку ліній електропередач. Стандарти визначають методи як для домашньої мережі, так і для мереж доступу (Інтернет).

Стандарт IEEE 1901.2010 використовує частоти передачі нижче 100 МГц і забезпечує високі швидкості передачі даних до 500 Мбіт / с на фізичному рівні. Він включає два різні фізичні рівні, один заснований на модуляції ортогонального мультиплексування з частотним поділом для швидкого перетворення Фур'є (OFDM). Це головним чином використовується у США та Європі. А другий - на основі модуляції Wavelet OFDM (обмежений для Японії). Стандарт також відповідає обмеженням електромагнітної сумісності, встановленим національними та міжнародними

регуляторними органами, щоб забезпечити успішне співіснування з бездротовими та іншими телекомунікаційними системами.

Основними на сьогодні являються стандарти, створені міжнародним альянсом HomePlug Powerline Alliance, відкритим європейським альянсом OPERA, європейською асоціацією UP A, а також альянсом HD-PLC. Організація HomePlug Powerline Alliance (засновники і учасники : Cisco, Intel, Inellon, Motorola, Texas Instruments, Enecia та ін.) на сьогодні розробила три стандарти:

- HomePlug 1.0 (2001 рік);
- HomePlug AV (2005 рік);
- HomePlug C&C (2007 рік).

HomePlugAV

HomePlug AV - це стандарт, визначений альянсом HomePlug, і в даний час є однією з найбільш реалізованих специфікацій в модемах PLC. Це еволюція свого попередника, HomePlug 1.0, який був випущений альянсом у 2003 році.

HomePlug AV працює в діапазоні частот від 2 до 30 МГц і може досягти швидкості передачі даних до 200 Мбіт/с на фізичному рівні та 150 Мбіт/с на рівні MAC. Він використовує віконну модуляцію OFDM разом із Turbo Convolutional Code (TCC).

Щодо символів OFDM, в HomePlug AV використовуються 1155 несучих від 1,8 МГц до 30 МГц, так що розділення між несучими становить приблизно 24,4 КГц. Однак деякі з цих несучих збігаються з діапазонами радіоаматорських випромінювань і не можуть бути використані, що зменшує загальну кількість використовуваних несучих до 917.

Носії, що використовуються для передачі даних, можуть бути когерентно модульовані за допомогою двійкової фазової маніпуляції (BPSK), квадратурної фазової маніпуляції (QPSK), 16 квадратурної амплітудної модуляції (QAM), 64 QAM, 256 QAM або 1024 QAM. На рівні управління доступом до медіа (MAC) HomePlug AV надає два різні види послуг зв'язку:

- Орієнтована на зв'язок якості обслуговування (QoS). Послуга, заснована на розподілі періодичного розподілу часу (TDMA) належної тривалості, для підтримки вимог QoS вимогливих програм.

- Безпідключна, пріоритетна служба суперечок, заснована на багаторазовому доступі Carrier Sense із запобіганням зіткненням (CSMA / CA), для підтримки як класичних програмних додатків так і програм, які покладаються на пріоритетний QoS.

Функціональна схема обладнання, побудованої відповідно до стандарту HomePlug AV, приведена на рисунку 5.

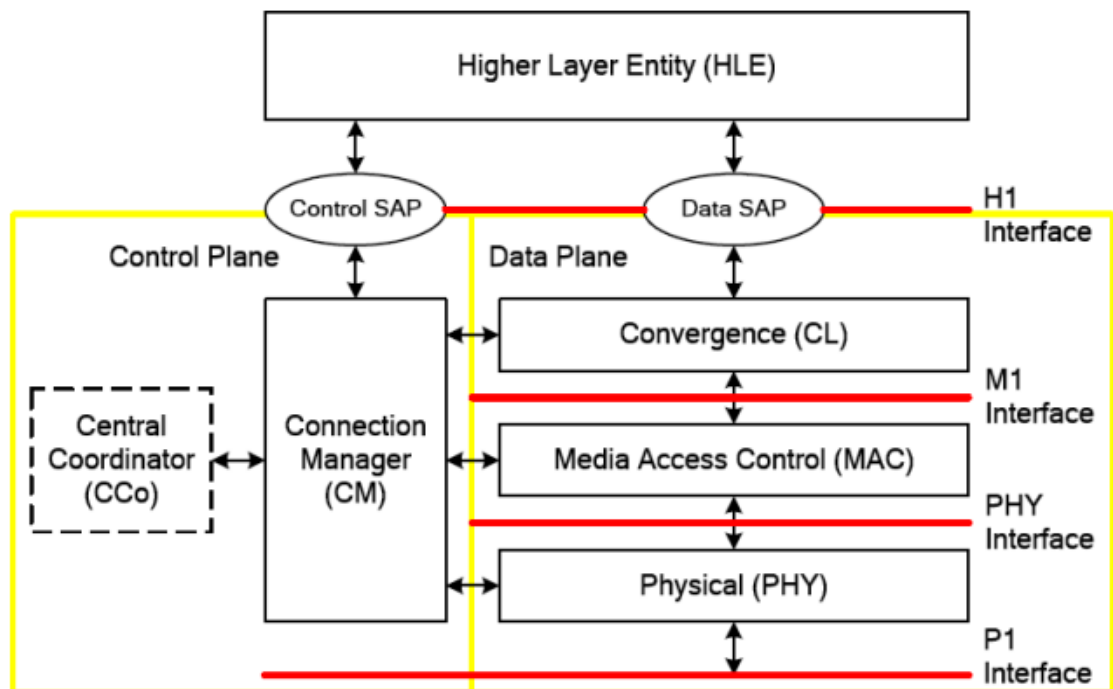


Рисунок 5 – Функціональна схема обладнання, побудованої у відповідності із стандартом HomePlug AV

HomePlug AV2

HomePlug AV2 був представлений у січні 2012 року і призначений для мереж електропередач наступного покоління. У порівнянні з Homeplug AV, HomePlug AV2 надає додаткові ключові функції

- Розширена смуга частот (від 30 до 86 МГц) і швидкість передачі даних до 2 Гбіт / с.
- МІМО з формуванням променя для вищої швидкості передачі даних.

- Режими енергозбереження для підвищення енергоефективності.
- Модуляція вищого порядку (4096 QAM) і, відповідно, вищі швидкості кодування (16/18 кодова швидкість).
- Маршрутизація та повторення, тобто зв'язок між пристроями, які не можуть безпосередньо зв'язуватися з іншими пристроями в мережі PLC, забезпечується за допомогою одного або декількох проміжних вузлів, що діють як повторювачі.

HomePlug AV2 представляє дві методики для оптимізації потужності передачі. Техніка зворотного відключення потужності передачі, яка зменшує спектральну щільність переданої потужності для вибраного набору несучих, коли це може бути зроблено без негативного впливу на продуктивність, і техніка EMC Friendly Power Boost, яка дозволяє передавачеві збільшити потужність передачі на деяких лініях без перевищення нормативних меж.

HomePlug GP

HomePlug Green PHY - це спеціальна спрощена версія стандарту, повністю похідна від HomePlug AV і розроблена для застосування в широкосмугових мережах Smart Grid, для забезпечення розподіленої роботи таких систем розумні електролічильники та моніторинг приладів.

HomePlug GP використовує той самий діапазон частот, техніку модуляції (OFDM) і швидкість коду, що і HomePlug AV. Однак, оскільки для додатків Smart Grid не потрібна висока швидкість передачі даних, HomePlug GP має пікову швидкість лише 10 Мбіт/с через обмеження модуляції несучої OFDM із застосуванням виключно QPSK.

Для модуляції носійних сигналів в HomePlug 1.0 використовуються такі методи:

- BPSK (Binary Phase Shift Keying - двопозиційній фазовій маніпуляції);
- DBPSK (Differential Binary Shift Keying - диференціальній двійковій фазовій маніпуляції);
- DQPSK 1/2, DQPSK 3/4 (Differential Quadrature Phase Shift Keying - диференціальній квадратурній фазовій маніпуляції).

Висока ефективність технології HomePlug 1.0 забезпечується завдяки можливості перерозподілу потужності сигналу в робочій смузі частот, що досягається шляхом:

- адаптації до реальних перешкод за рахунок відключення певних, що піднесуть;
- оперативної зміни способу модуляції частот (DBPSK/DQPSK), що несуть;
- зниження швидкості передачі даних для підвищення завадостійкості (за рахунок зміни типу модуляції на DQPSK 1/2, DQPSK 3/4, DQPSK 1/2).

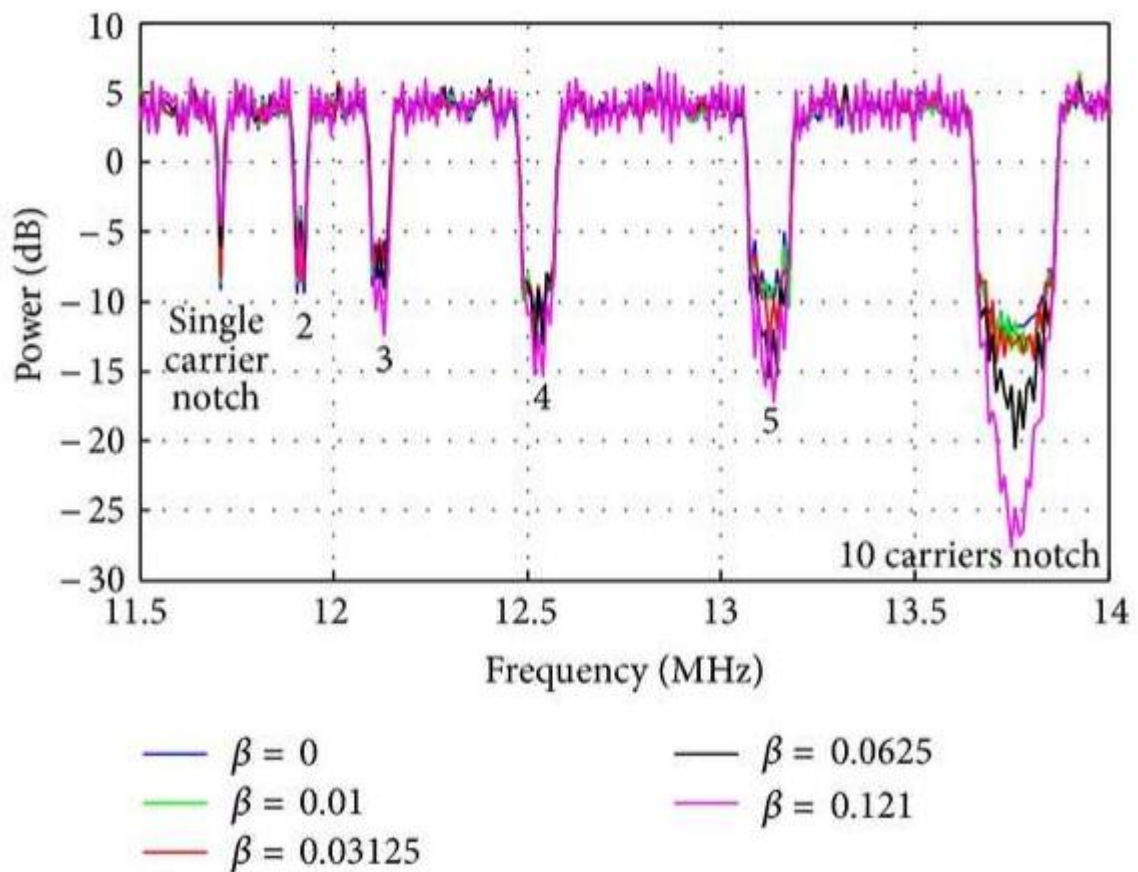


Рисунок 6 – Розподіл спектру в стандарті HomePlug AV

Стандарт HomePlug AV адаптований до високошвидкісної передачі великих об'ємів даних по домашніх електромережах. Діапазон робочих частот в цьому випадку знаходиться в межах від 2 до 28 МГц, кількості тих, що піднесуть до 1155 (рисунок 6), пікова швидкість передачі - 200 Мбіт/с, робоча швидкість 100-150 Мбіт/с. У специфікації HomePlug A V

передбачається використання стандарту шифрування цих AES (Advanced Encryption Standard), в якому застосовуються ключі розміром до 128 біт.

