

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”
Кафедра промислової електроніки**

Реєстраційний № ____

На правах рукопису

УДК 621.314

“Затверджую”

Зав. кафедрою д. т. н., проф.

_____ /Жуйков В. Я./

**АТЕСТАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА
УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ
ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА**

спеціальності: Електронні системи 8.090803

Виконавець роботи:

Шевченко В.М.

Науковий керівник:

доктор технічних наук,

професор

Терещенко Т.О.

Київ 2005

РЕФЕРАТ

Робота складається з: 135 друкованих сторінок, 36 ілюстрацій, 6 таблиць, одного додатка та 31 джерела інформації.

Метою роботи є розробка способів управління електроспоживанням локального об'єкта шляхом наближення характеристики електроспоживання до заданої. Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- аналіз та вибір принципів керування;
- розробка способів наближення характеристик електроспоживання до заданої;
- розробка алгоритму управління електроспоживанням локального об'єкта з урахуванням пріоритетів навантажень „розумного будинку”;
- розробка пристрою управління електроспоживанням локального об'єкта.

Перевірка отриманих результатів здійснена за допомогою комп'ютерних програм Borland C++ 6.0 і Mathcad 2001Pro.

Наукова новизна полягає в наступному:

- запропоновано спосіб порівняння характеристик електроспоживання шляхом обчислення нормованих ОБ-спектрів;
- отримані умови наближення характеристики до заданої;
- запропоновано спосіб наближення характеристики електроспоживання до заданої шляхом зсуву елементарних комірок;
- запропоновано спосіб наближення характеристики електроспоживання до заданої шляхом зсуву елементарних підфункцій.

Дані результати можуть бути використані для застосування в системах керування електроспоживанням локального об'єкта.

Розроблені способи отримання заданої характеристики електроспоживання дозволяють зменшити навантаження на альтернативні джерела енергії у випадку наближення характеристики до рівномірної або отримати вигоду у грошових витратах за рахунок використання електроенергії у час її найменшої вартості.

Опублікована одна стаття в журналі „Технічна електродинаміка” Тематичний випуск – 2004, ч.6, с. 23-26 і одна подана до публікації в журнал „Електроника и связь”.

Ключові слова: локальний об'єкт, ОБ-перетворення, вимірювально-комутуюча система, елементарна комірка, елементарна підфункція, характеристика електроспоживання, електромодем, експериментальна установка, протокол передачі.

ABSTRACT

The master's thesis consists of 135 printed pages, 36 illustrations, 6 tables, enclosure and 31 sources.

The purpose of work is development of ways of control electroconsumption of local object by approach of the characteristic electroconsumption to set. For achievement of the purpose it is necessary to solve the following tasks:

- the analysis and a choice of principles of control;
- development of ways of approach of characteristics electroconsumption to desired;
- development of algorithm of management electroconsumption of local object in view of priorities of loadings of “a clever house”;
- development of the device of control electroconsumption of local object;

Check of the received results is carried out with the help of computer programs Borland C ++ 6.0 and Mathcad 2001Pro.

Scientific novelty consists in the following:

- the way of comparison of characteristics electroconsumption is offered by calculation of the normalized OB - spectra;
- the received conditions of approach of the characteristic to set;
- the way of approach of the characteristic electroconsumption to set by shift is offered to elementary closets;
- the way of approach of the characteristic electroconsumption to set is offered by shift elementary underfunctions.

The given results can be used for application in control systems by electroconsumption of local object.

The developed ways of reception of the set characteristic electroconsumption allow to reduce loading by alternative energy sources in case of approach of the characteristic to uniform or to receive a prize in monetary expenses for the account of use of the electric power during its least cost.

Published one article in magazine „Technical electrodynamics” Thematic release - 2004, ch.6, p. 23-26 and one submitted in the publication in magazine „electronics and communication”.

Key words: local object, OB-transform, measuring-switching system, an elementary closet, an elementary minorant function, the characteristic electroconsumption, electromodem, experimental installation, the report of transfer.

	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. СПОСОБИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА	10
1.1. Визначення локального об'єкта	10
1.2. Задачі керування електроспоживанням локального об'єкта	12
1.3. Спектральні перетворення дискретних функцій	15
1.4. Порівняння трудомісткості спектральних перетворень дискретних функцій	23
Висновки до першого розділу	29
РОЗДІЛ 2. СПОСОБИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА	30
2.1. Шляхи наближення кривої електроспоживання до рекомендованої	30
2.2. Отримання заданої характеристики електроспоживання за допомогою елементарних комірок.....	36
2.2.1. Спектр характеристики електроспоживання в орієнтованому базисі	36
2.2.2. Рівномірна характеристика електроспоживання	39
2.2.3. Нерівномірна характеристика електроспоживання	46
2.2.4. Оцінка ефективності керування електроспоживанням	49
2.3. Наближення характеристики електроспоживання до заданої за допомогою елементарних підфункцій	49
2.3.1. Структурна схема пристрою для управління локальним об'єктом	49
2.3.2. Визначення спектру заданої характеристики в орієнтованому базисі.....	52
2.3.3. Наближення характеристики електроспоживання до заданої.....	53
2.3.4. Наближення характеристики електроспоживання до постійної	63
2.3.5. Приклади задач	65
Висновки до другого розділу	82
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА	84
3.1. Навантаження „розумного будинку”	84
3.2. Програмне забезпечення локального об'єкта типу „розумний будинок”	88

Висновки до третього розділу	6
Висновки до третього розділу	94
РОЗДІЛ 4. ПРИСТРІЙ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА.....	95
4.1. Розробка схеми пристрою управління	95
4.1.1. Структурна схема централізованого керування	95
4.1.2. Розробка схеми з'єднання вимірювально-комутуючої системи з персональним комп'ютером	96
4.1.3. Розробка вимірювально-комутуючої системи	98
4.2. Протокол передачі даних по електромережі.....	105
4.3. Експериментальна установка	109
4.3.1. Склад та технічні характеристики експериментального локального об'єкта.....	109
4.3.2. Система керування інвертором як складова системи керування електроспоживанням локального об'єкта.....	112
Висновки до четвертого розділу	118
ВИСНОВКИ.....	119
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	121
ДОДАТОК А	124

ВСТУП

Актуальність теми. Домінуючим аспектом розвитку суспільства в наш час є використання електричної енергії, оскільки, як свідчать багаторічні дослідження, рівень прогресу суспільства прямопропорційний до кількості енергії, що ним виробляється і споживається. Зростання кількості промислового та побутового електротехнічного обладнання, зростання потужності приладів, а також підвищення вимог до забезпечення електроживленням сприяє приділенню особливої уваги проблемам ефективного використання електричної енергії.

За умов відсутності керування вмиканням-вимиканням в загальній мережі і випадкового вмикання різних електричних навантажень, в деякі моменти часу споживається пікова потужність, яка може перевищувати середню споживану за добу потужність у декілька разів. Тому зміна вигляду характеристики електроспоживання і наближення її до рівномірної дозволяє знизити пікові значення потужності споживання, а також зменшити навантаження на альтернативні джерела, наприклад, дизель-генератор, фотобатарею, акумулятор та ін. Таким чином відпадає необхідність використання джерел електроенергії з завищеними характеристиками потужності.

Збільшення частки споживання електроенергії у інтервалі дії нижчих тарифів дозволяє наблизити характеристику електроспоживання до вигляду, що відповідає мінімальним грошовим витратам.

Таким чином, усунення пікових навантажень і зменшення вартісних витрат забезпечується розв'язанням задачі наближення характеристики електроспоживання до заданого вигляду.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Магістерська робота виконана у рамках програми кафедри промислової електроніки НТУУ „КПІ” та в рамках держбюджетної теми №2724 “Наукові основи та алгоритми інтелектуального керування електротехнічним комплексом локального об'єкта з фотогенераторами” (2004/2005, ДР 0104U000130).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка способів управління електроспоживанням локального об'єкта шляхом наближення характеристики електроспоживання до заданої.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- аналіз та вибір принципів керування;
- розробка способів наближення характеристик електроспоживання до заданої;
- розробка алгоритму управління електроспоживанням локального об'єкта з урахуванням пріоритетів навантажень „розумного будинку”;
- розробка пристрою управління електроспоживанням локального об'єкта.

Наукова новизна отриманих результатів:

- запропоновано спосіб порівняння характеристик електроспоживання шляхом обчислення нормованих ОБ-спектрів;
- отримані умови наближення характеристики до заданої;
- запропоновано способи наближення характеристики електроспоживання до заданої шляхом зсуву елементарних комірок;
- запропоновано спосіб наближення характеристики електроспоживання до заданої шляхом зсуву елементарних підфункцій;
- розроблено способи наближення характеристики електроспоживання до необхідного вигляду на основі ОБ-перетворення, який дозволяє зменшити навантаження на дизель-генератор у випадку наближення характеристики до рівномірної або отримати вигреш у грошових витратах за рахунок використання більшої частки електроенергії у час її найменшої вартості.

Практичне застосування отриманих результатів. Дані результати можуть бути використані для застосування в системах керування електроспоживанням локального об'єкта.

Особистий внесок здобувача:

- запропоновано спосіб наближення характеристики електроспоживання до заданої шляхом зсуву елементарних комірок;
- запропоновано спосіб наближення характеристики електроспоживання до заданої шляхом зсуву елементарних підфункцій;

- розроблено алгоритм управління електроспоживанням локального об'єкта з урахуванням пріоритетів навантажень „розумного будинку”;

- розроблено пристрій управління електроспоживанням локального об'єкта.

Публікації: Оpubлікована одна стаття в журналі „Технічна електродинаміка” Тематичний випуск – 2004, ч.6, с. 23-26 і одна подана до публікації в журнал „Електроника и связь”.

Структура та обсяг магістерської роботи. Робота складається з: 135 друкованих сторінок, 36 ілюстрацій, 6 таблиць, одного додатка та 31 джерела інформації.

РОЗДІЛ 1

СПОСОБИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА

1.1. Визначення локального об'єкта

Домінуючим аспектом розвитку суспільства в наш час є використання електричної енергії, оскільки, як свідчать багаторічні дослідження, рівень прогресу суспільства прямопропорційний до кількості енергії, що ним виробляється і споживається [1]. Зростання кількості промислового та побутового електротехнічного обладнання, зростання потужності приладів, а також підвищення вимог до забезпечення електроживленням сприяє приділенню особливої уваги проблемам ефективного використання електричної енергії [2]. Питання енергозбереження є актуальними і будуть залишатись такими ще тривалий час. Заходи по підвищенню ефективності використання енергії можуть здійснюватися на різних рівнях:

- генерування енергії;
- розподіл енергії у глобальних мережах енергопостачання;
- розподіл і управління енергією у районних мережах;
- розподіл і витрачання енергії в локальних об'єктах.

Важливе значення має розвиток локальних об'єктів електроспоживання, таких, як житловий будинок, що є одним з найнижчих рівнів, на якому можна здійснювати управління потоками енергії з метою підвищення ефективності використання [3]. Задача підвищення ефективності споживання енергії актуальна також у локальних об'єктах, не підключених до мережі. Серед таких об'єктів можна назвати автономні системи у високогірних районах, морські та космічні станції, для яких питання економії енергії безпосередньо пов'язане із забезпеченням безпеки життєдіяльності.

До локальних об'єктів можна віднести:

- 1) фермерські господарства, до складу яких входять системи первинної переробки та зберігання сільськогосподарської продукції;
- 2) готельні комплекси, насичені різнотипним електротехнічним обладнанням (системи охорони та сигналізації, кухонне обладнання, системи мікроклімату, побутові електроприлади і т.і.);
- 3) морські заводи (бурові свердловини, станції розробки корисних копалин, центри дослідження шельфу морського дна, науково-дослідні установки);
- 4) великі дослідні станції, віддалені від населених пунктів;
- 5) космічні станції та невеликі заводи;
- 6) заводи та станції підтримки життєзабезпечення та проведення досліджень на Місяці.

У найближчі декілька десятиріч можна очікувати концентрації зусиль вчених та інженерів у галузі створення, розвитку та дослідження перерахованих локальних об'єктів.

Сучасний рівень технічного розвитку та прагнення до створення максимально комфортних умов життя людини призвело до високого ступеню насичення локальних об'єктів електротехнічними, електронними та іншими технічними пристроями і системами, контроль і регулювання яких здійснюється від спеціалізованих систем керування.

Електротехнічна система локального об'єкта, як правило, містить декілька генераторів та декілька накопичувачів електроенергії. Об'єднання генераторів та накопичувачів у загальну систему з однотипними параметрами енергії можливо при використанні перетворювачів. Це дозволяє забезпечити перетворення механічної, фотоелектричної, теплової енергії та енергії, накопиченої у акумуляторах, у електричну енергію певних параметрів. До складу електротехнічної системи також входять вимірювально-комутуючі системи (ВКС), що здійснюють як підключення/відключення споживачів від електромережі так і переключення їх на альтернативні джерела енергії, а також центральний елемент, що керує процесом електроспоживання локального об'єкта.

При розв'язанні задач керування процесами генерації-споживання електроенергії слід мати на увазі, що потужність генерації/споживання, режими роботи, час вмикання, важливість для людини істотно відрізняються для різних пристроїв. До складу системи входять як побутові електроприлади, так і дуже відповідальні системи підтримки життя та безпеки людей. Тому треба розробити систему керування вмиканням/вимиканням споживачів, яка б враховувала рівні пріоритету споживачів, а також давала б можливість отримати енергозберігаюче керування шляхом наближення кривої електроспоживання локального об'єкту до потрібної форми.

1.2. Задачі керування електроспоживанням локального об'єкта

Підхід до ефективного керування енергетичними потоками у локальних об'єктах характеризується певними особливостями, пов'язаними з характером та режимами роботи електротехнічних пристроїв, що входять до єдиної системи енергозабезпечення [4].

Задачі керування використанням електроенергії у локальному об'єкті можуть бути сформульовані у двох варіантах: 1) мінімізація використання ресурсів; 2) мінімізація витрат у грошовому визначенні. І в першому, і в другому випадку необхідно забезпечити належний рівень безпеки та комфортності існування людини з обмеженнями на ресурси або на витрати залежно від типу задачі, що вирішується.

Перший варіант формулювання задач оптимального керування передбачає розглядання локальних об'єктів, для яких найважливішою є задача раціонального використання ресурсів, що справедливо для автономних систем електропостачання, морських та космічних станцій, систем забезпечення життєдіяльності.

Прикладом розробки алгоритму енергоефективного керування споживанням автономним локальним об'єктом за критерієм мінімізації ресурсів є система енергозабезпечення пілотованої експедиції на Марс на основі використання замкненої газотурбінної енергетичної установки, у якій енергозабезпечення здійснюється за рахунок лазерного випромінювання. Основною вимогою роботи

такої системи є надійне електропостачання та забезпечення функціонування з оптимальним використанням ресурсів.

Другий варіант задач справедливий для систем, в яких більш критичним є раціональне використання грошового доходу. При цьому передбачається впровадження алгоритмів оптимального керування для регулювання режимів роботи всіх пристроїв, що входять до складу системи, відповідно до вимог мінімізації вартісних витрат та ієрархічного розподілу пристроїв з урахуванням важливості, потужності споживання, часу та тривалості роботи.

Існуючі принципи побудови системи керування дозволяють виділити три основні стратегії керування: централізоване, децентралізоване та комбіноване керування.

Централізований підхід передбачає наявність центрального керуючого блоку, який виробляє керуючі алгоритми для кожного з навантажень, регулює режими їх роботи шляхом вироблення сигналів дозволу на вмикання та зміну рівня споживання та розподіляє електротехнічні пристрої по ієрархічним рівням, які характеризуються конкретними витратами, тарифною вартістю, виробничими функціями, оптимальними функціями керування. При цьому споживачі обмінюються інформацією тільки з центральним блоком та не отримують відомості про наявність або відсутність інших пристроїв у системі.

При децентралізованому керуванні кожний пристрій за допомогою системи керування регулюючого елемента, яким зазвичай виступає перетворювач, взаємодіє з певним числом інших автоматів - "сусідів", які утворюють локальне "підсередовище". Вибір "сусідів" виконується одним з трьох принципово різних способів: 1) ієрархічний – «сусідами» є пристрої одного рівня ієрархії; 2) груповий – «сусідами» є пристрої однієї групи, утвореної за ознаками потужності споживання, ступеня керованості, можливостями переривчастої роботи; 3) випадковий – за відсутності жорстко заданих правил розподілення "сусідами" обираються перші l пристроїв, від яких надійшла інформація при вмиканні. Перші два способи передбачають жорстке завдання правил розподілення при початковому встановленні системи. Для автономних локальних об'єктів, морських та космічних станцій

найбільш доцільним є використання саме цих способів, оскільки структура системи є незмінною або зазнає незначних змін. Третій спосіб є більш гнучким і має переваги за умов появи нових пристроїв, постійної зміни структури системи та робочих режимів. Використання цього способу доцільно для побутових локальних об'єктів, зокрема, житлових будинків.

Комбіноване керування містить елементи централізованого і децентралізованого підходів. В цьому випадку передбачається, що в системі присутній центральний керуючий блок, але використовується він лише для вироблення загальних сигналів про стан системи (наприклад, штрафних сигналів у випадку незабезпечення заданих параметрів або перевищення критичного рівня споживання, роботи на "піках"). Поведінка кожного споживача визначається стратегією, яка задається власною системою керування відповідного регулятора. Ця стратегія підлягає коректуванню з боку сигналів центрального блоку. Таким чином, формується гнучке інформаційне середовище, здатне адаптуватися до зміни параметрів та поточного рівня споживання (одночасне вмикання декількох споживачів великої потужності, здатне викликати небажане перевищення споживання, регулюється введенням затримок вмикання, плавним наростанням або черговістю вмикання пристроїв).

В даній роботі обрано централізоване керування в зв'язку з найбільшою простотою його апаратної реалізації та високої швидкодії при відносно невеликій кількості об'єктів керування (до 100).

За умов відсутності керування вмиканням-вимиканням в загальній мережі і випадкового вмикання різних електричних навантажень, в деякі моменти часу споживається пікова потужність, яка може перевищувати середню споживану за добу потужність у декілька разів. Зміна вигляду характеристики електроспоживання і наближення її до рівномірної дозволяє знизити пікові значення потужності споживання, а також зменшити навантаження на альтернативні джерела, наприклад, дизель-генератор, фотобатарей, акумулятор та ін. Таким чином відпадає необхідність використання джерел електроенергії з завищеними характеристиками потужності.

Збільшення частки споживання електроенергії у інтервалі дії нижчих тарифів дозволяє привести характеристику електроспоживання до вигляду, що відповідає мінімальним грошовим витратам [5].

Таким чином, усунення пікових навантажень і зменшення вартісних витрат забезпечується розв'язанням задачі наближення характеристики електроспоживання до заданого вигляду.

Дану задачу будемо вирішувати за допомогою перетворення в орієнтованому базисі (ОБ) так як серед перетворень дискретних функцій на кінцевих інтервалах найменшою трудомісткістю характеризується перетворення ОБ [6]. Порівняння характеристик електроспоживання - реальної та заданої (бажаної) у часовій області має обчислювальні труднощі, тому альтернативним є порівняння спектрів цих характеристик.

1.3. Спектральні перетворення дискретних функцій

Розглянемо способи представлення функцій з аргументом, заданим на кінцевому інтервалі, у вигляді кінцевих рядів Фур'є, Уолша, Віленкіна-Крестенсона, Хартлі.

Дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) послідовності дискретних значень $y(x)$ визначається наступним чином [7, 8]:

$$F(v) = \sum_{x=0}^{N-1} y(x) \exp(-j2\pi vx/N), \quad v = 0, 1, \dots, N-1.$$

ДПФ на інтервалі N оперує з N -точковою циклічною згорткою. Циклічній згортці в області зображень ДПФ відповідає рівність:

$$Y(v) = H(v) U(v),$$

де $Y(v)$, $H(v)$, $U(v)$ - зображення ДПФ решіткових функцій $y(x)$, $h(x)$, $u(x)$.

Операція циклічної згортки описує дискретну лінійну динамічну систему, яка є інваріантною до циклічного зсуву (циклостаціонарну) [9,10]. Аналогічно тому, як ДПФ є апроксимацією неперервного перетворення Фур'є, циклостаціонарна динамічна система апроксимує стаціонарну [10]. Один з недоліків дискретного перетворення Фур'є полягає в тому, що воно має дійсну та уявну частини, які доводиться обробляти як два окремих масиви, або як один масив подвоєної довжини [11,12].

Перетворення Хартлі, яке оперує лише з дійсними числами, було запропоноване американським вченим Р.В.Л. Хартлі ще в 1942р. Однак протягом наступних сорока років це перетворення не привертало до себе уваги фахівців з цифрової обробки сигналів. Ситуація змінилася у 1984 р., коли був опублікований запропонований Р.Н. Брейсуелом алгоритм швидкого перетворення Хартлі, який надав можливість ефективного його використання [11, 13]. Дискретне перетворення Хартлі (ДПХ) послідовності N дійсних чисел являє собою дійсну послідовність тієї ж довжини [14].

$$H(v) = \sum_{x=0}^{N-1} y(x) \text{cas}(2\pi vx/N), \quad (1.1)$$

де $\text{cas}(2\pi vx/N) = \cos(2\pi vx/N) + \sin(2\pi vx/N)$.

Зворотне перетворення Хартлі має вигляд:

$$y(x) = \frac{1}{N} \sum_{v=0}^{N-1} H(v) \text{cas}(2\pi vx/N). \quad (1.2)$$

Особливістю ДПХ є його симетричність, тобто однаковий вигляд прямого (1.1) і зворотного (1.2) перетворення. Тому оригінал і зображення обчислюються за одним і тим самим алгоритмом. В окремих випадках ДПХ є зручною заміною ДПФ. При необхідності можна отримати дійсну та уявну частини ДПФ, обчисливши відповідно парну та непарну частини ДПХ.

При використанні ДПФ і ДПХ для N точок необхідно обчислювати N значень синусоїдальних та N значень косинусоїдальних функцій.

Функції Віленкіна-Крестенсона. Перетворення на основі розкладення в кінцевий ряд базисних функцій Віленкіна-Крестенсона (ВКФ) [15] оперує із значно меншою кількістю значень синусоїдальних і косинусоїдальних функцій. На інтервалі $N=m^n$, де m і n - цілі позитивні числа, ВКФ мають вигляд:

$$V(v,x)=\exp\left(j 2\pi \sum_{s=1}^n \frac{x^{(s)}v^{(s)}}{m}\right)$$

де $x^{(s)}, v^{(s)}$ - розрядні компоненти при m -ічному представленні чисел x і v :

$$x = \sum_{s=1}^n x^{(s)} m^{n-s}, v = \sum_{s=1}^n v^{(s)} m^{n-s}.$$

При довжині інтервалу, яка визначається виразом

$$N = m^n, \quad (1.3)$$

кількість значень синусоїдальних та косинусоїдальних функцій, що беруть участь у перетворенні, дорівнює m . При $N=m$ ряд Віленкіна-Крестенсона перетворюється на ряд Фур'є і зазначена перевага втрачається. Комплексний характер ВКФ та неоднаковий вигляд прямого і зворотного перетворення ускладнює використання цього методу. Крім того, зсув дискретної функції на інтервалі N перестає бути простою циклічною перестановкою відліків в середині інтервалу, (як в ДПФ та ДПХ), а є більш складною функцією, що залежить від числа m [16]. Перетворення Віленкіна-Крестенсона оперує з m -згорткою та описує клас лінійних динамічних систем, нестационарних у звичайному сенсі та стаціонарних відносно m -зсуву. В теперішній час перетворення Віленкіна-Крестенсона знаходить застосування при

аналізі та синтезі пристроїв автоматики з елементами, що виконують операції трійкової і q -ічної логіки .

Функції Уолша. При $m=2$ ВКФ являють собою впорядковані за Пелі функції Уолша [17]. Перетворення Уолша реалізується просто, оскільки базисні функції приймають лише два значення на інтервалі N : $+1$ та -1 , що виключає операції множення.

При кожному способі впорядкування функцій Уолша використовуються відповідні формули. Наприклад, для функцій Уолша, впорядкованих за Пелі, з інтервалом зміни аргументу $[0, 2^n)$ справедливо:

$$pal(v, x) = (-1)^{\sum_{s=1}^n v^{(s)} x^{(s)}},$$

компоненти $v^{(s)}$, $x^{(s)}$ знаходяться шляхом двійкового розкладення v та x :

$$x = \sum_{s=1}^n x^{(s)} 2^{n-s}, \quad v = \sum_{s=1}^n v^{(s)} 2^{n-s}.$$

Особливості цих базисних функцій витікають з особливостей ВКФ - обмеження довжини інтервалу виразом (1.3) при $m=2$, а також нециклічний вигляд зсуву, що призводить до особливого вигляду згортки – діадної [18].

У нинішній час достатньо розробленим є математичний апарат для описання особливого класу дискретних систем - послідовносних машин. Прикладами послідовносних машин є такі вузли цифрових систем керування вентильними перетворювачами, як тригери, лічильники, дешифратори, перетворювачі кодів і т.д. Для кінцевих динамічних систем, якими є і послідовнісні машини, час є дискретною функцією, а координати та зовнішній вплив задаються на множинах, що мають кінцеву кількість елементів. Кількість узагальнених координат і функцій зовнішнього впливу також вважається дискретним. [19]. Такі системи описуються модулярними різницевиими рівняннями.

На спільність перетворень Фур'є (Лапласа) було звернуто увагу в роботах Я.З.Ципкіна та Р.Г.Фараджева, які впровадили поняття перетворення Лапласа-Галуа і вказали можливість його використання у теорії послідовносних машин [20]. Операторні методи аналізу послідовносних машин виникли під впливом робіт Хаффмана. Згодом Бусом, Рішале, Лунцем, Ципкіним та Фараджевим були впроваджені перетворення для розв'язання модулярних рівнянь [21]. Особливістю перетворень цієї групи є те, що не для всіх функцій вдається знайти перетворення у замкнутому вигляді. Крім того, методи аналізу послідовносних машин можуть використовуватися лише до класу функцій, значення яких являють собою кінцевий алфавіт.

З розглянутих перетворень тільки перетворення Хартлі та Уолша мають властивість симетричності (тобто однаковий вигляд прямого та зворотного перетворень) і оперують виключно з дійсними числами.

Симетричне перетворення на кінцевих інтервалах (СКІ-перетворення) [22] оперує з дійсними числами і узагальнює відомі симетричні перетворення.

Операторні методи дозволяють замінити згортку в часовій області операцією множення в області зображень [23]. Однак перехід від оригіналу до зображення і навпаки потребує на сьогоднішній час досить великого обсягу обчислень. Цей фактор обмежує використання алгоритмів управління, що включають в себе обчислення згортки чи знаходження усталеного рішення різницевих рівнянь в мікропроцесорних системах керування, які працюють в реальному масштабі часу. Тому задача розробки операторного методу, який би дозволив досить просто знаходити зображення (оригінали) функцій, при цьому потребував би малого числа множень і тому був би орієнтований на мікропроцесорну реалізацію, є актуальною. Такий метод аналізу дискретних функцій повинен мати всі властивості розглянутих операторних методів та оперувати з деяким набором чисел на кінцевому інтервалі.

Симетричне перетворення Хартлі усуває інформаційну надмірність перетворення Фур'є, спрощуючи формули та скорочуючи машинний час обробки інформації. Розроблене в Національному технічному університеті України "КПІ", (м.Київ) СКІ-перетворення на інтервалі $N=m^n$ усуває інформаційну надмірність

перетворення Фур'є у базисі функцій Віленкіна-Крестенсона (ВКФ) [24] таким самим чином, одночасно зменшуючи кількість базисних функцій перетворення у N/m^{n-1} разів. Завдяки цим особливостям СКІ-перетворення є перспективним для застосування у мікропроцесорних системах керування.

Розглянуте перетворення являє собою узагальнене дискретне перетворення Фур'є, оперує з дійсними числами, має однаковий вигляд прямого та зворотного перетворень та характеризується малою кількістю синусоїдальних і косинусоїдальних функцій, які приймають участь у перетворенні. Внаслідок цього воно характеризується меншою трудомісткістю порівняно з перетвореннями Фур'є, Хартлі або ВКФ.

Однак і симетричне перетворення оперує з функціями розкладення, які мають не цілі значення, отже потребують використання мікропроцесорних алгоритмів для чисел з плаваючою комою.

Перетворення дискретних функцій в орієнтованому базисі (ОБ) також оперує з функціями (зображеннями), заданими на кінцевих інтервалах довжиною $N=m^n$, де m, n - цілі позитивні числа.

