

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Автори: Телега Владислав Володимирович, Петрикеев Євген Ігорович

Керівник: Ямненко Юлія Сергіївна, д.т.н., професор, завідувач кафедри «Промислової електроніки»

Використання технології PLC для передавання інформації у MicroGrid
Галузь знань «Електроніка та телекомунікації»
Спеціальність «Електроніка»

Наукова робота
на Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузей знань і
спеціальностей у 2017/2018 навчальному році

Шифр: «MicroGrid-PLC»

Київ 2017

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. ПРИНЦИП РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЇ PLC.....	5
1.1. Типи частотного поділу каналів.....	6
1.2. Особливості застосування PLC у MicroGrid.....	7
1.3. Стратегії керування.....	9
2. ПРОТОКОЛ ПЕРЕДАЧІ X10.....	12
2.1. Основні властивості протоколу X10.....	12
2.2. Принцип організації бітових повідомлень.....	13
3. ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНА СИСТЕМА PLC НА БАЗІ ПРОТОКОЛУ X10.....	15
3.1. Можливості інтерфейсу X10.....	15
3.2. Структурна схема централізованої системи.....	15
3.3. Модифікація інформаційної інфраструктури.....	17
3.4. Формування та передавання сигналу за допомогою X10.....	18
3.5. Вибір способу модуляції сигналу.....	21
3.6. Схема PLC модуля.....	23
3.7 Реалізація вдосконаленого модему.....	24
ВИСНОВКИ.....	26
Перелік використаних літературних джерел.....	27

Вступ

На сучасному етапі розвитку електроніки та енергетики питання забезпечення ефективного та оперативного керування пристроями у складі складних електротехнічних комплексів, в тому числі з елементами розподіленої генерації (залученням альтернативних та відновлювальних джерел) набуває все більшої актуальності. Широке впровадження пристроїв та систем побутової автоматизації, розробка нових інтелектуальних методів керування електроспоживанням додатково підтверджують актуальність досліджень в цьому напрямку [1-4].

Необхідність підвищення енергетичної ефективності, розвиток та впровадження альтернативних та відновлювальних джерел призвели до формування концепції MicroGrid, в основі якої лежить розглядання групи взаємопов'язаних навантажень та розосереджених енергетичних ресурсів в межах чітко визначених електричних кордонів (визначення за офіційною версією U.S. Department of Energy Microgrid Exchange Group, [5]). По відношенню до центральної мережі живлення MicroGrid діє як єдиний контрольований об'єкт, який можна підключати та відключати від мережі для забезпечення як паралельної роботи, так і функціонування в «острівному» (автономному) режимі.

Внаслідок великої насиченості електротехнічними пристроями, які значно відрізняються за функціональними характеристиками, робочими режимами, рівнем споживання, важливістю для людини, актуальності набувають, зокрема, питання організації єдиної інформаційної інфраструктури. Одним із способів вирішення цієї задачі є організація передачі даних по існуючих силових лініях електричних мереж (PLC – Power Line Communication, [4,6]).

Існуючі технології передачі пакетів даних за допомогою PLC спрямовані на централізовану організацію мережі. В свою чергу це призводить до залежності кожного з пристроїв від налаштувань серверів, які потребують

налагодження та підтримки. З метою збільшення гнучкості організації мережі та керування електротехнічними пристроями доцільно розглянути однорангові мережі з елементами децентралізації, де кожний окремий модуль PLC реалізує функції керування. При підключенні нового модулю до мережі йому автоматично надається адреса у визначеному адресному просторі інформаційної мережі. Таким чином забезпечується інформаційний взаємозв'язок між модулями та узгодження функціонування підключених до них підлеглих пристроїв.

Автоматизація під'єднання модулів та введення елементів децентралізації дозволяє забезпечити ефективне керування електроспоживанням системи розподіленої генерації MicroGrid.

1. ПРИНЦИП РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЇ PLC

Організація каналів зв'язку по лініях електромережі має різний характер в залежності від їх галузі застосування, призначення, розміру мережі, що використовується для передавання сигналів; фізичних параметрів ліній електромережі, фізичних параметрів сигналів, що генеруються в мережу споживачами електричної енергії.

Основними галузями застосування каналів зв'язку по лініях електромережі є промисловість, сільське господарство та побут.

В залежності від призначення канали зв'язку по лініях електромережі поділяють на низько швидкісні та високошвидкісні, область використання яких наведена на рис.1 [4,7].

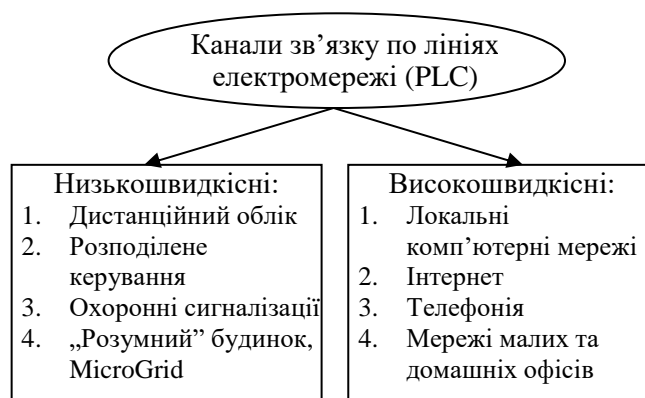


Рис. 1. Области застосування каналів зв'язку по лініях електромережі

Створення єдиної інформаційно-комунікаційної інфраструктури для передавання керуючих сигналів та інформації про стан кожного пристрою у кожний дискретний момент часу є необхідною умовою для реалізації ефективного керування електроживленням у MicroGrid. Наявність інформаційних зв'язків дозволяє кожному пристрою: 1) виробляти у мережу сигнали про власний стан; 2) приймати сигнали керування від центрального керуючого пристрою; 3) приймати сигнали про стан інших пристроїв. У відповідності з отриманими сигналами режим роботи пристрою змінюється або залишається незмінним.

1.1. Типи частотного поділу каналів

Технологія PLC використовує частотний поділ каналів передачі: високошвидкісний потік даних розбивається на декілька низькошвидкісних потоків, кожен із яких передається на окремій частоті з подальшим їх об'єднанням в один сигнал. Діапазон частот, що використовується – 4-21 МГц. Важливою задачею при цьому є організація моніторингу каналів передачі з метою виявлення ділянок спектру з перевищенням певного порогового значення загасання. У разі виявлення таких ділянок використання відповідних частотних смуг на певний час припиняється до відновлення нормального значення загасання.

Для створення використовують такі два типи частотного поділу сигналу:

- Звичайне мультиплексування FDM (Frequency-Division Multiplexing);
- Ортогональне мультиплексування OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

При використанні FDM тривалість захисних інтервалів (Guard Intervals) між несучими хвилями, необхідних для запобігання взаємного впливу, достатньо велика (рис.2), тому доступний частотний спектр використовується недостатньо ефективно.