Структурна схема приймача-передавача для реалізації HomePlug AV приведена на рисунку 7

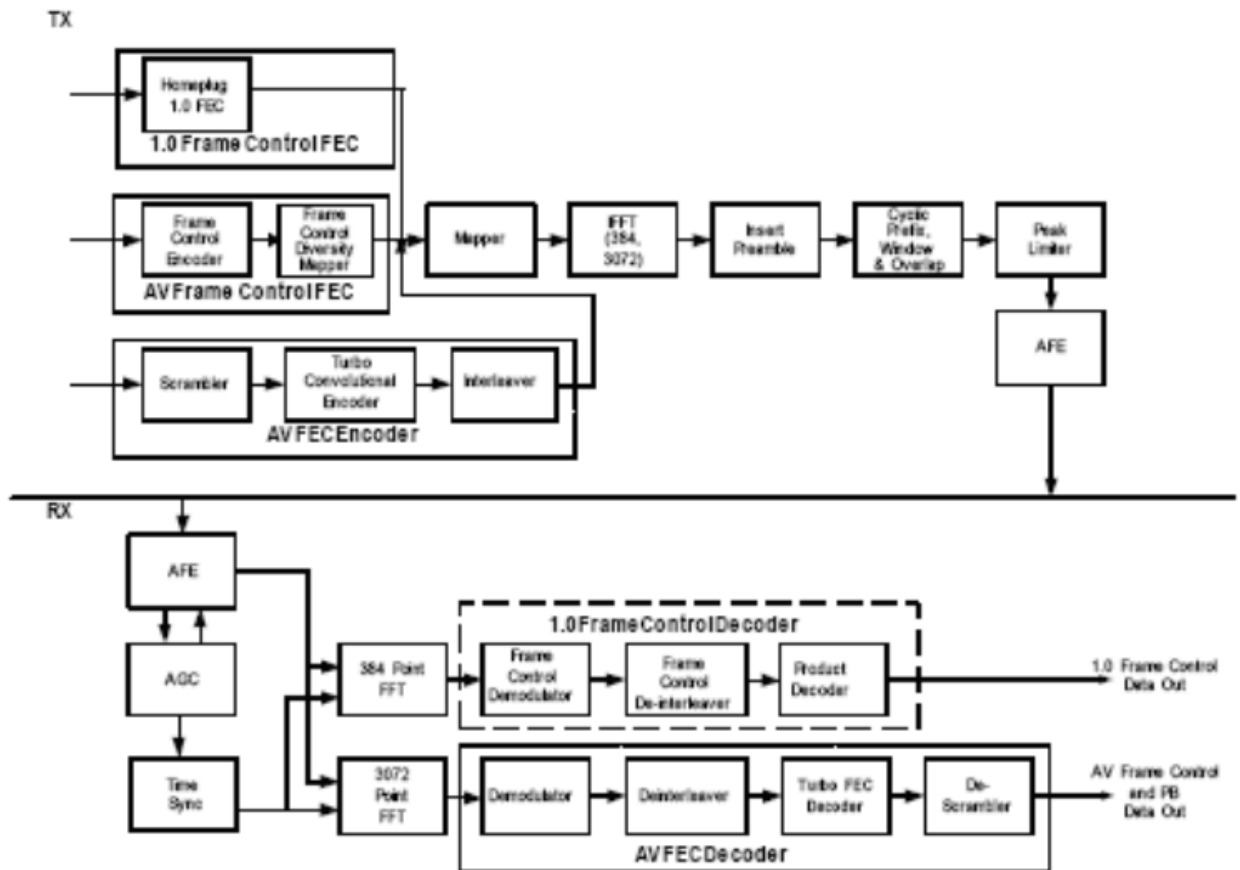


Рисунок 7 – Структурна схема приймача-передавача для реалізації HomePlug AV

Для досягнення теоретично можливої пропускної спроможності рекомендується застосовувати надмірне кодування (FEC, Forward Error Correction) і кодування з використанням надточних турбокодів (TCC, Turbo Convolutional Codes). Стандарт низькошвидкісної передачі даних HomePlug Command and Control (C&C) був створений на основі запропонованою компанією Yitran вузькосмуговій технології передачі даних по електромережі. Така передача орієнтована на використання в системах управління вуличним освітленням, вентиляцією, сигналізацією і т. п.

Таблиця 1 – Порівняння HomePlug, HomePlug AV2 та HomePlug GP

	HomePlug AV	HomePlug AV2	HomePlug GP
Головне застосування	Мультимедіа	Мультимедіа для мереж наступного покоління	Домашні мережі SMARTGRID
Частотний діапазон (МГц)	2-30	1.8-86	2-30
Кількість піднесучих	1155	4096	1155
Тип модуляцій на піднесучих	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM, 1024 QAM	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM, 1024 QAM, 4096 QAM	QPSK only
Код корегування помилок (турбокод), відношення	1/2 16/21	1/2 16/21 16/18	1/2
Фізична швидкість	200 Mbps	2 Gbps	10 Mbps

HomePlug GP і HomePlug AV2 повністю сумісні з HomePlug AV та IEEE P1901, хоча кожна надає окремий набір можливостей, зосереджених на різних аспектах та питаннях, пов'язаних з різними програмами та робочими

середовищами. Порівняльний огляд основних відмінностей між HomePlug AV, HomePlug AV2 та HomePlug GP наведено в таблиці 1.

Продукти сімейства HomePlug є найбільш поширеними на ринку. Характеристики, доступні через альянс для широкосмугових PLC, є: HomePlug 1.0, HomePlug AV, HomePlug AV2 та HomePlug Green PHY (GP).

1.5 Міжнародні стандарти

На жаль, досі не існує універсальних міжнародних стандартів для PLC-технології, а регулювання її застосування є завданням органів контролю конкретної країни, наприклад, в межах положень і директив комісії ЄС або ITU/ISO. У певному значенні, PLC системи підкоряються тим же правовим стандартам, що і кабельне обладнання зв'язку.

Вироби, розроблені по цих технологіях, між собою не взаємодіють і тому представники HomePlug Powerline Alliance, Consumer Electronics Association (США), ETSI PLT, PLC forum, CENELEC і окремі компанії, зокрема YiTRAN Communication (Ізраїль), проводять консультації по виробленню єдиного стандарту для організації мережі по лініях електропередачі.

Проект OPERA

Для заповнення «вакууму» в Європі створена власна версія стандарту для PLC систем. Її ініціаторами виступили комітет ETSI-TC PLT і PLCforum. Проект дістав умовну назву OPERA (Open PLC European Research Alliance). Основну мету проекту його організатори сформулювали таким чином: «Широкосмуговий доступ за низькою ціною для усіх». Конкретні цілі проекту OPERA – стандартизація PLC-систем, поліпшення їх характеристик, а також розвиток різних усередині стандартних сервісів.

Проект OPERA стартував в січні 2004 р. і був розрахований на чотири роки. Бюджет проекту 20 млн. €. Для проведення робіт у рамках проекту OPERA створений так званих OPERA Consortium. Цілі і завдання проекту приведені на рисунку 8.

Відкритий європейський альянс OPERA займається дослідженнями і розробками в області інтегрованих мереж PLC нового покоління. Він налічує 37 учасників і частково фінансується Європейським Союзом. OPERA планував до кінця 2 кв. 2006 р випустити специфікацію PowerLine Communications, яка в якості відкритого стандарту повинна сприяти вирішенню питань сумісності обладнання PLC для організації широкосмугового доступу. Швейцарська компанія Ascom, іспанська компанія DS2 (розробник наборів мікросхем) і Schneider Electric PowerLine Communications випускають обладнання з підтримкою стандарту OPERA в II кварталі 2006 р.

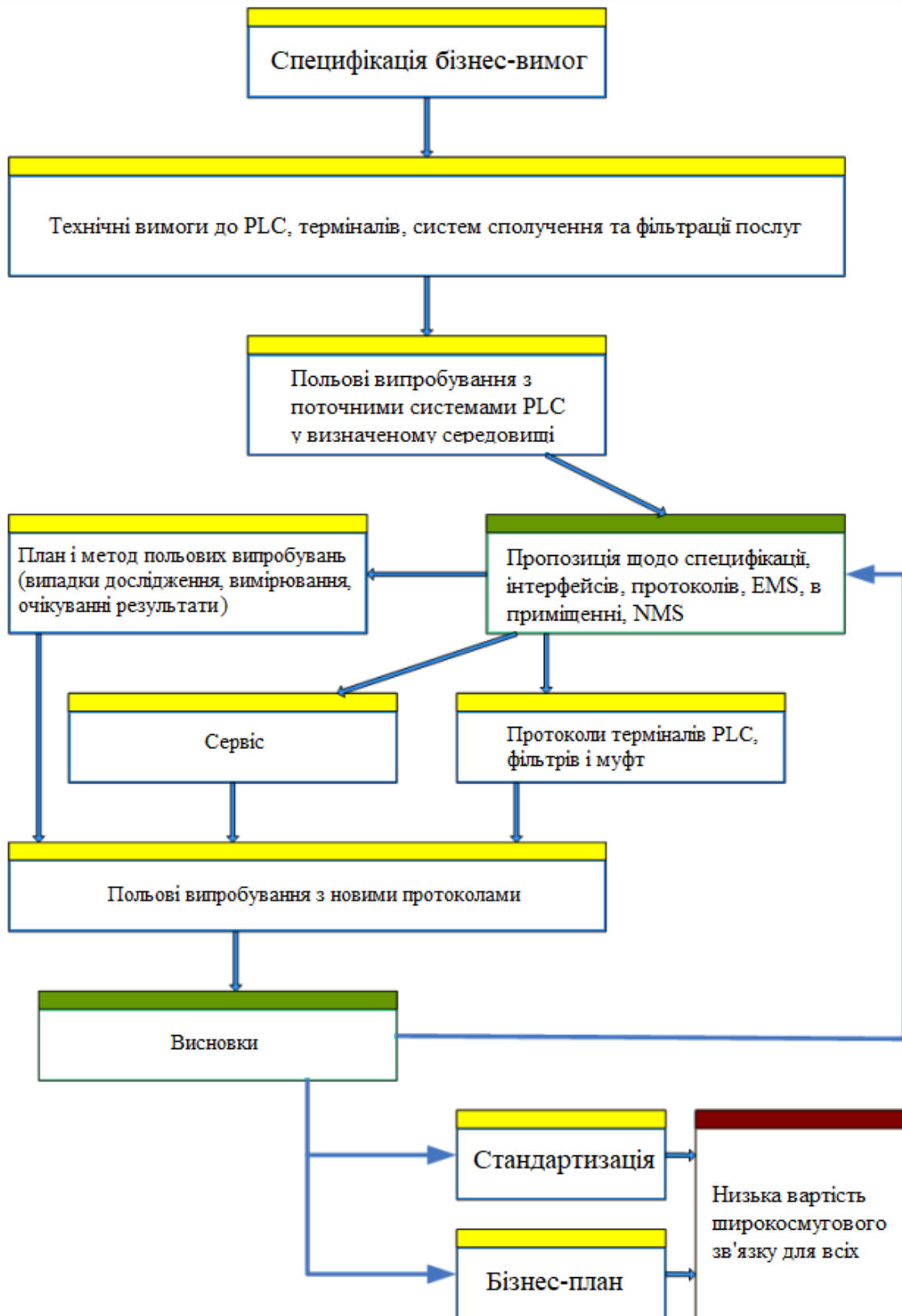


Рисунок 8 – Цілі і задачі проекту OPERA

На першому етапі основне завдання проекту OPERA полягало у визначенні базової технології для розвитку безпосередньо широкосмугового доступу (більше 200 Мбіт/с). Польові випробування почалися літом 2005 р. і

проходили в Італії, Іспанії, Австрії і Португалії. Перша редакція робочих специфікацій OPERA опублікована в січні 2006 р.