Пряме перетворення в орієнтованому базисі має вигляд:

$$Y(v) = \sum_{x=0}^{N-1} y(x) \cdot \varphi_d(v, x), \quad (1.4)$$

де $x, v = 0, 1, \dots, N-1$;

$$\varphi_d(v, x) = \cos \left[\frac{2\pi}{m} \sum_{s=1}^n v^{(s)} x^{(s)} \right] + A \sin \left[\frac{2\pi}{m} \sum_{s=1}^n v^{(s)} x^{(s)} \right]$$

- базисні функції розкладення; $y(x)$ - решіткова функція, що задана на кінцевій множині точок N ; $Y(v)$ - зображення функції $y(x)$, яке являє собою послідовність N

дискретних значень; $A = \operatorname{tg} \frac{2\pi}{m}$; $x^{(s)}, v^{(s)}$ - розрядні компоненти при m -ічному зображенні чисел x і v .

Зворотне перетворення обирається з умови ортогональності матриць прямого і зворотного перетворень та описується виразом:

$$y(x) = \frac{1}{N} \sum_{v=0}^{N-1} Y(v) \cdot \varphi_r(v, x), \quad (1.5)$$

$$\text{де } \varphi_r(v, x) = \cos \left[\frac{2\pi}{m} \sum_{s=1}^n v^{(s)} x^{(s)} \right] + \frac{1}{A} \sin \left[\frac{2\pi}{m} \sum_{s=1}^n v^{(s)} x^{(s)} \right].$$

При $A=1$ функції розкладення прямого перетворення співпадають з функціями зворотного перетворення, а саме перетворення співпадає з симетричним перетворенням на кінцевих інтервалах (СКІ-перетворенням). Базисні функції розкладення є проєкціями вектору, що обертається на комплексній площині, на вісь, яка проведена під кутом $-2\pi/m$ до осі абсцис. Така побудова базисних функцій дозволяє зменшити число проєкцій, не рівних одиниці і, як наслідок, зменшити число множень, що безпосередньо збільшує швидкодію мікропроцесорних алгоритмів.

Умову ортогональності можна записати як :

$$F_d \cdot F_r = F_r \cdot F_d = NI$$

де I – одинична матриця.

З умови ортогональності випливає, що по аналогії з введеним перетворенням в орієнтованому базисі (назвемо його ОБ1 або ОБ-перетворення)), можна ввести перетворення, в якому матриці F_d та F_r помінялися місцями (назвемо його ОБ2). Основні формули ОБ1 та ОБ2 зведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Основні формули перетворень в орієнтованому базисі

Оригінал $y(x)$	Зображення $Y^{(1)}(v)$ або $Y^{(2)}(v)$	Базисні функції прямого перетворення	Базисні функції зворотного перетворення
Перетворення ОБ1			
$y(x) = \sum_{v=0}^{N-1} Y^{(1)}(v) \cdot \varphi_r(v, x)$	$Y^{(1)}(v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} y(x) \cdot \varphi_d(v, x)$	$\varphi_d(v, x) = \cos\left(\frac{2\pi}{m} \sum_{s=1}^n v^{(s)} x^{(s)}\right) +$ $+ A \sin\left(\frac{2\pi}{m} \sum_{s=1}^n v^{(s)} x^{(s)}\right)$	$\varphi_r(v, x) = \cos\left(\frac{2\pi}{m} \sum_{s=1}^n v^{(s)} x^{(s)}\right) +$ $+ \frac{1}{A} \sin\left(\frac{2\pi}{m} \sum_{s=1}^n v^{(s)} x^{(s)}\right)$
Перетворення ОБ2			
$y(x) = \sum_{v=0}^{N-1} Y^{(2)}(v) \cdot \varphi_d(v, x)$	$Y^{(2)}(v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} y(x) \cdot \varphi_r(v, x)$	$\varphi_r(v, x)$	$\varphi_d(v, x)$

При $m=3$ операції множення в орієнтованому базисі повністю виключаються. Нехай інтервал визначення сигналів дорівнює $N=3^2$. Запишемо функції прямого перетворення у вигляді квадратної матриці, в якій кожний рядок являє собою функцію розкладення $\varphi_d(v, x)$, причому v є номером функції і номером рядка, а x - аргументом дискретної функції і номером колонки. Для $N=3^2$ матриці базисних функцій прямого та зворотного перетворень мають вигляд:

$$\mathbf{F}_{3^2}^d = \begin{array}{c} \begin{array}{c} x \\ \rightarrow \end{array} \\ \begin{array}{c} \downarrow v \end{array} \end{array} \left\| \begin{array}{ccc|ccc|ccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & 1 & -2 & 1 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 & 1 & 1 & -2 & 1 & 1 & -2 \\ \hline 1 & 1 & 1 & -2 & -2 & -2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & -2 & 1 & 1 & 1 & 1 & -2 \\ 1 & 1 & -2 & -2 & 1 & 1 & 1 & -2 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -2 & -2 & -2 \\ 1 & -2 & 1 & 1 & 1 & -2 & -2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 & 1 & -2 & 1 & -2 & 1 & 1 \end{array} \right\|, \quad (1.6)$$

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{F}_{3^2}^r = \\
 \downarrow v
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 \mathbf{x} \\
 \rightarrow
 \end{array} \\
 \left\| \begin{array}{ccc|ccc|ccc}
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\
 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\
 \hline
 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 \\
 1 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 \\
 \hline
 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \\
 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 1 \\
 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0
 \end{array} \right\|.
 \end{array}
 \quad (1.7)$$

Елементи матриць (1.6) і (1.7) приймають значення 0,+1,-1,-2 і обчислення прямого та зворотного перетворень можуть бути виконані лише за допомогою операцій додавання, віднімання і зсуву ліворуч (множення на 2).

1.4. Порівняння трудомісткості спектральних перетворень дискретних функцій

Процедура обчислення спектру являє собою операцію множення матриці розмірністю $N \times N$ на вектор-колонку розмірністю $N \times 1$. Елементами матриць перетворень можуть бути цілі та дробові, додатні та від'ємні числа. Враховуючи це, формули для обчислення трудомісткості розраховувались окремо для кожної з цих груп [25].

Аналіз матриці базисних функцій *СКИ-перетворення* для випадку $m=3$, показав [24], що елементи матриці можуть приймати лише три різні значення: 1, 0.366, -1.366, причому перший рядок матриці складається лише з одиниць, а в усіх наступних рядках кількість різних елементів однакова і дорівнює $m^{n-1}=N/m$. Тому при множенні першого рядка матриці на вектор-колонку необхідно виконувати $(N-1)$ операції додавання цілих. Для інших $(N-1)$ рядків матриці виконуються операції множення дробових чисел, а також додавання дробових та цілих чисел. Для кожного рядка кількість операцій множення дробових чисел дорівнює $(m-1)$, кількість

операцій додавання цілих чисел – $m(m^{n-1}-1) = m(N/m - 1)$, кількість операцій додавання дробових чисел — $(m-1)$.

Таким чином, кількість операцій для матриці СКІ-перетворення складає:

— операції додавання цілих чисел:

$$S_{\text{sum_c_CKI}}=(m^n-1)(m^n-m+1)=(N-1)(N-m+1);$$

— операції додавання дробових чисел:

$$S_{\text{sum_dr_CKI}}=(m^n-1)(m-1)=(N-1)(m-1);$$

— операції множення дробових чисел:

$$S_{\text{umn_dr_CKI}}=(m^n-1)(m-1)=(N-1)(m-1).$$

Загальна кількість операцій:

$$S_{\Sigma_CKI}=(m^n-1)(m^n+m-1)=(N-1)(N+m-1).$$

При оцінці трудомісткості *перетворення в орієнтованому базисі*, враховано, що матриці для прямого і зворотного перетворення будуть різними. Елементи матриць перетворень ОБ1 та ОБ3 приймають значення: 1 та -2 , тому для кожного рядка, крім першого, необхідно виконувати операції додавання цілих чисел та множення на -2 . Остання операція складається з двох елементарних операцій – зсуву та інвертування. Кількість елементів матриці, що дорівнюють -2 , в кожному рядку з першого по $(N-1)$ -й дорівнює $m^{n-1} = N/m$. Таким чином, в кожному рядку маємо $(N-1)$ операцій додавання цілих чисел та дві операції інверсії та зсуву. Загальна кількість операцій визначається наступним чином:

$$S_{\Sigma_OB1,3}=(N-1)+(N-1)(N-1+2(N/m))=$$

$$=(N-1)(N+2)=(m^n-1)(m^n+2).$$

Елементи матриць перетворення ОБ2, ОБ4 (1.4), (1.5) приймають значення 1, -1 та 0, що значно зменшує кількість розрахунків внаслідок наявності лише операцій додавання цілих чисел. Загальна кількість операцій у цьому випадку дорівнює:

$$\begin{aligned} S_{\Sigma_{\text{OB2,4}}} &= (N-1) + (N-1)(N-N/m-1) = \\ &= (N-1)(N-N/m) = (m^n-1)(m^n - m^{n-1}). \end{aligned}$$

Для матриці *перетворення Хартлі* кількість цілих елементів дорівнює $(2N-1)$, а всі інші елементи приймають різні дробові значення. При обчисленні спектру у базисі перетворення Хартлі необхідно виконати:

— операції додавання цілих чисел:

$$S_{\text{sum}_c\text{Hartly}} = (m^n-1) = (N-1);$$

— операції додавання дробових чисел

$$S_{\text{sum}_{dr}\text{Hartly}} = (m^n-1)^2 = (N-1)^2;$$

— операції множення дробових чисел

$$S_{\text{umn}_{dr}\text{Hartly}} = (m^n-1)^2 = (N-1)^2.$$

Загальна кількість операцій для матриці перетворення Хартлі:

$$S_{\Sigma_{\text{Hartly}}} = (m^n-1) + 2(m^n-1)^2 = (N-1) + 2(N-1)^2.$$

Особливістю *перетворення Уолша* є те що при $m=2$, а елементи матриці приймають значення 1 та -1 . Тому загальна кількість операцій дорівнює:

$$S_{\Sigma_Walsh}=m^n (m^n -1)=N(N-1).$$

Результати порівняльної оцінки трудомісткості спектральних перетворень при значеннях $m=3$ (для перетворення Уолша $m=2$) та $n=1,2,3,4$ показано на рис.1.1 де наведено графіки залежності кількості операцій від інтервалу визначення функції.

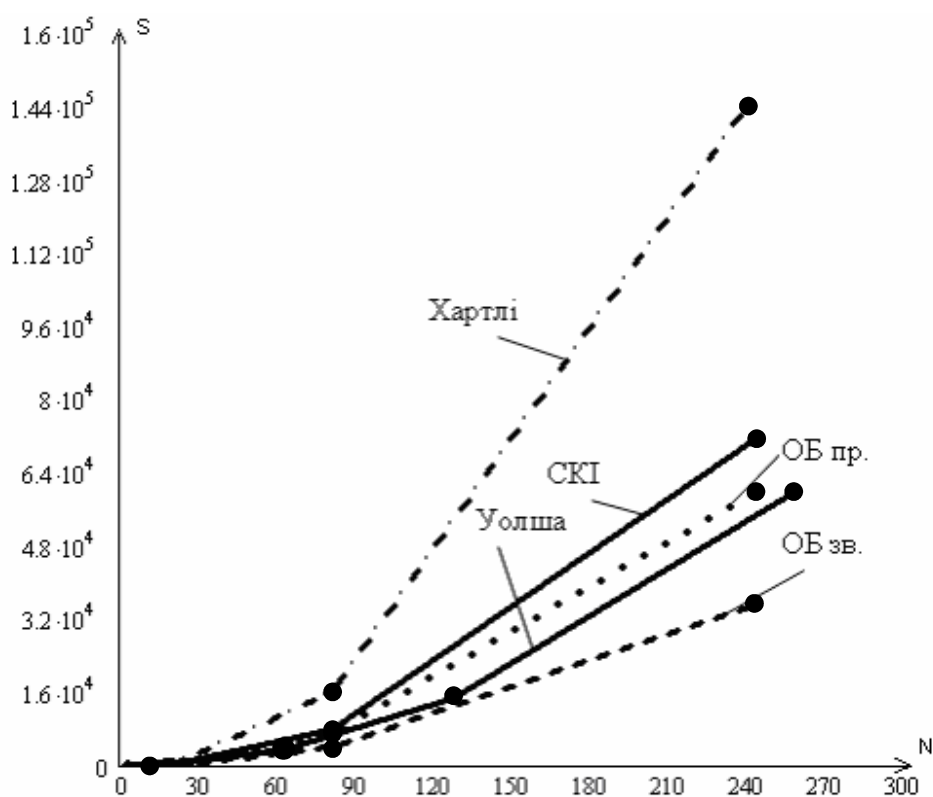


Рис. 1.1. Залежність кількості операцій від інтервалу визначення функції

Для оцінки часу, необхідного мікропроцесорній системі для проведення розрахунків, визначимо загальну кількість тактів, необхідних мікроконтролерам AVR та PIC для обчислення спектрів за допомогою кожного з перетворень (табл. 1.2).

Таблиця 1.2. Порівняння кількості тактів розрахунку мікроконтролерів AVR та PIC

Арифметична операція	Кількість тактів мікроконтролера	
	AVR	PIC
Додавання	1	4
Віднімання	1	4
Множення	2	4
Інверсія	1	4
Зсув	1	4

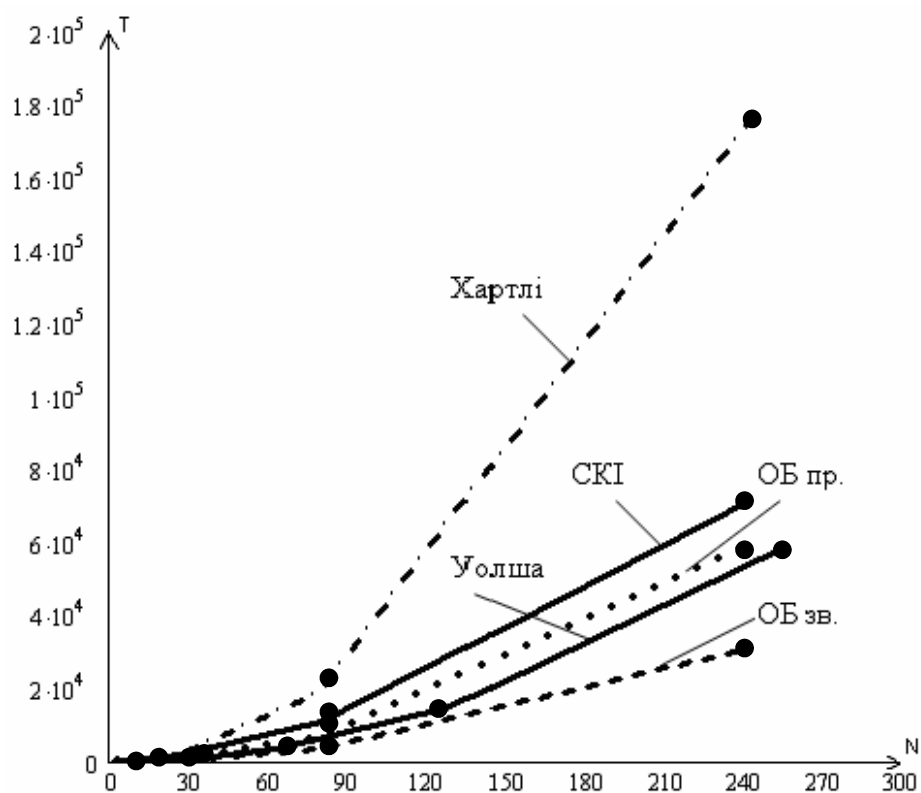


Рис. 1.2. Залежність кількості тактів мікроконтролера AVR від інтервалу визначення функції

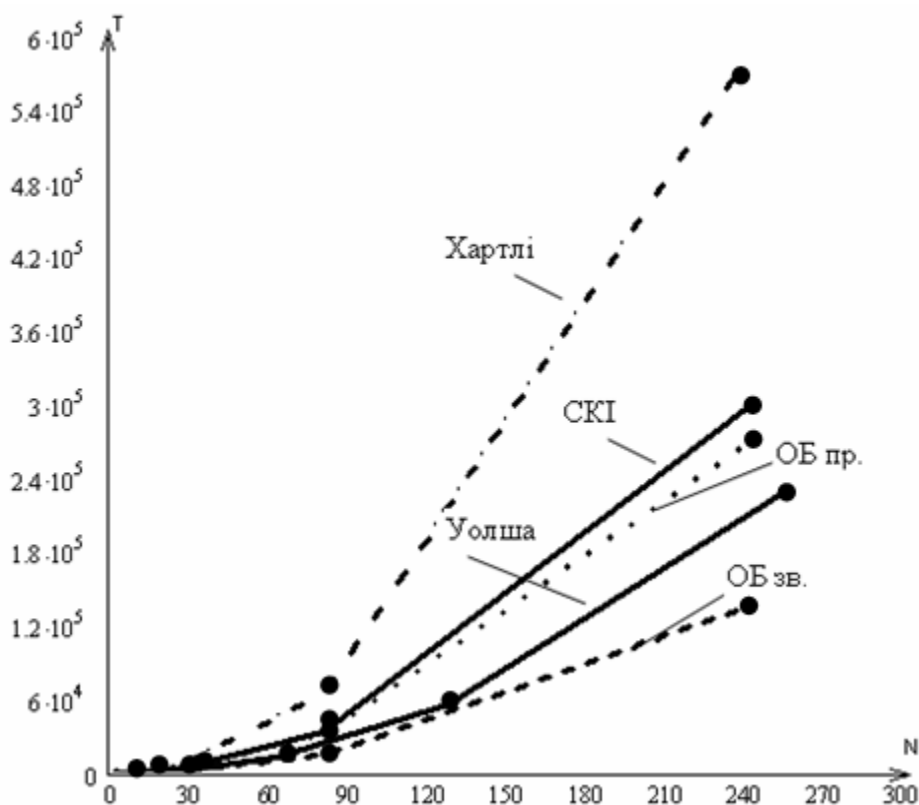


Рис. 1.3. Залежність кількості тактів РІС- контролера від інтервалу визначення функції

Отже, як видно з рис. 1.1-1.3 ОБ перетворення характеризується найменшою трудомісткістю і потребує меншої кількості робочих тактів мікроконтролера для його обчислення у порівнянні з іншими перетвореннями дискретних функцій.

Таким чином задачу обчислення значень затримок будемо вирішувати шляхом наближення спектру реальної характеристики до ОБ-спектру заданої. На інтервалі $N=3^n$ елементи матриць базисних функцій прямого й зворотного ОБ перетворень приймають значення 0,+1,-1,-2, тому обчислення оригіналів та спектрів виконуються лише за допомогою операцій додавання, віднімання і зсуву ліворуч (множення на 2). По швидкодії перетворення в орієнтованому базисі не поступається перетворенню Уолша, однак на відміну від нього оперує з інтервалом, кратним 3. Обчислювальні операції лише з цілими числами підвищують точність та швидкодію обробки даних.

Висновки до першого розділу

1. Одним із шляхів підвищення ефективності споживання електричної енергії локального об'єкта є вирішення задачі приведення кривої електроспоживання до бажаного вигляду.
2. Централізоване керування електроспоживанням локального об'єкта характеризується найбільшою простотою апаратної реалізації і більшою швидкістю у порівнянні з децентралізованим та комбінованим керуванням.
3. В результаті аналізу трудомісткості перетворень виявлено, що перетворення в орієнтованому базисі має меншу трудомісткість у порівнянні з іншими і, завдяки цьому, потребує меншої кількості робочих тактів мікроконтролера для його обчислення.
4. Обчислення спектрів в орієнтованому базисі на інтервалі $N=3^n$ не потребує виконання дробових операцій, що дозволяє використовувати цілочисельні процесори.

РОЗДІЛ 2

СПОСОБИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА

2.1. Шляхи наближення кривої електроспоживання до рекомендованої

Задача наближення кривої електроспоживання до рекомендованої може бути вирішена для досягнення 2-х цілей: 1) наближення до рівномірної, 2) до такої, що дає вигравш у грошових витратах. Наближення до рівномірної характеристики дозволяє зменшити навантаження на альтернативні джерела, наприклад дизель-генератор.

Крім того, завдяки вирівнюванню кривої електроспоживання споживач зменшує вартість споживаної електроенергії зменшуючи потужність джерел живлення. За рахунок наближення кривої електроспоживання до заданої також зменшує її собівартість, але вже за рахунок використання електроенергії у час її найменшої вартості.

Для прикладу розглянемо графік навантаження (ГН) рис. 2.1 (данні телеметричних вимірювань Київобленерго однієї підстанції). [26]

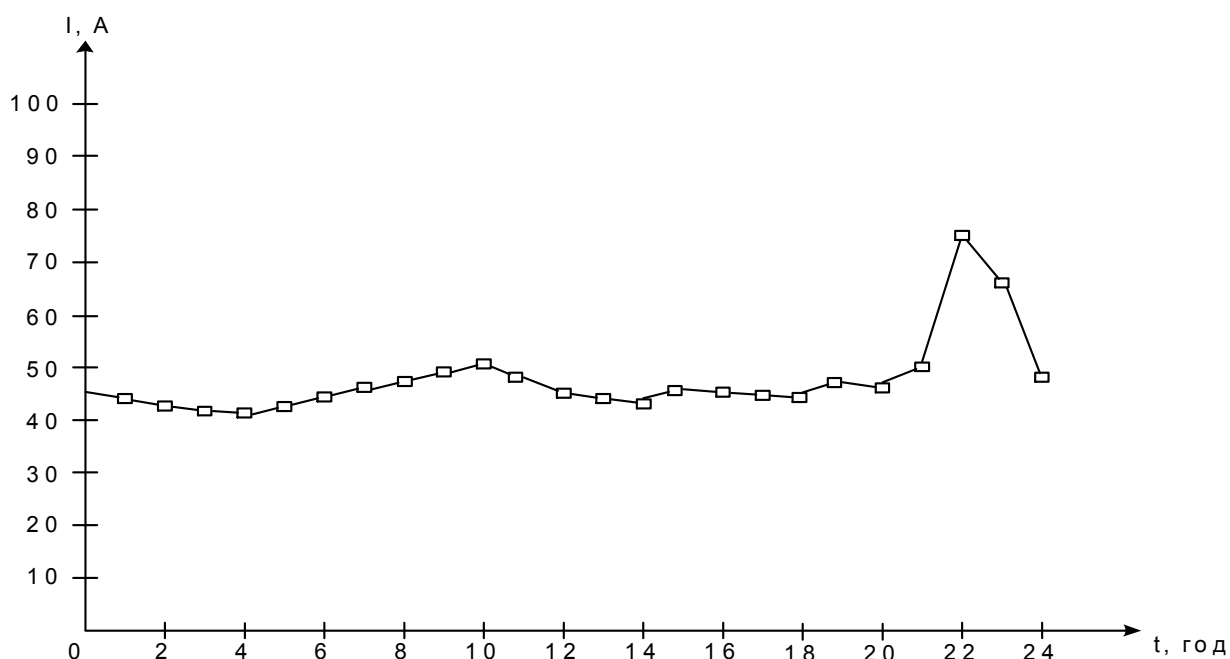
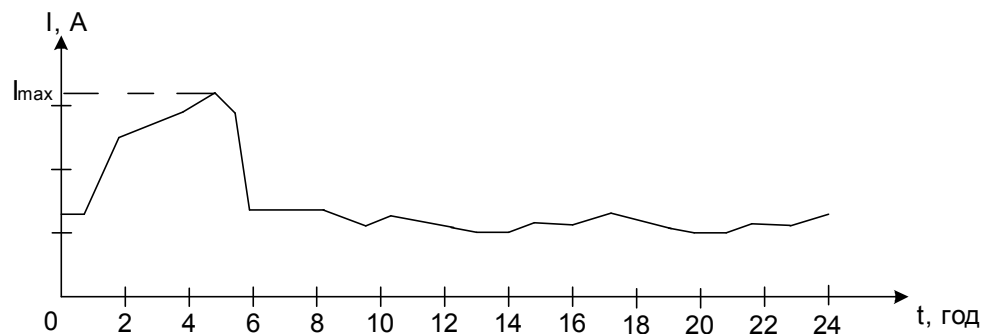


Рис. 2.1. Добовий графік навантаження

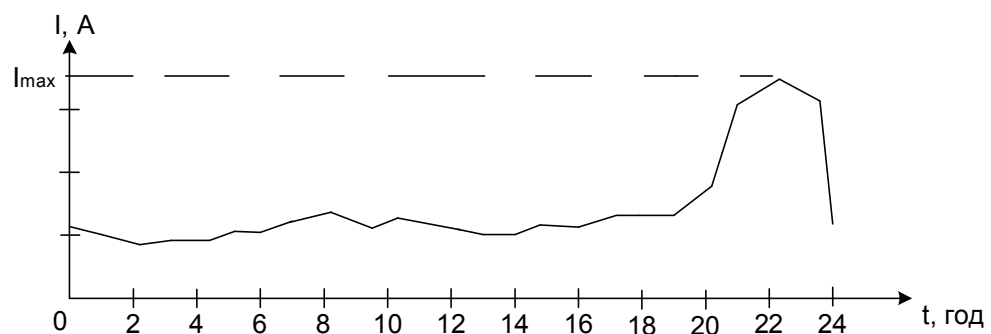
Як видно з графіка рис. 2.1, часи найбільшого споживання струму лежать у межах 21-24 год.

В останній час тарифною політикою є запропонування споживачеві різних ГН. В залежності від складеного контракту, споживач може вибрати певний профіль навантаження (рис. 2.2).

На рис. 2.2 показані три приклади ГН, що можуть бути запропоновані споживачеві. Самим вигідним (найдешевшим) для споживача, безперечно, є профіль навантаження показаний на рис. 2.2 а – споживання відбувається у години найменшої завантаженості станції (наприклад, підприємство працює у нічну зміну). Найдорожчим для споживача є ГН показаний на рис. 2.2 б, оскільки він схожий на добовий графік навантаження (рис. 2.1). ГН (рис. 2.2 в) найбільш задовольняє споживача, який живиться від мережі та дизель-генераторів у наслідок відсутності „піків споживання”.



а)



б)

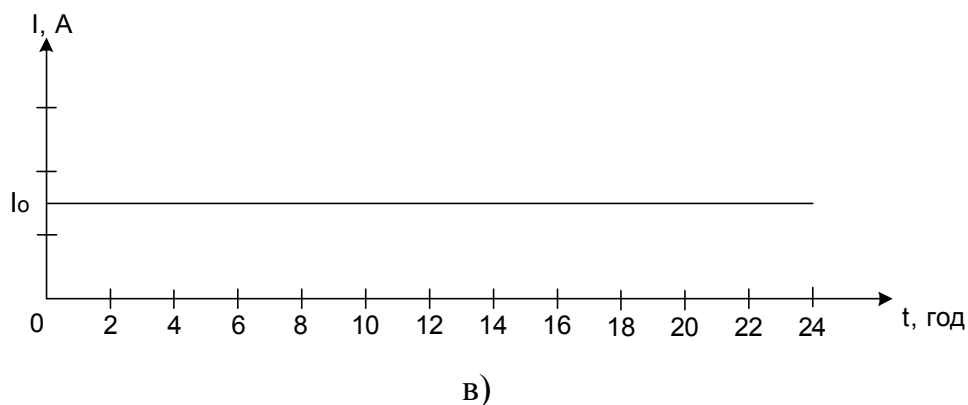


Рис. 2.2. Профілі навантаження

Для наближення до вибраної споживачем кривої навантаження необхідно вводити часові затримки вмикання окремих пристроїв в інтервалі часу споживання потужності, якщо це є допустимим для заданого пристрою.

Для визначення критерію, за допомогою якого вирішується задача наближення кривої електроспоживання до вибраного споживачем ГН, розглянемо декілька прикладів характеристик споживання електроенергії рис. 2.3.

На рис. 2.3 а зображена характеристика споживання електричної енергії, яке є сталим й невеликим на протязі великого проміжку часу, і досить великим на протязі короткого проміжку часу. Ця характеристика являє собою приклад найнераціонального споживання тому, що для забезпечення електропостачання такого споживача потужність джерела повинна бути досить великою. Але на протязі основного часу споживання це велике значення потужності не потрібно, тому джерело, що розраховане на велику потужність, використовується неефективно. Якщо джерелом є, наприклад, дизель-генератор, то збільшення потужності означає збільшення витрат пального та собівартості електроенергії.

На рис. 2.3 б зображена характеристика сталого споживання на протязі всього часу. Таким чином, уся потужність джерела використовується, тобто ця характеристика є найкращою за критерієм мінімуму потужності дизель-генератора.