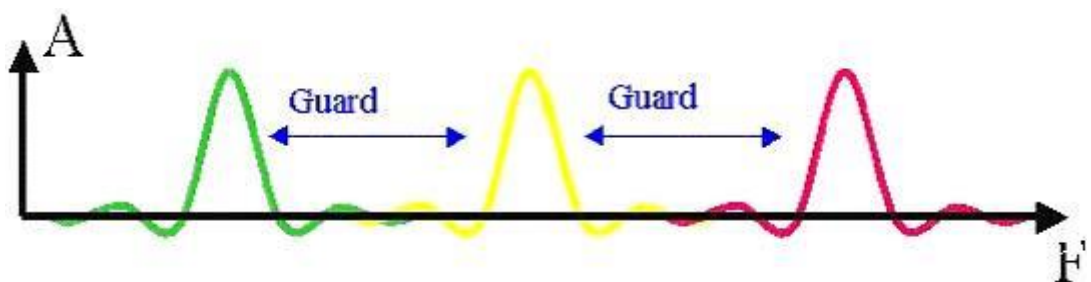


Рис. 2. Схема частотного поділу при звичайному мультиплексуванні FDM

У випадку ортогонального частото-подільного мультиплексування OFDM центральні частоти несучих хвиль розміщені так, що пік кожної з них співпадає з нульовим значенням попередньої (рис.3). Така конфігурація дозволяє ефективно використовувати всю доступну полосу частот.

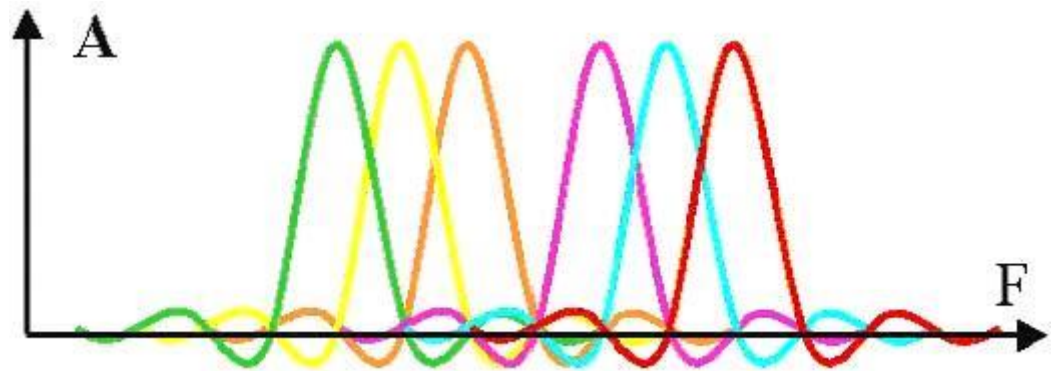


Рис. 3. Схема частотного поділу при ортогональному мультиплексуванні OFDM

Перед об'єднанням несучих хвиль у один сигнал вони попарно піддаються фазовій модуляції (рис.4), заданої для попарних комбінацій логічних двійкових значень послідовностей інформаційних бітів.

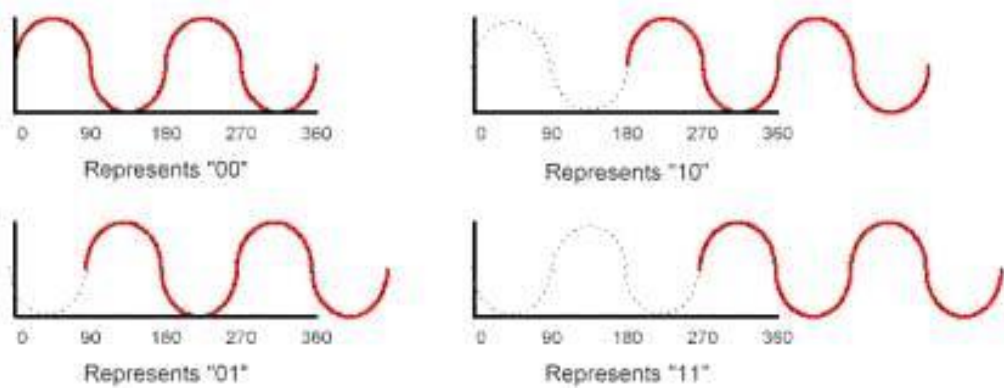


Рис. 4. Фазова модуляція сигналів для попарних бітових комбінацій

1.2. Особливості застосування PLC у MicroGrid

При використанні технології PLC передача даних по лініях електромережі не чинить впливу на робочі режими під'єднаних електричних пристроїв – лише PLC-модулі мають можливість отримувати і декодувати інформацію. Швидкість передачі різних способів передачі інформації сягає 1-200 Мбіт/с. Проте пропускна здатність мережі ділиться між усіма учасниками, тому одночасна передача даних між багатьма пристроями може виявитися ускладненою.

Використання технології PLC має достатньо суттєві недоліки, які полягають у можливому негативному впливі на інформаційний сигнал. Електропроводка з точки зору передавання інформаційних сигналів являє

собою складне середовище, що має розгалужену, деревоподібну неоднорідну структуру, яка зазнає дії багатьох відомих видів завад. Вагомими джерелами електромагнітних завад є [4]:

- джерела вторинного електроживлення;
- тиристорні регулятори змінної напруги;
- системи з електродвигунами;
- комутуючі пристрої;
- не ідеальність технічного стану існуючої електропроводки.

Внаслідок дії цих та інших завад інформаційні повідомлення можуть зазнавати пошкоджень та/або втрачатися взагалі. Для вирішення цього питання використовується завадостійкі коди, що забезпечують корегуючи властивості, частково або повністю компенсуючи пошкоджуючу дію завад шляхом введення додаткових захисних бітів [8-10]. Ці біти використовуються декодером на прийомній стороні для виявлення і виправлення помилок. По-друге, силова мережа служить спільним середовищем передачі даних, тобто в один момент часу передачу даних здійснює одразу декілька приладів. Для вирішення конфліктів трафіку застосовуються регулюючі механізми організації протоколу доступу до мережі.

Технологію PLC у системі MicroGrid можна використовувати для автоматичного збору даних з лічильників електричної енергії, що дає можливість здійснювати аналіз, обробку та прогнозування даних щодо електроспоживання [1]. PLC-модулі є елементами зв'язку пристроїв побутової та промислової електроніки в єдиній інформаційній інфраструктурі.

До переваг технології PLC слід віднести:

- відсутність потреби у прокладанні додаткових кабелів, укладанні їх в коробки, свердлінні стін і опорних конструкцій;
- швидкість встановлення устаткування;

У порівнянні з Wi-Fi технологія передачі даних PLC має наступні переваги:

- стабільніший зв'язок;

- більша безпека інформації;
- більші можливості щодо передавання multicast-трафіку, наприклад, IPTV;
- більша пропускна здатність;
- на якість зв'язку не впливає матеріал і товщина стін у приміщеннях.

Найбільш відомими протоколами реалізації технології передачі даних в PLC мережах є [11]:

- X-10
- CEBus
- LonWorks
- Adaptive Networks
- DPL 1000
- PLC Universal Powerline.

В абсолютній більшості застосувань реєстрація нових пристроїв у мережі та їх подальше функціонування відбувається через головний сервер або модем. З метою підвищення гнучкості та розгалуженості інформаційної інфраструктури пропонується взяти за основу протокол X10 та модифікувати його, додавши функціональні можливості децентралізованої стратегії керування.

1.3. Стратегії керування

Існуючі підходи до керування електроживленням пристроїв, об'єднаних у єдину інформаційну інфраструктуру середовище, базуються на двох основних принципах – централізованого та децентралізованого керування або їх комбінаціях, які найчастіше виявляються найбільш доцільними [1,12].

Централізований підхід передбачає наявність центрального керуючого блоку, який отримує дані про поточний стан пристроїв, які обмінюються інформацією тільки з центральним блоком та не отримують данні про наявність або відсутність інших пристроїв у системі.