Відповідно до пропозиції робочої групи OPERA мережа PLC складається з трьох функціональних компонентів:

- Основне (приймач-передавач) обладнання, що забезпечує передачу інформації з широкосмугової транспортної інфраструктури в мережу електроживлення (Head End Equipment – HE);
- Повторювачі, які дозволяють розширити зону дії мережі на основі ліній електроживлення;
- Обладнання абонентського долстupu (Customer Premises Equipment – CPE). Топологія мережі доступу на основі мережі електроживлення за проектом OPERA приведена на рисунку 9.

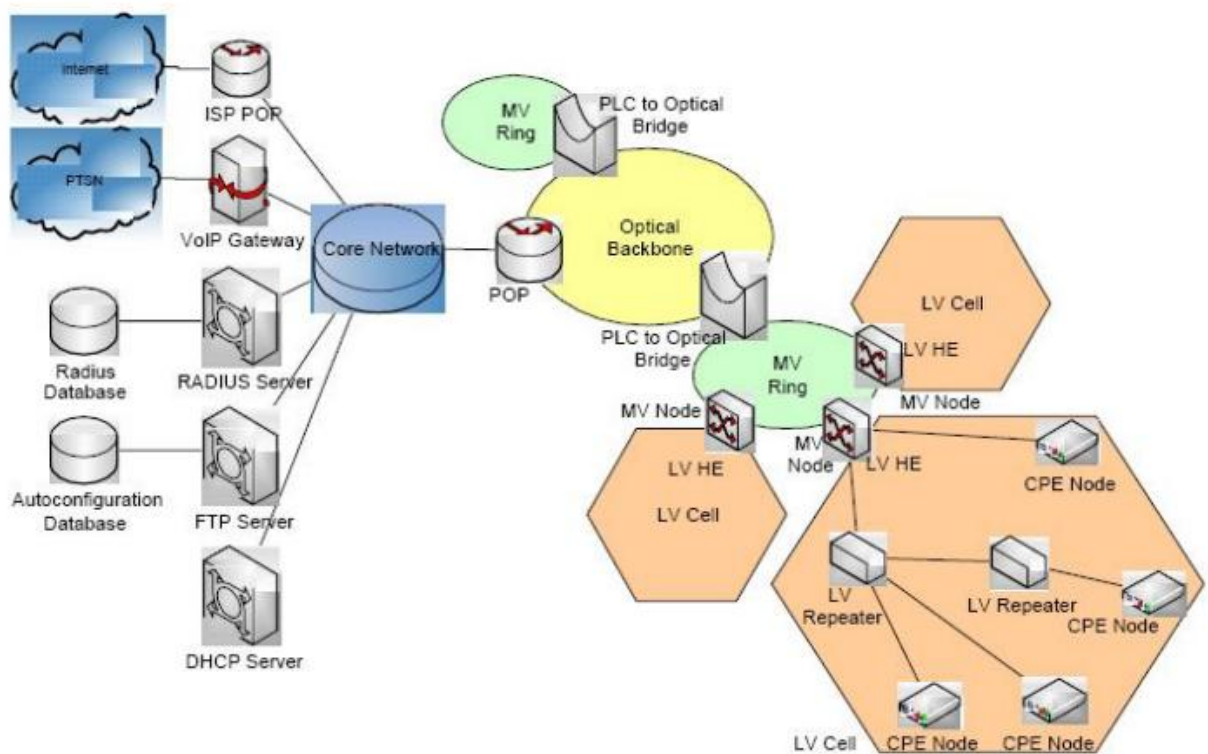


Рисунок 9 – Топологія мережі доступу на основі мережі електроживлення за проектом OPERA

У березні 2006 р. Асоціація UPA оголосила про випуск першої версії стандарту «Digital Home Standard» (DHS). Цей стандарт дозволить створити обладнання для передачі потокового відео високого розділення і тому

подібних додатків усередині приміщення без прокладення додаткових комунікацій. У основу нового стандарту покладені рішення проекту OPERA. Остаточна версія стандарту DHS повинна була з'явитися у кінці 2006 р.

2 АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

2.1 Властивості технології PLC

Основою PLC-технології є використання частотного розділення сигналу, при якому високошвидкісний потік даних розбивається на дещо відносно низькошвидкісних, кожен з них передається на окремій частоті, що піднесе, з подальшим їх об'єднанням в результуючий сигнал (рисунок 10)

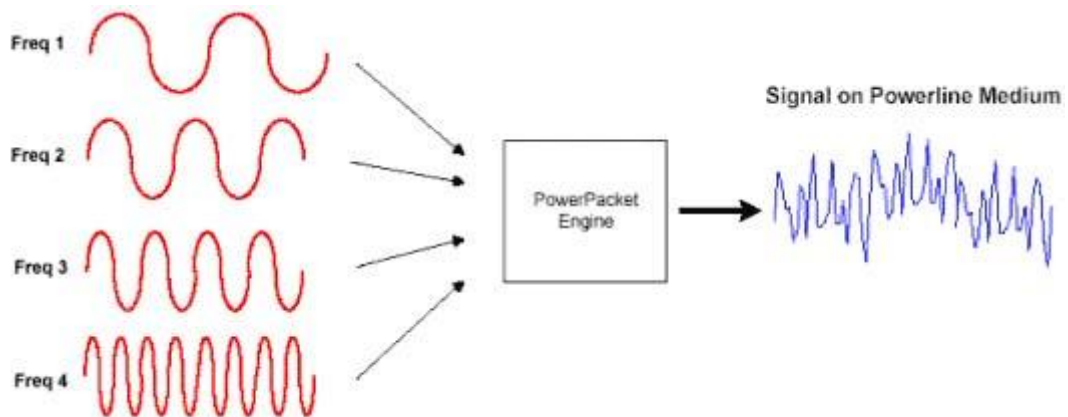


Рисунок 10 – Частотне розділення початкового сигналу

При використанні звичайної модуляції з частотним розділенням (FDM — Frequency Division Multiplexing) доступний спектр витрачається неефективно. Пов'язано це з наявністю захисних інтервалів між тими, що окремими, що піднесуть, необхідних для запобігання взаємному впливу сигналів (рисунок 11А).

Тому в PLC-пристроях застосовується ортогональне частотнорозділене мультиплексування (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing), при якому центри частот, що піднесуть, розміщуються так, щоб пік кожного подальшого сигналу співпадав з нульовим значенням попереднього. Як видно на рисунку 11Б, доступна смуга частот в цьому випадку витрачається раціональніше.

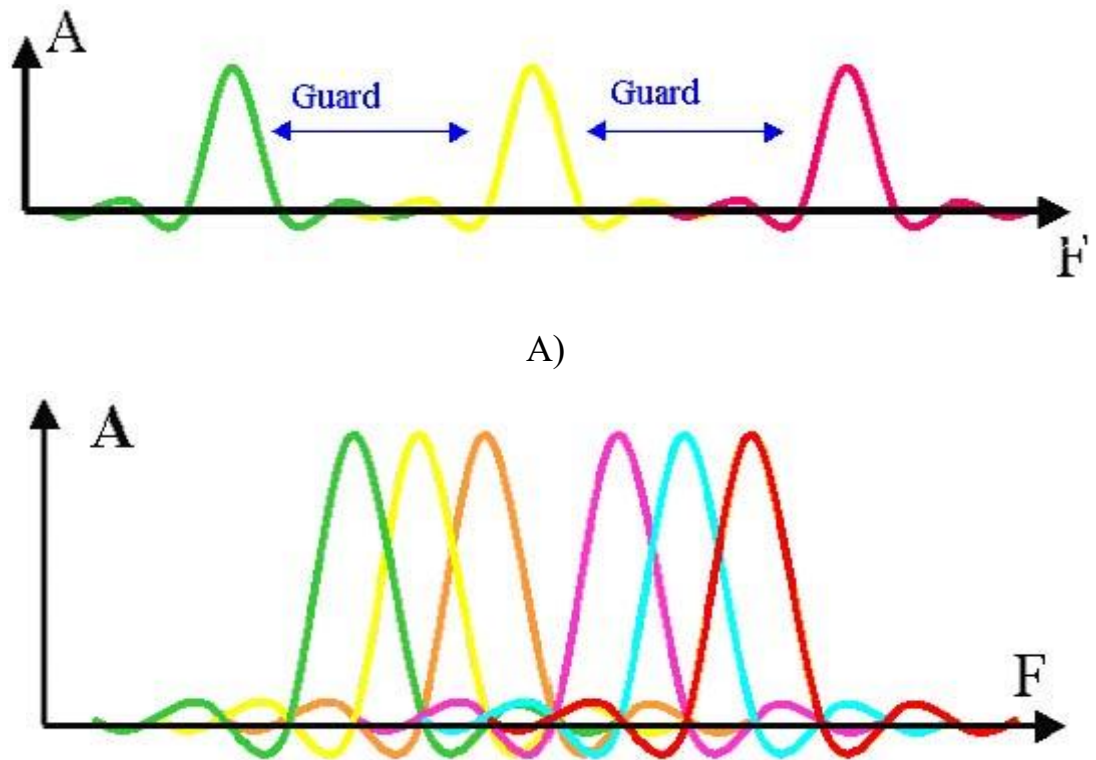


Рисунок 11 – Спектр сигналів з методами модуляції : А) FDM; Б) OFDM

Перед об'єднанням в один сигнал усі частоти, що піднесуть, піддаються фазовій модуляції — кожна своєю послідовністю біт. Після цього вони проходять через блок формування, де збираються в єдиний інформаційний пакет, що називається ще OFDM-символом. На рисунку 12 наведений приклад відносної квадратурної фазової маніпуляції (DQPSK — Differential Quadrature Phase Shift Keying) для кожної з чотирьох частот, що піднесуть, в діапазоні 4,5-5,1 МГц. Реально в технології PLC передача ведеться з використанням 1536 частот, що піднесуть, з вибором 84 найкращих на діапазоні від 2 до 32 МГц залежно від поточного стану лінії і наявності перешкод.

