

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерних наук

(повна назва)

Кафедра Програмної інженерії

(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Дослідження методів оперативного планування виробітку, постачання та споживання електричної енергії у мережах електропостачання

(тема)

Виконав: студент 2 курсу, групи ПЗСзм-19-1

Сокорчук Ігор Петрович

(прізвище, ініціали)

спеціальності 121– Інженерія програмного забезпечення

(код і повна назва спеціальності)

Освітньо-професійної програми

(тип програми)

Програмне забезпечення систем

Керівник проф. Дудар З.В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри, проф. З.В.Дудар

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерних наук

Кафедра Програмної інженерії

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 121 – Інженерія програмного забезпечення

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна програма

Освітня програма Програмне забезпечення систем

ЗАТВЕРДЖУЮ: Зав. кафедри _____ (підпис)

«_____» _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Сокорчуку Ігорю Петровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів оперативного планування виробітку, постачання та споживання електричної енергії у мережах електропостачання затверджена наказом університету від " _____ " _____ 20 ____ р № _____
заповнюється вручну після отримання наказу
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16 грудня 2020 р.
3. Вихідні дані до роботи: мінімальні вимоги до функціональності програми, загальні вимоги до архітектури системи, результати математичних розрахунків, результати експериментів.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі: мета роботи, аналіз проблемної області, постановка задачі, аналіз методів, розв'язок задачі, аналіз результатів впровадження.

5 Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основний	Дудар Зоя Володимирівна		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка *
1	Аналіз предметної області	23.09.2020	виконано
2	Формулювання проблеми	01.10.2020	виконано
3	Постановка задачі	07.10.2020	виконано
4	Проектування архітектури системи	01.11.2020	виконано
5	Опис досліджуваної моделі та аналіз	07.11.2020	виконано
6	Підготовка презентації та доповіді	01.12.2020	виконано
7	Нормоконтроль, рецензування	10.12.2020	виконано
8	Занесення диплома в електронний архів	14.12.2020	виконано
9	Допуск до захисту у зав. кафедри	14.12.2020	виконано
* заповнюється вручну після виконання чергового пункту			

Дата видачі завдання 02 вересня 2020 р.

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Дудар З. В.

(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ / ABSTRACT

Пояснювальна записка містить 102 с., 73 рисунки, 7 таблиць, 18 джерел.

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, МЕТОДИ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ, ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, СОНЯЧНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ, ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ,

Метою роботи є дослідження методів оперативного планування виробництва, постачання та споживання електроенергії, виробленої сонячними електростанціями в електророзподільних мережах.

Об'єкт дослідження – режими роботи сонячної електростанції у складі розподільчої мережі електропостачання.

Предмет дослідження – оптимізація оперативного планування режиму роботи сонячної електростанції у складі розподільчих мереж електропостачання.

SIMULATION MODELING, OPERATIONAL PLANNING METHODS, ELECTRIC POWER GENERATION, SOLAR POWER PLANTS, ELECTRICAL GRIDS,

Objective of the study is the research on operational planning methods of electric power generation, supply and consumption of electricity produced by solar power plants in electrical grids

A research object are the operating modes of a solar power plant in distribution power grids.

A research subject is the optimization of the operation mode of a solar power plant in distribution power grids.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	6
Вступ	8
1 Опис проведених теоретичних і експериментальних досліджень	11
1.1 Аналіз предметної області	11
1.2 Аналіз стану проблеми	14
1.3 Способи вирішення проблеми	16
1.4 Огляд методів прогнозування виробітку та споживання електроенергії.....	18
1.5 Огляд алгоритмів для розв'язання задачі розподілу електричної енергії	23
1.6 Визначення транспортних витрат у розподільчій частині мережі	29
1.7 Визначення транспортних витрат у транспортній частині мережі	32
1.8 Пошук мінімального шляху з допомогою алгоритму Дейкстри	37
1.9 Методи розв'язку задач багатокритерійного вибору	43
1.10 Постановка задачі	45
2 Розв'язок поставленої задачі	46
2.1 Огляд будови мережі електропостачання	46
2.2 Розробка моделі прогнозування виробітку електричної енергії сонячною електростанцією	48
2.3 Розв'язок задачі оперативного планування виробітку електроенергії	53
3 Опис практичної реалізації	56
3.1 Опис будови системи автоматизованого обліку енергоресурсів	56
3.2 Опис інтерфейсу системи	61
3.3 Встановлення та тестування розробленого програмного забезпечення ...	68
4 Апробація досліджень	70