Незважаючи на можливості сучасної обчислювальної техніки, очевидно, що централізоване керування більш складними системами виявиться

настільки неефективним, що поняття оперативного керування втратить сенс. Крім того, помилки, пов'язані з централізованим керуванням, можуть мати катастрофічний характер. Тому централізоване керування, як самостійне, навряд чи може розглядатися як перспективне.

Отже, централізований підхід мало підходить для вирішення задачі ефективного керування електроживленням та створення єдиної інформаційної інфраструктури MicroGrid внаслідок таких факторів, як: 1) велика різноманітність типів пристроїв; 2) значна кількість можливих зв'язків та умов роботи; 3) постійний розвиток та зміни структури системи, обумовлені появою нових типів навантажень та функцій, що виконуються ними, внаслідок чого виникає необхідність створення додаткових зв'язків та розробки відповідних алгоритмів керування; 4) тривалий час обробки великих інформаційних потоків.

У децентралізованій системі обмін інформацією, узгодження та зміна робочих режимів здійснюється на підставі обміну інформацією між окремими пристроями. Переваги децентралізованого керування є очевидними при розгляданні функціонування міжнародної телефонної мережі. Незважаючи на високу складність та величезну кількість точок перемикавання – комутаційних вузлів – близько 109-1010 (щогодини не менше 104 елементів має виходити з ладу [13]) – ця мережа забезпечує задовільний зв'язок між абонентами. Працездатність системи забезпечується високим ступенем децентралізації керування та великою автономією складових частин – телефонних підстанцій.

При децентралізованому керуванні кожний пристрій за допомогою системи керування регулюючого елемента, яким зазвичай виступає перетворювач, взаємодіє з певним числом інших пристроїв-“сусідів”, які утворюють локальне “підсередовище”.

Децентралізована система в силу принципів її функціонування здатна досить швидко вирішувати локальні задачі, однак не забезпечує вирішення глобальної задачі оптимізації споживання енергії та не може вважатися стало

працюючою [14]. Оцінка загального стану та рівня споживання всього об'єкта при цьому практично неможлива.

Найбільш ефективним є комбіноване керування, яке містить елементи централізованої і децентралізованої стратегій. В цьому випадку передбачається, що в системі присутній центральний блок керування, але він виконує функцію контролю та керування на узагальненому рівні – визначає тенденції якості роботи, поточний стан споживання електроенергії, виробляє загальні оціночні сигнали про стан системи та необхідність вжиття заходів щодо зменшення споживання шляхом переходу в більш економічній режим. Таким чином, формується гнучка інформаційна інфраструктура, здатна адаптуватися до зміни параметрів та поточного рівня споживання. Наприклад, одночасне вмикання декількох споживачів великої потужності, здатне викликати небажане перевищення споживання, регулюється введенням зсувів моментів комутації, плавним наростанням або черговістю вмикання пристроїв.

При комбінованому керуванні центральний пристрій та підсистеми керування наступного рівня (див. рис.2.3) утворюють централізовану систему, проте між собою підсистеми узгоджують свої дії за децентралізованим принципом. При переході на нижчий рівень також реалізується централізоване керування, в якому центральним керуючим блоком слугує відповідна підсистема, а керованими об'єктами – підсистеми наступного нижчого рівня або ж безпосередньо електротехнічні пристрої – генератори або навантаження – у випадку, якщо йдеться про найнижчий рівень керування.

Поєднання централізованого та децентралізованого принципів побудови систем керування з комунікаційним середовищем передаванням інформації дозволяє враховувати такі аспекти, які не досить повно враховуються при звичайній побудові систем керування, а саме:

1. Індивідуальні властивості електротехнічного обладнання; кваліфікацію оператора, який обслуговує устаткування; функцію витрат; виробничу функцію; тарифні ставки та інші економічні показники.

2. Часові залежності вектору тарифної вартості витрат, який може відрізнятися не тільки для різних пристроїв, але й для тих самих, якщо використовується на різних ділянках або підприємствах.

3. Зміну значень вектору вартості витрат та виробничої функції в залежності від кількості залученого до роботи електротехнічного обладнання.

Розглянемо можливості введення елементів децентралізації при створенні інформаційної інфраструктури MicroGrid на базі протоколу X10.

2. ПРОТОКОЛ ПЕРЕДАЧІ X10

2.1. Основні властивості протоколу X10

X10 - міжнародний відкритий промисловий стандарт, застосовуваний для зв'язку електронних пристроїв в системах побутової автоматизації. Стандарт X10 визначає методи і протокол передачі сигналів керування електронними модулями, до яких підключені електротехнічні пристрої, з використанням існуючих ліній електричної мережі або бездротових каналів.

Стандарт X10 був розроблений в 1975 році компанією Pico Electronics для управління побутовими електроприладами.

В наші дні стандарт залишається одним з найпопулярніших, хоча є ряд альтернатив з більш широкими можливостями.

Для зв'язку модулів мережі X10 використовується звичайна електрична мережа. Закодовані цифрові дані передаються за допомогою радіочастотних імпульсів з центральною частотою 120 кГц, тривалістю 1мс, синхронізованих з моментом переходу змінного струму через нульове значення. За один перехід через нуль передається один біт інформації. Приймач так само формує вікно очікування поблизу переходу напруги через нуль. Розмір вікна (тривалість інтервалу очікування) складає 200 мкс. Наявність імпульсу у вікні свідчить про значення логічної «1», відсутність - логічного «0».

Самі PLC-модулі мережі підключаються в якості «інтелектуальних вимикачів» до електромережі, хоча існують більш складні вбудовані модулі, наприклад замінні розетки, вимикачі та інше.

Відносно висока несуча частота не дозволяє сигналу поширюватися через трансформатори або між фазами в багатофазних мережах і мережах з розщепленою фазою. В мережах з розщепленою фазою для передачі сигналу з фази на фазу може використовуватися звичайний конденсатор, але для багатофазних мереж і мереж з розщепленою фазою, де простого конденсатора мало, необхідно використовувати активний повторювач. При передачі сигналу з фази на фазу необхідно враховувати вищезазвану умову - передача біта починається при перетині нуля. Саме з цієї причини, при переході з фази на фазу, сигнал зсувається на $1/6$ періоду.

Ще одним важливим моментом є можливість блокування сигналів за межами дії мережі. Для знешкодження впливу модулів однієї мережі X10 на іншу використовуються індуктивні фільтри.

2.2.Принцип організації бітових повідомлень

Інформаційний пакет у протоколі X10 складається з адресного і командного поля, що відправляються контролером керованого модулю. У більш складних контролерах додатково реалізовано функцію опитування керованих пристроїв про їх поточний статус. Цей статус може бути простим («ввімкнено» або «вимкнено») або виражатися числовим значенням (поточне значення яскравості, температури або інших параметрів).

Незалежно від середовища передачі (електрична мережа або радіосигнал), пакети X10 складаються з:

4 біти – код будинку;

4 біти – код модуля (може бути задано кілька модулів);

4 біти – код команди.

Щоб уникнути плутанини і зручності користувачів, код будинку задається латинськими буквами від А до Р, а код модуля - цифрами від 1 до 16.

Коли мережа X10 встановлена, кожен модуль налаштовується таким чином, щоб відгукуватися на одну з 256 можливих адрес (16 кодів будинків × 16 кодів модулів = 256). Кожен модуль реагує тільки на команди, відправлені безпосередньо йому і на кілька ширококомовних команд.