На рис. 2.3 в показана залежність, що характеризує стале споживання на протязі досить великого проміжку часу, та трохи зменшене споживання на протязі невеликого проміжку часу. Таким чином, більшу частину часу використовується

повна потужність джерела, тобто відсоток використання потужності є досить великим, а це значить, що ця характеристика є близькою до раціональної, стосовно мінімуму потужності дизель-генератора.

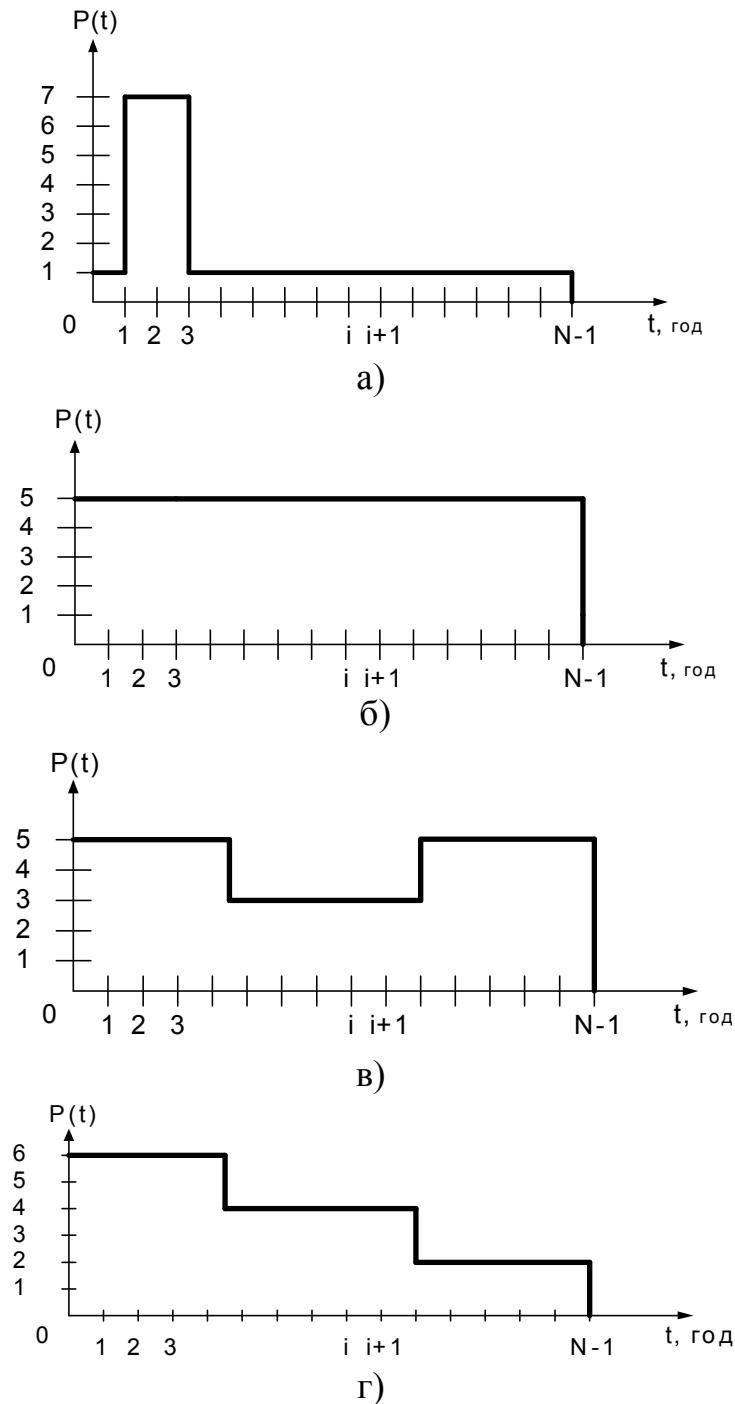


Рис. 2.3. Варіанти характеристик споживання енергії

На рис. 2.3 г зображена характеристика споживання, яке протягом всього часу східчасто зменшується. В цьому випадку приблизно третину всього часу

використовується повна потужність джерела, а потім використовується все менша частка повної потужності джерела.

Ця характеристика є більш наближеною до рівномірної, ніж характеристика зображена на рис. 2.3 а, але менш наближеною до рівномірної, ніж характеристики рис. 2.3 б та рис. 2.3 в.

Для визначення кількісної оцінки **наближення кривих електроспоживання до рівномірної** порівнюємо їх спектри, для цього надамо функціям (рис. 2.3) такі числові значення:

$$\begin{aligned}y_a(t) &= [1, 7, 7, 1, 1, 1, 1] \quad t = 0 \dots 7, \\y_b(t) &= [5, 5, 5, 5, 5, 5, 5] \quad t = 0 \dots 7, \\y_c(t) &= [5, 5, 3, 3, 3, 5, 5] \quad t = 0 \dots 7, \\y_d(t) &= [6, 6, 4, 4, 4, 2, 2] \quad t = 0 \dots 7.\end{aligned}$$

Зображення цих функцій у ОБ області мають вигляд:

$$Y_a(v) = [2.714, 2.232, -0.381, -0.612, 0.136, -1.545, -1.545],$$

$$Y_b(v) = [5, 0, 0, 0, 0, 0, 0],$$

$$Y_c(v) = [4, 1.259, 1.086, 0.138, 0.77, 0, -0.56],$$

$$Y_d(v) = [4.143, 0.229, 0.057, 0.229, -0.331, -0.254, 0.928].$$

Для отриманих спектрів не можна проводити пряме (покомпонентне) порівняння, тому що середній рівень потужності, споживаної за період, різний.

Приведемо рівні потужності до загального вигляду. Для того, щоб привести, розділимо всі спектральні складові на відповідні $Y_a(0), Y_b(0), Y_c(0), Y_d(0)$. Дана операція припустима, тому, що при цьому змінюється тільки рівень споживаної потужності, а форма графіка навантаження залишається незмінною. У такий спосіб одержимо наступні спектри:

$$Y'_a(\nu) = Y_a(\nu)/Y_a(0) = [1, 0.822, -0.141, -0.225, 0.05, -0.569, -0.569],$$

$$Y'_6(\nu) = Y_6(\nu)/Y_6(0) = [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0],$$

$$Y'_8(\nu) = Y_8(\nu)/Y_8(0) = [1, 0.315, 0.272, 0.035, 0.019, 0, -0.14],$$

$$Y'_2(\nu) = Y_2(\nu)/Y_2(0) = [1, 0.055, 0.014, 0.055, -0.08, 0.061, 0.224].$$

Порівнюючи отримані величини відповідних спектральних складових, бачимо, що, чим функція ближче до рівномірної, тим менше значення $|Y(\nu)/Y(0)|$. Однак це справедливо не для всіх складових спектру, тому, що при зменшенні одної складової може збільшуватися інша. Тому необхідно також враховувати суму всіх $|Y(\nu)/Y(0)|$, яка також повинна бути мінімальною. У такий спосіб задача вибору постійної функції в ОБ спектрі зводиться до задачі вибору функції з мінімальними спектральними складовими.

ОБ спектр характеристики електроспоживання, яка являє собою постійну функцію (рис. 2.2 в) дорівнює:

$$\begin{cases} Y'(\nu)|_{\nu=0} = Y(0) \\ Y'(\nu)|_{\nu \neq 0} = 0 \end{cases}.$$

Для *наближення кривих електроспоживання до вибраних споживачем*, (наприклад, рис. 2.2 а або рис. 2.2 б) необхідно виконати умову:

$$\begin{cases} Y'(\nu)|_{\nu=0} = Y(0) \\ Y'(\nu)|_{\nu \neq 0} = Y_3(i) \end{cases},$$

де $Y_3(i)$ - спектр заданої (вибраної споживачем) функції рис. 2.2 а, або рис. 2.2 б в орієнтованому базисі.

2.2. Отримання заданої характеристики електроспоживання за допомогою елементарних комірок

2.2.1. Спектр характеристики електроспоживання в орієнтованому базисі

Одним із способів отримання заданої характеристики споживання системою різних споживачів є введення часових затримок вмикання окремих пристроїв в інтервалі часу споживання потужності. Для визначення значень затримок по вигляду ОБ спектра (1.4) необхідно знайти відповідність між затримкою в реальній області та в ОБ спектрі.

Для знаходження даної відповідності, розглянемо деяку функцію електроспоживання, рис. 2.4:

$$P(t) = \{p_0, p_1, \dots, p_i, p_{i+1}, \dots, p_{N-1}\}, \quad (2.1)$$

де $t=0 \dots N-1$, N - кількість тактів, а такт – часовий інтервал заданої довжини, з яких складається час спостереження t . Функцію електроспоживання апроксимуємо східчастою функцією:

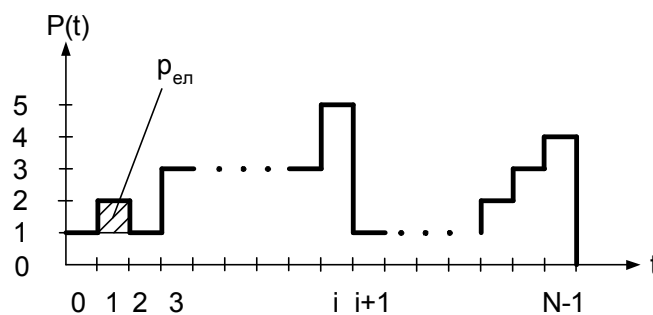


Рис. 2.4. Характеристика електроспоживання за відсутності затримок

Введемо поняття елементарної комірки як функції одиничної амплітуди -

$$p_{\text{ел}}(i) = \begin{cases} 1; & t = i, \\ 0 & t \neq i. \end{cases}, \text{ розташованої на одному такті. Тепер зробимо такі допущення:}$$

1) представимо характеристику електроспоживання як суму елементарних комірок, причому кожна елементарна комірка являє собою характеристику електроспоживання окремого споживача електроенергії, а отже має певний рівень пріоритету серед інших споживачів. Цей рівень виражається у величині припустимої затримки даної елементарної комірки на певне число тактів, або у забороні такої затримки. Чим більший рівень пріоритету споживача тим менша величина затримки.

2) будемо вважати, що до складу системи керування входить пристрій прогнозування, за допомогою якого вигляд характеристики споживання є відомим на момент аналізу кривих електроспоживання.

Визначимо, яким чином зміниться ОБ спектр функції при переміщені елементарної комірки на один такт. Для цього представимо функцію споживання у вигляді суми елементарних комірок

$$p(t) = \{ p_0 \cdot p_{ел}, p_1 \cdot p_{ел}, \dots, p_i \cdot p_{ел}, p_{i+1} \cdot p_{ел}, \dots, p_{N-1} \cdot p_{ел} \}, \quad (2.2)$$

спектр якої в орієнтованому базисі має вигляд:

$$Y(v) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{x=0}^{N-1} p(x) \cdot \varphi_d(v, x) = \frac{p_{ел}}{N} \cdot [p_0 \cdot \varphi_d(v, 0) + p_i \cdot \varphi_d(v, i) + p_{i+1} \cdot \varphi_d(v, i+1) + \dots + p_{N-1} \cdot \varphi_d(v, N-1)]. \quad (2.3)$$

Після введення затримки однієї елементарної комірки на один такт з i на $i+1$ функція прийме вигляд

$$\begin{aligned}
 p'(t) &= \{p_0 \cdot p_{el}, p_1 \cdot p_{el}, \dots, p'_i \cdot p_{el}, \\
 & p'_{i+1} \cdot p_{el}, \dots, p_{N-1} \cdot p_{el}\} = \\
 &= \{p_0 \cdot p_{el}, p_1 \cdot p_{el}, \dots, (p_i - 1) \cdot p_{el}, \\
 & (p_{i+1} + 1) \cdot p_{el}, \dots, p_{N-1} \cdot p_{el}\},
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

а її спектр:

$$\begin{aligned}
 Y'(v) &= \frac{1}{N} \cdot \sum_{x=0}^{N-1} p'(x) \cdot \varphi_d(v, x) = \frac{p_{el}}{N} \cdot [p_0 \cdot \varphi_d(v, 0) + \dots \\
 & + p'_i \cdot \varphi_d(v, i) + p'_{i+1} \cdot \varphi_d(v, i+1) + \dots \\
 & + p_{N-1} \cdot \varphi_d(v, N-1)].
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Вихідна характеристика електроспоживання (рис. 2.4) після введення затримки однієї елементарної комірки на один такт наведена на рис. 2.5.

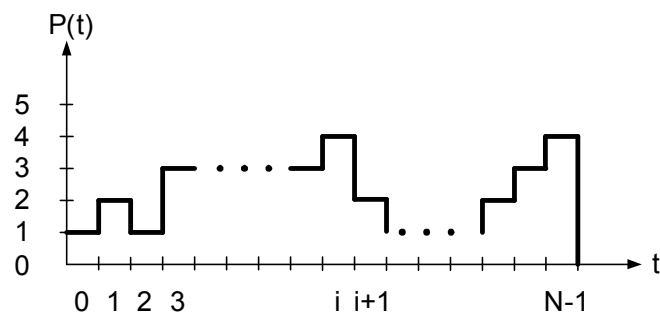


Рис. 2.5. Характеристика електроспоживання після зсуву з i на $i+1$

З урахуванням формули (2.5) отримаємо ОБ спектр характеристики електроспоживання після зсуву елементарної комірки на один такт :

$$Y'(v) = Y(v) + \frac{1}{N} \cdot [\varphi_d(v, i+1) - \varphi_d(v, i)]. \tag{2.6}$$

При виборі комірок, які необхідно піддати затримці, варто також враховувати, що

$$\begin{aligned}
 A_{v,i} + A_{v,i+1} &= \frac{1}{N} \cdot (\varphi_d(v,i) - \varphi_d(v,i-1)) + \\
 &+ \frac{1}{N} \cdot (\varphi_d(v,i+1) - \varphi_d(v,i)) = \quad , \quad (2.9) \\
 &= \frac{1}{N} \cdot (\varphi_d(v,i+1) - \varphi_d(v,i-1))
 \end{aligned}$$

тобто затримка на один такт двох прилеглих елементарних комірок аналогічна затримці першої на два такти.

Аналогічно справедливо:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^h A_{v,i} &= \frac{1}{N} \cdot (\varphi_d(v,i) - \varphi_d(v,0)) + \frac{1}{N} \cdot (\varphi_d(v,2) - \\
 &-\varphi_d(v,1)) + \dots + \frac{1}{N} \cdot (\varphi_d(v,h+1) - \quad , \quad (2.10) \\
 &-\varphi_d(v,h)) = \frac{1}{N} \cdot (\varphi_d(v,h+1) - \varphi_d(v,0))
 \end{aligned}$$

тобто затримка на один такт h прилеглих елементарних комірок аналогічна затримці першої на h тактів.

У результаті одержуємо різні варіанти приведення вихідної характеристики до рівномірної. Вибір варіанта залежить від початкових умов задачі та рівнів пріоритету відповідних комірок.

Наведемо приклад зведення характеристики до близької до рівномірної. Хай необхідно привести функцію, зображену на рис.2.6, до функції, яка близька до рівномірної, шляхом затримки елементарних комірок.

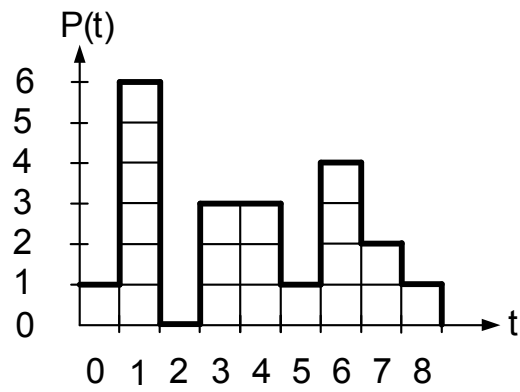


Рис. 2.6. Початкова характеристика споживання (без введення затримок)

Запишемо функцію зображену на рис. 2.6 у чисельному вигляді

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ 6 \\ 0 \\ 3 \\ 3 \\ 1 \\ 4 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Число інтервалів $N=9$. Задамося $m=3$, $n=2$. Визначимо ОБ спектр вихідної функції.

$$Y(0) = \frac{1}{9} \cdot (1 + 6 + 0 + 3 + 3 + 1 + 4 + 2 + 1) = 2.333$$

$$\begin{aligned}
Y(1) = & \frac{1}{9} \cdot (1 + 6 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 1) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 1)) + \\
& + 0 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 2) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 2)) + 3 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 0) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 0)) + \\
& + 3 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 1) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 1)) + 1 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 2) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 2)) + \\
& + 4 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 0) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 0)) + 2 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 1) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 1)) + \\
& + 1 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 2) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 2))) = -1.333
\end{aligned}$$

.....

$$\begin{aligned}
Y(8) = & \frac{1}{9} \cdot (1 + 6 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 2) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 2)) + \\
& + 0 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 1) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 1)) + 3 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 2) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 2)) + \\
& + 3 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 1) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 1)) + 1 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 0) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 0)) + \\
& + 4 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 1) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 1)) + 2 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 0) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 0)) + \\
& + 1 \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 2) + A \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot 2))) = 0
\end{aligned}$$

Тобто

$$Y_{\text{без затримок}} = \begin{bmatrix} 2.333 \\ -1.333 \\ 1.667 \\ 0 \\ -1 \\ 0.667 \\ 0 \\ -1.333 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Складемо систему алгебраїчних рівнянь згідно (2.8), яку запишемо в матричному вигляді:

$$A \cdot G = Y,$$

$$\text{де } A = \frac{1}{9} \cdot \begin{bmatrix} -0.333 & 0.333 & 0 & -0.333 & 0.333 & 0 & -0.333 & 0.333 \\ 0 & -0.333 & 0.333 & 0 & -0.333 & 0.333 & 0 & -0.333 \\ 0 & 0 & -0.333 & 0 & 0 & 0.333 & 0 & 0 \\ -0.333 & 0.333 & -0.333 & 0.333 & 0 & 0 & 0 & -0.333 \\ 0 & -0.333 & 0 & 0.333 & 0 & 0 & -0.333 & 0.333 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.333 & 0 & 0 \\ -0.333 & 0.333 & 0 & 0 & -0.333 & 0 & 0.333 & 0 \\ 0 & -0.333 & 0.333 & -0.333 & 0.333 & -0.333 & 0.333 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \\ g_7 \\ g_8 \end{bmatrix},$$

$$Y = \begin{bmatrix} -1.333 \\ 1.667 \\ 0 \\ -1 \\ 0.667 \\ 0 \\ -1.333 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Вирішимо дану систему матричним способом. Для цього визначимо зворотню матрицю A^{-1} :

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -2 & 0 & -1 & -2 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -2 & 1 & 1 & -3 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & -3 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -2 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G = A^{-1} \cdot Y = \begin{bmatrix} -1.333 \\ 2.333 \\ 0 \\ 0.667 \\ 1.333 \\ 0 \\ 1.667 \\ 1.333 \end{bmatrix}$$

Округляючи значення G до цілих, одержимо:

$$G = A^{-1} \cdot Y = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Таким чином для одержання характеристики наближеної до рівномірної необхідно зсунути дві елементарні комірки з інтервалу 1 на інтервал 2, одну елементарну комірку з інтервалу 3 на інтервал 4, одну елементарну комірку з інтервалу 4 на інтервал 5, дві елементарні комірки з інтервалу 6 на інтервал 7 і одну елементарну комірку з інтервалу 7 на інтервал 8. У результаті одержимо функцію, зображену на рис. 2.7.

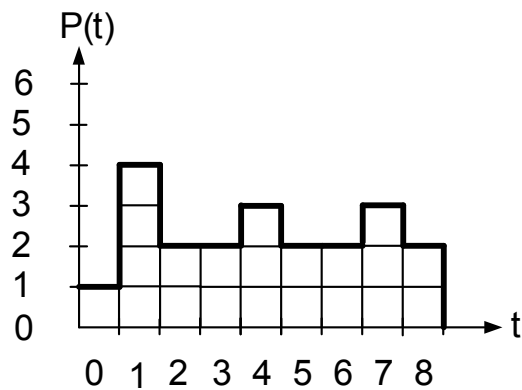


Рис. 2.7. Характеристика електроспоживання, що близька до рівномірної (після введення затримок елементарних функцій)

ОБ спектр функції, після введення затримок елементарних комірок, має таке значення:

$$Y'_{\text{введення затримок}} = \begin{bmatrix} 2.333 \\ -1 \\ 0.333 \\ 0 \\ -0.333 \\ 0 \\ 0 \\ -0.333 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

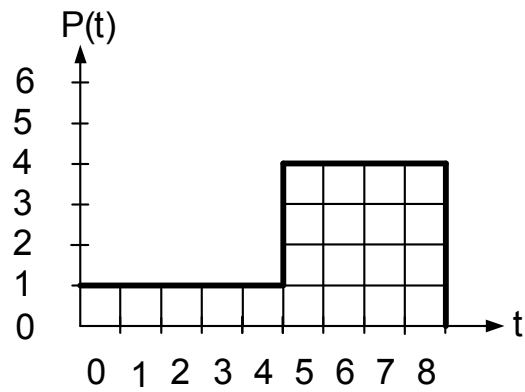


Рис. 2.8 Характеристика електроспоживання, яку необхідно отримати

Обчислимо ОБ - спектр даної характеристики:

$$Y_3 = \begin{bmatrix} 2.333 \\ 0.333 \\ -0.667 \\ 0.333 \\ 0.333 \\ 0.333 \\ -1.667 \\ -0.667 \\ 0.333 \end{bmatrix}$$

Згідно (2.14) отримаємо систему рівнянь:

$$A \cdot G = Y_3 - Y,$$

де $Y_3 - Y = \begin{bmatrix} 1.667 \\ -2.333 \\ 0.333 \\ 1.333 \\ -0.333 \\ -1.667 \\ 0.667 \\ 0.333 \end{bmatrix}$, а матриця A така ж, як і у попередньому прикладі.

Вирішивши дану систему отримаємо:

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ 5 \\ 4 \\ 6 \\ 8 \\ 5 \\ 5 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Таким чином для одержання заданої характеристики необхідно п'ять елементарних комірок з інтервалу 1 на інтервал 2, чотири елементарні комірки з інтервалу 2 на інтервал 3, шість елементарних комірок з інтервалу 3 на інтервал 4, вісім елементарних комірок з інтервалу 4 на інтервал 5, п'ять елементарних комірок з інтервалу 5 на інтервал 6, п'ять елементарних комірок з інтервалу 6 на інтервал 7 і три елементарні комірки з інтервалу 7 на інтервал 8. У результаті одержимо функцію, зображену на рис. 2.8.

Проте, якщо треба вирішити наведений приклад з урахуванням заборони затримки елементарних комірок (наприклад, три елементарні комірки з 4-го інтервалу не можна затримувати), тоді отримаємо характеристику, лише наближену до заданої (рис 2.9).

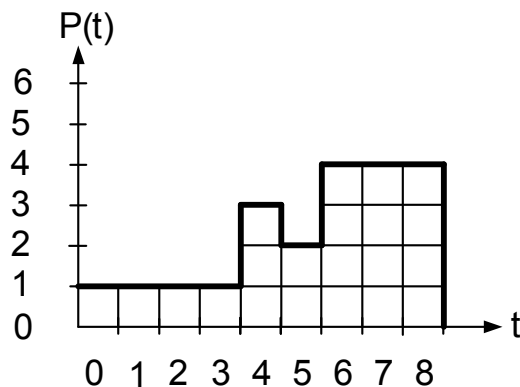


Рис. 2.9. Наближення характеристики електроспоживання до заданої, з урахуванням обмежень

2.2.4. Оцінка ефективності керування електроспоживанням

Шляхом зміни моментів вмикання/вимикання окремих споживачів досягнуто наближення до заданої характеристики електроспоживання та отриманий виграш у вартісних витратах за рахунок збільшення споживання електроенергії у інтервалі дії тарифів меншої вартості - рис. 2.8 $t \in [5,8]$.

Припустимо, що діє така тарифна політика: одна елементарна комірка має вартість 3 у.о. (умовні одиниці) на інтервалі $t \in [0,4]$ і 2 у.о. на інтервалі $t \in [5,8]$ тоді отримуємо вартість спожитої електроенергії:

- $13*3+8*2=55$ у.о. – для рис. 2.6;
- $5*3+16*2=47$ у.о. – для рис. 2.8;
- $7*3+14*2=49$ у.о. – для рис. 2.9.

Отже виграш складає 15% (8 у.о.) для приклада рис. 2.8 і 10% (6 у.о.) для рис. 2.9 у порівнянні з рис. 2.6.

2.3 Наближення характеристики електроспоживання до заданої за допомогою елементарних підфункцій

2.3.1. Структурна схема пристрою для управління локальним об'єктом

У загальному випадку характеристика споживання енергії представляє собою сукупність характеристик споживання потужності різними навантаженнями, причому дані характеристики мають відмінні від одиничних інтервал споживання потужності і рівень споживаної потужності. Тому при рішенні даної задачі не можна використовувати спосіб отримання заданої характеристики електроспоживання за допомогою зсувів елементарних комірок (див. п. 2.2).

Хай вихідна потужнісна характеристика $P_{\Sigma}(t)$ являє собою суму потужнісних характеристик $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, різних споживачів енергії як показано на рис. 2.10.

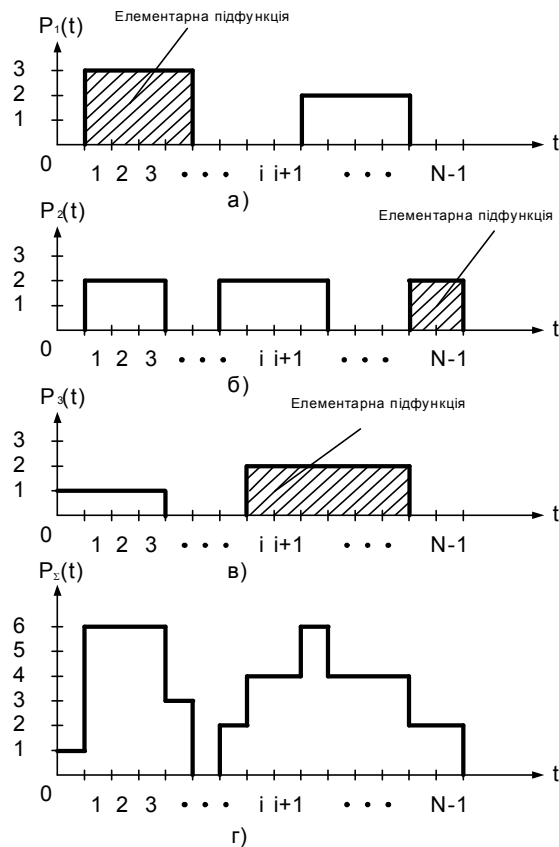


Рис. 2.10. Електроспоживання різних споживачів (а-в), та загальне електроспоживання (г)

Електроспоживання кожним споживачем $P_i(t)$ має кілька моментів включення і моментів вимикання навантаження. Кожну функцію можна розглядати як суму деяких елементарних підфункцій. Елементарною підфункцією будемо називати частину функції від моменту вмикання до моменту вимикання (див рис. 2.10 а-в заштриховані області).

Максимальна затримка для елементарної підфункції визначається рівнем ієрархії характеристики споживання. Кожному рівню ієрархії відповідає час затримки τ , яка допускається для даного споживача.

Структурна схема пристрою для управління локальним об'єктом наведена на рис. 2.11. Вона складається з: локального об'єкту – N споживачів електроенергії, пристрою прогнозування, системи керування та N вимірювально-комутуючих систем (ВКС), за допомогою яких відбувається комутація споживача з силовою мережею та вимірювання його потужності споживання.