	5
Висновки	71
Перелік джерел посилання	72
Додаток А Перелік посилань відповідно до наукових досліджень кафедри	74
Додаток Б Щомісячний виробіток електричної енергії СЕС	75
Додаток В Виробіток електричної енергії сонячною електростанцією протягом року	81
Додаток Г Виробіток та споживання електричної енергії протягом місяця	82
Додаток Д Блок схема алгоритму розв'язку задачі оперативного планування виробітку електричної енергії СЕС.....	88
Додаток Е Будова програмної системи обліку та планування енергоресурсів	89
Додаток Ж Довідка про впровадження результатів дослідження	90
Додаток З Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір	91
Додаток И Слайди презентації	92

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АЕС – атомна електростанція;
- АСКОЕ – автоматизована система комерційного обліку електроенергії;
- АСОЕ – автоматизована система обліку електроенергії;
- ВДЕ – відновлювальне джерело електроенергії;
- ВЕС – вітрова електростанція;
- ВОК – вимірювально обчислювальний комплекс;
- ГА – генетичні алгоритми;
- ГЕС – гідроелектростанція;
- ДПФ – дискретне перетворення Фур'є;
- ЛУЗО – локальне устаткування збору і обробки (даних);
- МГВД – метод групового врахування аргументів;
- РУ – розподільче устаткування;
- СЕС – сонячна електростанція;
- СУБД – система управління базою даних;
- ТЕС – теплова електростанція;
- ТЕЦ – теплоелектроцентрально (електростанція);
- УППД – уніфікований протокол передачі даних;
- ШНМ – штучні нейронні мережі;
- D* – алгоритм з переобчисленням шляху в процесі зміни графа;
- D*-Lite – удосконалений алгоритм LPA*;
- LCA – алгоритм пошуку найближчого спільного предка;
- LPA* – удосконалений алгоритм A* з планування впродовж життя;
- СУБД – система управління базою даних;
- IP – протокол мережевого рівня для передавання датаграм між мережами;
- TCP – протокол керування передачею даних у комп'ютерних мережах;
- UDP – протокол датаграм користувача (протокол обміну повідомленнями);

ICMP – міжмережевий протокол керуючих повідомлень;

CGI – загальний інтерфейс шлюзу (стандарт інтерфейсу для організації взаємодії програми веб-сервера із зовнішньою програмою);

UPS – джерело безперебійного живлення;

SSL – рівень захищених сокетів;

TLS – захист на транспортному рівні.

ВСТУП

У роботі розглянуто методи оперативного планування виробітку, постачання та споживання електричної енергії у мережах електропостачання.

Робота виконана на кафедрі програмної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки. У роботі використані наукові роботи викладачів кафедри щодо реалізації безпеки застосувань для обміну інформацією [1], нейронних систем [2], [3], формальних методів при розробці і супроводі програмних систем аналізу даних [4], дискретних структур [5], NoSQL СУБД [6],

Тема роботи є актуальною на сьогодні.