Наприклад, по мережі може прийти повідомлення виду: «модуль A3» а за ним команда «включитися» (turn on), що змушує модуль A3 включити приєднаний до нього пристрій. Керування кількома модулями здійснюється повідомленням виду: «модуль A3», «модуль A15» і «модуль A4», а потім команда «включитися». В результаті всі перераховані вище модулі повинні включити підключені до них пристрої.

Варто відзначити, що немає обмеження на використання більш ніж одного коду будинку в разі перерахування, однак, ширококомовні команди вигляду «включити все світло» або «вимкнути всі модулі» впливають тільки на модулі з одним кодом будинку. Таким чином, коди будинків можуть бути використані для поділу мережі X10 на окремі зони.

Протокол X10 є достатньо повільним. Передача адреси приладу та коду команди може зайняти 3/4 секунди. Це може бути непомітним при використанні настільного контролера, але суттєво відчутним при використанні двостороннього зв'язку, а також при великій кількості пристроїв у мережі.

В мережі X10 може передаватися тільки одна команда в кожний момент часу. Якщо в одному і тому самому інтервалі часу буде вестись передача двох і більше команд, це призведе до колізії, в результаті чого команди не будуть коректно прийнятими або виконаними вірно.

Деякі блоки живлення, які використовуються в сучасній апаратурі, можуть «поглинати» команди протоколу X10. Це відбувається через використання конденсаторів на вході блоків живлення, які створюють низький опір для високочастотного сигналу, що свою чергу згладжує сигнал. При використанні подібних приладів застосовуються вхідні фільтри, які забезпечують безперешкодне проходження пакетів X10.

3. ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНА СИСТЕМА PLC НА БАЗІ ПРОТОКОЛУ X10

3.1. Можливості інтерфейсу X10

Протокол X10 не підходить для передачі інформаційних даних у вигляді Інтернет-пакетів чи трансляцій цифрового телебачення через низьку швидкість, проте цей протокол добре пристосований та успішно довів свої переваги при передаванні відносно невеликих пакетів даних між пристроями, зокрема, у системах побутової автоматизації та інтелектуального керування MicroGrid. Перевагою його використання є відкрита технологія, а також порівняно невисока вартість приладів для зчитування та передавання інформації. Протокол X10 наразі використовується найчастіше для створення комунікаційних систем побутової автоматизації будинків і технологічних об'єктів [4], а також для передачі даних на великі відстані. Хоч цей протокол має не надійну передачу даних, проте за рахунок високої амплітуди імпульсів дані можуть передаватися на великі відстані, що дає можливість передавати інформаційні пакети навіть через лінії електропередачі (ЛЕП).

Протокол X10 характеризується недостатньою гнучкістю для задоволення потреб користувача та оператора в інтелектуальній розгалуженій системі керування, оскільки оперує лише з перед установленими командами і жорстко заданою логікою керування. Проте, його можна дещо вдосконалити і зробити більш доступним для створення нових команд і реалізації нових приладів та способів керування.

3.2. Структурна схема централізованої системи

Протокол передачі даних через силові лінії широко використовується в системах як закритого, так і відкритого типу. Отже, реалізація інформаційної інфраструктури MicroGrid та організація узгодженого керування електротехнічними пристроями може здійснюватися як в рамках однієї квартири чи будівлі, так і у рамках декількох будівель, що мають PLC-модулі. Для того щоб приєднатися до вже існуючої системи або створити нову,

необхідно забезпечити встановлення та налаштування центрального серверу (панелі керування пристроями), до функцій якого відноситься, зокрема, організація взаємозв'язку та інформаційного обміну з PLC-модулями. При цьому у існуючому протоколі модулі не пов'язані між собою і не можуть безпосередньо обмінюватися інформацією, що накладає обмеження на використання протоколу X10.

Узагальнену структурну схему організації інформаційної інфраструктури MicroGrid на базі протоколу X10 наведено на рис.5. При цьому, як видно з рис.5, система є повністю централізованою.

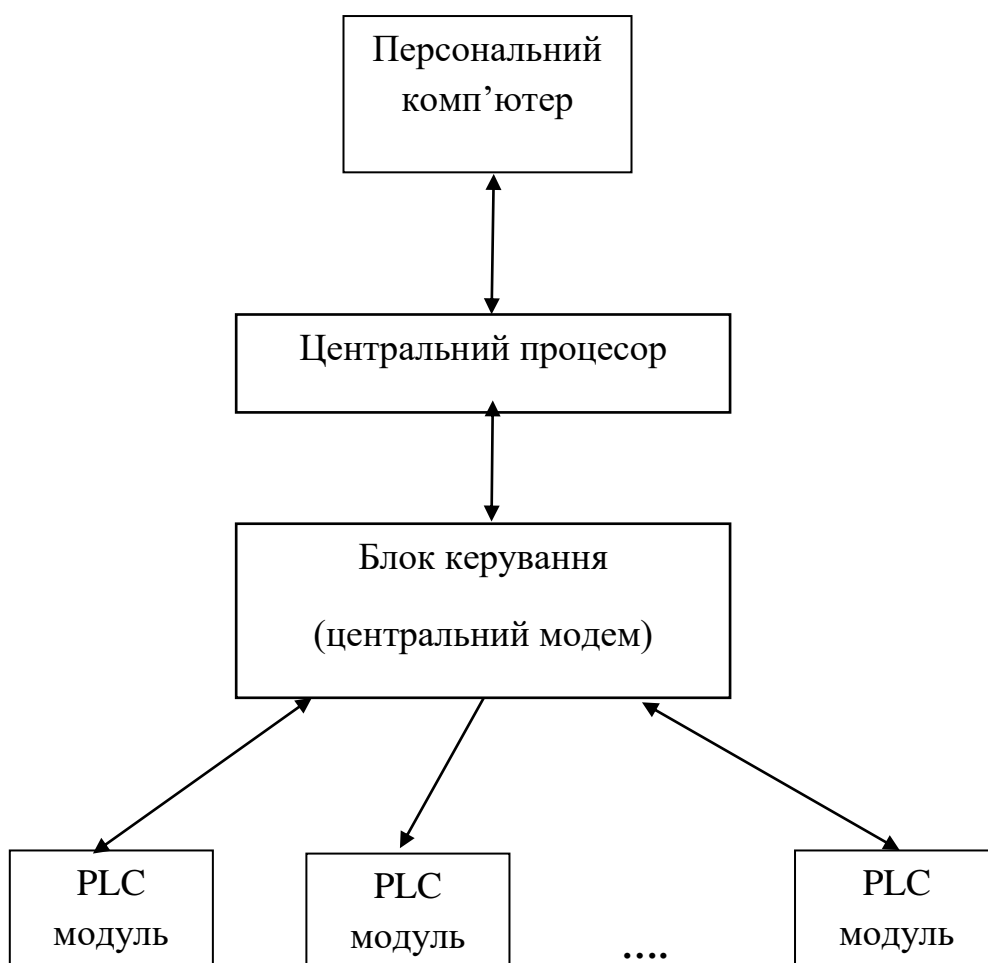


Рис 5. Структурна схема централізованої системи інформаційної інфраструктури на базі X10

Сучасні PLC-модулі можна додатково відстежувати та програмувати за допомогою комп'ютера, що зручно при використанні великої кількості таких модулів.