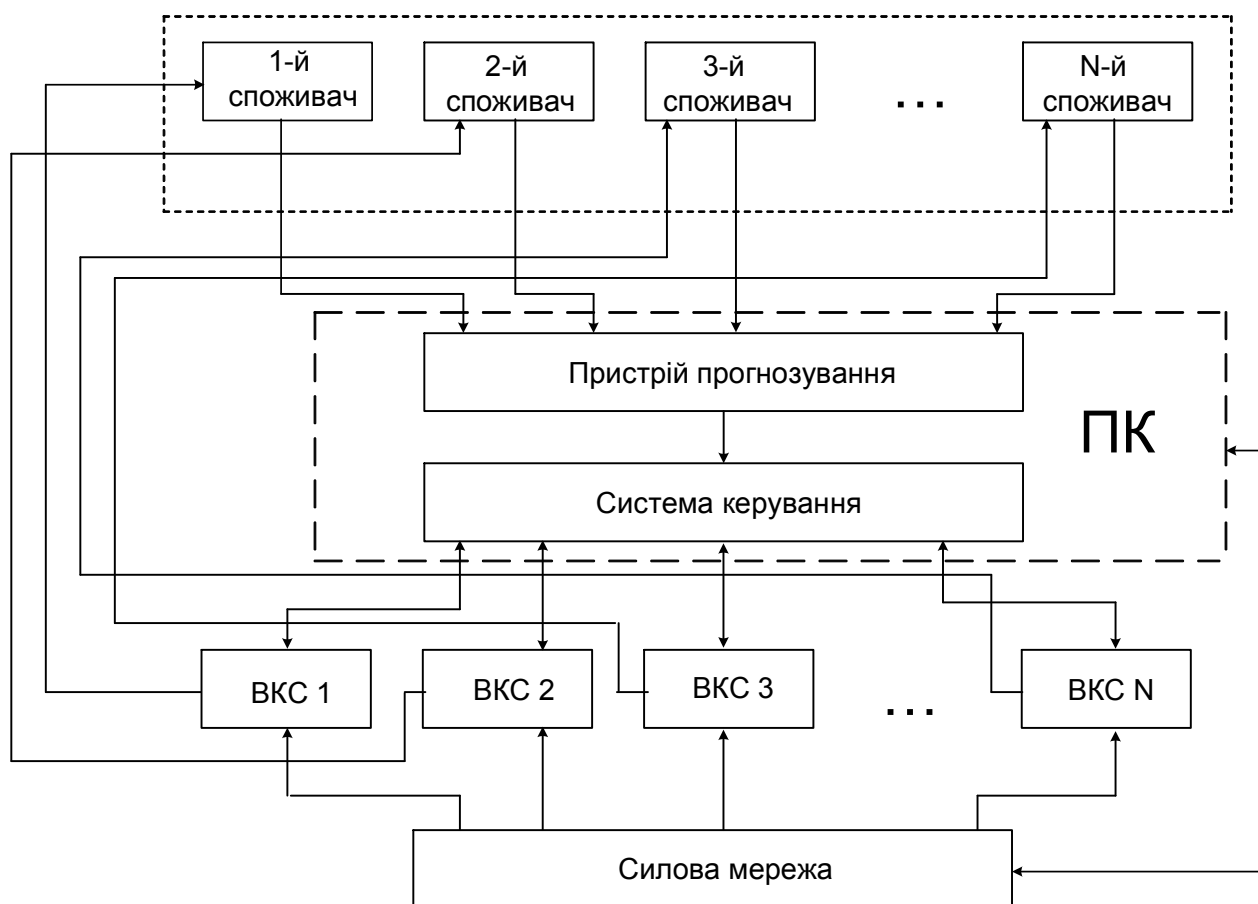


Рис. 2.11. Структурна схема пристрою управління ЛО

Задачею системи керування є визначення величини затримок елементарних підфункцій для отримання заданої характеристики електроспоживання з урахуванням рівнів ієрархій споживачів.

Оскільки для визначення величини затримки необхідно знати характеристику розподілу потужності по ієрархічних рівнях наперед, то для одержання цих даних у системі керування локальним об'єктом існує пристрій прогнозування (рис. 2.11). Пристрій прогнозування отримує з ВКС значення потужності споживання, аналізує їх та, на основі деяких початкових даних про систему, прогнозує значення потужності у найближчий момент часу, також коректує спрогнозовану характеристику на підставі нових даних отриманих з датчика. Прогнозовані в такий спосіб характеристики електроспоживання передаються на систему керування. Для правильного функціонування системи до системи керування також передається інформація, на підставі якої вихідна характеристика розподілу потужності розбивається на кілька ієрархічних

характеристик. Частота, з якою надходять нові характеристики, визначається максимальним часом розрахунку затримок, а також пропускною здатністю каналу. Одержавши вхідну характеристику електроспоживання, система керування приступає до визначення затримки за методикою, наведеною нижче. Результатом роботи системи керування є значення затримок для кожної елементарної підфункції відповідної ієрархічної характеристики. Величини затримок надходять на вимірювально-комутуючі системи (ВКС). Після приходу нової характеристики від пристрою прогнозування значення перераховуються й обновляються. ВКС виконують затримку вмикання навантаження на задану величину, яку одержали від системи керування. ВКС також передають значення потужності споживання на пристрій прогнозування, для побудови реальної характеристики споживання. У такий спосіб відбувається приведення характеристики споживання до якомога більш наближеної до заданої.

2.3.2. Визначення спектру заданої характеристики в орієнтованому базисі

Визначимо, яким чином зміниться ОБ спектр при затримці елементарної підфункції на один такт. Для цього представимо елементарну підфункцію як деяку сукупність елементарних комірок. Також врахуємо, що для збереження структури елементарної підфункції необхідно здійснити зсув цих комірок одночасно на однакову величину, тобто значення спектральних складових ОБ спектра буде змінюватися на значення деякої функції, яка являє собою сукупність цих комірок. Тоді можна записати

$$Y'(v) = Y(v) + F(v),$$

де $F(v)$ - величина, на яку необхідно змінити спектральну складову при затримці на один такт.

$$F(v) = f(t_0) \cdot \frac{1}{N} \cdot (\varphi_d(v, t_0 + 1) - \varphi_d(v, t_0)) + f(t_0 + 1) \times \\ \times \frac{1}{N} \cdot (\varphi_d(v, t_0 + 2) - \varphi_d(v, t_0 + 1)) + \dots + f(t_i) \frac{1}{N} \cdot (\varphi_d(v, t_i + 1) - \varphi_d(v, t_i))$$

де t_0 - момент вмикання елементарної підфункції,

t_i - момент вимикання елементарної підфункції,

$f_i(t)$ - значення елементарної підфункції на інтервалі i .

Аналогічно для затримки елементарної підфункції на τ тактів необхідно спектральні складові перетворити наступним чином

$$Y'(v) = Y(v) + F(v, \tau),$$

де $F(v, \tau)$ - величина, на яку необхідно змінити спектральну складову при затримці на τ тактів.

$$F(v, \tau) = f(t_0) \cdot \frac{1}{N} \cdot (\varphi_d(v, t_0 + \tau) - \varphi_d(v, t_0)) + f(t_0 + 1) \times \\ \times \frac{1}{N} \cdot (\varphi_d(v, t_0 + \tau + 1) - \varphi_d(v, t_0 + 1)) + \dots + f(t_i) \frac{1}{N} \cdot (\varphi_d(v, t_i + \tau) - \varphi_d(v, t_i))$$

2.3.3 Наближення характеристики електроспоживання до заданої

Для наближення до заданої (вибраної споживачем) характеристики необхідно визначити, на яку величину треба затримати кожен з елементарних підфункцій для того щоб $Y'(v) \rightarrow Y_3(v)$, де $Y_3(v)$ - ОБ спектр заданої характеристики електроспоживання. З огляду на те, що $Y_3(v)$ може змінюватися тільки на дискретні значення $F(v, \tau)$ запишемо систему рівнянь:

$$F_1(1, t) + F_2(1, t) + \dots + F_p(1, t) = Y_3(1) - Y(1)$$

$$F_1(2,t) + F_2(2,t) + \dots + F_p(2,t) = Y_3(2) - Y(2) \quad (2.15)$$

$$F_1(N-1,t) + F_2(N-1,t) + \dots + F_p(N-1,t) = Y_3(N-1) - Y(N-1)$$

де P - кількість елементарних підфункцій, причому P може бути як менше, так і більше ніж $N-1$, тобто система нелінійних рівнянь (2.15) може бути як недовизначеною так і перевизначеною.

Запишемо $F_i(v, \tau)$ у вигляді:

$$F_i(v, \tau) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=t_0}^{t_i} f_i(t) \cdot (\varphi_d(v, t + \tau) - \varphi_d(v, t)), \quad (2.16)$$

Дану систему нелінійних рівнянь необхідно вирішити відносно τ_i .

З огляду на те, що у випадку $t \notin (t_0, t_i)$, тобто на інтервалах де елементарна підфункція не визначена функція $f_i(t) = 0$, можемо записати $F_i(v, \tau)$ у вигляді

$$F_i(v, \tau) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_i(t) \cdot (\varphi_d(v, t + \tau) - \varphi_d(v, t)), \quad (2.17)$$

Після підстановки (2.17) в (2.15) отримаємо:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_1(t) \cdot (\varphi_d(1, t + \tau_1) - \varphi_d(1, t)) + \\ & + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_2(t) \cdot (\varphi_d(1, t + \tau_2) - \varphi_d(1, t)) + \dots \\ & + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_p(t) \cdot (\varphi_d(1, t + \tau_p) - \varphi_d(1, t)) = Y'(1) - Y(1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_1(t) \cdot (\varphi_d(2, t + \tau_1) - \varphi_d(2, t)) + \\
& + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_2(t) \cdot (\varphi_d(2, t + \tau_2) - \varphi_d(2, t)) + \dots \\
& + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_p(t) \cdot (\varphi_d(2, t + \tau_p) - \varphi_d(2, t)) = Y'(2) - Y(2)
\end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_1(t) \cdot (\varphi_d(N-1, t + \tau_1) - \varphi_d(N-1, t)) + \\
& + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_2(t) \cdot (\varphi_d(N-1, t + \tau_2) - \varphi_d(N-1, t)) + \dots \\
& + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_p(t) \cdot (\varphi_d(N-1, t + \tau_p) - \varphi_d(N-1, t)) = Y'(N-1) - Y(N-1)
\end{aligned}$$

Перегрупуємо систему нелінійних рівнянь (2.18). Для цього розкриємо вирази, що стоять під знаком суми. У результаті одержимо наступну систему:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_1(t) \cdot \varphi_d(1, t + \tau_1) + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_2(t) \cdot \varphi_d(1, t + \tau_2) + \dots \\
& + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_p(t) \cdot \varphi_d(1, t + \tau_p) - \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_1(t) \cdot \varphi_d(1, t) - \\
& \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_2(t) \cdot \varphi_d(1, t) - \dots - \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_p(t) \cdot \varphi_d(1, t) = Y'(1) - Y(1) \\
& \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_1(t) \cdot \varphi_d(2, t + \tau_1) + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_2(t) \cdot \varphi_d(2, t + \tau_2) + \dots \\
& + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_p(t) \cdot \varphi_d(2, t + \tau_p) - \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_1(t) \cdot \varphi_d(2, t) - \\
& \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_2(t) \cdot \varphi_d(2, t) - \dots - \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_p(t) \cdot \varphi_d(2, t) = Y'(2) - Y(2)
\end{aligned} \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_1(t) \cdot \varphi_d(N-1, t + \tau_1) + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_2(t) \cdot \varphi_d(N-1, t + \tau_2) + \dots \\
& + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_P(t) \cdot \varphi_d(N-1, t + \tau_P) - \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_1(t) \cdot \varphi_d(N-1, t) - \\
& \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_2(t) \cdot \varphi_d(N-1, t) - \dots - \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_P(t) \cdot \varphi_d(N-1, t) = Y'(2) - Y(2)
\end{aligned}$$

Виходячи з того, що

$$\begin{aligned}
& -Y(1) + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_1(t) \cdot \varphi_d(v, t) + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_2(t) \cdot \varphi_d(v, t) + \dots \\
& + \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} f_P(t) \cdot \varphi_d(v, t) = 0
\end{aligned}$$

можемо записати:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[f_1(t) \cdot \varphi_d(1, t + \tau_1) + f_2(t) \cdot \varphi_d(1, t + \tau_2) + \dots + \right. \\
& \left. + f_P(t) \cdot \varphi_d(1, t + \tau_P) \right] = Y'(1) \\
& \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[f_1(t) \cdot \varphi_d(2, t + \tau_1) + f_2(t) \cdot \varphi_d(2, t + \tau_2) + \dots + \right. \\
& \left. + f_P(t) \cdot \varphi_d(2, t + \tau_P) \right] = Y'(2) \\
& \dots\dots\dots \\
& \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[f_1(t) \cdot \varphi_d(N-1, t + \tau_1) + f_2(t) \cdot \varphi_d(N-1, t + \tau_2) + \dots + \right. \\
& \left. + f_P(t) \cdot \varphi_d(N-1, t + \tau_P) \right] = Y'(N-1)
\end{aligned}$$

Згідно (1.11) :

$$\varphi_d(v, x) = \cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n v^s \cdot x^s\right) + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n v^s \cdot x^s\right).$$

Розкривши в системі значення $f(v, x)$, можемо записати систему нелінійних рівнянь (2.19) у вигляді

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_1)^s\right) + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{m} \times \right. \right. \\ & \times \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_1)^s \left. \left. \right) \right) + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_2)^s\right) + \right. \\ & + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_2)^s\right) \left. \right) + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \times \right. \right. \\ & \times \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_p)^s \left. \left. \right) + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_p)^s\right) \right) \end{aligned} \right] = Y'(1) \\
 & \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_1)^s\right) + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{m} \times \right. \right. \\ & \times \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_1)^s \left. \left. \right) \right) + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_2)^s\right) + \right. \\ & + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_2)^s\right) \left. \right) + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \times \right. \right. \\ & \times \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_p)^s \left. \left. \right) + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_p)^s\right) \right) \end{aligned} \right] = Y'(2) \quad (2.20) \\
 & \dots \\
 & \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_1)^s\right) + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{m} \times \right. \right. \\ & \times \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_1)^s \left. \left. \right) \right) + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_2)^s\right) + \right. \\ & + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_2)^s\right) \left. \right) + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \times \right. \right. \\ & \times \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_p)^s \left. \left. \right) + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_p)^s\right) \right) \end{aligned} \right] = Y'(N-1)
 \end{aligned}$$

Спростимо отриману систему. Для цього скористаємося наступним виразом:

$$\begin{aligned}
& \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n v^s \cdot x^s\right) + A \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n v^s \cdot x^s\right) = \\
& = \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n v^s \cdot x^s\right) + \operatorname{tg}\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n v^s \cdot x^s\right) = \\
& = \frac{1}{\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n v^s \cdot x^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right).
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Після тригонометричних перетворень (2.21), одержимо наступну систему нелінійних рівнянь:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{N \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (1 + \tau_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_p)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \end{aligned} \right] = Y'(1) \\
& \frac{1}{N \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (1 + \tau_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_p)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \end{aligned} \right] = Y'(2) \tag{2.22} \\
& \dots\dots\dots \\
& \frac{1}{N \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (1 + \tau_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_p)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \end{aligned} \right] = Y'(N-1)
\end{aligned}$$

Вирішуючи отриману систему відносно τ_i одержимо значення затримок для кожної підфункції, кожної характеристики електроспоживання.

Однак аналітичними методами дану систему розв'язати не завжди можливо, тому необхідно застосовувати чисельні методи рішення систем нелінійних рівнянь, при чому чисельний метод повинний вирішувати як недовизначені, так і перевизначені системи нелінійних рівнянь.

Для розв'язку системи нелінійних рівнянь (2.22), у даній роботі, будемо використовувати метод нерівномірних покриттів [27].

Для використання даного методу доведемо, що нелінійні рівняння утворюючі систему (2.22) належать до Ліпшицевих класів функцій нульового порядку.

По визначенню, функція f на множині X задовольняє умові Ліпшиця нульового порядку з вектором l , якщо існує вектор l такий, що для будь-яких векторів x і x' приналежних множині X виконується умова

$$|f(x) - f(x')| \leq \sum_{i=1}^P l_i \cdot |x_i - x'_i| = \langle l, |x - x'| \rangle \quad (2.23)$$

$$f(x) = \frac{1}{N \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n v^s \cdot (t + x_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n v^s \cdot (t + x_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n v^s \cdot (t + x_p)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \right) \end{aligned} \right] \quad (2.24)$$

тоді можна обчислити значення $|f(x) - f(x')|$:

$$|f(x) - f(x')| = \frac{1}{N \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{m})} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n v^s \cdot (t + x_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) - \right. \\ & - f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n v^s \cdot (t + x'_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n v^s \cdot (t + x_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) - \right. \\ & - f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n v^s \cdot (t + x'_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n v^s \cdot (t + x_p)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) - \right. \\ & - f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n v^s \cdot (t + x'_p)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \end{aligned} \right) \quad (2.25)$$

Нехай x і x' підібрані так, що значення косинусів дорівнюють 1 при додатних коефіцієнтах і -1 при від'ємних. При цьому буде виконуватися умова $|x - x'| > 0$. Тоді вираз (2.25) набуде вигляду:

$$|f(x) - f(x')| = \sum_{t=0}^{N-1} \left[\frac{2}{N \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{m})} \cdot |f_1(t)| + \frac{2}{N \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{m})} \cdot |f_2(t)| + \dots + \right. \\ \left. + \frac{2}{N \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{m})} \cdot |f_p(t)| \right] \quad (2.26)$$

З виразу (2.26) видно, що $|f(x) - f(x')|$ є величиною кінцевою, а оскільки $|x - x'| > 0$, то завжди можна підібрати вектор такий, що умова (2.24) буде виконуватися.

У випадку, якщо $|x - x'| = 0$, згідно (2.25) $|f(x) - f(x')|$, а отже умова (2.23) виконується при будь-яких значеннях l .

Таким чином функції, які використовуються в системі нелінійних рівнянь (2.22) належать до Лїпшицевих класів функцій нульового порядку.

Оскільки функція $f(x)$ є диференціюємою на X , то значення вектора l знаходиться у вигляді:

$$l_i = \max_{x \in X} \left| \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \right|, i = 1, \dots, P \quad (2.27)$$

Перепишемо систему нелінійних рівнянь (2.22) у вигляді:

$$\begin{aligned}
 Y'(1) &= \frac{1}{N \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} &f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (1 + \tau_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ &+ f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ &+ \dots + f_P(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_P)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \right) \end{aligned} \right] \\
 Y'(2) &= \frac{1}{N \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} &f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (1 + \tau_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ &+ f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ &+ \dots + f_P(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_P)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \right) \end{aligned} \right] \quad (2.28) \\
 \dots \\
 Y'(N-1) &= \frac{1}{N \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} &f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (1 + \tau_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ &+ f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ &+ \dots + f_P(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_P)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \right) \end{aligned} \right]
 \end{aligned}$$

Заданою точністю обчислень за допомогою верхньої і нижньої границі.

$$Y'(j) - \alpha_j \leq Y'(j) \leq Y'(j) - \beta_j \quad (2.29)$$

Таким чином система нелінійних рівнянь (2.28) розв'язується у такий спосіб:

1. Створюється список можливих розв'язків з області початкового паралелепіпеда

$$S = X_0 = X = \{x \in R, a_i \leq x \leq b_i, i = 1, \dots, P\} \quad (2.30)$$

2. Розглядаємо першу функцію системи $j=1$. $Y'(j) = Y'(1)$

3. Обчислюється центр-вектор з P - вимірного паралелепіпеда X_0

$$c_i = \frac{1}{2} \cdot (a_i + b_i), i = 1, \dots, P \quad (2.31)$$

4. Обчислюється діагональ-вектор d P - вимірного паралелепіпеда X_0 :

$$d_i = b_i - a_i, i = 1, \dots, P \quad (2.32)$$

5. Обчислюється значення розглянутої функції системи в центрі P - вимірного паралелепіпеда X_0 :

$$y = Y'(c)$$

6. Обчислюється значення $\psi_{G_j}(X_0)$ за формулою :

$$\psi_{G_j}(X_0) = y - \frac{1}{2} \cdot \langle l, d \rangle = y - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^P l_i \cdot d_i \quad (2.33)$$

7. Обчислюється значення $\varphi_{G_j}(X_0)$ за формулою

$$\varphi_{G_j}(X_0) = y + \frac{1}{2} \cdot \langle l, d \rangle = y + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^P l_i \cdot d_i \quad (2.34)$$

8. Якщо $\beta_j < \psi_{G_j}(X_0)$ чи $\phi_{G_j}(X_0) < \alpha_j$ то в області розв'язку немає. Видалити X_0 зі списку і перейти до пункту 11.
9. Якщо умова (2.29) виконується, то перейти до пункту 14.
10. В області X_0 є розв'язок, розбити її на K паралелепіпедів і занести їх у список S .
11. Якщо список S порожній, то розв'язку у $Y'(j)$ з заданою точністю не існує і перейти до пункту 14.
12. Вибрати новий X_0 зі списку S і перейти до пункту 2.
13. Розглянути наступну функцію системи нелінійних рівнянь (2.28), тобто $j = j + 1$ і перейти до пункту 3.
14. Вектор c - розв'язок даної системи нелінійних рівнянь.

2.3.4 Наближення характеристики електроспоживання до постійної

Для знаходження рівномірної (що забезпечує мінімум потужності альтернативного джерела живлення) характеристики необхідно визначити, на яку величину треба затримати кожен з елементарних підфункцій для того, щоб виконувалась умова $Y(v)|_{v \neq 0} \rightarrow 0$. Отже система рівнянь (2.15) прийме вигляд:

$$F_1(1,t) + F_2(1,t) + \dots + F_p(1,t) = -Y(1)$$

$$F_1(2,t) + F_2(2,t) + \dots + F_p(2,t) = -Y(2) \quad (2.35)$$

.....

$$F_1(N-1,t) + F_2(N-1,t) + \dots + F_p(N-1,t) = -Y(N-1).$$

Систему (2.22) запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{N \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (1 + \tau_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_p)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \right) \end{aligned} \right] = 0 \\
& \frac{1}{N \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (1 + \tau_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_p)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \right) \end{aligned} \right] = 0 \quad (2.36) \\
& \dots \\
& \frac{1}{N \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (1 + \tau_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_p)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \right) \end{aligned} \right] = 0
\end{aligned}$$

Вирішуючи отриману систему відносно τ_i одержимо значення затримок для кожної підфункції кожної функції.

Отже перепишемо систему нелінійних рівнянь (2.36) у вигляді:

$$G_1(\tau) = \frac{1}{N \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (1 + \tau_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 1^s \cdot (t + \tau_p)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \right) \end{aligned} \right]$$

$$G_2(\tau) = \frac{1}{N \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (1 + \tau_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n 2^s \cdot (t + \tau_p)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \right) \end{aligned} \right]$$

$$G_N(\tau) = \frac{1}{N \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m}\right)} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} \left[\begin{aligned} & f_1(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{m} \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (1 + \tau_1)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + f_2(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_2)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) + \right. \\ & + \dots + f_p(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot \sum_{s=1}^n (N-1)^s \cdot (t + \tau_p)^s - \frac{2 \cdot \pi}{m}\right) \right) \end{aligned} \right]$$

Заданою точністю обчислень за допомогою верхньої і нижньої границі.

$$-\alpha_j \leq G_j(\tau) \leq -\beta_j \quad (2.37)$$

Далі алгоритм не відрізняється від наведеного вище в п. 2.3.3.

2.3.5 Приклади задач

Нехай задані такі криві (ієрархічні характеристики) споживання електроенергії, зображені на рис. 2.12:

$$\begin{aligned} f_1(t) &= (1, 1, 1, 0, 1, 0, 0) \\ f_2(t) &= (0, 1, 1, 1, 0, 0, 1), \\ f_3(t) &= (0, 1, 1, 0, 1, 1, 0) \end{aligned}$$

причому, згідно існуючому розподілу, характеристика $f_1(t)$ має найвищий рівень ієрархії і її не можна затримувати, характеристика $f_2(t)$ має самий нижній рівень ієрархії і

її можна затримувати на два такти, характеристика $f_3(t)$ має середній рівень ієрархії і її можна затримувати на один такт.

Сумарну характеристику споживання (потужнісну):

$$f_{\text{пор}}(t_i) = f_1(t_i) + f_2(t_i) + f_3(t_i) = (1, 3, 3, 1, 2, 1, 1),$$

наведено на рис. 2.13.

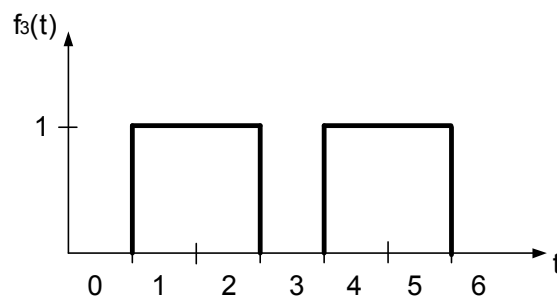
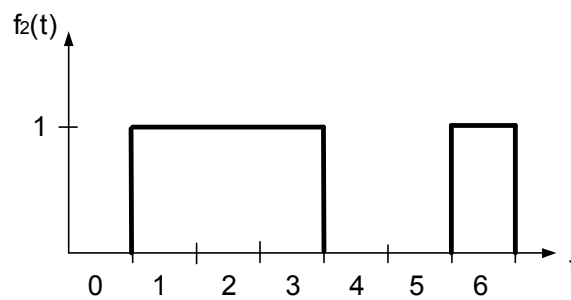
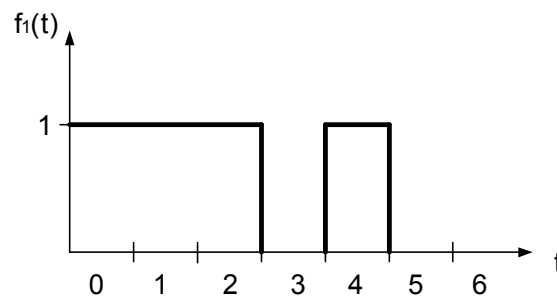


Рис. 2.12 Характеристики електроспоживання окремих споживачів

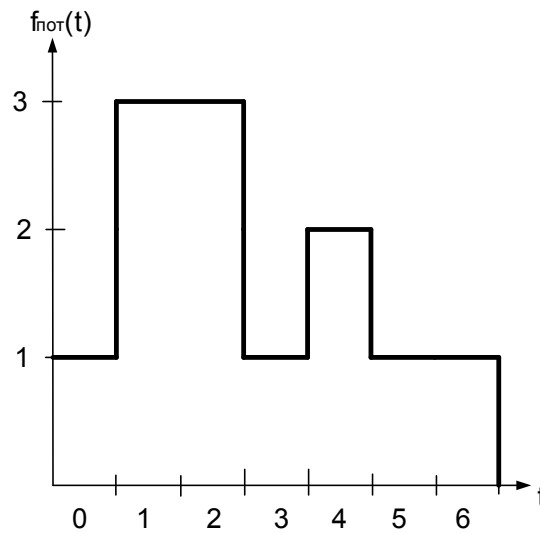


Рис. 2.13. Сумарна характеристика електроспоживання ЛО

Спочатку визначається ОБ спектр сумарної характеристики за формулою прямого перетворення (1.4):

$$Y(\nu) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^{N-1} y(x) \cdot \varphi_d(\nu, x)$$

де N - число розподілів, на які розбивається часовий інтервал (кількість інтервалів).

У випадку, що розглядається, характеристика розбивається на сім ділянок, тобто $N = 7$. Задамося значеннями $n = 1$, $m = 7$. Тоді ОБ-спектр матиме вид:

$$\begin{aligned} Y(0) &= \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 f_{\text{пот}}(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 0 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 0 \cdot t)) = \\ &= \frac{1}{7} \cdot (1 + 3 + 3 + 1 + 2 + 1 + 1) = 1.714; \end{aligned}$$

$$Y(1) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 f_{\text{пот}}(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 1 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 1 \cdot t)) = 0.538;$$

$$Y(2) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 f_{\text{пот}}(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 2 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 2 \cdot t)) = 0.102;$$

$$Y(3) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 f_{\text{пот}}(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 3 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 3 \cdot t)) = -0.41;$$

$$Y(4) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 f_{\text{порт}}(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 4 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 4 \cdot t)) = 0.188;$$

$$Y(5) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 f_{\text{порт}}(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 5 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 5 \cdot t)) = -0.566;$$

$$Y(6) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 f_{\text{порт}}(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 6 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 6 \cdot t)) = -0.566;$$

Далі визначається початкове значення похибки обчислень ε , яке повинно бути меншим, ніж модуль відповідної спектральної складової при $\nu > 0$:

$$\varepsilon < |Y(\nu)|.$$

Тоді можна записати:

$$\varepsilon < \begin{bmatrix} 0.538 \\ 0.102 \\ 0.41 \\ 0.188 \\ 0.566 \\ 0.566 \end{bmatrix}$$

Задамося значеннями похибки

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.15 \\ 0.15 \\ 0.15 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{1,1} &= 0 \\
\tau_{1,2} &= 0 \\
0 &< \tau_{2,1} < 2 \\
0 &< \tau_{2,2} < 2 \\
0 &< \tau_{3,1} < 1 \\
0 &< \tau_{3,2} < 1
\end{aligned}$$

Необхідно вирішити систему нелінійних рівнянь відносно $\tau_{i,j}$. Для цього скористаємося алгоритмом наведеним вище (див. п. 2.3.3).