На сьогодні в Україні на державному рівні розвивається програма "Нова енергетична стратегія України до 2035 року: "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність" [7]. Складовою цієї програми є концепція так званого свідомого та енергоефективного суспільства, яка, зокрема, передбачає:

- впровадження на державному і муніципальному рівнях та на підприємствах системи енергетичного менеджменту та її постійне вдосконалення відповідно до вимог стандартів та міжнародних угод;

- стимулювання енергоощадження на рівні споживачів, формування енергоефективної свідомості у громадян;

- стимулювання підвищення енергоефективності шляхом адресної монетизації субсидій кінцевому споживачеві, мінімізація обсягів субсидування у перспективі;

- підвищення енергоефективності на етапі генерації електро- та теплоенергії, зниження втрат енергії у подальшому при її передачі та розподілі;

- забезпечення повноти та прозорості обліку всіх форм енергії та паливно-енергетичних ресурсів;

– формування та регулярний моніторинг енергетичного балансу України, його оцінка за критеріями ефективності.

У таких умовах, задача створення програмної системи для автоматизації обміну даними між суб'єктами ринку електричної енергії з подальшим накопиченням, збереженням та аналізом цих даних для управління енергетичними системами. Особливо важливою на сьогодні задачею є доповнення цієї системи функціями оперативного планування виробітку, постачання та споживання електричної енергії у мережах електропостачання.

Метою цієї атестаційної роботи є дослідження методів оперативного планування виробітку, постачання та споживання виробленої сонячними електростанціями електричної енергії у розподільчих мережах електропостачання.

Об'єкт дослідження – режими роботи сонячної електростанції у складі розподільчої мережі електропостачання.

Предмет дослідження – оптимізація оперативного планування режиму роботи сонячної електростанції у складі розподільчих мереж електропостачання.

В атестаційній роботі розв'язано такі задачі:

– розроблено імітаційну модель для визначення обсягів генерації електричної енергії сонячною електростанцією;

– запропоновано метод імітаційного моделювання режиму роботи розподільчої мережі електропостачання для визначення можливих обсягів постачання електричної енергії сонячною електростанцією у розподільчу мережу електропостачання, за умови мінімізації витрат на передачу електричної енергії та з врахуванням граничних режимів на ділянках транспортування у цій мережі;

Інноваційність дослідження:

– запропоновано метод імітаційного моделювання для розв'язку задачі прогнозування обсягів виробітку електричної енергії сонячною електростанцією;

– запропоновано використання методу диференціальних рент для розв'язку задачі з визначення обсягів постачання електричної енергії сонячними електростанціями у складі розподільчої мережі електропостачання;

– показана можливість оперативної планування режимів постачання електричної енергії у розподільчі мережі електропостачання на підставі даних від встановленого на сонячні електростанції локального устаткування збору та обробки даних (ЛУЗО) та автоматизованих систем комерційного обліку енергоресурсів (АСКОЕ);

Практичне значення одержаних результатів – розроблено програмний модуль для комплексу: "Вимірювально-обчислювальний комплекс автоматизованої системи обліку енергоресурсів Promenergy/E7" ("BOK ACOE Promenergy/E7") та впроваджено його у дослідну експлуатацію на об'єктах, які обслуговуються ТОВ "Харківпроменерго", що дозволило зменшити період планування виробітку і постачання електричної енергії у розподільчій мережі електропостачання з одного місяця до одного тижня;

В атестаційній роботі використано методи теорії математичного моделювання, теорії графів, теорії матриць, теорії лінійного програмування, теорії цифрової обробки сигналів та теорії прийняття рішення.

Результати дослідження та програмні рішення були представлені у п'яти доповідях на науково-практичних конференціях та у підготовленій до друку публікації. За результатами роботи, було оформлено заявку на реєстрацію авторського права на твір (програмний модуль).

1 ОПИС ПРОВЕДЕНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз предметної області

Згідно зі статистичними даними, опублікованими в Інтернет джерелах [7], в енергетичній галузі, частка атомної енергії, гідроенергії та відновлюваних джерел енергії у світовому енергетичному балансі відповідно становить: 2,2%, 10,7% та 6,2%. До 2025 р. світовий попит на енергоресурси зросте приблизно на 30%.

Енергоресурсами із найбільшою швидкістю зростання, залишатимуться відновлювані джерела енергії. Обсяги їх споживання зростуть більш ніж у чотири рази за прогнозований період [8].