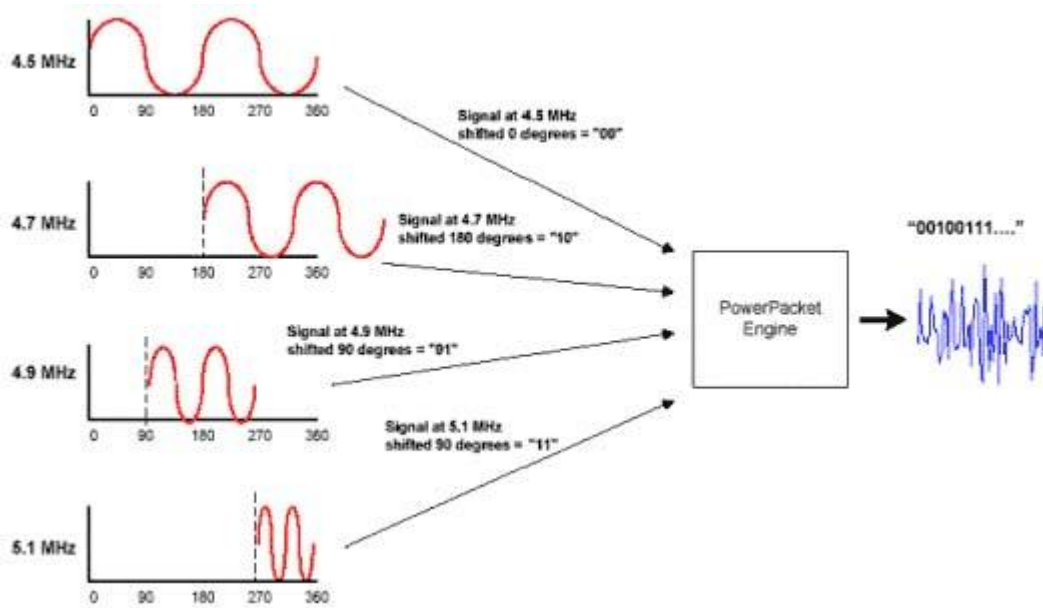


Рисунок 12 – DQPSK-модуляція інформаційного сигналу

На практиці ортогональність дозволяє спростити конструкцію як передавача, так і приймача. Тобто модулятор і демодулятор реалізовані з використанням алгоритму БПФ на стороні приймача і зворотного БПФ на стороні передавача.

Крім того, поділивши потік даних на N піднесучих, тривалість символу в піднесучі буде в N разів більше, ніж на вході передавача, що означає, що кожен символ займає вузьку смугу, але більш тривалий проміжок часу. Щоб уникнути перешкод між символами (ISI), для кожного символу OFDM вводиться захисний інтервал. Протягом цього інтервалу, який повинен бути заповнений циклічним продовженням того самого символу OFDM, корисні дані не передаються. Це розширення називається циклічним префіксом (CP).

Цей спосіб надає PLC технології гнучкість при використанні в різних умовах. Наприклад, як вже було сказано, працюючий PLC-пристрій здатний створювати завади на певних частотах. Ще одним прикладом є випадок, коли деякий пристрій вже використовує частину діапазону.

Технічно усунення небажаного взаємного впливу реалізується застосуванням налаштувань, так званих Signal Mode і Power Mask, на пристроях, в яких передбачена відповідна можливість. Signal Mode — програмний метод визначення робочого діапазону частот, а Power Mask —

програмний метод обмеження спектру використовуваних частот. За рахунок цього PLC-пристрої можуть спокійно співіснувати в одному фізичному середовищі і не зашумлять діапазони частот, призначені для радіозв'язку.

При передачі сигналів по побутовій електромережі можуть виникати значні загасання передаваного сигналу на певних частотах, що здатне привести до втрати і спотворення даних. Для вирішення питання адаптації до фізичного середовища передачі передбачений спосіб динамічного включення і виключення передачі сигналу, що дозволяє виконати виявлення усунення помилок і конфліктів. Суть цього методу полягає в постійному моніторингу каналу передачі з метою виявлення ділянки спектру з перевищенням певного порогового значення загасання. У разі виявлення цього факту використання проблемного діапазону на якийсь час припиняється до відновлення прийнятної значення загасання, а дані передаються на інших частотах.

Іншою істотною складністю при передачі даних по побутовій електромережі, тепер уже для самих облаштувань PLC, являються імпульсні перешкоди, джерелами яких можуть бути різні зарядні пристрої, галогенні лампи, включення або виключення різних електроприладів. Складність ситуації полягає в тому, що, використовуючи вищеописаний метод, PLCмодем не встигає адаптуватися до швидкозмінних умов, адже їх тривалість може не перевищувати однієї мікросекунди, в результаті частина бітів може бути загублена.

Для вирішення цієї проблеми використовується двоступінчате (каскадне) завадостійке кодування бітових потоків перед тим, як вони будуть промодульовані і поступлять в канал передачі даних. Його суть полягає в додаванні в початковий інформаційний потік по певних алгоритмах надмірних («захисних») бітів, які використовуються декодером на приймальній стороні для виявлення і виправлення помилок. Каскадує блокового коду Рида — Соломона і простого згортального коду, що декодується по алгоритму Витерби, дозволяє виправляти не лише поодинокі помилки, але і пакети помилок, що значно збільшує цілісність передаваних

даних. Крім того, завадостійке кодування збільшує безпеку передаваної інформації з точки зору захисту від несанкціонованого доступу.

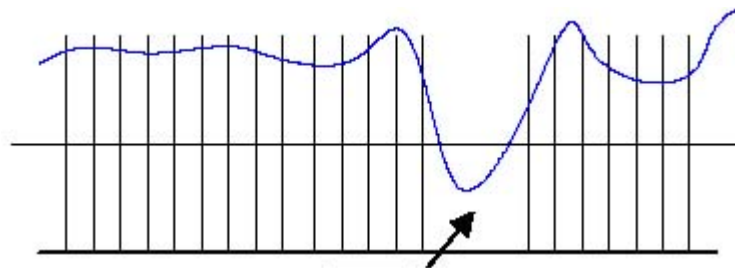
Оскільки в якості середовища передачі даних вибрана розгалужена мережа побутового електроживлення, то водночас часу передачу можуть почати відразу декілька підключених пристроїв. У такій ситуації для вирішення конфліктів зіткнення трафіку застосовується регулюючий механізм — протокол доступу до середовища CSMA/CA. Дозвіл колізій відбувається на основі того або іншого пріоритету, що задається в спеціальних полях пріоритезації пакетів даних.

2.2 IC Semtech для реалізації PLC-технології

PLC продукція компанії Semtech призначена для експлуатації в типових лініях електропостачання з низьким або середнім робітником напругою. Будь-який модем, діючий з аналоговою фізичною лінією, повинен мати функціональні вузли, необхідні для обробки аналогових даних, перетворення їх в цифрову форму і, звичайно, для обробки цифрових даних. На стороні передачі модем також повинен робити кодування цифрових даних відповідно до заданого алгоритму, перетворювати їх в аналогові і посылати в лінію.

Усі ці дії виконують мікросхеми серії EV 8xxx. Вузькосмугові мікросхеми, що є «системами на кристалі», відрізняються високою мірою інтеграції і містять усі необхідні структурні блоки для реалізації фізичного, MAC і інших рівнів протоколу (6LoWPAN і IEC). Підтримують декілька типів модуляції, на практиці найчастіше застосовується OFDM для організації стійкого і заводо захищеного каналу зв'язку. Однокристалні IC, такі, що пройшли тестування функціональної сумісності в HomePlug Alliance Netricity, відрізняються універсальністю застосування, на їх основі проектуються як крайові вузли, так і координатори мережі. Специфікація Netricity розроблена для мережевих комунікацій по лініях електромережі великої дальності і призначена для введомової інфраструктури, інтелектуальних мереж розподілу електроенергії і управління виробничими

процесами. Технологія може бути використана як в щільних міських, так і в сільських електромережах із застосуванням частот нижче 500 кГц. Вона також включає рівень доступу на основі IEEE 802.15.4 (MAC), що є ключовим для розробки гібридних дротяних/безпроводних мереж.



передача даних вимкнена, через
перевищення величини затухання на даній
частоті

Рисунок 13 – Адаптивна передача даних

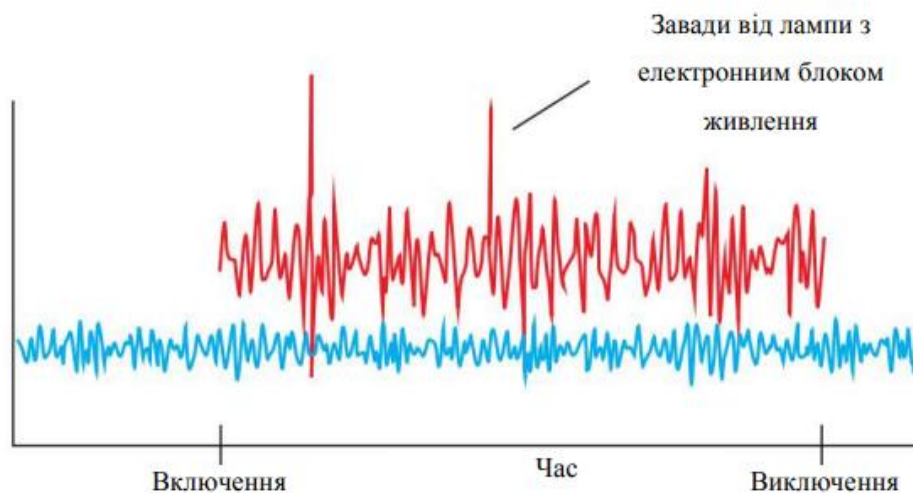


Рисунок 14 – Вплив імпульсних завад, що виникають в часі на передачу даних

ІС серії EV 8xxx мають програмовані діапазони частот від 10 до 490 кГц, покриваючи CENELEC A (10-95 кГц), CENELEC B (95-120 кГц), CENELEC C (120-140 кГц), FCC (10-490 кГц) і ARIB (10-490 кГц) смуги без змін в конструкції пристрою.

Шляхом завантаження відповідного вбудованого програмного забезпечення по лінії електромережі вони можуть бути налагоджені для

роботи в режимах ITU-T G.9903 (G3-PLC), ITU G.9902, ITU - T G.9904 (PRIME), IEEE P1901.2 і IEC-61334 (S-FSK).

Крім того, вони підтримують фірмовий високопродуктивний режим 4GPLC. Конструктивно мікросхеми сімейства виготовляються в низькопрофільних корпусах для поверхневого монтажу, призначених для експлуатації в діапазоні робочих температур - 40.+85 °С. Спрощена структура із зображенням основних функціональних вузлів приведена на мал. 6, тут можна виділити наступні блоки:

Блок AFE (Analog Front - End) є набором аналогових компонентів, що забезпечують ізоляцію за допомогою трансформатора з розділовим конденсатором, фільтрацію і посилення вхідного сигналу, а також формування заданих рівнів вихідного передаваного сигналу шляхом використання драйвера лінії на ОУ.

RNU — це блок, призначений для сполучення цифрової частини мікросхеми з аналоговою лінією.

32-бітовий RISC -мікроконтроллер забезпечує внутрішньосхемну реалізацію MAC -уровня, здійснює обробку даних, формування пакету, кодування даних по симетричному алгоритму блокового шифрування AES і т. д., а також вирішує прикладні завдання.

Периферійні блоки, що сполучають вбудований мікропроцесор із зовнішніми мікросхемами — пам'яттю EEPROM, АЦП з високим розділенням і хостконтроллером. Для зв'язку застосовується апаратна реалізація широко поширених інтерфейсів SPI, I2C і UART.