Створюємо список з одного вихідного паралелепіпеда:

$$S = X_0 = X = \left\{ \begin{array}{l} \tau_{2,1} \in R, 0 \leq \tau_{2,1} \leq 2 \\ \tau_{2,2} \in R, 0 \leq \tau_{2,2} \leq 2 \\ \tau_{3,1} \in R, 0 \leq \tau_{3,1} \leq 1 \\ \tau_{3,2} \in R, 0 \leq \tau_{3,2} \leq 1 \end{array} \right\}$$

Розглядаємо першу функцію системи $j=1$: $G_j(\tau) = G_1(\tau)$

$$G_1(\tau) = \frac{1}{7 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}\right)} \cdot \sum_{t=0}^6 \left[\begin{array}{l} f_{1,1}(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{1,1})\right) - \frac{2 \cdot \pi}{7}\right) + \\ + f_{1,2}(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{1,2})\right) - \frac{2 \cdot \pi}{7}\right) + \\ + f_{2,1}(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{2,1})\right) - \frac{2 \cdot \pi}{7}\right) + \\ + f_{2,2}(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{2,2})\right) - \frac{2 \cdot \pi}{7}\right) + \\ + f_{3,1}(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{3,1})\right) - \frac{2 \cdot \pi}{7}\right) + \\ + f_{3,2}(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{3,2})\right) - \frac{2 \cdot \pi}{7}\right) \end{array} \right]$$

Обчислюємо центр вектор з чотиривимірною паралелепіпеда X_0 :

$$c = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cdot (0+2) \\ \frac{1}{2} \cdot (0+2) \\ \frac{1}{2} \cdot (0+1) \\ \frac{1}{2} \cdot (0+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}.$$

Діагональ вектор d чотиривимірного паралелепіеда X_0 має вигляд:

$$d = \begin{bmatrix} (2-0) \\ (2-0) \\ (1-0) \\ (1-0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Обчислюємо значення розглянутої функції системи в центрі чотиривимірного паралелепіеда X_0 :

$$y = G_1(c) = \frac{1}{7 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}\right)} \cdot \sum_{t=0}^6 \begin{bmatrix} f_{1,1}(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{1,1}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}\right) + \right. \\ + f_{1,2}(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{1,2}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}\right) + \right. \\ + f_{2,1}(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{2,1}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}\right) + \right. \\ + f_{2,2}(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{2,2}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}\right) + \right. \\ + f_{3,1}(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{3,1}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}\right) + \right. \\ \left. \left. \left. + f_{3,2}(t) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{3,2}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}\right)\right) \right) \right) \right) \right) \right) \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{1}{7 \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{7})} \cdot \sum_{t=0}^6 \left[\begin{array}{l} f_{1,1}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{1,2}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{2,1}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t+1) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{2,2}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t+1) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{3,1}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t+0.5) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{3,2}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t+0.5) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) \end{array} \right] = 0.222$$

Обчислюємо вектор l за формулою:

$$l = \begin{bmatrix} \max_{\tau_{2,1}} \left| \frac{\partial G_1(\tau)}{\partial \tau_{2,1}} \right| \\ \max_{\tau_{2,2}} \left| \frac{\partial G_1(\tau)}{\partial \tau_{2,2}} \right| \\ \max_{\tau_{3,1}} \left| \frac{\partial G_1(\tau)}{\partial \tau_{3,1}} \right| \\ \max_{\tau_{3,2}} \left| \frac{\partial G_1(\tau)}{\partial \tau_{3,2}} \right| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \max_{\tau_{2,1}} \left| \frac{1}{2 \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{7})} \cdot \sum_{t=0}^6 f_{2,1}(t) \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{7} \cdot (t + \tau_{2,1}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) \right| \\ \max_{\tau_{2,2}} \left| \frac{1}{2 \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{7})} \cdot \sum_{t=0}^6 f_{2,2}(t) \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{7} \cdot (t + \tau_{2,2}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) \right| \\ \max_{\tau_{3,1}} \left| \frac{1}{2 \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{7})} \cdot \sum_{t=0}^6 f_{3,1}(t) \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{7} \cdot (t + \tau_{3,1}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) \right| \\ \max_{\tau_{3,2}} \left| \frac{1}{2 \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{7})} \cdot \sum_{t=0}^6 f_{3,2}(t) \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{7} \cdot (t + \tau_{3,2}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) \right| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.462 \\ 0.206 \\ 0.361 \\ 0.29 \end{bmatrix}$$

Обчислюємо значення $\psi_{G_1}(X_0)$ за формулою:

$$\begin{aligned}\psi_{G_1}(X_0) &= y - \frac{1}{2} \cdot \langle l, d \rangle = y - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^P l_i d_i = \\ &= 0.222 - \frac{1}{2} \cdot (0.462 \cdot 2 + 0.206 \cdot 2 + 0.361 \cdot 1 + 0.29 \cdot 1) = -0.771\end{aligned}$$

Обчислюємо значення $\varphi_{G_1}(X_0)$ за формулою:

$$\begin{aligned}\varphi_{G_1}(X_0) &= y + \frac{1}{2} \cdot \langle l, d \rangle = y + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^P l_i d_i = \\ &= 0.222 + \frac{1}{2} \cdot (0.462 \cdot 2 + 0.206 \cdot 2 + 0.361 \cdot 1 + 0.29 \cdot 1) = 1.215.\end{aligned}$$

Оскільки $0.25 > -0.771$ і $1.215 > -0.25$, то в області X_0 є розв'язок.

Розв'язок $|G_1(c)| = 0.97 > 0.25$ (тобто $\left|G_1(c) \cdot 7 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}\right)\right| = 0.222 \cdot 7 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{7}\right) = 0.97 > 0.25$), то центр даного чотиривимірного паралелепіпеда не є розв'язком, тому розбиваємо область X_0 на 16 паралелепіпедів і заносимо їх у список S:

Обираємо новий X_0 зі списку S і повторюємо процедуру розрахунку.

Таким чином розв'язок з заданою точністю досягається при

$$\tau_{1,1} = 0$$

$$\tau_{1,2} = 0$$

$$\tau_{2,1} = 2$$

$$\tau_{2,2} = 0$$

$$\tau_{3,1} = 0$$

$$\tau_{3,2} = 1$$

Одержавши величини затримок, можна визначити наближену до рівномірної характеристику. Для цього необхідно першу підфункцію другої функції затримати на два такти, а другу підфункцію третьої функції на один такт. Вирівняна (близька до рівномірної) характеристика споживання зображена на рис. 2.14.

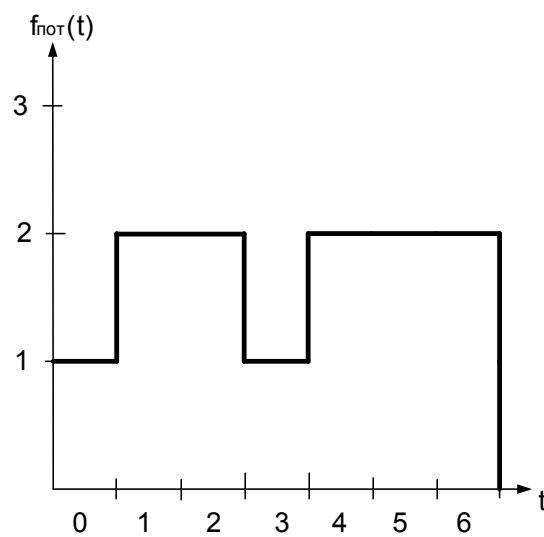


Рис. 2.14. Вирівняна характеристика електроспоживання

Якщо необхідно наблизити криву рис. 2.13 до заданої – рис. 2.15 то скориставшись викладеним вище отримаємо:

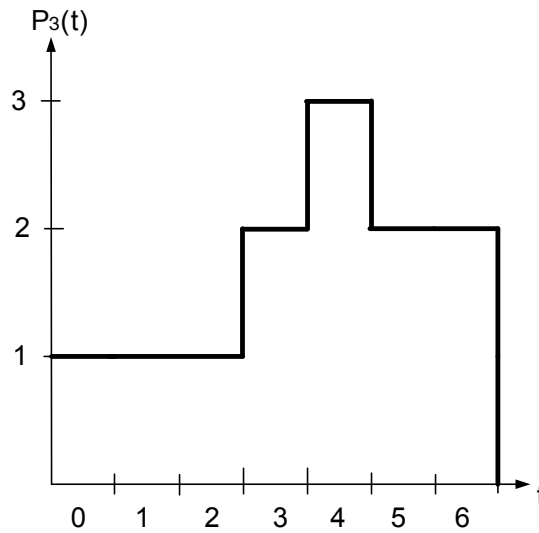


Рис. 2.15 Задана характеристика електроспоживання.

ОБ спектр заданої характеристики за формулою прямого перетворення (1.10):

$$Y'(0) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 P_3(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 0 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 0 \cdot t)) = \\ = \frac{1}{7} \cdot (1 + 1 + 1 + 2 + 3 + 2 + 2) = 1.714;$$

$$Y'(1) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 P_3(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 1 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 1 \cdot t)) = -0.877;$$

$$Y'(2) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 P_3(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 2 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 2 \cdot t)) = 0.305;$$

$$Y'(3) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 P_3(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 3 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 3 \cdot t)) = 0.188;$$

$$Y'(4) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 P_3(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 4 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 4 \cdot t)) = -0.023;$$

$$Y'(5) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 P_3(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 5 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 5 \cdot t)) = -0.286;$$

$$Y'(6) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{t=0}^6 P_3(t) \cdot (\cos(\frac{2\pi}{7} \cdot 6 \cdot t) + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{7} \cdot 6 \cdot t)) = -0.023;$$

Визначивши ОБ - спектр, знайдемо початкове значення похибки обчислень ε , яке повинно бути меншим, ніж модуль відповідної спектральної складової при $\nu > 0$:

$$\varepsilon < |Y(\nu)|.$$

Тоді можна записати:

$$\varepsilon < \begin{bmatrix} 0.877 \\ 0.305 \\ 0.188 \\ 0.023 \\ 0.286 \\ 0.023 \end{bmatrix}$$

Задамося значеннями похибки

$$\varepsilon < \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.2 \\ 0.15 \\ 0.02 \\ 0.2 \\ 0.02 \end{bmatrix}$$

Для визначення оптимальних затримок складаємо систему за формулами (2.22), яку вирішуємо відносно $\tau_{i,j}$.

Створюємо список з одного вихідного паралелепіпеда

$$S = X_0 = X = \left\{ \begin{array}{l} \tau_{2,1} \in R, 0 \leq \tau_{2,1} \leq 2 \\ \tau_{2,2} \in R, 0 \leq \tau_{2,2} \leq 2 \\ \tau_{3,1} \in R, 0 \leq \tau_{3,1} \leq 1 \\ \tau_{3,2} \in R, 0 \leq \tau_{3,2} \leq 1 \end{array} \right\}$$

Розглядаємо першу функцію системи $j=1$: $Y'(j) = Y'(1)$

$$Y'(1) = \frac{1}{7 \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{7})} \cdot \sum_{t=0}^6 \left[\begin{array}{l} f_{1,1}(t) \cdot \left(\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{1,1}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \right. \\ + f_{1,2}(t) \cdot \left(\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{1,2}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \right. \\ + f_{2,1}(t) \cdot \left(\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{2,1}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \right. \\ + f_{2,2}(t) \cdot \left(\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{2,2}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \right. \\ + f_{3,1}(t) \cdot \left(\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{3,1}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \right. \\ + f_{3,2}(t) \cdot \left(\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{3,2}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) \right) \end{array} \right]$$

Обчислюємо центр вектор з чотиривимірному паралелепіеда X_0 :

$$c = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cdot (0+2) \\ \frac{1}{2} \cdot (0+2) \\ \frac{1}{2} \cdot (0+1) \\ \frac{1}{2} \cdot (0+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}.$$

Діагональ вектор d чотиривимірному паралелепіеда X_0 має вигляд:

$$d = \begin{bmatrix} (2-0) \\ (2-0) \\ (1-0) \\ (1-0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Обчислюємо значення розглянутої функції системи в центрі чотиривимірного паралелепіпеда X_0 :

$$y = Y_1'(c) = \frac{1}{7 \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{7})} \cdot \sum_{t=0}^6 \begin{bmatrix} f_{1,1}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{1,1}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{1,2}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{1,2}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{2,1}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{2,1}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{2,2}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{2,2}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{3,1}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{3,1}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{3,2}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + \tau_{3,2}) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{1}{7 \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{7})} \cdot \sum_{t=0}^6 \begin{bmatrix} f_{1,1}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{1,2}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{2,1}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + 1) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{2,2}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + 1) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{3,1}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + 0.5) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) + \\ + f_{3,2}(t) \cdot (\cos(\frac{2 \cdot \pi}{7}(t + 0.5) - \frac{2 \cdot \pi}{7}) \end{bmatrix} = -0.185$$

вектор l :

$$l = \begin{bmatrix} 0.462 \\ 0.206 \\ 0.361 \\ 0.29 \end{bmatrix}$$

Обчислюємо значення $\psi_{G_i}(X_0)$ за формулою:

$$\begin{aligned} \psi_{G_i}(X_0) &= y - \frac{1}{2} \cdot \langle l, d \rangle = y - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^P l_i d_i = \\ &= 0.222 - \frac{1}{2} \cdot (0.462 \cdot 2 + 0.206 \cdot 2 + 0.361 \cdot 1 + 0.29 \cdot 1) = -0.727 \end{aligned}$$

Обчислюємо значення $\varphi_{G_i}(X_0)$ за формулою:

$$\begin{aligned} \varphi_{G_i}(X_0) &= y + \frac{1}{2} \cdot \langle l, d \rangle = y + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^P l_i d_i = \\ &= 0.222 + \frac{1}{2} \cdot (0.462 \cdot 2 + 0.206 \cdot 2 + 0.361 \cdot 1 + 0.29 \cdot 1) = 1.215. \end{aligned}$$

Оскільки $0.25 > -0.727$ і $1.215 > -0.25$, то в області X_0 є розв'язок.

Розв'язок $-0.627 > Y_1(c) = 0.97 > -1.137$, то центр даного чотиривимірного паралелепіпеда не є розв'язком, тому розбиваємо область X_0 на 16 паралелепіпедів і заносимо їх у список S (див. попередній приклад).

Обираємо новий X_0 зі списку S і повторюємо процедуру розрахунку.

Таким чином розв'язок з заданою точністю досягається при

$$\tau_{1,1} = 0$$

$$\tau_{1,2} = 0$$

$$\tau_{2,1} = 2$$

$$\tau_{2,2} = 0$$

$$\tau_{3,2} = 1$$

$$\tau_{3,2} = 0$$

Одержавши величини затримок, можна визначити наближену до рівномірної характеристику. Для цього необхідно першу підфункцію другої функції затримати на два такти, а першу підфункцію третьої функції на один такт. Наближена до заданої характеристика споживання зображена на рис. 2.15.

Висновки до другого розділу

1. Запропоновано спосіб порівняння характеристик електроспоживання шляхом обчислення нормованих ОБ-спектрів та отримані умови наближення характеристики електроспоживання до заданої.

2. Запропоновано спосіб приведення характеристики електроспоживання до заданої шляхом зсуву елементарних комірок, який дозволяє зменшити навантаження на дизель-генератор у випадку наближення характеристики до рівномірної або отримати вигоду у грошових витратах за рахунок використання електроенергії у час її найменшої вартості.

3. Запропоновано спосіб приведення характеристики електроспоживання до заданої шляхом зсуву елементарних підфункцій, який є більш узагальненим, та усуває необхідність представлення функції у вигляді елементарних комірок. Спосіб призводить до необхідності розв'язку системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, як недовизначеної так і перевизначеної, методом нерівномірних покриттів із заданою точністю.

4. За рахунок вирівнювання характеристики зменшено викид на 33%, а за рахунок збільшення споживання електроенергії у інтервалі дії тарифів меншої вартості досягнуто зменшення вартості спожитої електроенергії на 10 - 15% у порівнянні з характеристикою без введення затримок.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА

3.1. Навантаження „розумного будинку”

Модель сучасного будинку, так званий „розумний будинок” складається з об'єктів електротехніки. Серед цих об'єктів є як життєнеобхідні (такі як освітлення будинку - верхнє світло), так і маловажливі (такі як електрокамін). Крім цього, даний список об'єктів можна розділити на ті, що постійно використовуються й на ті, що використовуються в заданий час - як приклад можуть виступати сигналізація і електротренажери в тренажерному залі. Так само можливо групувати об'єкти за ознаками, виділяючи які, можна проводити вибір пріоритетів споживання електроенергії - наприклад у ранковий час пріоритет у споживанні електроенергії відданий тренажерному залу, ніж бару, а у вечірній і нічний час - навпаки. Також необхідно враховувати вартісний фактор, якщо є певний розподіл вартості за спожиту електроенергію на протязі доби.

Виходячи з вартісного фактора, необхідно встановлювати пріоритети для різних груп споживачів. Наприклад, напруга в розетках повинна бути завжди, також в розетках повинна забезпечуватися необхідна потужність для можливості швидкого включення будь-яких електроприладів, у той час як підігрів доріжок у денний час може бути зменшений для зменшення споживання електроенергії в денний час.

Розподіл по пріоритетах суцільно суб'єктивний. З огляду на вищесказане необхідно передбачати можливість перерозподілу пріоритетів.

Також варто враховувати перерозподіл пріоритетів залежно від часу доби. Так, наприклад, освітлення доріжок і периметра в денний час має пріоритет нижче, ніж у вечірній і нічний час.

Також необхідно враховувати можливість короткочасного вимикання або перемикання в режим з меншим електроспоживанням деяких споживачів. Наприклад, система гарячого водопостачання - електробойлер ГВС по пріоритетах

займає значиме положення, однак на функціонуванні всього будинку в цілому не позначиться короткочасне перемикання даного споживача в режим меншого нагрівання. Це можна використовувати під час включення інших високопотужних споживачів з метою запобігання перевантажень по потужності під час виходу на режим.

При проектуванні оптимального енергоспоживання варто звернути увагу на взаємозв'язок деяких окремо взятих споживачів, коли від режиму роботи одного пристрою залежить в якому режимі буде функціонувати інший. Це може бути зв'язок освітлення периметра з камерами спостереження за периметром, коли від наявності або інтенсивності освітлення залежить режим роботи камер.

Всі споживачі, обрані як приклад, зведені в Таблицю 3.1 і розподілені по групах з урахуванням особливостей їхнього функціонування.

Таблиця 3.1. Розподіл споживачів по групах

1	2	3	4	5	6 7		8
					День	Ніч	
№	Споживач	Пріоритет	Кількість режимів роботи	Можливість короткочасного вимикання	Зміна пріоритету залежно від часу доби		Взаємозв'язок між споживачами
1	• освітлення будинку (верхнє світло в кімнатах)	0	1	-			
2	• розетки для електроустаткування загальнопобутового значення	0	1	-			
3	• охоронна сигналізація будинку	1	3	-			4

Продовження таблиці 3.1.

4	• камери спостереження будинку	1	2	-			3
5	• система гарячого водопостачання - електробойлер ГВС	1	6	+			
6	• охоронна сигналізація периметра	1	3	-			7, 8
7	• освітлення периметра	2	5	-	4	2	6, 8
8	• камери спостереження периметра	2	2	-			6, 7
9	• електроогорожа	2	3	-			
10	• ліфти в будинку	2	4	-			
11	• система опалення – електробойлер	2	6	+	3	2	12, 13, 22
12	• клімат-контроль теплиці	2	5	-			11, 13, 22
13	• підігрів підлог	3	6	+	3	4	11, 12, 22
14	• клімат-контроль – кондиціонери	3	6	+			
15	• освітлення доріжок	3	5	-	4	2	
16	• електроворота огорожі	3	2	-			
17	• електроворота гаража	3	2	-			

Продовження таблиці 3.1.

18	• освітлення гаража	4	4	-			
19	• артезіанська свердловина (електронасос)	4	5	+	3	4	
20	• клімат-контроль – електрожалюзі	4	3	+			
21	• освітлення теплиці	4	4	-			
22	• підігрів доріжок	4	6	+	4	3	11,12, 13
23	• електрокамін	4	4	+			
24	• джакузі	4	4	-			
25	• насоси басейну	4	6	+			26,27
26	• підігрів басейну	4	6	+			25,27
27	• освітлення басейну	4	6	-			25,26
28	• сауна - освітлення	4	5	-			29,30
29	• сауна – електро-устаткування	4	4	-			28,30
30	• сауна – вентиляція	4	4	-			28,29
31	• тренажерний зал - освітлення	4	5	-			32
32	• тренажерний зал – електро-тренажери	4	4	+			31
33	• бар - освітлення й світломузика	4	5	-	5	4	34
34	• бар електро-устаткування	4	4	-	5	4	33

Продовження таблиці 3.1.

35	• насоси зрошення галявин	5	6	+			
36	• електро- прибиральник	5	6	+			

У Таблиці 3.2, у стовпці «пріоритет» розставлені пріоритети по убуванню. Споживач зі значенням 0 у графі «пріоритет» має найвищий пріоритет, що не допускає перемикавання даного пристрою в які-небудь режими, або відключення даного пристрою (затримка ввімкнення дорівнює 0). Значення пріоритету 5 має на увазі найменший пріоритет (затримка ввімкнення дорівнює $0 \div 5$ тактів).

3.2. Програмне забезпечення локального об'єкта типу „розумний будинок”

Робота з програмним забезпеченням починається з блоку ініціалізації (блок 1):

- вводиться загальна кількість споживачів – K і унікальні ідентифікаційні номери для кожної ВКС, які з'єднані з споживачами локального об'єкта;
- вводиться $\tau_{i\min}, \tau_{i\max}, \varepsilon$ - мінімальне та максимальне значення можливої затримки для кожного споживача та значення похибки розв'язання системи нелінійних рівнянь;
- вводиться отримана з пристрою прогнозування характеристика електроспоживання;
- вводиться задана характеристика електроспоживання;
- $i:=0, h:=0$, де i – початкове значення для лічильника кількості споживачів k – для лічильника кількості невдалих спроб отримання підтвердження працездатності ВКС;

Потім в блоках 2 - 18 за алгоритмом, наведеним в п. 2.3 знаходяться необхідні значення затримок ввімкнення:

- блоки 2-4 – обчислюються спектральні складові ОБ перетворення;

- блок 5 – створюється список $S = X_0 = X = \{x \in R, a_i \leq x \leq b_i, i = 1, \dots, P\}$ можливих розв'язків з області початкового паралелепіпеда;
- блок 6 – розглядається перша функція системи $j=1$;
- блок 7 - обчислюються значення: центр-вектора $c: c_i = \frac{1}{2} \cdot (a_i + b_i), i = 1, \dots, P$, діагональ-вектора $d: d_i = b_i - a_i, i = 1, \dots, P$ і вектора l :

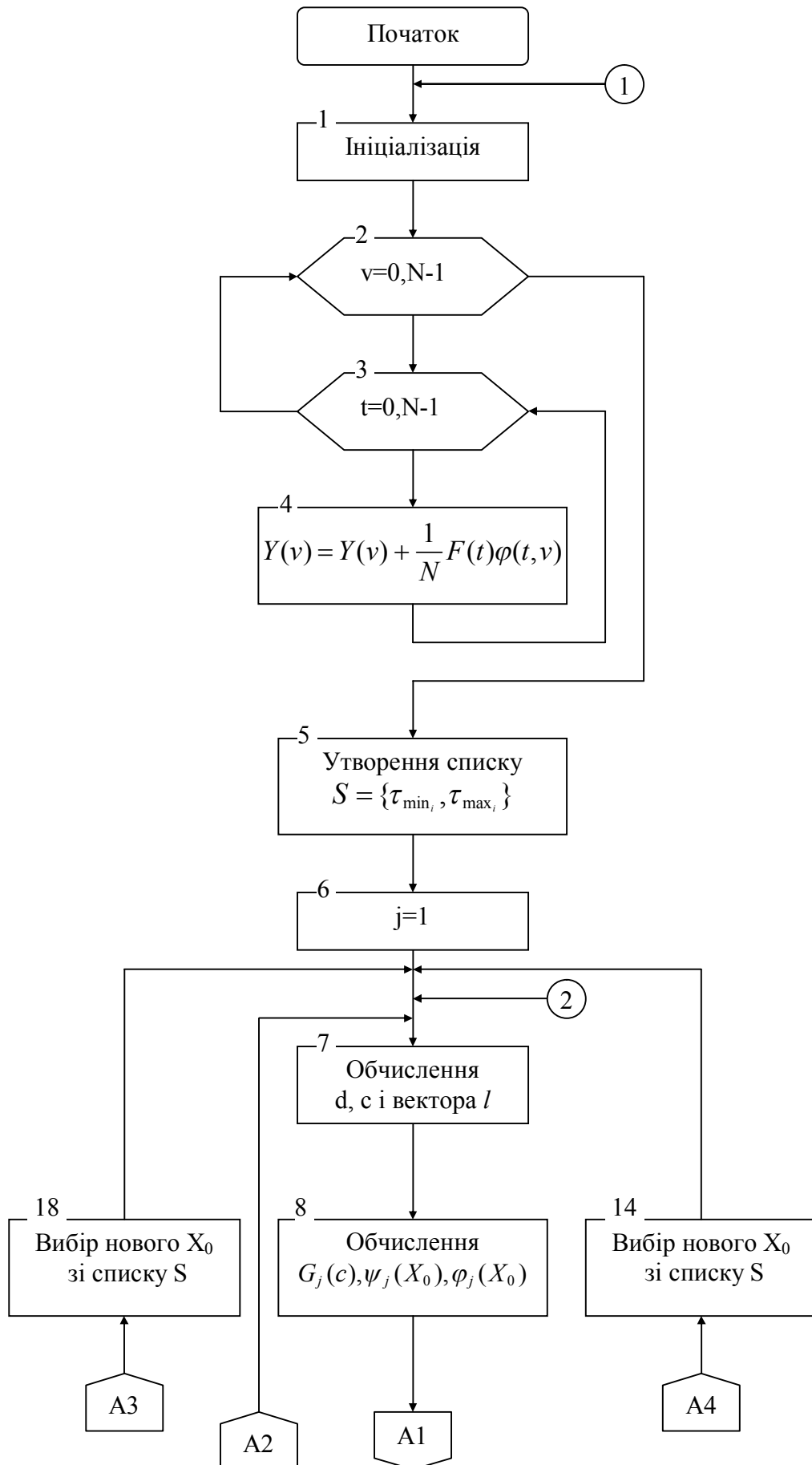
$$l_i = \max_{x \in X} \left| \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \right|, i = 1, \dots, P;$$