Зі структурної схеми видно чітку вертикальну ієрархію пристроїв, що притаманно централізованим системам. Робочі режими та перемикання пристроїв задаються відповідними PLC-модулями. Без центрального блоку керування неможливо організувати PLC-модулі у єдину мережу та налаштувати їх роботу.

Розглянемо можливість модифікації існуючого протоколу X10 шляхом введення децентралізованого обміну (горизонтальних зв'язків) у систему керування.

3.3. Модифікація інформаційної інфраструктури

Для вдосконалення системи та розширення її функціональних можливостей пропонується введення децентралізованої системи керування пристроями. У модифікованій системі PLC-модулі є рівноправними з точки зору передавання інформаційних пакетів. Таке вдосконалення системи за певних умов дає змогу уникнути навіть використання центрального блоку керування, що значно здешевлює систему і може стати корисним для невеликих об'єктів, наприклад, квартир. У випадку повної децентралізації PLC-модулі можуть взаємно контролювати один одного та вимикатися під час аварійної ситуації, щоб уникнути короткого замикання. Підлаштування робочих режимів пристроїв відбувається узгоджено для забезпечення енергоефективності. Користувач має змогу контролювати та змінювати робочі режими одночасно декількох пристроїв, або ж вони зможуть підлаштовуватися автоматично під потреби споживача.

Наприклад, при підключенні приладу з високим ієрархічним рівнем та великою потужністю споживання формується інформаційний сигнал оповіщення інших PLC-модулів, які у випадку їх меншого пріоритету та заданої потужності альтернативних джерел живлення пропорційно зменшують значення власної потужності споживання для уникнення перевантаження мережі.

Таким чином реалізується повністю децентралізована або комбінована стратегія керування (рис.6) [1].

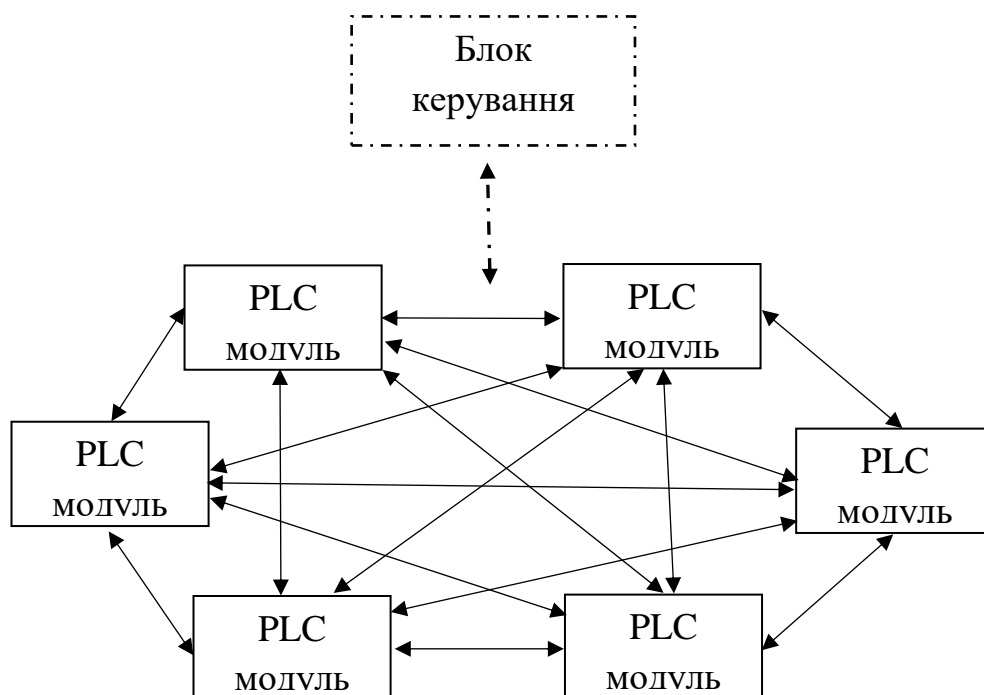


Рис. 6. Структурна схема децентралізованої системи PLC

У наведеній структурній схемі (див. рис.6) центральний блок керування стає не обов'язковим елементом (для окремих застосувань). При цьому PLC-модулі пов'язані перехресними зв'язками.

3.4. Формування та передавання сигналу за допомогою X10

Протокол X10 має невелику швидкість передачі інформації, тому структура інформаційного пакету є достатньо простою. Пакет складається з трьох окремих частин. Для збільшення надійності передачі пакет передається двічі, проте це все одно не вважається надійним способом передачі інформації, оскільки наявність значного рівня завад різної природи може призвести до пошкодження корисного і відповідно некоректного спрацювання підлеглого пристрою.

На рис.7 наведено часові діаграми, що пояснюють формування інформаційного сигналу у протоколі X10, часове розташування якого

прив'язано до переходу синусоїдальної напруги однофазної електричної мережі через нульове значення.

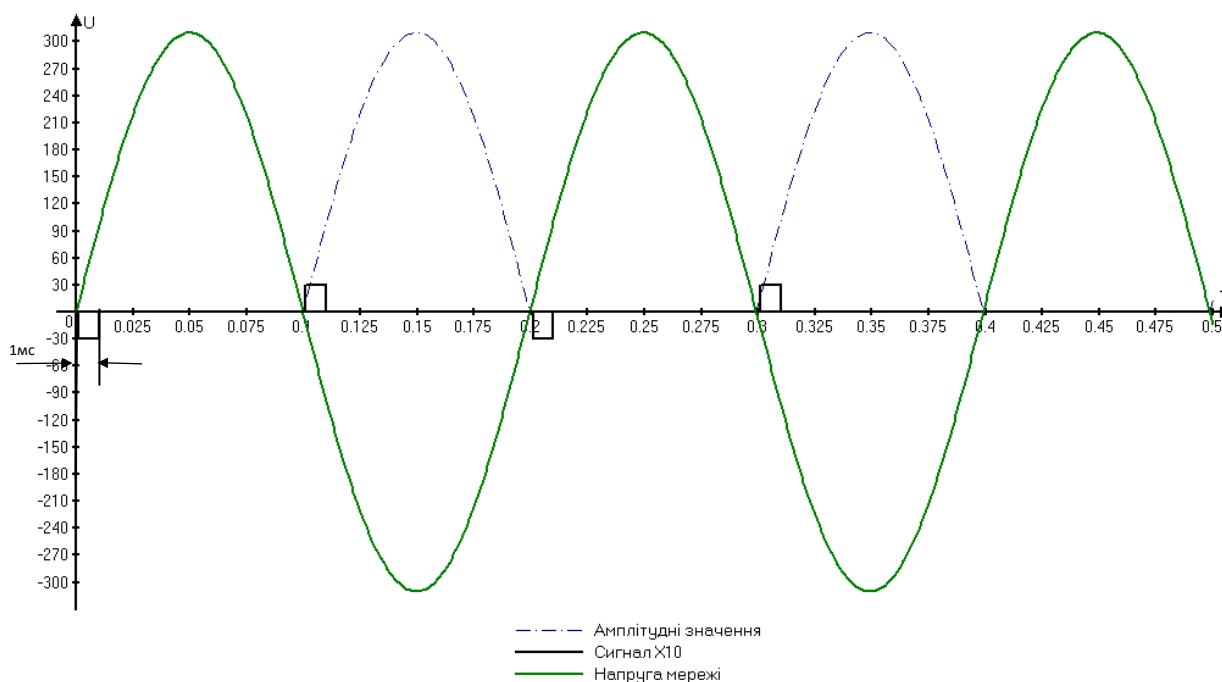


Рис. 7. Передача корисного сигналу X10 в однофазній мережі

Ширина вікна для передачі інформації у протоколі X10 складає 10 мс, корисний сигнал всередині вікна має тривалість 1 мс. PLC-модуль передає пакет одразу після перетину нульового значення напруги, проте для запобігання впливу сторонніх сигналів встановлюється затримка у 100 мкс. Після цього передається інформаційний біт. Сигнал реалізується за допомогою імпульсу напруги тривалістю 1 мс та частотою 120 кГц. Через високу частоту інформаційний сигнал не впливає на роботу пристроїв, що підключені до мережі.