Інтегрована оперативна і флешпам'ять. Розмір вбудованої пам'яті програм варіюється в межах від 1 до 2 Мбайт, оперативною — від 256 кбайт у EV8100 до 384 кбайт у інших, за запитом до виробника можливі інші варіанти.

Блок управління.

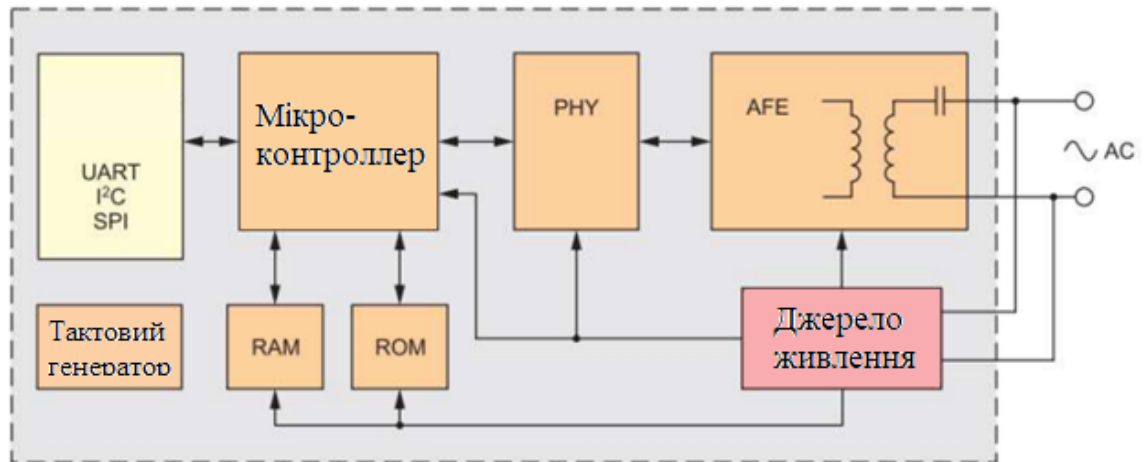


Рисунок 15 – Спрощена блок-схема IC сімейства EV8xxx

Підсистема живлення, що забезпечує усю необхідну для окремих вузлів напругу. Як правило, застосовується джерело, працююче від тієї ж мережі змінного струму, що і використовується для передачі даних.

Окремо слід зазначити IC EV8100, яка, окрім типових вузлів, містить вбудований контролер 6х33 сегментного LCD-дісплея і драйвер сенсорної клавіатури.

PLC-мікросхеми компанії Semtech орієнтовані передусім на використання в системах автоматизації, дистанційного керування і контролю видаленими об'єктами, найбільш популярні сфери їх застосування :

Мережі автоматизації будівель (AMI).

Системи управління посадочними вогнями в аеропортах.

Облаштування «Інтернету речей».

Домашні локальні мережі.

Інтелектуальне устаткування («розумні речі»), у тому числі побутова електроніка.

Системи контролю і управління на сонячних електростанціях.

Мережі вуличного освітлення.

Устаткування зв'язку з підстанціями.

Системи управління транспортними потоками.

Зв'язок по силових лініях є основним елементом автоматизованих систем контролю і обліку енергоносіїв, вживаних комунальними службами. Основні переваги цієї технології : можливість автоматично отримувати інформацію від житлових і промислових приміщень, розташованих у видалених районах з низькою щільністю населення і низькою якістю інфраструктури, великий термін служби, можливість нарощування і низькі витрати

Принцип роботи системи досить простий. Електрика від електростанції передається по високовольтному кабелю до підстанції. Тут відбувається пониження напруги і розподіл на велику кількість низьковольтних трансформаторних підстанцій, що знижують напругу до побутового. Зазвичай до одного трансформатора приєднані від 500 до 1000 кінцевих споживачів. Таким чином, можна запропонувати наступний варіант побудови PLC-систем для цих цілей: концентратор, діючий як центральний вузол, базується на низьковольтних підстанціях і регулярно (наприклад, раз на годину) збирає результати вимірів з лічильників (це можуть бути лічильники не лише електроенергії, але і води, тепла, газу).

Далі інформація пересилається на сервер для подальшої обробки, наприклад по каналу GSM. Такий тип систем не обмежений тільки отриманням інформації з лічильників і може виконувати інші функції.

Налагоджувальні комплекти EVM8K-01, EVM8K-02 і EVM8K-03 можуть виступати як видаленими вимірювальними вузлами, так і концентраторами, що забезпечують збір даних.

Модулі призначені для експлуатації в одно- і трифазних мережах, живляться від вбудованого джерела змінного струму з напругою 80-280 В (EVM8K - 01 і EVM8K - 02) або від постійного із стандартною напругою 12 В (EVM8K - 01 і EVM8K - 03).

Зв'язок з хост-контролером здійснюється за допомогою інтерфейсів RS - 232 або USB. Комплект EVM8K - 13 є концентратором мережі, що об'єднує на одній платі PLC-модем на базі IC EV8000 з 32-бітовим

RISC мікроконтролером, необхідним для виконання призначеного для користувача застосування.

Комплект здатний обслуговувати до 500 крайових вузлів (до 2000 опціонально), з особливостей можна відмітити наявність «на борту» 3G/EDGE/GPRS-модему, GPS-модуля і 8-Гбит SD-карти. Окрім безпроводної передачі даних на сервер, можна також скористатися інтерфейсами RS - 232, USB або Ethernet.

Визначено спільні властивості для PLC систем, щодо реалізації принципів передачі інформації, а саме звичайної модуляції з частотним розділенням FDM, та ортогональне частотно-розділене мультиплексування OFDM, що має на меті збільшення кількості одночасних каналів та із застосуванням технології адаптивного оцінювання стану провідникової лінії збільшити швидкість передачі інформації. Зростання швидкості дозволяє зменшити час передачі, а отже і енергоспоживання пристрою.

Застосування технології ортогонального частотно-розділеного мультиплексування OFDM дозволяє підвищити завадостійкість системи передачі. У свою чергу це дозволяє підвищити надійність передачі інформації по незалежних каналах.

З ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧ ІНФОРМАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

3.1 Дослідження ефективності застосування ортогональних гармонічних сигналів узагальненого класу в системах передачі

В основі даної технології лежить метод передавання із застосуванням ортогональних гармонічних сигналів (ОГС) – OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). OFDM – це метод передавання, який характеризується високою ефективністю при роботі по каналах зв'язку з ненормованими і швидко змінними характеристиками. До таких каналів належать, зокрема, і канали організовані по мережі електропостачання.

Інтерес представляють характеристики (параметри) системи передачі (СП) BPL при роботі по вітчизняних проводах будинкової мережі електропостачання.

Одним з основних факторів, що обмежують швидкість передавання в систем передачі ортогональними гармонічними сигналами (СП ОГС), а, отже, і в СП BPL, є інтерференційні завади, що виникають внаслідок лінійних спотворень групового сигналу СП ОГС у каналі зв'язку. На прикладі СП за технологією ADSL2+, доведено ефективність застосування ОГС узагальненого класу (УК) для зменшення потужності інтерференційних завад.

У дослідженнях враховано наступні вихідні дані:

- частотний план 25 MHz-PB;
- СГП сигналу на виході передавача $PSD(f) = PSD_{MASK}(f) - 3,5$
- рознос частот 24,4140625 кГц;
- кількість носійних частот – 1024;
- кількість інформаційних каналів $n = 950$;
- номер першого інформаційного каналу $m = 74$;
- кількість відліків на інтервалі ортогональності $N = 2048$;
- кількість відліків на захисному інтервалі $L = 64$;

- припустима ймовірність помилки $p = 10^{-7}$;
- СГП завад на вході приймача $n(i) -140, -120, -100 = \text{дБм/Гц}$;
- запас по захищеності ΔSNR 6 дБ ;
- частота надходження тактів (символів) $f_c = 23,67424 \text{ кГц}$ (для тривалості захисного інтервалу 64 відліки);
- параметри мережі електропостачання на базі двожильних проводів типу ППВ 2х1,5;
- довжина лінії, l_d – від 25 до 100 м.

Інтерференційні завади в СП BPL досліджувалися за умови застосування як традиційних ОГС, так і ОГС УК, при роботі однорідними (без розгалужень) проводами домашньої мережі електропостачання. СП BPL, що використовує традиційні ОГС позначимо як СП-1, а СП BPL з ОГС УК – СП-2.

Результати розрахунків інтерференції при використанні традиційних ОГС та ОГС узагальненого класу наведено на тривимірних графіках відповідно на рисунок 16 і 17. Ці графіки ілюструють залежність відсоткового відношення ефективних значень інтерференційної завади і сигналу h від номерал інформаційного каналу СП PLC/BPL і номера відліку початку інтегрування k_T у приймачі СП PLC/BPL.

Як видно з рисунків 15 та 16 значення h суттєво залежить від номера відліку початку інтегрування k_T . Значення k_T , за якого досягається мінімум співвідношення h є оптимальним і подальші дослідження характеристик СП BPL повинні проводитися саме при $k_{\text{ТОПТ}}$.

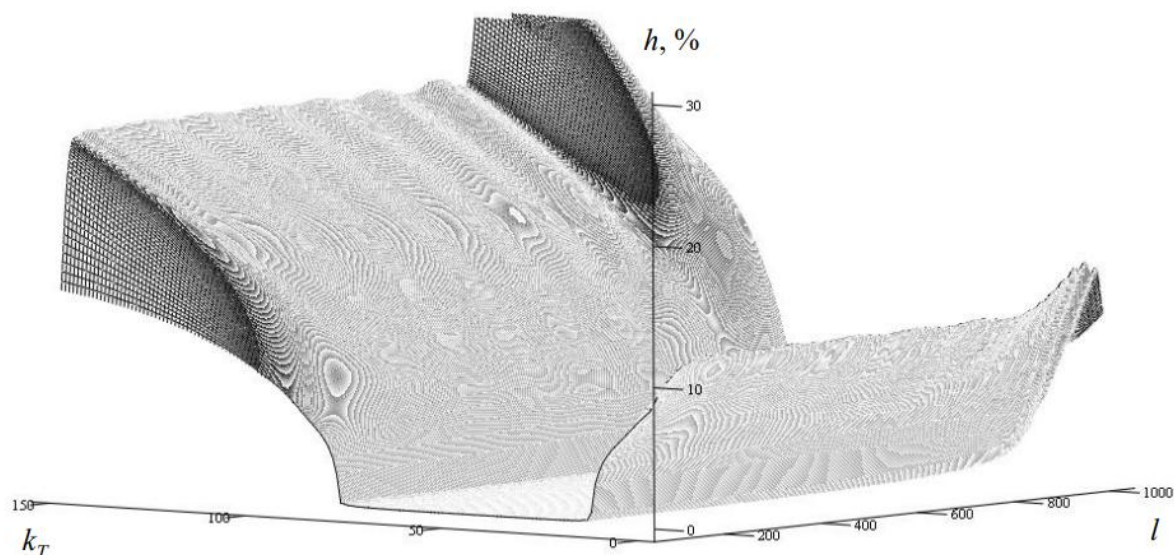


Рисунок 15 – Тривимірний графік залежності співвідношення h від l і k_T у для СП-1 та роботі по проводу типу ППВ 2х1,5 довжиною 50 м