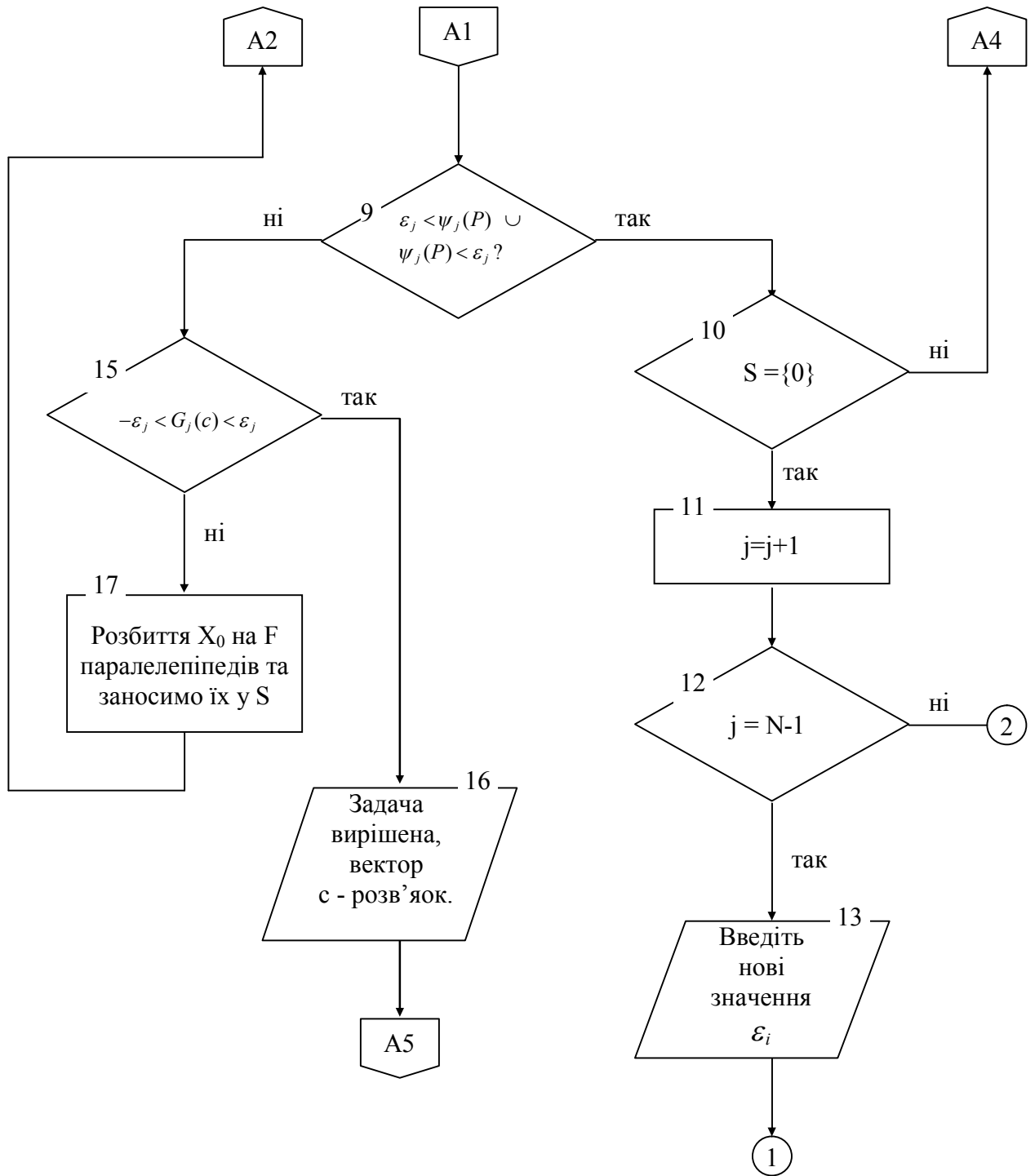
- блок 8 - обчислюються значення розглянутої функції системи в центрі P - вимірного паралелепіпеда X_0 , також обчислюється значення $\psi_{G_j}(X_0)$ за формулою: $\psi_{G_j}(X_0) = y - \frac{1}{2} \cdot \langle l, d \rangle = y - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^P l_i \cdot d_i$, і значення $\varphi_{G_j}(X_0)$ за формулою $\varphi_{G_j}(X_0) = y + \frac{1}{2} \cdot \langle l, d \rangle = y + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^P l_i \cdot d_i$;
- блок 9 - якщо $\varepsilon_j < \psi_{G_j}(X_0)$ чи $\varphi_{G_j}(X_0) < \varepsilon_j$ то перевіряється чи порожній список S , якщо ні - то перевіряється виконання умови блоку 15 - $-\varepsilon_j < G_j(c) < \varepsilon_j$;
- блок 10 – перевіряється на порожність списку S ;
- блок 11 - розглядається наступна функція системи нелінійних рівнянь;
- блок 12 – якщо $j = N - 1$, то розв'язку з даною точністю не існує;
- блок 13 - збільшується значення похибки ε_j ;
- блок 14 – вибирається новий X_0 зі списку S ;
- блок 15 - якщо умова виконується то знайдено розв'язок задачі, якщо ні - тоді в області X_0 є розв'язок; розбивається область на F паралелепіпедів, які заносяться у список S ;
- блок 16 – розв'язок задачі знайдений;

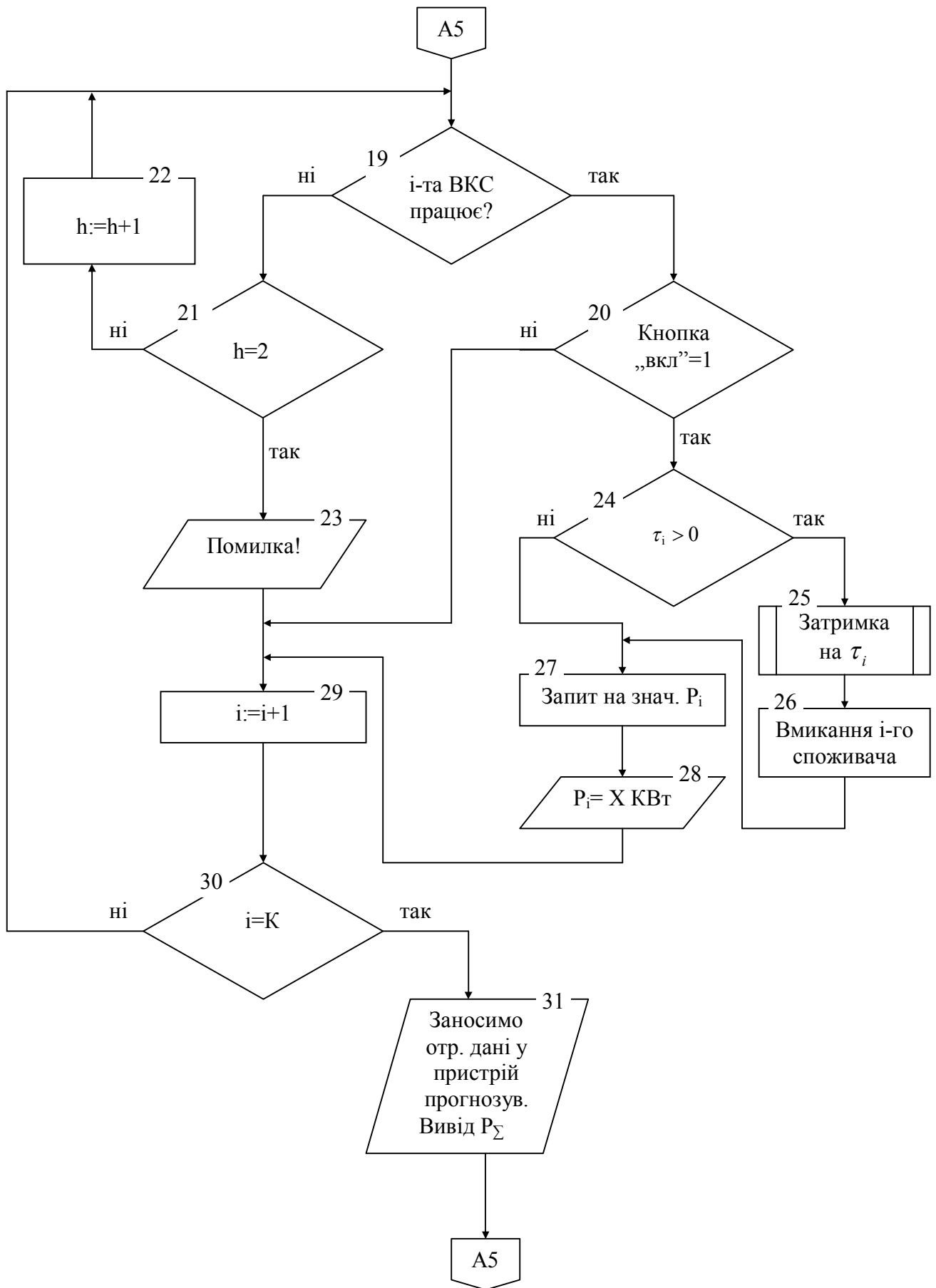
- блоки 17 – 18 – розбиття S на F паралелепіпедів і вибір нового X_0 з цього списку.

Далі проводиться реалізація отримання заданої характеристики електроспоживання шляхом введення знайдених затримок, а також поповнюється база пристрою прогнозування і виводиться графік отриманої характеристики (наближеної до заданої):

- блок 19 – перевіряється на працездатність i -та ВКС;
- блок 20 – перевіряється чи натиснута кнопка „вкл.” i -го ВКС, тобто якщо „вкл” =1 ПК відповідає i -й ВКС про значення величини затримки τ_i ;
- блоки 21-22 – якщо i -та ВКС не дає відповідь, то повтор дій блоку 19 ще два рази ($h=2$);
- блок 23 – виводиться на екран інформація про те, що i -та ВКС не працює і здійснюється перехід до опитування наступної ВКС (блок 29);
- блоки 24-26 – якщо є затримка включення $\tau_i > 0$, то мікроконтролером ВКС включається таймер, реалізується затримка на величину рівну τ_i (блок 25) і вже потім підключається навантаження до електромережі;
- блок 27 – ПК посилає до ВКС запит на значення потужності споживання;
- блок 28 – ВКС персилає ПК значення потужності споживання навантаження;
- блок 29 – здійснюється перехід до іншого споживача;
- блок 30 – якщо $i=K$ – то здійснено опитування всіх K ВКС;
- блок 31 – виводиться на екран сумарна потужність споживання локального об'єкту для даного кола опитування. Потім здійснюється перехід на початок опитування навантажень (блок 19) і циклічно повторюється.







Висновки до третього розділу

1. Розглянуто навантаження „розумного будинку”, серед яких є як життєнеобхідні (такі як освітлення будинку - верхнє світло), так і маловажливі (такі як електрокамін). Встановлено пріоритети для різних груп споживачів.
2. При розробці алгоритму управління енергоспоживанням локального об'єкту треба звертати увагу на взаємозв'язок деяких окремо взятих споживачів, коли від режиму роботи одного пристрою залежить в якому режимі буде функціонувати інший.
3. Розроблено алгоритм рішення задачі наближення характеристики електроспоживання до заданої. Дана задача вирішується за умови, що вже є, отримана з пристрою прогнозування, початкова (без введення затримок ввімкнення) характеристика електроспоживання.

РОЗДІЛ 4

ПРИСТРІЙ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА

4.1. Розробка схеми пристрою управління

4.1.1. Структурна схема централізованого керування

У даній роботі вирішена задача управління електроспоживанням локального об'єкта. Одне з рішень даної задачі ґрунтується на зміні режимів і часових характеристик роботи окремих споживачів за допомогою перетворювачів і комутаторів. За основу прийнято централізовану систему керування (рис. 4.1). В системі присутній центральний керуючий пристрій, в якості якого використовується персональний комп'ютер - ПК, що регулює роботу кожного зі споживачів шляхом вироблення сигналів керування вимірювально-комутуючій системі (ВКС) кожного навантаження. В якості споживачів можуть бути будь-які пристрої, що живляться від електричної мережі 220В, 50Гц.

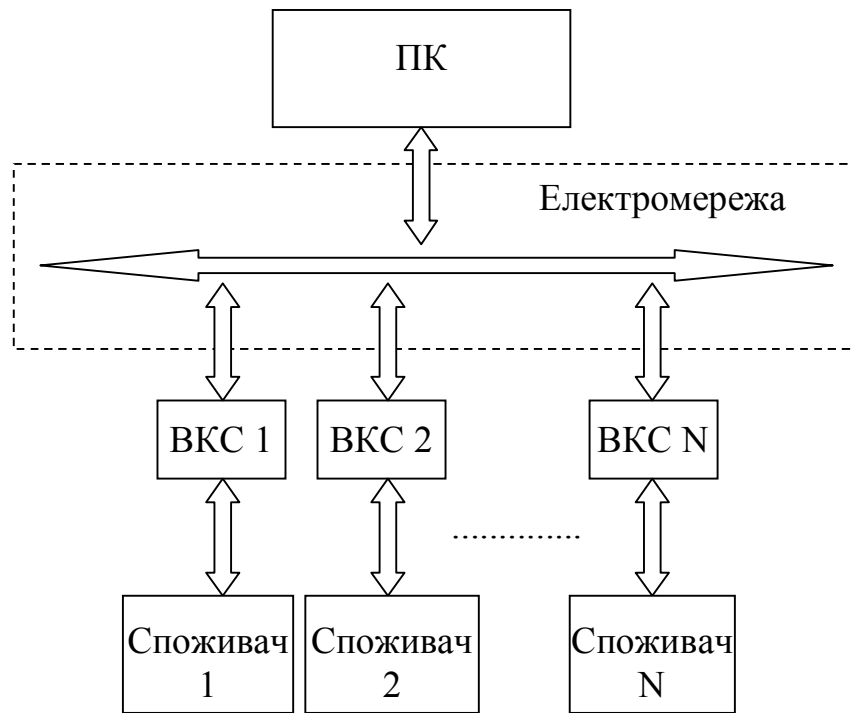


Рис.4.1. Структурна схема централізованої системи управління електроспоживанням ЛО

4.1.2. Розробка схеми з'єднання вимірювально-комутуючої системи з персональним комп'ютером

При централізованому керуванні ВКС обмінюються інформацією тільки з центральним керуючим пристроєм і не мають ніякої відомості про наявність чи відсутність інших ВКС у системі.

Будь-яка розподілена система управління повинна мати в своєму складі комунікаційну мережу, керовані об'єкти та систему керування.

Комунікаційна мережа ЛО являє собою інфраструктуру для з'єднання пристроїв, датчиків, контролерів і керуючих панелей усередині цього ЛО.

Система керування покликана безперервно направляти та координувати роботу керованих об'єктів з метою забезпечити:

- своєчасну та оптимальну роботу споживачів електричної енергії;
- ефективне використання комунікаційної мережі;

— оперативний збір інформації від датчиків та об'єктів керування, яка буде врахована у подальшій роботі.

В якості середовища передачі даних доцільним є використання силової електропроводки. Це дозволяє уникнути прокладання нових проводів. Для підключення до мережі досить включити пристрій у розетку. Крім того, заощаджуються гроші на установку додаткового устаткування. Така мережа дуже гнучка, легко модифікується і розширюється при введенні нових пристроїв.

Отже структурна схема з'єднання буде мати вигляд, як показано на рис. 3.2.

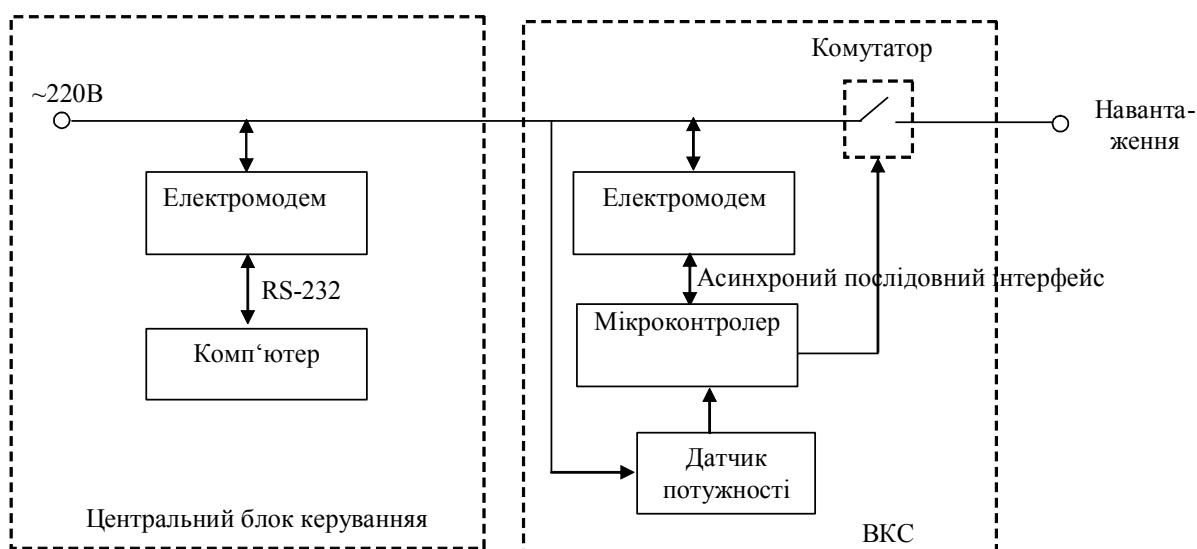


Рис.4.2. Структурна схема з'єднання ПК з ВКС

Комп'ютер з'єднаний з електромодемом через інтерфейс RS-232, а мікроконтролер, який входить до ВКС, з'єднаний з модемом через послідовний асинхронний інтерфейс (UART). Комутатор виконує комутацію електроенергії на навантаження. В якості комутатора використовується реле. Мікроконтролер оброблює інформацію, що поступає від ПК та схеми вимірювання параметрів споживача електроенергії (стум і напруга навантаження та потужність споживання), а також керує комутатором.

4.1.3. Розробка вимірювально-комутуючої системи

Вимірювально-комутуюча система (ВКС) має в своєму складі електромодем, комутатор, мікроконтролер, датчик потужності (див. рис. 4.2).

Блок-схема електромодему наведена на рис. 4.3. Він складається з трансивера, підсилювача та ізолюючого модуля.

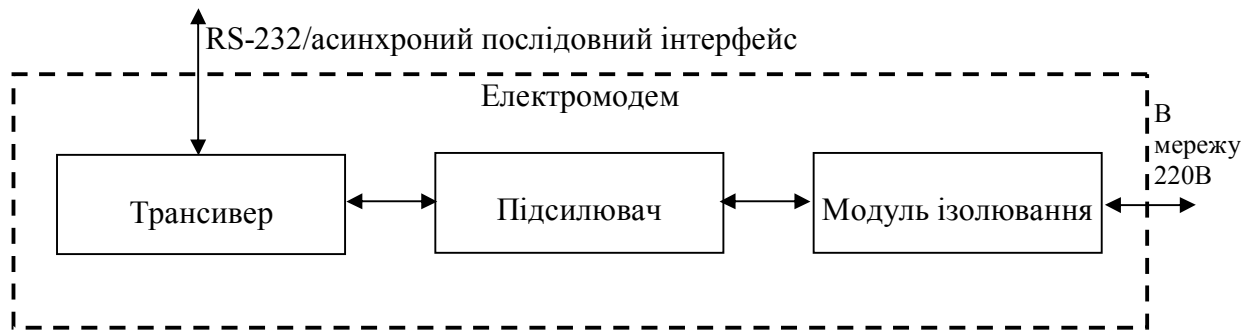


Рис. 4.3. Структурна схема електромодему

Трансивер модулює сигнал та реалізується на базі спеціалізованих мікросхем, що виробляються рядом фірм National Semiconductor's, Philips, ST Microelectronics.

Ізолюючий модуль в загальному випадку виконує дві функції: ізолює апаратуру від напруги живлення та виділяє інформаційний сигнал, який передається по силовій електромережі від силової напруги.

Підсилювач посилює сигнал, отриманий від трансивера та передає в електромережу. Електромодем ST7535HS1 [28] являє собою - напівдуплексний асинхронний FSK (frequency-shift keying – частотна маніпуляція) модем, розроблений для комунікацій автоматизації будинку і призначений для потреб домашньої електроніки, що дотримує стандарт EN 50065-1 CENELEC [29].

Основна напруга живлення 10В та 5В для цифрового мікропроцесорного інтерфейсу.

Він з'єднується з електромережею через зовнішній підсилювач і трансформатор.

Швидкість передачі даних 1200 біт/с і несуча частота 132.45 кГц. На рис. 3.4 показана блок-схема модему ST7537, де:

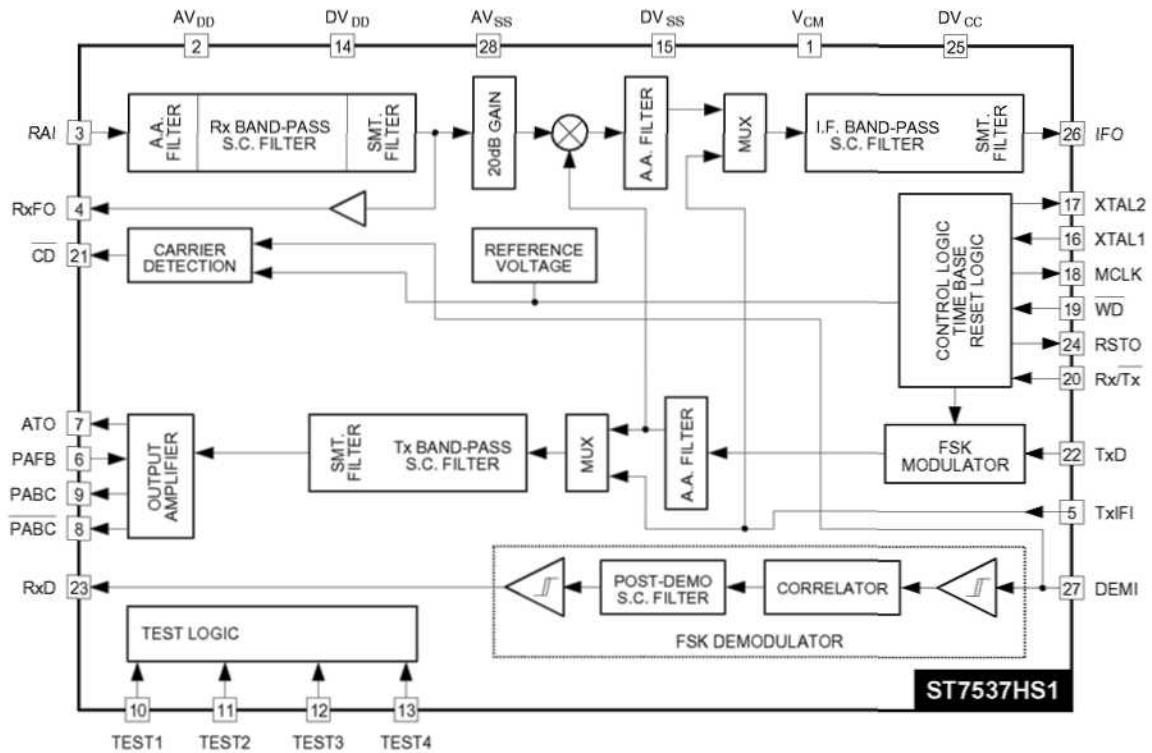


Рис. 4.4. Структурна схема модему

Band-pass filter – полосовий фільтр;

20 dB GAIN – підсилювач на 20 дБ;

Reference voltage – опорна напруга;

MUX – мультиплексор;

FSK modulator – модулятор з частотною маніпуляцією;

Carrier detection – виявлення несучої;

Output amplifier – вихідний підсилювач;

Test logic – блок тестування модему.

У таблиці 4.1 приведені призначення виводів вибраного модему.

Таблиця 4.1. Призначення виводів мікросхеми ST7537

Назва виводу	Номер виводу	Тип виводу	Опис
V _{CM}	1	аналоговий	Напруга загального режиму
A _V DD	2	живлення	Аналогова напруга живлення 10В±5%
RAI	3	аналоговий	Аналоговий вхід прийому
RxF0	4	аналоговий	Вихід фільтра прийому
TxIFI	5	аналоговий	Тестовий вхід фільтра прийому і проміжної частоти (режим TEST 3)
PAFB	6	аналоговий	Вхід зворотного зв'язку підсилювача потужності
ATO	7	аналоговий	Аналоговий вхід прийому
$\overline{\text{PABC}}$	8	цифровий (10В)	Інверсний вхід керування струму зсуву підсилювача потужності
PABC	9	цифровий (10В)	Вхід керування струму зсуву підсилювача потужності
TEST1	10	цифровий	Керуючий вхід режиму автоматичного переключення Tx у Rx
TEST2	11	цифровий	Керуючий вхід автоматичного переключення часу і зменшення часу watch-dog
TEST3	12	цифровий	Вхід вибору TxIFI
TEST4	13	цифровий	Вхід негайного скидання
DV _{DD}	14	живлення	Цифрова напруга живлення 10В±5%
DV _{SS}	15	живлення	Цифрова земля 0В
XTAL1	16	цифровий (10В)	Вхід кварцового резонатора
XTAL2	17	цифровий (10В)	Вихід кварцового резонатора
MCLK	18	цифровий	Вихід генератора головних тактових імпульсів
$\overline{\text{WD}}$	19	цифровий	Вхід watch-dog
Rx / $\overline{\text{Tx}}$	20	цифровий	Вхід вибору режиму Rx чи Tx
$\overline{\text{CD}}$	21	цифровий	Вихід детектора несучої
TxD	22	цифровий	Вхід переданих даних
RxD	23	цифровий	Вихід прийнятих даних
RSTO	24	цифровий	Вихід скидання
DV _{CC}	25	живлення	Живлення цифрових буферів 5В±5%
IFO	26	аналоговий	Вихід проміжної частоти фільтра
DEMI	27	аналоговий	Вхід демодулятора
A _V SS	28	живлення	Аналогова земля 0В

Режим передачі встановлюється, коли $\text{RX}/\overline{\text{TX}}=0$. Якщо $\text{RX}/\overline{\text{TX}}$ утримується в стані логічного „0” довше, чим 1 с, то пристрій автоматично переключається в режим прийому. Наступний перехід у режим передачі вимагає установки в стан логічної „1” $\text{RX}/\overline{\text{TX}}$ на тривалість у 2 мкс перед установкою Rx/Tx в стан логічного „0”.

Передані дані надходять на FSK модулятор зі швидкістю 1200 біт/с.

Основні передавальні частоти:

- $f(TxD = 0) = 133.05$ кГц
- $f(TxD = 1) = 131.85$ кГц

Ці частоти синтезовані зовнішнім кварцовим резонатором з частотою 11.0592 МГц.

Модульований сигнал, що виходить з FSK модулятора, фільтрується смуговим фільтром. Він виконує функцію обмежника вихідного спектра і зменшення рівня гармонійних складових.

Фінальна стадія проходження TxD сигналу містить операційний підсилювач, якому необхідний сигнал зворотного зв'язку від підсилювача потужності.

У режимі передачі на виводі прийнятих даних Tx встановлюється в ста логічної одиниці „1”.

Режим прийому. Приймна секція активізується при $RX/\overline{TX} = 1$.

Сигнал прийнятих даних надходить на вивід RAI, потім фільтрується смуговим фільтром; центральна частота дорівнює несучій частоті, ширина смуги близько 12 кГц.

На виході RxD фільтра сигнал підсилюється на 20 dB підсилювальним каскадом, що забезпечує симетричне обмеження від високих напруг.

Результуючий сигнал перетворюється, зі зниженням частоти за допомогою змішувача, що приймає місцевий гетеродин приймача, синтезованого блоком FSK модулятора.

Далі сигнал проходить смуговий фільтр проміжної частоти (IF bandpass), центральна частота якого 5.4 кГц. Задача фільтра - приглушення шумів. Після цього цей сигнал попадає на FSK демодулятора.

Вивід виходу фільтра проміжної частоти (IFO) і вивід входу FSK демодулятора з'єднуються зовнішнім конденсатором (100нФ±10%, 10В). Він необхідний для запобігання проходу постійної складової на шляху проходження RxD сигналу.

На виході RxD приймається демодульований сигнал, коли сигнал детекторної несучої $\overline{CD}=0$, і встановлюється високий рівень, коли $\overline{CD}=1$.

Однак вихід RxD може приймати демодульований сигнал незалежно від \overline{CD} (0 чи 1), якщо $RX/\overline{TX}=1$ і $TxD=0$.

На рис. 4.5 показані часові діаграми роботи модему.

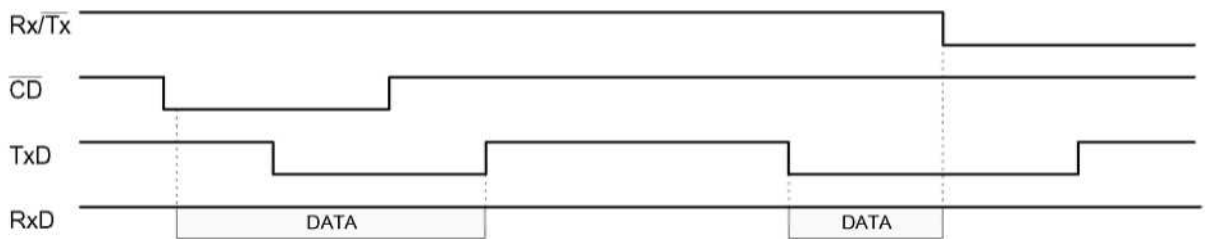


Рис.4.5.Часові діаграми роботи модему

Секція часового масштабу (Control logic time base) приймає всі внутрішні частоти від кварцового резонатора (11.0592 МГц). Кварцовий резонатор підключається до виводів XTAL1 і XTAL2. Для правильної роботи необхідно підключити два зовнішніх конденсатори (22пФ±10%, 10В).

Детектування несучої. Вихід детектування несучої \overline{CD} встановлюється в стан логічного „0”, коли вхідна амплітуда сигналу на виводі RAI стає більше, чим V_{CD} тривалістю не меншою чим T_{CD} (нормально 6 мс). Коли вхідний сигнал зникає чи стає менше V_{CD} , то \overline{CD} утримується ще на протязі T_{CD} , перед тим як перейде в «1». V_{CD} - гранична напруга детектування несучої, яка встановлюється в середині пристрою для детектування 5мВ (середньоквадратичне значення, при $f = 132.45$ кГц). На рис. 4.6 приведені часові діаграми роботи блоку детектування несучої.