Усього для передачі інформації використовується три пакети даних:

- пакет старту коду (1110),
- пакет передачі адреси пристрою,
- пакет коду команди.

Інформаційний пакет передається у вигляді трьох сигналів логічних «1» або «0». Якщо в певному проміжку часу наявна напруга вище заданого порогового рівня, фіксується значення логічної «1», якщо в цьому проміжку напруга не фіксується – логічного «0». За одну напівхвилю напруги мережі

передається 1 біт корисного сигналу. Для надійного передавання сигнал подається двічі (рис.8). Отже, пропускна здатність при реалізації даного протоколу складає 20 біт/с.

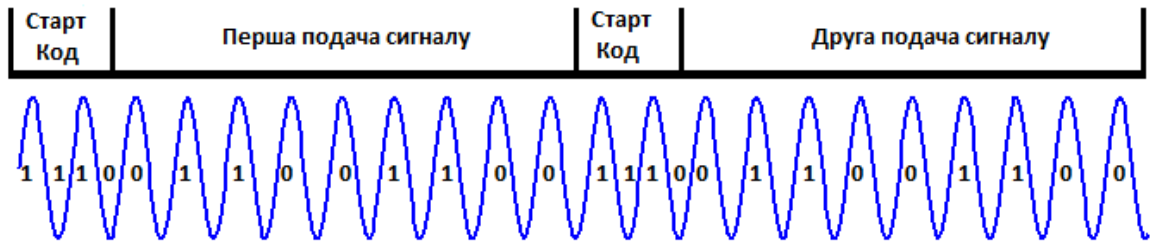


Рис. 8. Формат інформаційного пакету X10

Як можна помітити, усього повна передача сигналу займає 11 циклів напруги.

На рис.9 наведено діаграму передавання інформаційного пакету у трифазній електричній мережі.

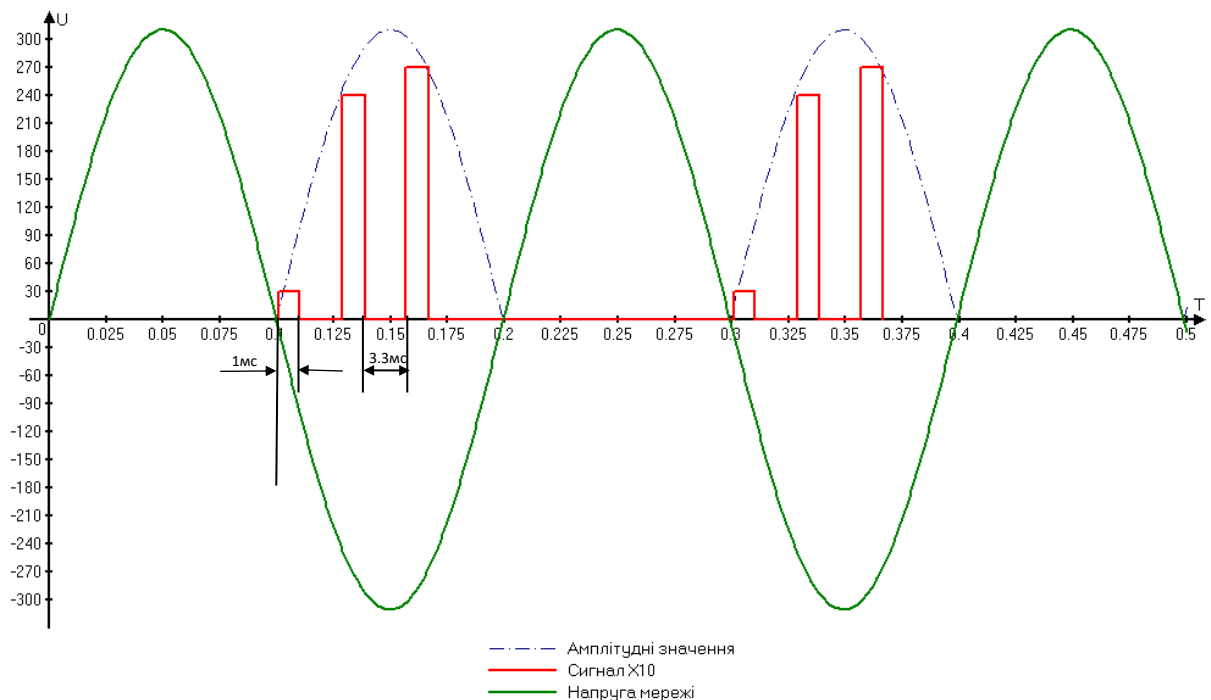


Рис. 9. Передача корисного сигналу X10 у трифазній мережі

Принцип передачі схожий з однофазною мережею. Рис.9 представлено для мережі з частотою 50 Гц, для 60 Гц затримка між сигналами

встановлюється на рівні 1,778 мс. Ці три сигнали передаються таким чином, щоб на кожній з фаз сигнал починався з затримкою у 100 мкс після перетину напруженою нульового значення [15].

3.5. Вибір способу модуляції сигналу

Оскільки протокол X10 використовується як для однофазних, так і для трифазних систем, виникають певні відмінності в передачі та модуляції інформаційного сигналу. Для однофазної мережі зазвичай використовується амплітудна модуляція сигналу. Введення додаткової частотної модуляції дає змогу розпізнавати сигнал, що може фіксуватися не тільки вхідними частотами, а також і сумою або різницею вхідних частот.

Якщо модулюючий сигнал містить певну множину сигналів різних частот, то суми і різниці цих частот займуть дві смуги, одна нижче, інша вище несучої частоти F_c . Їх називають верхньою та нижньою бічними. Верхня смуга є копією початкового сигналу, зсуненого на частоту F_c . Нижня смуга являє собою інвертовану копію початкового сигналу, тобто верхні частоти сигналу є нижніми частотами в нижній бічній.

Нижня бічна - це дзеркальне відображення верхньої бічної по відношенню до частоти несучої F_c . Система з амплітудною модуляцією, яка передає обидві бічних і несучу, відома як двосмугова система (DSB - Double SideBand). Несуча не несе корисної інформації і може бути видалена, але з несучої або без, смуга сигналу DSB вдвічі більше смуги початкового сигналу. Для звуження смуги можливе витіснення як несучою, а й однією з бічних, так як вони несуть одну інформацію. Цей вид модуляції відомий як односмугова модуляція з пригніченою несучою (SSB-SC - Single SideBand Suppressed Carrier).

Демодуляція сигналу виконується шляхом змішування модульованого сигналу з несучою тієї ж самої частоти, що і на модуляторі.