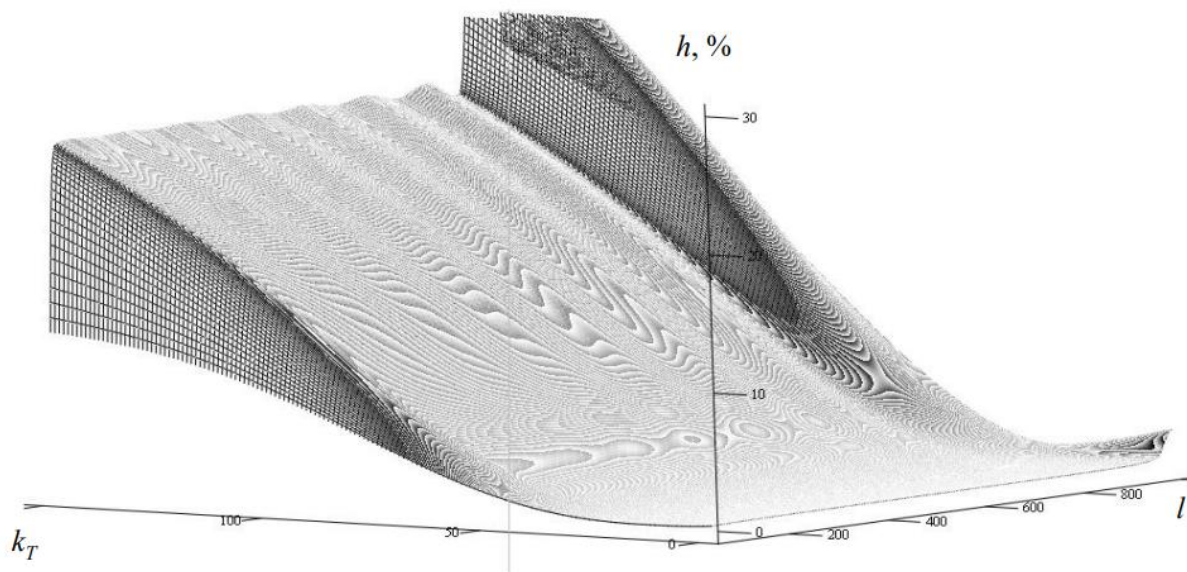


Рисунок 16 – Тривимірний графік залежності співвідношення h від l і k_T у для СП-2 та роботі по проводу типу ППВ 2х1,5 довжиною 50 м

Для оцінки ефективності застосування у СП за технологіями PLC/BPL сигналів ОГС узагальненого класу у порівнянні з традиційними ОГС порівняємо залежності середньоарифметичних значень відсоткового відношення ефективних значень інтерференційної завади і сигналу від номера відліку початку інтегрування $h_{сер}(k_T)$ та розподіл інтерференції h по

інформаційних каналах при оптимальному значенні відліку початку інтегрування h ($l, k_T = k_{T_{\text{опт}}}$).

У таблиці 2 наведено значення оптимального номера відліку початку інтегрування $k_{T_{\text{опт}}}$ у приймачі СП PLC/BPL та середньоарифметичні значення $h_{\text{сер}}$ по всіх каналах системи передачі при $k_{T_{\text{опт}}}$, які розраховувалися за формулою:

$$h_{\text{сер}}(k_T) = \frac{\sum_{l=1}^n h_l k_T}{n},$$

де n – загальна кількість каналів, що використовувалося для передавання інформації.

На рисунку 17 та 18 показані залежності $h_{\text{сер}}(k_T)$ при різній довжині лінії для СП-1 і СП-2 відповідно. На рисунку 19 надане порівняння розподілу інтерференції h по каналах 1 при $k_{T_{\text{опт}}}$ для СП-1 і СП-2 при однаковій довжині лінії.

Таблиця 2 – Результати визначення значень оптимального номера відліку початку інтегрування $k_{T_{\text{опт}}}$ у приймачі СП PLC/BPL та середньоарифметичних значень відсоткового відношення інтерференційної завади і сигналу h

Довжина лінії, м	СП-1		СП-1	
	$k_{T_{\text{опт}}}$, номер відліку	$h_{\text{сер}}, \%$	$k_{T_{\text{опт}}}$, номер відліку	$h_{\text{сер}}, \%$
50	64	0,114	17	0,064
75	65	0,201	25	0,102
100	68	0,255	33	0,113

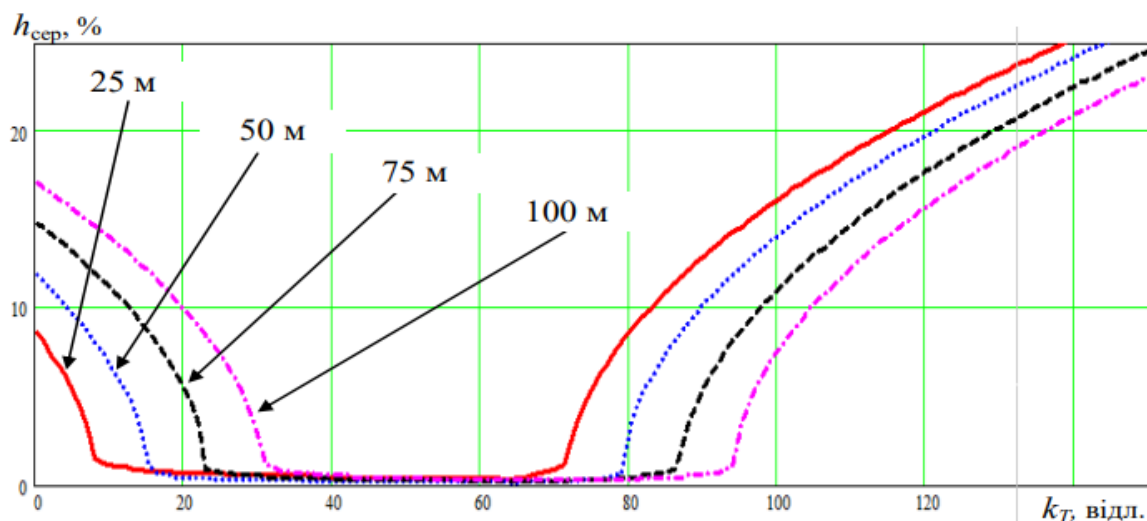


Рисунок 17 – Залежність h_{cer} від номера k_T та довжини лінії l_L для СП-1 (ППВ 2x1,5; L = 64)

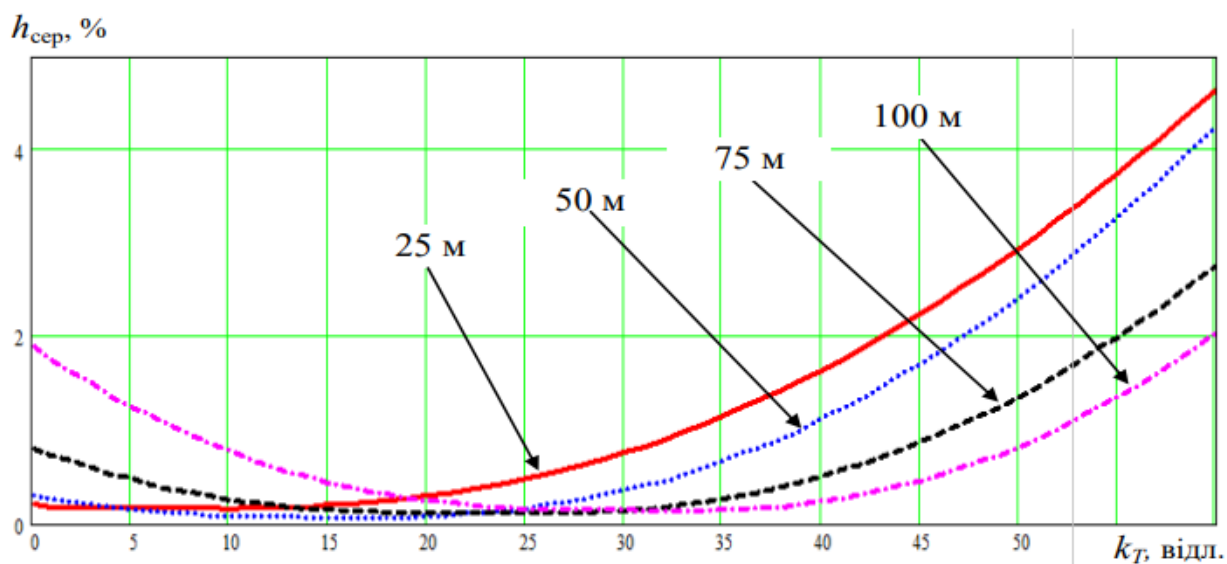


Рисунок 18 – Залежність h_{cer} від номера k_T та довжини лінії l_L для СП-2 (ППВ 2x1,5; L = 64)

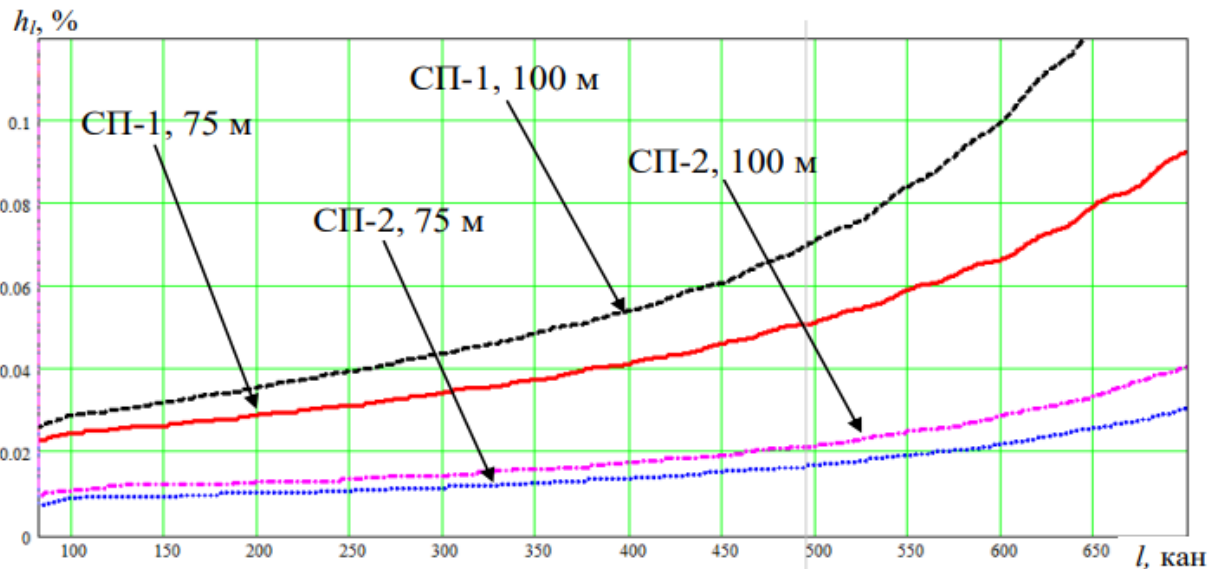


Рисунок 19 – Порівняння залежності h_l від номера $k_{\text{ТОПТ}}$ для СП-1 і СП-2 ($l_l = 75$ та 100 м; ППВ $2 \times 1,5$; $L = 64$)

За результатами дослідження інтерференційних завад, що виникають у СП PLC/BPL при роботі по двохжильному проводу типу ППВ з площею поперечного перетину струмопровідних жил $1,5 \text{ мм}^2$ можна зазначити наступне:

- оптимальні моменти початку обробки сигналу у приймачі $k_{\text{ТОПТ}}$ при всіх інших однакових параметрах суттєво відрізняються для СП-1 і СП-2, що пояснюється різницею способів обробки сигналу у приймачі цих СП. Для СП-1 $k_{\text{ТОПТ}}$ не менша за тривалість захисного інтервалу (≥ 64 відлік), для СП-2 значення $k_{\text{ТОПТ}}$ не перевищує 33, тобто у 2 рази менша ніж для СП-1;

- співвідношення ефективних значень інтерференційної завади і сигналу h для СП-1 і СП-2 також суттєво відрізняються – застосування ОГС УК дозволяє при всіх інших однакових параметрах зменшити інтерференцію в середньому у 3 рази, що свідчить про доцільність застосування ОГС УК у СП PLC/BPL.