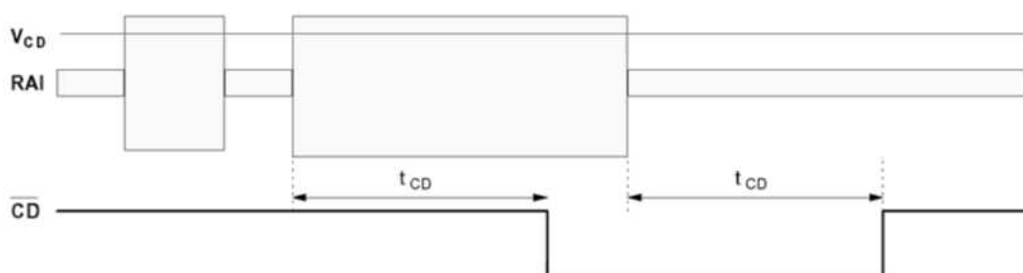


Рис 4.6. Часові діаграми роботи блоку детектування несучої

В якості датчика потужності використовується інтегральна мікросхема ADE7753 [30] з необхідними навісними елементами, підключеними до неї, як показано на рис. 4.7.

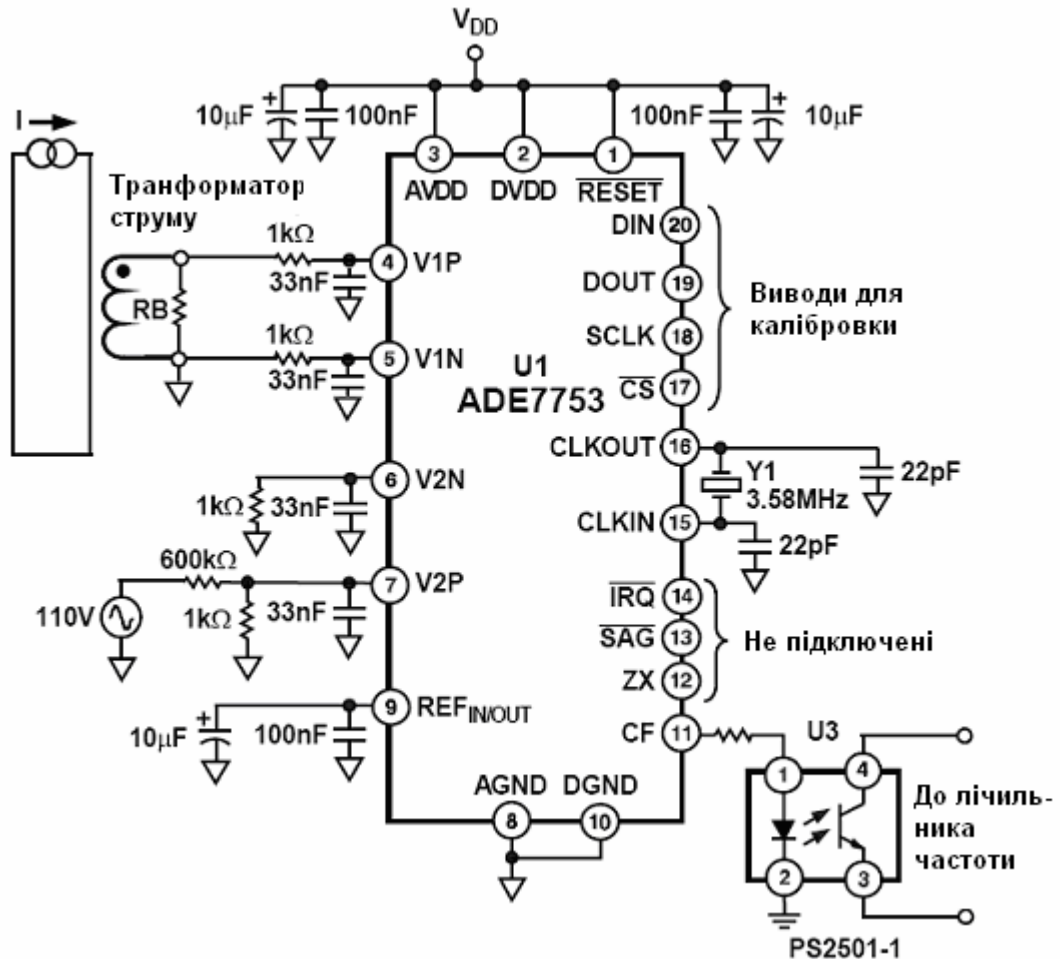


Рис. 4.7. Схема електрична принципова датчика потужності

До складу датчика потужності входять:

- датчики напруги "Дат. U" і струму "Дат. I", що вимірюють напругу мережі й струм навантаження;
- вимірювальна мікросхема, у якій виконується посилення й аналого-цифрове перетворення сигналів датчиків, їхнє перемножування й фільтрація (у цифровому вигляді). Отриманий сигнал, пропорційний вимірюваній

потужності, перетворюється у вихідний сигнал, зручний для використання мікроконтроллером;

- навісні елементи (резистори, конденсатори, кварц), необхідні для правильного функціонування вимірювальної мікросхеми.

Для комутації навантаження до мережі в пристрої інтелектуальний роз'єднувач будемо застосовувати реле. Для забезпечення комутації на навантаженні струмів до 10А вибираємо реле RM82P фірми Relpol.

Технічні характеристики даного реле наведені в таблиці 4.2, реле зі схемою керування показане на рис. 4.8:

Таблиця 4.2. Параметри реле Relpol RM82P

Параметри реле Relpol RM82P	
Максимальний струм комутації на навантаженні, А	16
Максимальна напруга комутації, В	250
Номінальна напруга живлення, В	5
Мінімальний перемикаючий струм, мА	10
Номінальна споживана потужність, Ват	0,5
Опір обмотки, Ом	49
Час спрацьовування, мс	7
Час відпускання, мс	3

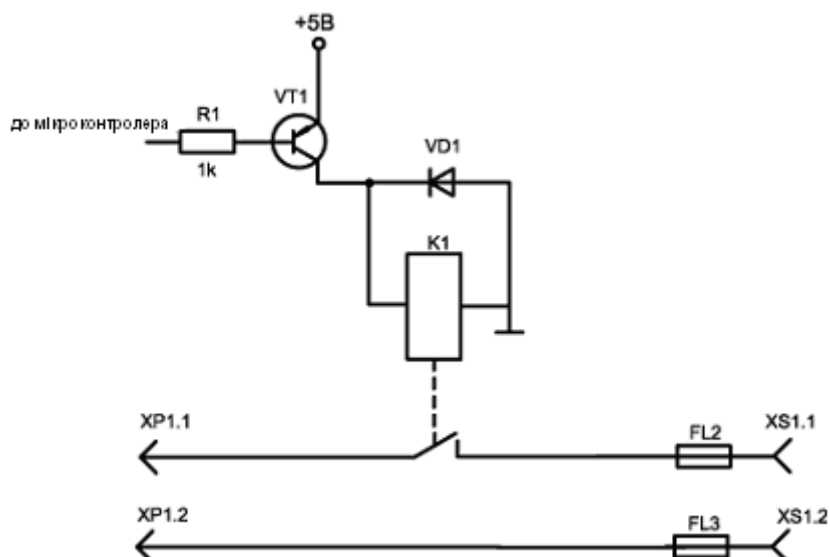


Рис.4.8. Реле зі схемою керування

Отже як видно з таблиці 4.2 дане реле забезпечує можливість комутувати струм до 16А, що більше ніж задане значення 10А.

В якості мікроконтролера візьмемо АТmega8 фірми Atmel з використанням внутрішнього ППЗП, що має високу швидкодію та достатній об'єм пам'яті програм і даних.

4.2. Протокол передачі даних по електромережі

Якщо кілька пристроїв комутуються між собою через загальну лінію зв'язку (шину), то повинен бути визначений ясний і зрозумілий протокол доступу до неї.

Однією з задач даної розробки є вибір протоколу, який найбільш задовольняє розроблюваній схемі ВКС та централізованої системи керування (див. п. 4.1).

У випадку централізованого контролю MASTER-SLAVE за доступом до шини виділяється вузол із правами Майстра. Він призначає й відслідковує порядок і час доступу до шини для всіх інших учасників. Якщо раптом Майстер "зламався", то й цикли обміну по шині зупиняються - це є недоліком цього методу, а достоїнством його є те, що не виникає конфліктів (колізій) при передачі даних.

Право ініціювати цикли читання/запису на шині має тільки MASTER-вузол. Він адресує кожного пасивного учасника (SLAVE node), забезпечує їх даними й запитує в них дані. Для того щоб збільшити пропускну здатність шини, команди протоколу повинні бути як можна простіше. У рамках протоколу вирішуються такі завдання, як захист даних, виявлення помилок при передачі, відновлення даних. На швидкість й обсяг переданої інформації природно впливає середовище передачі.

Для реалізації можливості передачі даних по силовій електропроводці вибираємо протокол передачі даних EIB [31] тому, що він задовольняє таким, необхідним для нашого завдання, критеріям:

- обсяг переданих корисних даних;
- час передачі фіксованого обсягу даних;
- припустиме число вузлів на шині;
- заводо захищеність;

EIB (European Installation Bus). Система EIB однаково ефективна для об'єктів всіякого призначення. В даному випадку один двожилий кабель - шина EIB - поєднує всі електричні пристрої ЛО. Крім того система EIB має виняткову гнучкість. Система EIB дозволяє управляти споживанням ЛО централізовано - за допомогою диспетчерського пульта або комп'ютера.

Стандарт передачі даних по силовій лінії в EIB одержав назву PL110.

Топологія лінії зв'язку PL, визначається розведенням силової лінії. Силова лінія повинна, у першу чергу, відповідати національним стандартам. Мережа може бути 2-х або 3-х фазною, напруга між фазою й нейтраллю - 230 вольт.

Основні характеристики PL110 зведені в таблицю:

Таблиця 4.3. Основні характеристики PL110

Характеристика	Значення
Середовище передачі даних	силова проводка
Топологія	зірка, дерево, комб.
Швидкість передачі	1200 біт/с
Частота в мережі	50 Гц
Передача даних	асинхронна
Синхронізація	за основною частотою
Тип модуляції	частотна маніпуляція
Зв'язок	напівдуплексний
Стандарт	EN 50065-1:1991
Клас пристрою по стандарту	116

У кожного компонента системи є *фізична* адреса. Два компоненти не можуть мати однакової фізичної адреси. Фізична адреса складається із Лінії й Номеру пристрою, що однозначно визначає унікальне місце розташування компонента в системі, зберігається в постійному запам'ятовуючому пристрої компонента й при необхідності може бути змінена.

Компоненти обмінюються повідомленнями (*телеграмами*), що складаються з пакетів даних, кожен пакет повинен бути підтверджений. Протокол EIB допускає пакети даних змінної довжини. Один пакет (або телеграма) може містити 256 байт корисної інформації. Нижче наведена основна структура телеграми:

X	X	..	X	EOF	X	EOF
\--- Пакет ---/				\- Підтвердження -/		
\----- Телеграма -----/						

Пакет складається з полів:

Управл.	Адреса джерела	Адреса призначення	Довжина	Повідомлення	Check byte
\----- Пакет -----/					

Наприклад, пакет який передається від ЛО №2 і ВКС №3 до ПК та містить повідомлення „натиснута кнопка вкл.”, показано на рис. 4.9:

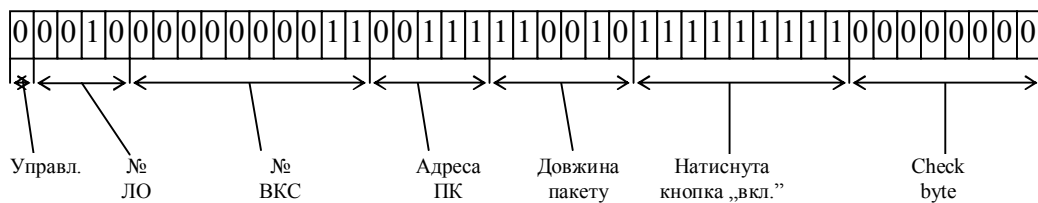


Рис. 4.9. Вигляд пакету даних

В розробленій системі керування ЛО існують наступні повідомлення:

1. Від ВКС до ПК:

- „натиснута кнопка вкл.”;
- „значення потужності споживання навантаження”;
- байт „стан ВКС”;

2. Від ПК до ВКС:

- „запит на стан кнопки вкл.”;
- „Значення τ_i ”;
- „Запит на значення потужності споживання”
- „Запит на стан ВКС”.

Схему обігу пакетів даних в ЛО показано на рис. 4.10.

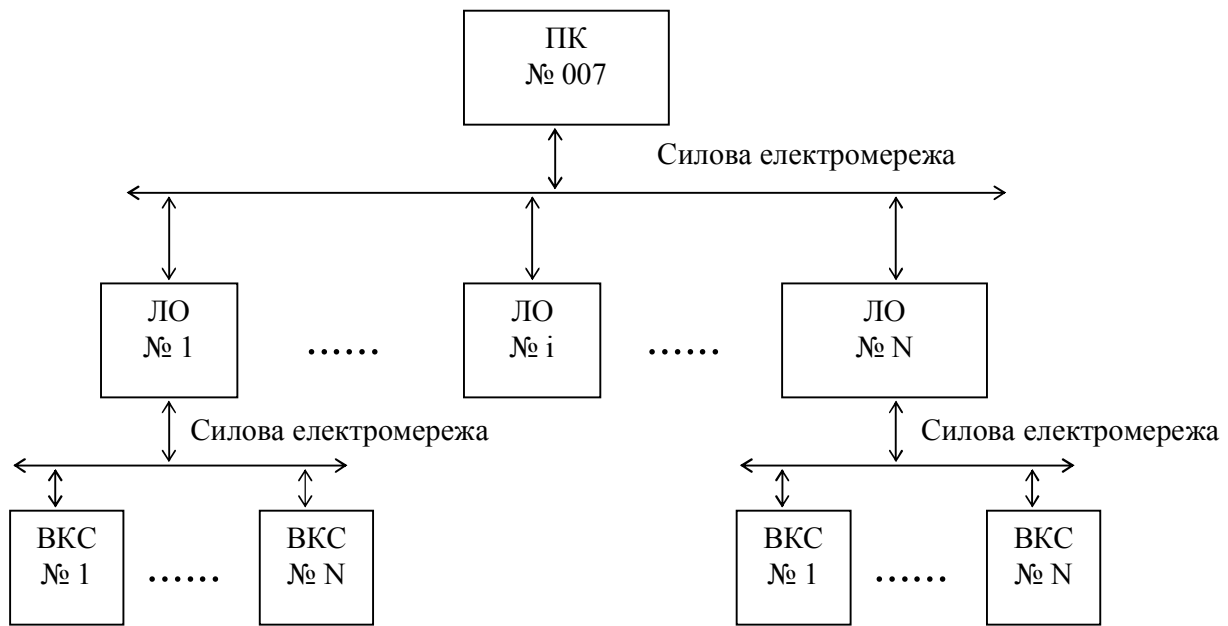


Рис. 4.10. Схема обігу пакетів даних

Таким чином протокол ЕІВ задовольняє розробленим вимогам і його доволі легко реалізувати.

4.3. Експериментальна установка

4.3.1. Склад та технічні характеристики експериментального локального об'єкта

Структурна схема експериментального локального об'єкта наведена на рис. 4.11 і має такий склад:

- фото батареї потужністю - 2,1 кВА;
- накопичувальні акумуляторні батареї на номінальну постійну напругу 110 В та ємністю накопичувачів 100 А*год;
- інвертор з такими параметрами вихідної напруги: 220 В+10%, -15% синусоїдальна 50 Гц $\pm 1\%$;
- персональний комп'ютер з вбудованим електромодемом для передачі сигналів керування по електромережі;
- вимірювально-комутуючої системи (ВКС) для кожного споживача.

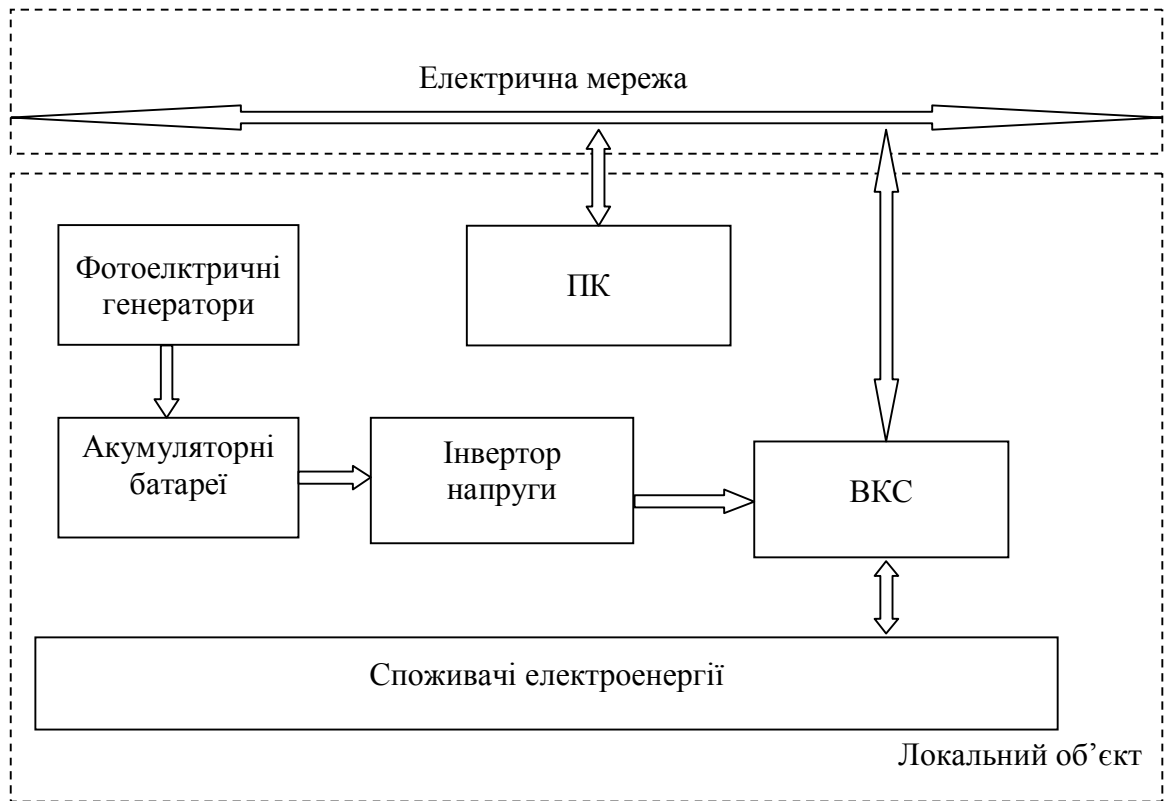


Рис 4.11 Структурна схема експериментального локального об'єкту

Зовнішній вигляд системи керування локального об'єкту в учбовій лабораторії НТУУ „КПІ” наведено на рис. 4.12, а розміщення сонячних панелей у лабораторії - на рис. 4.13.

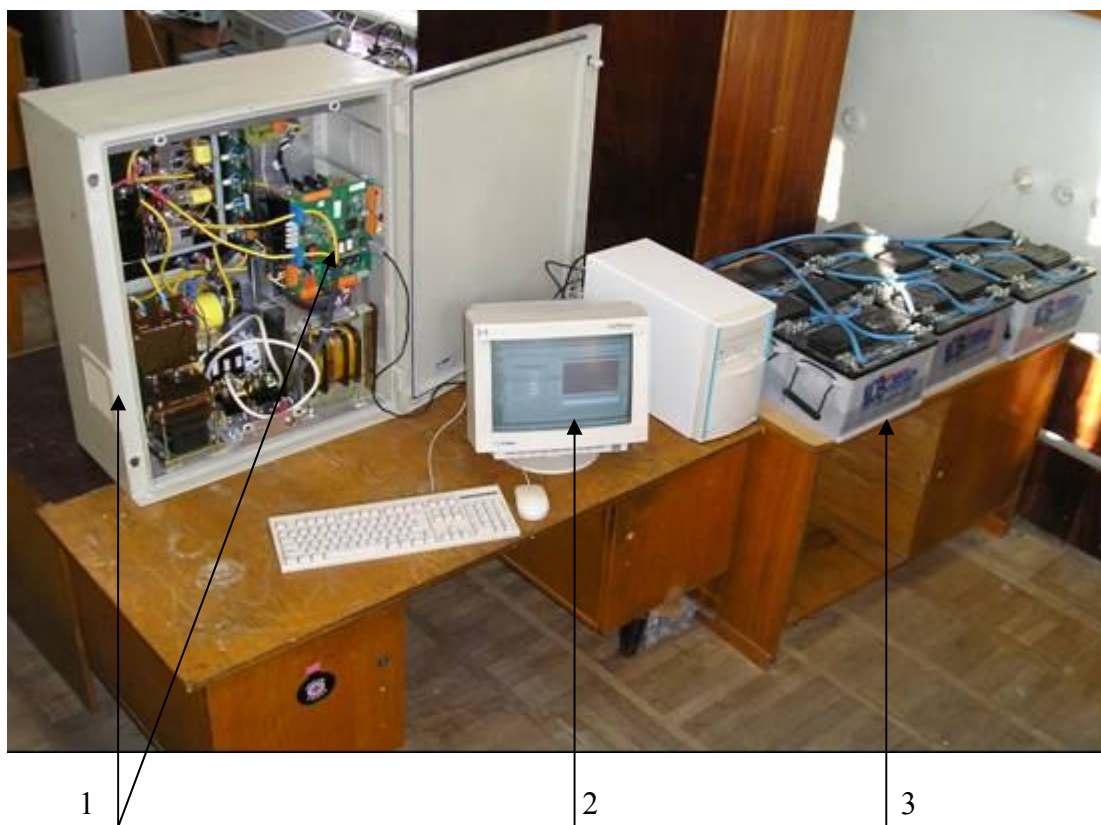


Рис. 4.12. Система керування локальним об'єктом:

1 – інвертор наруги з мікропроцесорною системою керування; 2 – ПК з вбудованим електромодемом для передачі та прийому даних по електромережі;
3 – акумуляторні батареї.



Рис. 4.13. Сонячні панелі

Експериментальна установка працює наступним чином: персональний комп'ютер циклічно опитує усі ВКС. Якщо з ВКС приходить інформація про те, що натиснута кнопка „вкл.” то ПК передає даному ВКС розраховане раніше значення величини затримки ввімкнення τ_i . У відповідь на це ВКС відраховує час τ_i і підключає навантаження до мережі. Оскільки для деяких навантажень є можливість вибору джерела живлення (альтернативне джерело або стаціонарна електромережа) то разом з величиною τ_i передається і тип джерела, до якого треба підключити споживача. Також ПК зчитує з датчиків потужності ВКС значення споживчої потужності, аналізує їх та заносить ці значення в пристрій прогнозування і виводить вигляд характеристики споживання на екран монітора.

ВКС отримавши інформацію з мережі від центрального блока керування, перевіряє належність інформації даному шляхом порівняння адрес. Якщо інформація призначена саме цьому пристрою, вимірювально-комутуюча система діє у відповідності з отриманими сигналами керування.

4.3.2. Система керування інвертором як складова системи керування електроспоживанням локального об'єкта

До автономного інвертора, який призначений для роботи у системі електроживлення на основі фото батарей, ставляться наступні загальні вимоги:

- 1) високий ККД;
- 2) можливість синхронізації із зовнішньою мережею (промисловою мережею електроживлення або іншим інвертором).

У даний час основним засобом регулювання вихідних параметрів інвертора є широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). За формою огинаючої виділяють прямокутну та синусоїдальну ШІМ. В даній системі обрано синусоїдальну ШІМ, оскільки це дозволило зменшити масогабаритні показники вихідного фільтру інвертора за рахунок меншого вмісту важкозгладжуваних низькочастотних гармонік.

Структурна схема інвертора наведена на рис. 4.14. Вона містить наступні складові елементи:

- 1) широтно-імпульсний перетворювач (ШП) підвищуючого типу із стабілізацією вихідної напруги;
- 2) силовий міст;
- 3) підвищуючий трансформатор;
- 4) вихідний фільтр;
- 5) система керування затворами транзисторів силового моста;
- 6) мікропроцесорна система керування інвертором;
- 7) датчики напруг та струмів у ланках схеми.

Напруга від масиву акумуляторних батарей $80\text{ В} \pm 10\%$ потрапляє на стабілізуючий ШП. Стабілізуючий ШП виконує наступні задачі:

- 1) стабілізація вихідної напруги на рівні 100 В ;
- 2) однополярна широтно-імпульсна модуляція вихідної напруги за синусоїдальним законом на кожному півперіоді вихідної напруги інвертора; несуча частота модуляції – 20 кГц .

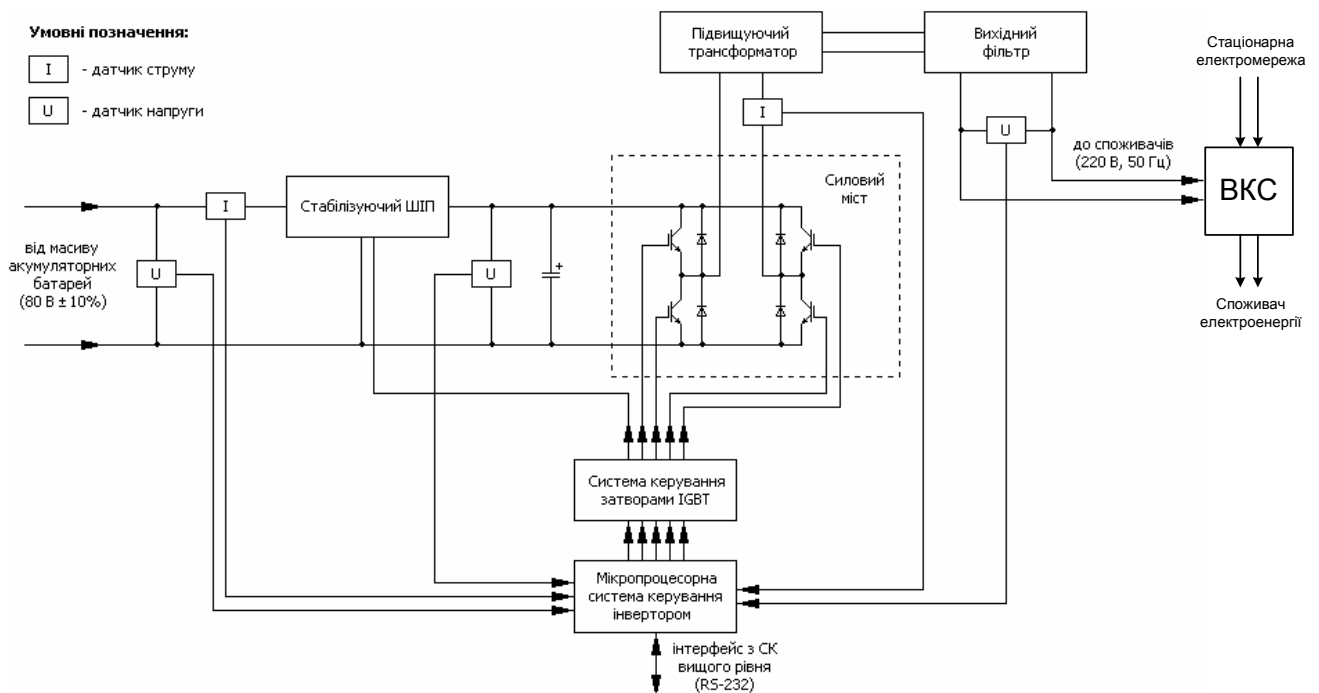


Рис. 4.14. Структурна схема інвертора з ВКС

Модульована напруга з стабілізуючого ШПП потрапляє на силовий міст, де відбувається діагональна комутація із частотою 50 Гц. Далі вже змінна напруга підвищується до необхідного рівня імпульсним трансформатором, позбавляється високочастотних гармонічних складових вихідним фільтром та подається до споживачів. У якості комутуючих елементів схеми застосовуються сучасні біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT). Особливістю даної схеми є попередня модуляція напруги за синусоїдальним законом.