Початковий сигнал потім отримують як сигнал, розташований на заданій частоті (або у смузі частот), що дозволяє відфільтрувати його від інших

сигналів. При використанні SSB-SC несуча для демодуляції може не збігатися з частотою несучої на модуляторі. Невелика різниця між двома частотами є причиною розбіжності частот [16].

Що стосується систем для трьох фазної мережі, то в даному випадку пропонується використовувати амплітудно-фазову модуляцію, що враховує зсув фаз і створює сигнали у різні проміжки часу. Ідея децентралізованої системи пристроїв, об'єднаних інформаційними зв'язками по протоколу X10, полягає у використанні саме амплітудно-фазової модуляції сигналу для збільшення пропускної здатності каналу.

Один із сучасних методів амплітудно-фазової модуляції заснований на одночасній передачі множини несучих.

Наприклад, розглянемо використання 48 несучих, розділених смугою в 45 Гц. Шляхом комбінування фазової і амплітудної модуляції кожна несуча може мати до 32 дискретних станів на кожен період напруги мережі, дозволяючи переносити 5 біт на період. Таким чином, 48 несучих можуть переносити: $5 \times 48 = 240$ біт на період. Для роботи зі швидкістю 9600 біт/с швидкість модуляції вимагає тільки 40 періодів ($9600: 240$), така низька швидкість досить стабільна до фазових і амплітудних стрибках [16].

Таким чином, кожний пристрій має своє «підвікно» для передачі даних всередині загального «вікна», призначеного для передавання даних всіма пристроями. Заповнюватися це вікно буде поступово. При подачі першого старт-коду PLC-модулі повинні узгодитися у часових проміжках для передачі, щоб запобігти наступній появі колізій (рис.10). Реєстрація нового пристрою у системі проводиться шляхом генерування спеціального формату біту у вигляді тривалої логічної «1», яка слугує оповіщенням для інших пристроїв про те, що в мережі з'явився новий пристрій. Кожен пристрій мережі додає цю подію до себе в пам'ять, після чого відновлюється робота мережі, а новий пристрій зчитує існуючу картину заповнення інформаційного вікна і автоматично підлаштовується до генерування сигналу у певний проміжок часу, що відповідає його реєстраційному номеру у мережі.

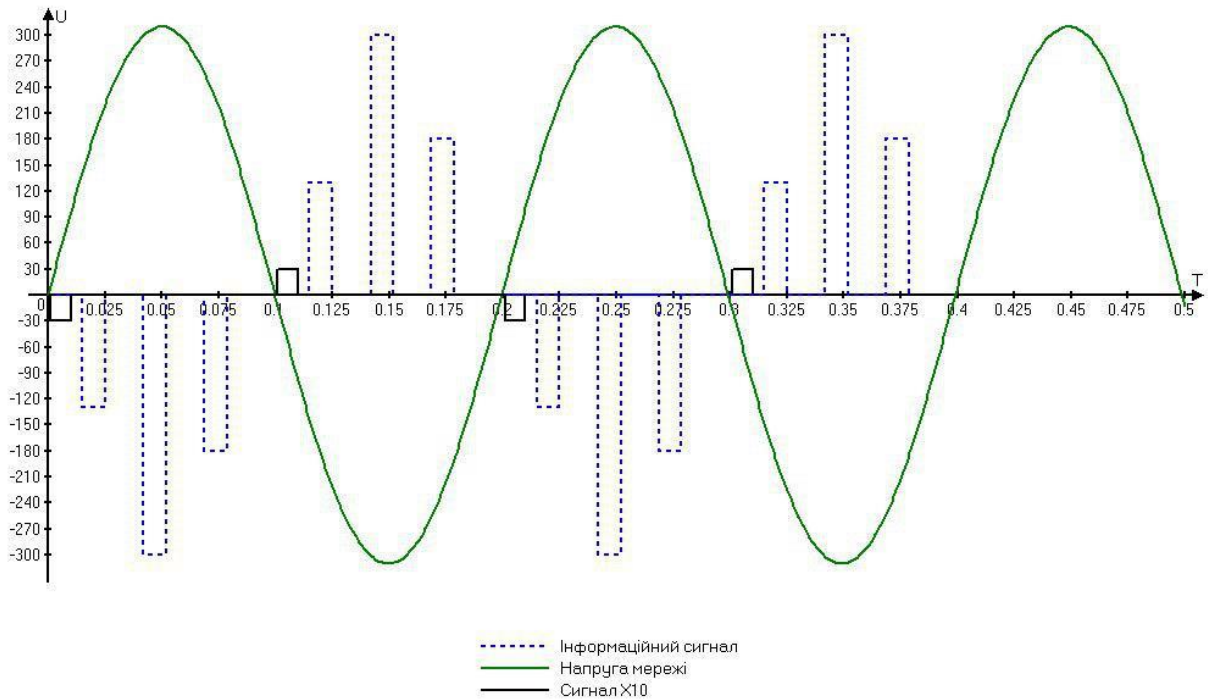


Рис. 10. Часова діаграма модульованого сигналу у протоколі X10

Тривалість імпульсів та проміжки між ними можуть відрізнятися. Таким чином, використовуючи відкритий протокол X10, можна отримати можливість підключення пристроїв до децентралізованої системи PLC.

При цьому діють певні обмеження, що встановлюються протоколом X10, а саме: максимально можлива кількість пристроїв у мережі становить 256, оскільки кількість можливих 8-бітових адрес становить 2^8 .

3.6. Схема PLC модуля

Усі PLC-модулі однієї системи мають однотипну структуру та принципову схему побудови, оскільки це є найдешевшим та найпростішим способом реалізації. Особливість налаштування повинна враховувати стандарти електричної мережі (за стандартами США напруга мережі має параметри 120 В та 60 Гц, в Україні та країнах Європи – 220 В та 50 Гц).

На рис.11 наведено схему уніфікованого PLC-модуля, в якому реалізовано узгодження інтерфейсів PLC для під'єднання до електричної мережі з промисловим інтерфейсом RS-485.