Дослідимо як зменшення потужності інтерференційних при застосуванні ОГС УК у порівнянні з традиційними ОГС впливає на досягну СП PLC/BPL швидкість передавання. Для цього було розраховано залежності швидкості передавання від довжини лінії без урахування інтерференції (на

рисунках позначено як СП-0) та з урахуванням інтерференції у традиційних СП ОГС (позначено як СП-1) та СП з ОГС УК (позначено як СП-2), також враховано вплив зовнішніх адитивних завад (заданих як білий Гаусів шум AWGN з рівнем спектральної густини потужності (СГП) мінус 140, 120 та 100 дБм/Гц). Відповідні результати надані у таблиці 3

Таблиця 3

Довжина лінії Іл, м	AWGN, дБм/Гц								
	-140			-120			-100		
	СП-0	СП-1	СП-2	СП-0	СП-1	СП-2	СП-0	СП-1	СП-2
25	334,5	321,2	327,6	314	299,4	307	165,3	164,5	164,6
50	334,5	316,4	325	298,8	286,4	292,3	150,9	150,2	150,5
75	334,5	305,4	321	284	269,4	277,6	136,4	135,6	135,9
100	334,5	290,9	316,9	269,2	252,9	263,2	122	121	121,4

За результатами розрахунку швидкості передавання можна зробити наступні висновки:

- за високого рівня СГП зовнішніх завад (AWGN –100 = дБм/Гц) інтерференційні завади не впливають на швидкість передавання, тому що їх рівень потужності значно менший, при цьому досяжна швидкість передавання (незалежно від типу СП) становить 120...165 Мбіт/с в залежності від довжини лінії електропостачання;

- якщо рівень СГП зовнішніх завад не перевищує мінус 120 дБм/Гц, то при визначенні швидкості передавання необхідно враховувати й інтерференційні завади, при цьому видно, що застосування ОГС УК дозволяє зменшити втрату швидкості відносно варіанту без врахування інтерференції у порівнянні з традиційними ОГС не менш ніж удвічі;

- за рівня AWGN –120 = дБм/Гц швидкість СП-0 становить 270...315 Мбіт/с в залежності від довжини лінії електропостачання, при цьому

швидкість СП-1 менша за СП-0 в середньому на 14 Мбіт/с, а швидкість СП-1 – лише на 7 Мбіт/с;

– за рівня AWGN -140 = дБм/Гц (за відсутності зовнішніх завад, враховується лише тепловий шум) швидкість СП-0 незалежно від довжини лінії електропостачання складає максимум 334,5 Мбіт/с, при цьому інтерференційні завади здійснюють значний вплив на швидкість передавання. Для СП-1 швидкість зменшується на 13...44 Мбіт/с в залежності від довжини лінії електропостачання, а для СП-2 – на 7...18 Мбіт/с

Згідно з проведеними дослідженнями визначено, що застосування ОГС узагальненого класу у порівнянні з традиційними ОГС дозволяють значно зменшити інтерференцію у СП PLC/BPL – на однорідних лініях в середньому у 3 рази, відповідно підвищити швидкість передавання. Отримані результати свідчать про доцільність застосування ОГС узагальненого класу для підвищення ефективності роботи СП за технологіями PLC/BPL вітчизняними мережами електропостачання.

3.2 Порівняльна характеристика завадостійкості систем при використанні багатопозиційних сигналів

Останнім часом питання теорії побудови інфокомунікаційних мереж майбутнього – FN набули значного інтересу. Системний аналіз принципів їх побудови дає підставу стверджувати, що це будуть багатомірні мережі. Відомо, що багатомірність розглядається як конструктивний принцип, є способом об'єднання розрізнених сутностей в єдине ціле та, відповідно, багатомірні мережі майбутнього не обов'язково повинні мати чітко виражений розподіл на мережі транспорту, доступу і мережі підтримки та сервісу.

Тому в мережах FN, тобто в інфокомунікаційних мережах майбутнього, стане можливим за рахунок використання багатомірної структури мережі та багатоядерних обчислювальних засобів в її вузлах забезпечувати обмін інформацією і надавати різноманітні послуги користувачам по майже

примітивній на перший погляд схемі: Користувачі – Багатомірна мережа – Користувачі.

При такому підході доступ, транспорт, сервіс, підтримка (синхронізація, сигналізація і т. д.) – це внутрішні функції інтегрованої мережі FN, багатомірна архітектура якої в принципі надає можливість спільного рішення задач, що покладені на складові мережі.

Можна передбачити, що для складної мережі FN найпростіше рішення, при якому мережі доступу, транспорту та різні мережі підтримки знаходяться в своїх власних, тільки для них відведених вимірах не буде найбільш ефективним рішенням.

В сучасних системах передачі інформації використовуються різноманітні ансамблі дискретних сигналів. Розглянемо ансамбль, який містить M сигналів: $S_1(t)$, $S_3(t)$, ... , $S_m(t)$. Повідомлення передаються за інтервал часу T у вигляді посилок того чи іншого сигналу. Для визначення сигналів будемо використовувати наступні характеристики:

– енергія сигналу:

$$E_i = \int_0^T S_i^2(t) dt$$

– взаємна енергія сигналів $S_i(t)$ та $S_j(t)$:

$$E_{ij} = \int_0^T S_i(t) S_j(t) dt$$

– енергія різниці між сигналами $S_i(t)$ та $S_j(t)$:

$$E_{i-j} = \int_0^T [S_i(t) - S_j(t)]^2 dt = E_i + E_j - 2E_{ij}$$

– коефіцієнт взаємної кореляції:

$$\rho_{ij} = \frac{E_{ij}}{\sqrt{E_i E_j}}$$

Відповідно до теорії потенційної завадостійкості мінімум ймовірності помилки відображення сигналу на виході приймача ρ_0 для рівноймовірних сигналів забезпечується оптимальним приймачем, алгоритм роботи якого має вигляд:

$$\int_0^T [X(t) - S_i(t)]^2 dt < \int_0^T [X(t) - S_j(t)]^2 dt$$

$$i, j = 1, \dots, M$$

$$i \neq j$$

При виконанні цієї нерівності приймач виносить рішення про передачу сигналу $S_i(t)$. Приймач містить M каналів, в кожному з яких розраховується квадрат відстані $\|X - S_i\|^2 = \int_0^T [X(t) - S_j(t)]^2 dt$; $i, j = 1, \dots, M$ та пристрій, де проходить порівняння відстаней та приймається рішення щодо надісланого сигналу. Для сигналів з однаковими енергіями алгоритм можливо представити:

$$\int_0^T X(t) S_i(t) dt < \int_0^T X(t) S_j(t) dt$$

В загальному випадку алгоритм виглядає так:

$$Y_i > Y_j, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, M; i \neq j$$

де Y_i, Y_j – результати обробки сигналів та завад в каналах приймача.

Рішення щодо надісланого сигналу виноситься по виходу каналу, в якому Y має найбільшу величину.

Ймовірність правильного прийому надісланого сигналу S_i визначається як ймовірність одночасного виконання $M-1$ нерівностей:

$$P_{np}(S_i) = P\{Y_i > Y_1, \dots, Y_i > Y_{i-1}, Y_i > Y_{i+1}, \dots, Y_i > Y_M\}$$

Ймовірність помилки в відображенні сигналу S_i на виході приймача:

$$P_0(S_i) = 1 - P_{np}(S_i)$$

При великому відношенні сигнал-шум розрахунок ймовірності помилки в багатопозиційній системі можливо оцінити сумарною ймовірністю помилки, що створюється сигналом S_i та кожному з $(M-1)$ інших сигналів:

$$P_0(S_i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N P_{0ij}$$

При $M > 8$ P_0 визначається як

$$P_0 = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[1 - \Phi \left(a_{ij} \sqrt{\frac{2E_6}{N_0}} \right) \right]$$

Якщо розглянути ансамблі двовірних сигналів, то в загальному випадку завадостійкість залежить як від виду сигналів, що передаються, так і від способу прийому. При оптимальному прийомі реалізується потенційна завадостійкість. Тому подальша оптимізація системи передачі повинна проводитись вибором найкращого ансамблю сигналів.

При одному й тому ж самому способі прийому різні ансамблі забезпечують різну завадостійкість. Це зумовлено особливостями розташування меж областей, які оточують кожний сигнал. Ймовірність правильного відтворення будь-якого сигналу можливо збільшити, якщо розсунути межі області цього сигналу. При цьому зменшуються об'єми області сусідніх сигналів, що збільшує ймовірність помилки відтворення цих сигналів. Мінімум середньої ймовірності помилки досягається при розміщенні меж на рівних відстанях від сигнальних точок.

Оптимізація ансамблю зводиться до знаходження такого розміщення сигнальних точок, при якому області сигналів мають найбільшу величину, найбільш близькі одна до одної за розмірами та наближаються за формою до кіл.

Якщо число сигналів в ансамблі, побудованому на основі мережі найбільшої густини вкладки, достатньо велика, тоді таке розміщення

сигнальних точок може бути достатньо близьким до оптимального. Області сигналів в цьому випадку однакові, за виключенням крайніх областей.