МПСК автономного інвертора виконує наступні функції:

1) керування затвором IGBT-транзистора у стабілізуючому ШПП (стабілізація напруги з масиву акумуляторних батарей на фіксованому рівні незалежно від стану масиву; модуляція отриманої напруги за синусоїдальним законом із несучою частотою 20 кГц) на основі даних про вихідну напругу масиву та струм на вході інвертора;

2) керування затворами IGBT-транзисторів у силовому мості (діагональна комутація із частотою 50 Гц) на основі даних про вхідну напругу та вихідний струм моста;

3) моніторинг напруг та струмів в усіх ланках інвертора;

4) моніторинг вихідної частоти інвертора;

5) зв'язок із системою керування вищого рівня (ПК контролю та керування) для передачі даних (п.3, п.4);

6) синхронізація інвертора із зовнішньою мережею (промислова мережа електроживлення або інший автономний інвертор).

На рис. 4.15 наведено плату мікропроцесорної системи керування інвертором, а на рис. 4.16 показано інвертор із встановленою мікропроцесорною системою керування.

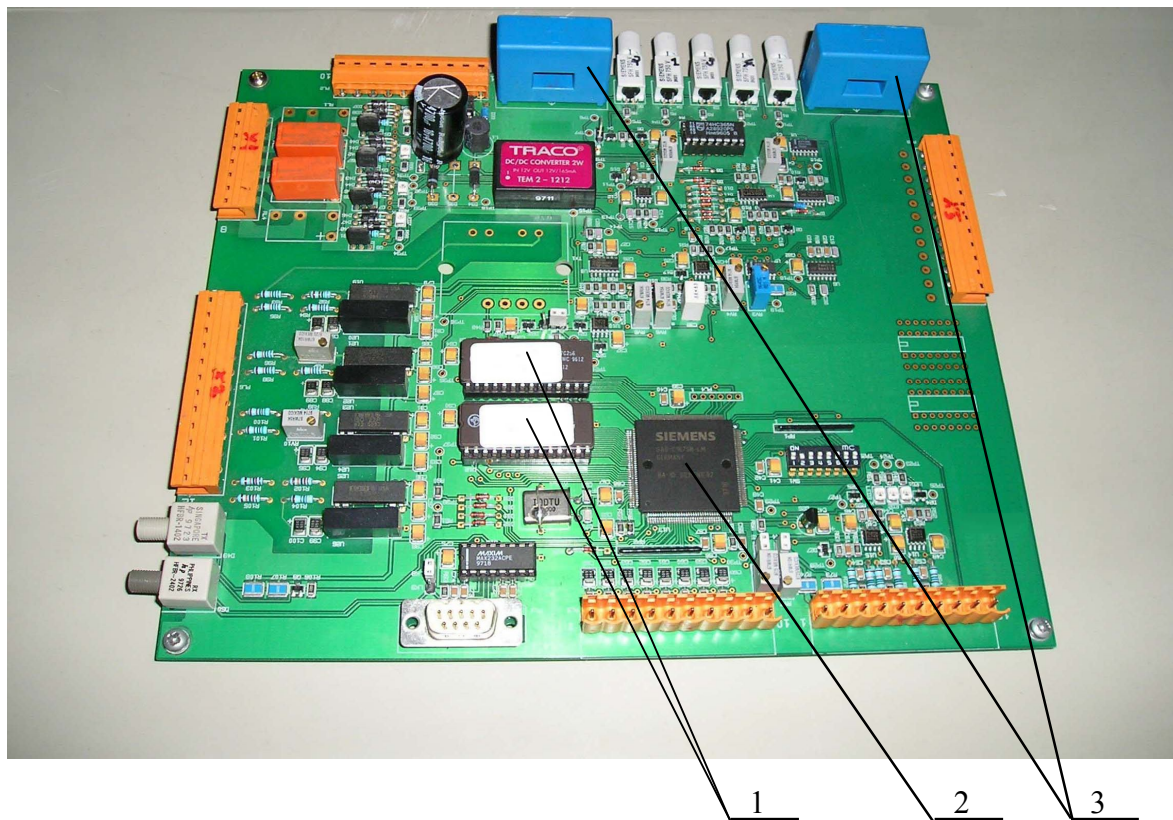


Рис. 4.15. Мікропроцесорна система керування інвертором
1. Банки пам'яті (ПЗП); 2. Мікропроцесор Siemens SAB-C167SR-LM;
3. Датчики струму.



1

Рис.4.16. Інвертор із встановленою мікропроцесорною системою керування

1. Мікропроцесорна система керування інвертором

Вимірювально-комутуюча система (ВКС) показана на рис. 3.17 а на рис. 3.18. - електромодем, що вбудовується у комп'ютер.



Рис. 4.17. Вимірювально-комутуюча система

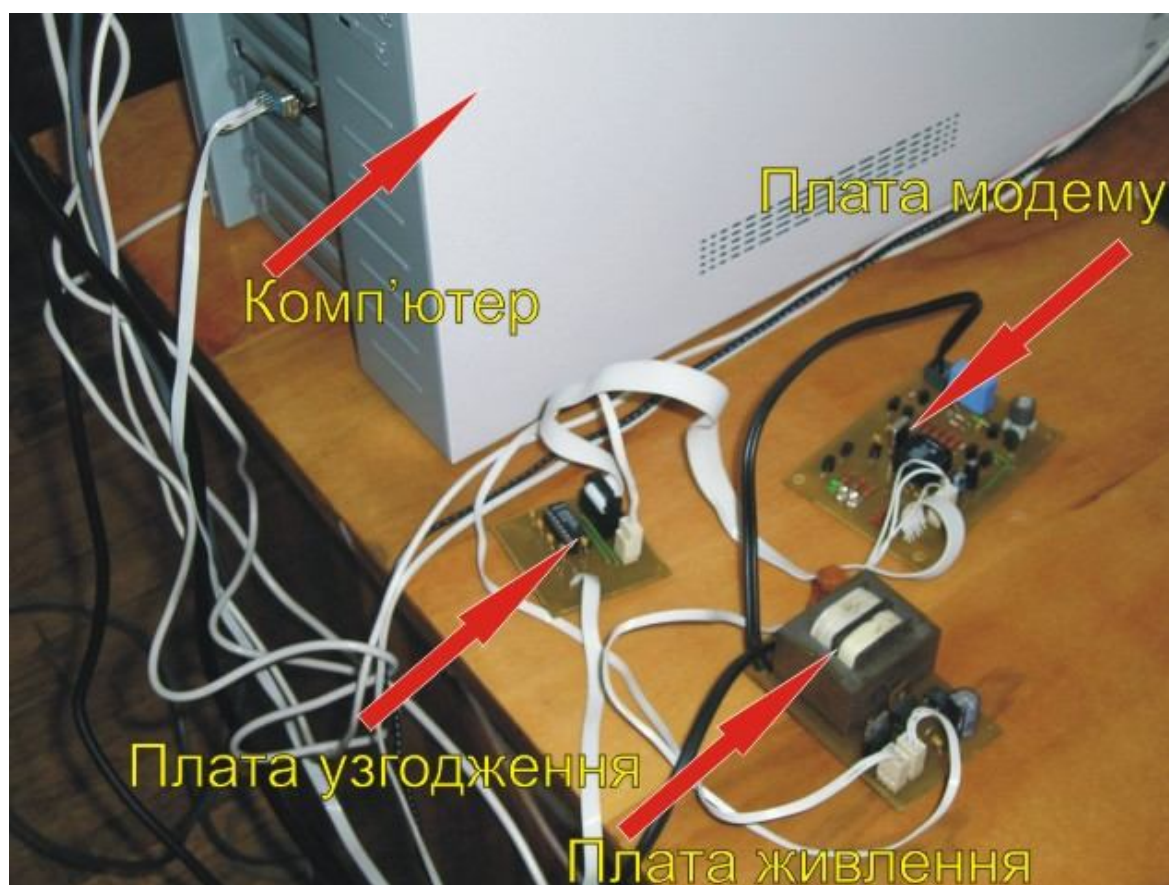


Рис. 4.18. Електромодем

Система передавання керуючих сигналів вимірювально-комутуючим системам локального об'єкту по електропроводці використовує заводозахисні алгоритми передачі даних [31].

Висновки до четвертого розділу

1. Розроблена схема пристрою управління електроспоживанням локального об'єкта на основі централізованої системи реалізує вибраний принцип централізованого керування. В якості середовища передачі даних використовується силова електромережа, що дозволяє позбутися витрат на прокладання кабелю для керування споживачами. Обґрунтований вибір електромодему, мікроконтролера та датчика потужності дозволив створити пристрій для керування електроспоживанням локального об'єкта.

2. Протокол передачі даних ЕІВ дозволяє здійснити централізований принцип керування системи керування споживачами по електропроводці та характеризується простотою схемної реалізації.

3. Експериментальна установка підтвердила працездатність алгоритмів керування електроспоживанням локального об'єкта.

ВИСНОВКИ

1. Одним із шляхів підвищення ефективності споживання електричної енергії локального об'єкта є вирішення задачі приведення кривої електроспоживання до бажаного вигляду.
2. В результаті аналізу трудомісткості перетворень виявлено, що перетворення в орієнтованому базисі має меншу трудомісткість у порівнянні з іншими і, завдяки цьому, потребує меншої кількості робочих тактів мікроконтролера для його обчислення. Обчислення спектрів в орієнтованому базисі на інтервалі $N=3^n$ не потребує виконання дробових операцій, що дозволяє використовувати цілочисельні процесори.
3. Запропоновано спосіб порівняння характеристик електроспоживання шляхом обчислення нормованих ОБ-спектрів та отримані умови наближення характеристики електроспоживання до заданої.
4. Запропоновано спосіб приведення характеристики електроспоживання до заданої шляхом зсуву елементарних комірок, який дозволяє зменшити навантаження на дизель-генератор у випадку наближення характеристики до рівномірної або отримати вигоду у грошових витратах за рахунок використання електроенергії у час її найменшої вартості. Так, в наведених прикладах за рахунок вирівнювання характеристики зменшено викид на 33%, а за рахунок збільшення споживання електроенергії у інтервалі дії тарифів меншої вартості - зменшено вартість спожитої електроенергії на 10 - 15%.
5. Запропоновано спосіб приведення характеристики електроспоживання до заданої шляхом зсуву елементарних підфункцій, який є більш узагальненим, та усуває необхідність представлення функції у вигляді елементарних комірок. Спосіб призводить до необхідності розв'язку системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, як недовизначеної так і перевизначеної, методом нерівномірних покриттів із заданою точністю.

6. Розроблений алгоритм керування електроспоживанням локального об'єкта „розумний будинок” реалізує запропоновані способи із врахуванням пріоритетів різних груп споживачів, режимів роботи та їх взаємозв'язку.
7. Розроблена схема пристрою управління електроспоживанням локального об'єкта на основі централізованої системи реалізує вибраний принцип централізованого керування. Передача даних по силовій електромережі за протоколом EIB дозволяє позбутися витрат на прокладання кабелю для керування споживачами. Обґрунтований вибір електромодему, мікроконтролера та датчика потужності дозволив створити пристрій для керування електроспоживанням локального об'єкта.
8. Експериментальна установка підтвердила працездатність алгоритмів керування електроспоживанням локального об'єкта.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електроенергетика України // Міністерство енергетики України. – К.: Міненерго України, 1998. – 34 с.
2. Жуйков В.Я. Петергеря Ю.С. Керування електроспоживанням локальних об'єктів з урахуванням економічних моделей // Технічна електродинаміка. – 2000. – С.131-136.
3. Петергеря Ю.С., Жуйков В.Я. Принципи побудови інтелектуальних систем керування перетворювачами у локальних об'єктах // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2001.– №1. – С.17-21.
4. Шидловський А.К. Проблеми стабілізації та подальшого розвитку електроенергетичного комплексу та елетротехніки як його технологічної складової // Технічна електродинаміка, тематичний випуск, ч.1. 2000. – С.3-8.
5. Праховник А.В., Федосенко Д.М.. Управління використанням електричної енергії: стан та варіанти розв'язання проблеми // Технічна електродинаміка. – 2004. – №1 – С.22-27.
6. Жуйков В.Я., Терещенко Т.А., Петергеря Ю.С. Преобразования дискретных сигналов на конечных интервалах в ориентированном базисе. - К.: Аверс, 2004. – 274 с.
7. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. - М.: Гл. ред. физико-математической лит-ры, 1989.- 496 с.
8. Жуйков В.Я., Коротеев И.Е., Рябенский В.М. Замкнутые системы преобразования электрической энергии.- К.: Тэхніка, 1989. - 319 с.
9. Жуйков В.Я., Павлов В.Б., Стжелецки Р.Г. Системы упреждающего управления вентильными преобразователями.- К.: Наукова думка, 1991. - 240 с.
10. Жуйков В. Я., Петергеря Ю. С. Нова концепція побудови систем керування перетворювачами електричної енергії // Технічна електродинаміка. - 1998. - №4. - С.33-37.

11. Жуйков В.Я., Сучик В.Е., Денисенко С.П. Применимость ключевых моделей при анализе процессов преобразовательных устройств // Ред. ж. Математическое моделирование и программное обеспечение автоматизированного проектирования устройств электропитания на ЭВМ. - К., 1982. - С.8-84. Деп. В УкрНИИТИ , №3991, Ук-82.
12. Жуйков В.Я., Терещенко Т.О. Дискретне симетричне перетворення функцій на кінцевих інтервалах // Доп. АН УРСР. -1988. -Сер. А.,№7. - С. 77-78.
13. Брейсуелл Р. Перетворення Хартлі.- М.: Мир, 1990. - 175 с.
14. Герасимчук В.Г. Преобразование Хартли при виброакустическом анализе динамических режимов асинхронных двигателей // Технічна електродинаміка. - 1998. - Спец. випуск, т.2. - С.163-166.
15. Трахтман А.М., Трахтман В.А. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах. - М.: Сов. радио, 1975. - 208 с.
16. Жуйков В.Я., Терещенко Т.А. Обобщение преобразования Хартли в м-ичной арифметике // Электронное моделирование. - 1989.- № 2. - С. 95-97.
17. Хармут Х.Ф. Применение функций Уолша в теории связи // Зарубежная электроника. - 1971.- № 8- С.15-31.
18. Власенко В.А., Лаппа Ю.М., Ярославский Л.П. Методы синтеза быстрых алгоритмов свертки и спектрального анализа сигналов. -М.: Наука, 1990. -179 с.
19. Крот А.М. Дискретные модели динамических систем на основе полиномиальной алгебры. - Минск: Наука и техника, 1990. - 312 с.
20. Фараджев Р.Г. Линейные последовательностные машины. - М.: Сов. радио, 1975. - 248 с.
21. Цыпкин Я.З., Фараджев Р.Г. Преобразование Лапласа-Галуа в теории последовательностных машин. - М.: Наука, 1968. - 304 с.
22. Жуйков В.Я., Терещенко Т.А., Яценко И.А., Волков В.В. Основные свойства и теоремы симметричного преобразования на конечных интервалах // Электронное моделирование. - 1990.- №1. - С.103-104.

23. Петергеря Ю.С. Потактовая обработка дискретных функций на основе симметричного преобразования на конечных интервалах // Электроника и связь. - 1998. - №4, ч.1. - С.177-182.

24. Жуйков В.Я., Терещенко Т.А., Петергеря Ю.С. Симметричное преобразование на конечных интервалах – К.: Аверс, 2000. - 218с.

25. Петергеря Ю.С. Керування вентильними перетворювачами з ідентифікацією параметрів. Дис. канд. техн. наук: 05.09.12. - Київ, КПІ, 1999. - 158 с.

26. Праховник А.В., Попов В.А., Федосенко Д.М. Прогнозування електричних навантажень з використанням нейронних мереж. // Технічна електродинаміка. – 2004. – С.24-27.

27. Деннис Дж., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. – М.: Мир, 1988. 440с.

28. ST7537 Home Automation Modem,

<http://us.st.com/stonline/books/pdf/docs/1787.pdf>, STMicroelectronics, USA, 1995.

29. CENELEC, 1992, Reference Number: EN 50065-1:1991/A1:1992, “Signalling on Low-Voltage Electrical Installations in the Frequency Range 3 kHz to 148.5 kHz, Part One”.

30. Analog Devices’ Data Sheets and Preliminary Technical Data:; ADE7753. Rev. PrD. 2002.

31. <http://www.eiba.ru>.

ДОДАТОК А

Програма розв'язку задачі наближення характеристики електроспоживання до заданої

```
#include <vcl.h> #pragma hdrstop
#include "Diplom.h" #include
"OutData.h" #include <Stdio.h>
#include <Math.h>
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TForm1 *Form1;
//-----
int TForm1 ::WeigthFunc(int m, int i, int x)
{
int K;
    int z = x; for(intj=0;j<=i;j++)
    {
        K = z%m; z = (int)((float)z/(float)m);
    } return K;
}
//----- Обчислення базисної функції-----
float TForm1 ::BasicFunc(int v, int x, int m, int n)
{
const float Pi = 3.1415926536;
int Sum = 0;
float Res;
for(int s=0; s<n; s++)
{
```

```

Sum += (WeigthFunc(m,s,v)*WeigthFunc(m,s,x));
}
A=tg(2*Pi/(float)m);
Res = (float)(2*Sum) * (Pi/(float)m);
return (cos(Res)+A*sin(Res)); }
//----- Обчислення ОБ спектру-----
float* TForml ::CountOB(inFunction *inFuncs, int m, int n)
{
float Sum=0;
    float *OBFunc; int N = m*n;
OBFunc = new float[N];
for(int v=0; v<N; v++)
{
Sum = 0;
for(int t=0; t<N; t++)
{
Sum += inFuncs->GetData(t)*BasicFunc(t,v,m,n);
}
OBFunc[v] = Sum / (float)N;
}
return OBFunc;
}
//-----

int* TForml ::ReverseOB(float* inOB, int m, int n)
{
float Sum=0;
    int *OBFunc; int N = m*n;
OBFunc = new int[N]; for(int v=0; v<N;
v++)
{

```

```

Sum = 0;
for(int t=0; t<N; t++)
{
Sum += mOB[t]*BasicFunc(t,v,m,n);
    } Sum+=0.5;
OBFunc [v] = (int)Sum ;
}
return OBFunc;
}
//----- Зсув елементарної комірки -----
float* TForm1 ::MoveCell(inFunction *inFuncs, int inNumOfFunc, int *inShift, float
*inOB, int inm, int inn)
{
int N = inm * inn;
float *outOB;
outOB = new float[N];
for(int v=0; v<N; v++)
{
    outOB[v] = inOB[v];
    outOB[v] = 0;
}
int FuncNum; int CellNum; int
t0,t1;
FuncNum = inNumOfFunc;
CellNum = inFuncs[--FuncNum].GetNumOfCell()-1;
for(inti=(inFuncs[inNumOfFunc].GetNumOfCell()-1); i>=0; i--)
{
inFuncs[FuncNum].GetCell(CellNum,t0,t1,NULL);
for(int v=0; v<N; v++)
{

```

```

outOB[v] = 0; for(int t=tO;t<=tI;t++)
{
outOB[v] +=
float)inFuncs[FuncNum].GetData(t)*(BasicFunc(v,t+inShift[i],mm,inn)-
BasicFunc(v,t,inn,inn))/(float)N;
} outOB[v] += inOBfv];
}
if(CellNum = 0)
CellNum = inFuncs[--FuncNum].GetNumOfCell(); CellNum--;
return outOB;
//-----Обчислення суми модулів ОБ спектру -----
float TForml ::AbsOB(float* inOB, int N)
float Sum=0; for(int i=0; i<N;i++)
Sum+=fabs(inOB[i]); return Sum;
void TForml ::DrawFunc(float* OBFunc,int m,int n, TImage *ImageS)
{ int *Data = NULL;
int N=m*n;
Data = ReverseOB(OBFunc,m,n); TCanvas *pCanvas =
ImageS->Canvas; pCanvas->Pen->Color = clBlack;
pCanvas->FillRect(Rect(0,0,ImageS->Width,ImageS->Height));
pCanvas->MoveTo(0+30,ImageS->Height-30);
int MAX;
MAX = Data[0]; for(int i=0;i<N;i++)
{
if(Data[i] > MAX)
MAX = Data[i]; }
intj=0;
for(int i=0; i<ImageS->Width-40;i+=(ImageS->Width-40)/N)
{
intY; ifG<N)

```

```

Y = (((ImageS->Height-40)/MAX)*Data[j]); else
Y = 0;
pCanvas->LineTo(i+30,ImageS->Height-30-Y);
if(j<N)
pCanvas->LineTo(i+((ImageS->Width-40)/N)+30,Image 1 ->Height-30-Y );
j++;
}
for(int i=1; i<=MAX;i++)
{
pCanvas->TextOutA(0+15,ImageS->Height-30-(((ImageS->Height-
40)/MAX)*i)),IntToStr(i)); }
for(int i=0; i<N;i++) {pCanvas-
>TextOutA(i*((ImageS->Width-
40)/N)+30 + (((ImageS->Width-
40)/(2*N))),ImageS->Height-
30,IntToStr(i));
}
pCanvas->Pen->Color = clRed; pCanvas->MoveTo(30,10); pCanvas-
>LineTo(30,ImageS->Height-10); pCanvas->MoveTo(10,ImageS->Height-30);
pCanvas->LineTo(ImageS-> Width-10,ImageS->Height-30);
if(Data!=NULL)
{
    delete [] Data; Data = NULL;
}
}
}
//-----
_fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner) : TForm(Owner)
{
    OBFunc = NULL; SaveOB = NULL;
SaveShift = NULL; inFuncs = NULL;

```



```

}
//-----
void _fastcall TForm1::Button1Click(TObject *Sender)
{
// ----- Ініціалізація -----
    FILE *in, *out; char *FileName;
    int N=0, m,n; int FuncNum, CellNum, CellPow;
int Temp;
    float *ChOBFunc = NULL; int *Shift = NULL;
shortSTOP=0; int Count=0;
if(SaveShift != NULL)
{
    delete [] SaveShift; SaveShift =
NULL;
}
if(SaveOB != NULL)
{
    delete [] SaveOB; SaveOB =
NULL;
}
if(OBFunc!=NULL)
{
    delete [] OBFunc;
OBFunc = NULL;
}
if(inFuncs != NULL)
{
    delete [] inFuncs;
inFuncs = NULL;
}
}

```

```

OpenDialog1->Filter = "OB files|*.OB;"; OpenDialog 1 -
>Execute(); FileName = OpenDialog 1->FileName.c_str();
//----- Введення даних -----
if( (in = fopen(FileName, "rt"))= NULL )
{
MessageDlg("Can't open file", mtError, TMsgDlgButtons() « mbOK, 0);
return;
}
fscanf(in, "%d", &N);
fscanf(in, "%d", &NumOfFunc); inFuncs = new
inFunction[NumOfFunc+1]; for(int i=0; i<NumOfFunc+1;
i++) inFuncs[i].Initialize(N); for(int i=0; i<NumOfFunc; i++)
{
fscanf(in, "%d", &Temp);
inFuncs[i].SetPowFree(Temp);
}
for(int i=0; i < NumOfFunc; i++)
for(intj=0;j<N;j++)
{
fscanf(in, "%d", &Temp); inFuncs[i].SetData(Temp,j);
} fclose(in);
for(intj=0;j<N;j++)
{
Temp = 0;
for(int i=0; i < NumOfFunc; i++)
{
Temp += inFuncs[i].GetData(j);
inFuncs[NumOfFunc].SetData(Temp,j);
}}
Temp = 0;

```

```

for(int i=0; i < NumOfFunc; i++)
{
inFuncs[i] .CountNumOfCell();
Temp += inFuncs[i].GetNumOfCell();
inFuncs[NumOfFunc].SetNumOfCell(Temp);
    } Temp = 1;
for(int i=0; i < NumOfFunc; i++)
{
inFuncs[i] .CountNumOfComb();
Temp *= inFuncs[i].GetNumOfComb();
inFuncs[NumOfFunc].SetNumOfComb(Temp);
}
m=N; n=1;
    OBFunc = CountOB(&inFuncs [NumOfFunc],m,n); Temp = inFuncs
[NumOfFunc].GetNumOfCell(); Shift = new int[Temp]; for(int i=0; i< Temp;
i++)
Shift[i] = 0;
SaveShift = new int[Temp];
memmove(SaveShift,Shift,(Temp)*sizeof(int));
SaveOB = OBFunc;
//-----Обчислення необхідних затримок-----
while(ISTOP)
{
    ProgressBar1->Position =
(int)(((float)Count/(float)inFuncs[NumOfFunc].GetNumOfComb()*100.0);
Count++;
    Temp = inFuncs[NumOfFunc].GetNumOfCell(); Temp--;
        ChOBFunc = MoveCell(inFuncs,NumOfFunc,Shift, OBFunc,m,n);
//ListBox1->Items->Add(AbsOB(ChOBFunc,N)); //DELETE ME
if(AbsOB(SaveOB,N)>AbsOB(ChOBFunc,N))

```

```

{
if((SaveOB != NULL) && (SaveOB != OBFunc))
{ delete [] SaveOB;
SaveOB = NULL;
}
    SaveOB = ChOBFunc;
memmove(SaveShift,Shift,(Temp+1)*sizeof(int));
} else
{
if(ChOBFunc != NULL)
{
delete [] ChOBFunc;
ChOBFunc = NULL;
} }
FuncNum = NumOfFunc;
CellNum = inFuncs[~FuncNum].GetNumOfCell();
CellNum--;
inFuncs[FuncNum].GetCell(CellNum, NULL, NULL, CellPow);
while(1)
{
Shift[Temp]++;
if(Temp = 0) break;
if(Shift[Temp]>CellPow)
{
Shift[Temp] = 0;
Temp--; if(CellNum = 0)
{ if(FuncNum = 0)
FuncNum = NumOfFunc;
CellNum = inFuncs[~FuncNum].GetNumOfCell();
} CellNum-

```

```

inFuncs[FuncNumj].GetCell(CellNum, NULL, NULL, CellPow);
}
else break;
    CellPow += Shift[Temp+1]*inFuncs[FuncNum].GetCell(CellNum+1, NULL,
NULL, NULL);
if(CellPow > inFuncs[FuncNum].GetPowFree())
CellPow = inFuncs[FuncNum].GetPowFree();
}
    inFuncs[0].GetCell(0, NULL, NULL, CellPow); CellPow 4=
Shift[l]*inFuncs[0].GetCell(l, NULL, NULL, NULL); if(CellPow >
inFuncs[0].GetPowFree())
    CellPow = inFuncs[0].GetPowFree(); STOP =
Shift[0] > CellPow;
}
CountedComb = Count;
ProgressBar->Position= 100;
DrawFunc(SaveOB,m,n,Image2);
DrawFunc(OBFunc,m,n,Image 1); Savel-
>Enabled = true; Viewl->Enabled = true;
if(Shift != NULL)
{
delete [] Shift;
Shift = NULL;
}
if((ChOBFunc != NULL) && (SaveOB != ChOBFunc))
{
    delete [] ChOBFunc; ChOBFunc =
NULL;
}

```

```

} // DELETE ALL CREATED BY NEW !!!
//-----
void _fastcall TForm1::Exit1CHck(TObject *Sender)
{
CloseO;
}
//-----
void _fastcall TForm1::Save1Click(TObject *Sender)
{
FILE *in;
SaveDialog1->Filter = "Shift files|*.SHT;"; SaveDialog 1 -
>Execute();
char *FileName = SaveDialog 1->FileName.c_str(); if( (in = fopen(FileName, "wt"))=
NULL )
{
MessageDlg("Can't create file", mtError, TMsgDlgButtons() « mbOK,0);
return;
}
for(int i = 0;i<inFuncs[NumOfFunc].GetNumOfCell();i++)
{
fprintf(in,"%d;",SaveShift[i]);
} fclose(in);
}
//-----
void _fastcall TForm1::FormClose(TObject *Sender, TCloseAction &Action)
{
if(SaveShift!=NULL)
{
delete [] SaveShift; SaveShift = NULL;
}
}

```

```

if(SaveOB != NULL)
{
    delete [] SaveOB; SaveOB = NULL;
}
if(OBFunc!=NULL)
{
    delete [] OBFunc; OBFunc = NULL;
}
if(inFuncs != NULL)
{
    delete [] inFuncs; inFuncs = NULL;
}
//-----
void _fastcall TForm1::View1Click(TObject *Sender)
{ char *Str = "1234567890123456789012345678901234567890";
    Form2->ListBox 1 ->Items->Clear(); for(int i =
0;i<inFuncs[NumOfFunc].GetNumOfCell();i++)
{
    sprintf(Str,"Cell[%d], Shift by : %d",i,SaveShift[i]); Form2->ListBox 1 ->Items-
>Add(Str);
}
    sprintf(Str,"Number Of Used Combination : %d",CountedComb);
    Form2->ListBox 1 ->Items->Add(Str); Form2-
>ShowModal();
}
//-----

```