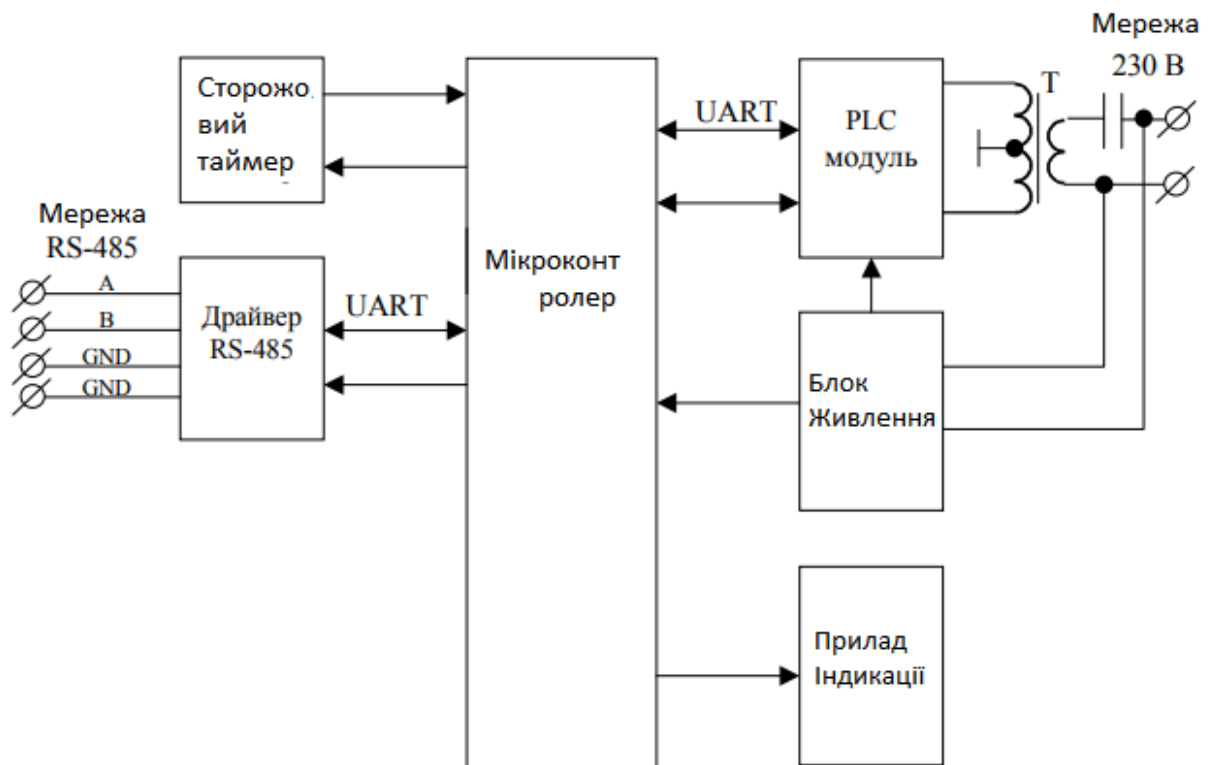


Рис. 11. Структурна схема PLC-модуля

Найбільш розповсюдженими у світі є PLC-модулі, які стали основою для інтерфейсу X10 – це моделі PL513 та TW523 [15]. Розроблені компанією PowerHouse модулі стали основою для появи нових моделей PLC-модулів.

Сучасні модеми PLC мають мікроконтролер для отримання, обробки та надсилання даних. Тому для розробки вдосконаленого приладу для децентралізованої системи знадобиться внесення поправок у програмний код мікроконтролера та занесення у пам'ять нових команд керування.

3.7 Реалізація вдосконаленого модему

Для створення PLC-модуля, в якому буде передбачено функціональну можливість реалізації децентралізованого керування, в якості мікроконтролера пропонується використання Arduino на базі процесорів ATmega. Для розробки приладу PLC розроблено готову бібліотека команд для протоколу X10 з урахуванням фазового зсуву при реалізації амплітудно-фазової модуляції.

Запропоноване рішення не вносить значні зміни в схемотехніку технології передачі даних X10, а лише змінює правила передачі даних та кодування. Принцип роботи модифікованого протоколу X10 полягає в тому, що кожен новий пристрій сканує мережу на наявність вже існуючих модулів. Якщо інформаційний канал вже створений іншими пристроями X10, то новий пристрій очікує на синхронізуючий біт, після чого шукає вільне місце в інформаційному «вікні». Таким чином пристрій «бронює» собі адресу, за якою можна буде до нього звернутись. Інші пристрої при цьому теж фіксують новий модуль і включають його до своєї карти мережі для подальшого інформаційного обміну. Таким чином утворюється черга в інформаційному каналі, де адреса кожного із пристроїв визначається фазовим зсувом у вільному діапазоні від моменту перетину мережевою напруги нульового значення. Якщо це перший пристрій в мережі, він сам створює інформаційний канал, і постійно сканує його на предмет появи нових пристроїв. В такий самий спосіб передаються сигнали керування та даних.

ВИСНОВКИ

В даній роботі представлено розробку модифікованого протоколу з введенням децентралізованого обміну між пристроями на базі протоколу X10 в інформаційній інфраструктурі MicroGrid з реалізацією передавання даних за технологією PLC. У запропонованому способі кожен новий пристрій автоматично реєструється у мережі і взаємодіє з наявними пристроями.

Використання децентралізованої стратегії підвищує його гнучкість та можливості узгодженої взаємодії між пристроями системи MicroGrid для реалізації оперативного енергоефективного керування.

Запропоновано використання амплітудно-частотної та амплітудно-фазової модуляції сигналів при формуванні імпульсів інформаційних пакетів протоколу X10, що дозволяє уникнути колізій та збільшити пропускну здатність каналу. Максимальна кількість одночасно підключених PLC-модулів у системі обмежується значенням 256.

Перелік використаних літературних джерел

1. Інтелектуальні системи забезпечення енергозбереження житлових будинків. Навчальний посібник. – К.: Медіа-ПРЕС, 2008. – 256 с.
2. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы: Под общ. ред. акад. НАН Украины А.В. Кириленко / Институт электродинамики НАН Украины. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2014. – 408 с.
3. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
4. Жуйков В.Я., Терещенко Т.О., Хохлов Ю.В. Передавання сигналів керування в умовах завод. Навчальний посібник. – К.: Аверс, 2010. – 256 с.
5. LANTERO A. How Microgrids Work [Електронний ресурс] / ALLISON LANTERO // U.S. Department of Energy – Режим доступу до ресурсу: <https://energy.gov/articles/how-microgrids-work>.
6. J. Misurec, P. Mlynek and S. Bezzateev, "The modeling of power line for PLC in smart grids," 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS), St. Petersburg, 2017, pp. 780-786. doi: 10.1109/PIERS.2017.8261848.
7. Колотов М.В. Передача інформації по лініях електроживлення // Енергоінформ / Укренергозбереження. – 2003. – №42(224). – С. 5-6.
8. Ямненко Ю. С. Дискретні спектральні перетворення Уолша та Адамара та їх застосування для систем розширення спектру / Ю. С. Ямненко, Є. О. Желясков. // Дванадцята міжнародна науково-практична конференція "Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС-2017". - 26-29 червня 2017. – 2017. – С. 420–424.
9. I. I. Bezukladnikov and A. A. Yuzhakov, "Problems of synchronous and noise immune transmission of information in intelligent mechatronic systems," 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in

Telecommunications (SINKHROINFO), Kazan, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/SINKHROINFO.2017.7997500.

10. Гепко И. А., Олейник В. Ф., Чайка Ю. Д., Бондаренко А. В. «Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития».

11. Pablo Gagliardo. Take advantage of power line communications in nextgen home networking & IPTV designs. — CommsDesign. 2009 (<http://www.commsdesign.com/article/printableArticle.jhtml?articleID=217300850>)

12. Буткевич А.Ф., Зелинский Е.С. Интеллектуализация систем диспетчерского управления территориально-распределенными электроэнергетическими объектами – основные задачи и их решение // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск „Силова електроніка та енергоефективність”. – 2001. – Ч.3. – С.76-81.

13. Варшавский В.И. Коллективное поведение автоматов. – М.: Гл. ред. физ.-мат. литературы изд-ва „Наука”, 1973. – 408 с.

14. Цетлин М. Л. Исследования по теории автоматов и моделирование биологических систем. - М.: Наука, 1969. – 316 с.

15. The X-10 PowerHouse Power Line Interface Model # PL513 and Two-way Power Line Interface Model # TW523 [Электронный ресурс] // X-10 (USA) Inc. – Режим доступа до ресурсу: http://jvde.us/info/x10_protocol.pdf.

16. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с. : ил. – Парал. тит. англ.