При великій кількості сигналів в ансамблі M ймовірність помилки залежить від відстані d між ближніми сигнальними точками. Тому порівняння ансамблів можливо проводити по коефіцієнту завадостійкості.

$$a = \frac{d}{2\sqrt{E_6}}$$

В цьому випадку відстань d вимірюється разом з енергетичними затратами на передачу одного двійкового символу (біта) :

$$E_6 = \frac{E_c}{\log_2 M}$$

В системах з обмеженою середньою потужністю (в одноканальних системах з лінійним каналом та обмеженим енергоресурсом передавача, в багатоканальних системах з розподілом каналів по частоті та інші) використовується середня енергія E_6 с. В системах з обмеженою піковою потужністю завадостійкість оцінюють по відношенню до максимальної енергії сигналу з ансамблю $E_{6\max}$. При мінімальній відстані між сигналами d та рівноймовірній передачі сигналів середня енергія дорівнює:

$$E_6 = \frac{d}{2M} \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} (2i-1)^2, \text{ де } M - \text{парне}$$

В цьому випадку коефіцієнт завадостійкості дорівнює:

$$a = \frac{d}{2\sqrt{E_{6c}}} = \sqrt{\frac{M \log_2 M}{2 \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} (2i-1)^2}}$$

Максимальна енергія, найбільш віддаленого сигналу від початку координат, визначається виразом:

$$E_M = \frac{[(M-1)d]^2}{4}$$

Тоді коефіцієнт завадостійкості по максимальній енергії дорівнює:

$$a_M = \frac{d}{2\sqrt{E_{bmax}}} = \sqrt{\frac{\log_2 M}{(M-1)^2}}$$

На рисунку 20 показані залежності ймовірності помилки від енергетичних показників при оптимальному прийомі багатопозиційних сигналів значень НАР цих сигналів (НАР=2^k– кількість позицій сигналу, k – кратність модуляції)

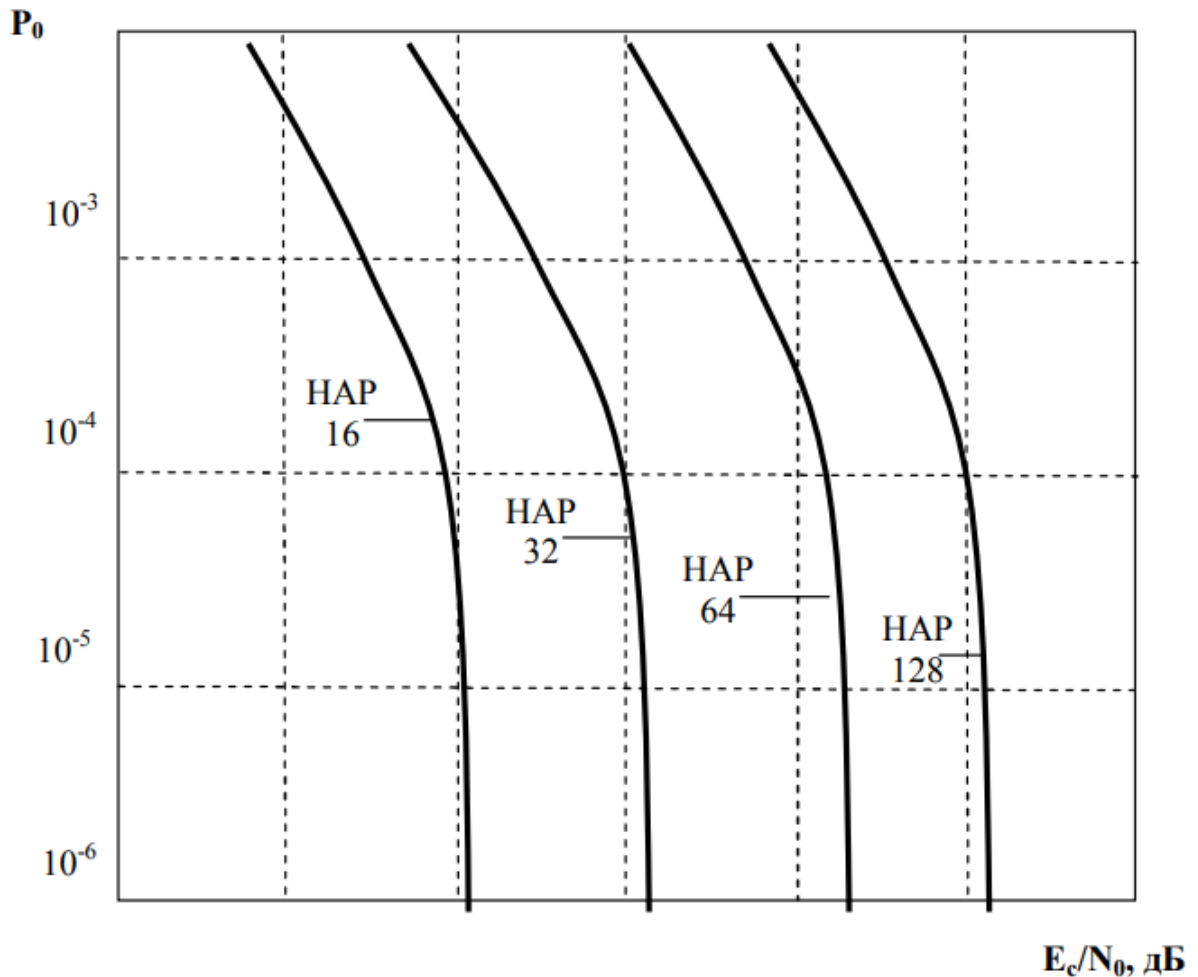


Рисунок 20 – Криві ймовірності помилки при оптимальному прийомі багатопозиційних сигналів

При двійковій передачі $E_c = E_M$ та $a_c = a_M = 1$. З ростом числа сигналів в ансамблі M значення коефіцієнтів a_c та a_M поступово загасає, але при цьому збільшується питома швидкість:

$$\gamma_c = \gamma_{0max} = \frac{\max H(S)}{N} = \log M/N$$

Питома швидкість є характеристикою ансамблю сигналів. Вона визначає продуктивність джерела рівноймовірних сигналів, що виражена в бітах на один відлік. На основі вище викладеного коефіцієнти завадостійкості для різних значень НАР (M) показані в таблиці 4 та для наглядності на рисунку 21

Коефіцієнти завадостійкості для $M = 16, 32, 64, 128$

Коефіцієнт завадостійкості	$M=16$	$M=32$	$M=64$	$M=128$
Коефіцієнт завадостійкості a_c	0,667	0,516	0,429	0,342
Коефіцієнт завадостійкості a_M	0,500	0,373	0,309	0,246

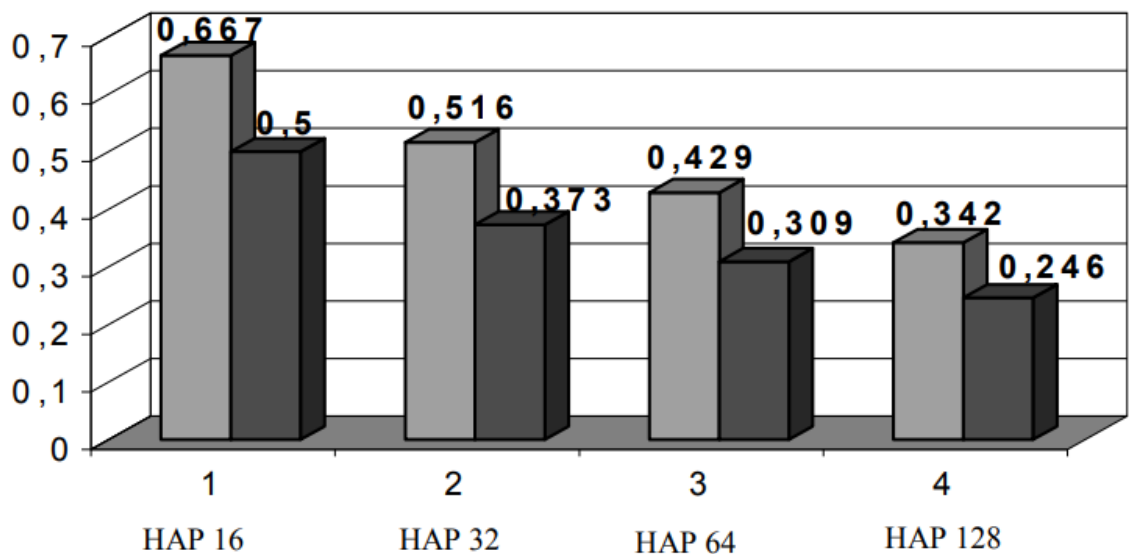


Рисунок 21 – Коефіцієнти завадостійкості для НАР 16, 32, 64, 128

Таким чином, використання багатопозиційних сигналів з фазорізницевою модуляцією високої кратності та високих порядків забезпечить швидкість передавання інформації наближену до пропускнуєї спроможності каналу зв'язку. Це важливо для сучасних систем доступу, які вимагають здійснення великих швидкостей передачі інформації в порівнянні з іншими технологіями.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень, були виконані аналіз існуючих тенденцій та апаратних рішень щодо впровадження технології PLC, що мають місце на сучасному ринку телекомунікаційних послуг. Існує широкий набір стандартів передачі інформації, що є наступниками один одного та розширеннями, це HomePlug 1.0, HomePlug AV, HomePlug C&C, а також 1.4.5 HomePlug GP. Основними організаціями і співтовариствами, що регламентують вимоги до PLC пристроями є IEEE, ETSI, CENELEC, OPERA, UPA і HomePlug Powerline Alliance

Застосування технології ортогонального частотно-розділеного мультиплексування OFDM дозволяє підвищити завадостійкість системи передачі. У свою чергу це дозволяє підвищити надійність передачі інформації по незалежних каналах. Використання пристроїв PLC стандарту може бути обмежено в наслідок існування зовнішніх завад, що впливають на канал передачі даних та створюють завади при роботі.

В ході дослідження було виявлено, що застосування ОГС узагальненого класу у порівнянні з традиційними ОГС дозволяють значно зменшити інтерференцію у СП PLC/BPL – на однорідних лініях в середньому у 3 рази, відповідно підвищити швидкість передавання. А отримані результати свідчать про доцільність застосування ОГС узагальненого класу для підвищення ефективності роботи СП за технологіями PLC/BPL вітчизняними мережами електропостачання. А також, що використання багатопозиційних сигналів з фазорізницевою модуляцією високої кратності та високих порядків забезпечить швидкість передавання інформації наближену до пропускнуєї спроможності каналу зв'язку.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. О.Л. Недашківський, Б.Ю. Жураковський, С.І. Тарбасєв
ТЕХНОЛОГІЯ PLC ТА ЇЇ ПЕРСПЕКТИВИ НА РИНКУ
ШИРОКОСМУГОВОГО АБОНЕНТСЬКОГО ДОСТУПУ
2. Перспективні телекомунікаційні технології мереж широкосмугового доступу: монографія / [авт.кол. : Балашов В.О., Лашко А.Г., Ляховецький Л.М. та ін.]. – Одеса: КУПРІЄНКО СВ, 2016 – 200 с.: 118 рис., 35 табл.
3. Телекомунікаційні технології мереж широкосмугового доступу: монографія / Балашов В.О., Барба І.Б., Лашко А.Г., Ляховецький Л.М., Орешков В.І., Педяш В.В., Яневич О.К. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2018. – 276 с.: 166 рис., 35 табл.
4. В.А. Балашов, А.Г. Лашко, Л.М. Ляховецкий Б20 Технологии широкополосного доступа xDSL. Инженернотехнический справочник / Под общей редакцией В.А. Балашова. — М.: Эко-Трендз, 2009. — 256 с.: ил.
5. Балашов В. О. Б 20 Системи передавання широкосмуговими сигналами: [навч. посібник] / В. О. Балашов, П. П. Воробієнко, Л. М. Ляховецький, В. В. Педяш. – Одеса: Вид. центр ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2012. – 336 с.
6. ЗАСТОСУВАННЯ ОРТОГОНАЛЬНИХ ГАРМОНІЧНИХ СИГНАЛІВ УЗАГАЛЬНЕНОГО КЛАСУ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ PLC ОРЄШКОВ В.І.
7. Недашківський О. Л., Срібна І. М., Бойко І. А., Рогожніков О. І.
Порівняльна характеристика завадостійкості систем при використанні багатопозиційних сигналів.
8. МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПО ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ © Макаренко А. О., Гринкевич Г. О., 2015

9. Ляховецький Л.М., Яневич О.К. PLC – ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ МЕРЕЖАМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
10. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОПОРУ НАВАНТАЖЕННЯ ВІДГАЛУЖЕННЯ НА ШВИДКІСТЬ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ МЕРЕЖАМИ БУДИНКОВОЇ ЕЛЕКТРОПРОВОДКИ Лашко А.Г., Ляховецький Л.М., Яневич О.К.