Таким чином, розширення використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ, англ. – Renewable Energy) на сьогодні є одним із пріоритетних напрямів розвитку енергетики.

За даними, наведеними на офіційному сайті Євростату [9], у 2017 році частка відновлювальної енергії становила 17,5% споживаної енергії в ЄС. Частка енергії з відновлюваних джерел, що використовуються в транспортній діяльності, у 2017 році досягла 7,6%.

Директива ЄС 2009/28/ "Про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел" створила основу для просування ВДЕ у ЄС та встановила обов'язкові національні цільові показники, а саме: до 2020 року частка ВДЕ у кінцевому споживанні енергії у середньому у ЄС–28 має досягти 20%, в тому числі у транспорті – 10%.

Країни ЄС визначили цільовий індикатор використання відновлюваних джерел енергії у кінцевому споживанні енергії, який, за даними наведеними на сайті Євростату, має у 2030 році досягти рівня щонайменше 27%.

Розвиток відновлювальних джерел енергії обумовлений низкою чинників. Основними серед них є:

- зменшення енергетичної нестабільності, пов'язаної з енергетичними кризами;
- скорочення залежності від імпорту енергоносіїв;
- зменшення обсягів шкідливих викидів, що утворюються в процесі використання традиційних енергоносіїв;
- збереження запасів енергоресурсів на майбутнє.

Використання відновлювальних джерел енергії наведено на рисунку 2.1.

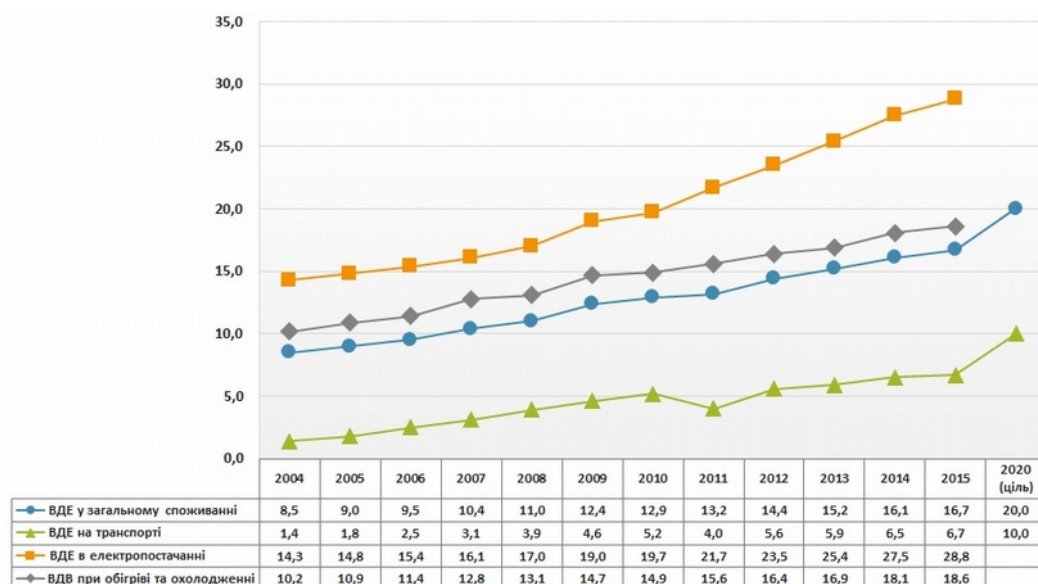


Рисунок 1.1 – Динаміка частки відновлювальних джерел енергії у валовому кінцевому споживанні енергії у ЄС за основними напрямками.

За даними Євростату, використання відновлювальних джерел енергії спостерігається в усіх країнах ЄС. У Швеції ця частка складає понад 50%, у Фінляндії 40%, Данії, Латвії, Австрії – понад 30%, див рис. 2.2.

Розвиток використання відновлювальних джерел енергії спостерігається не тільки у ЄС але й у світі.

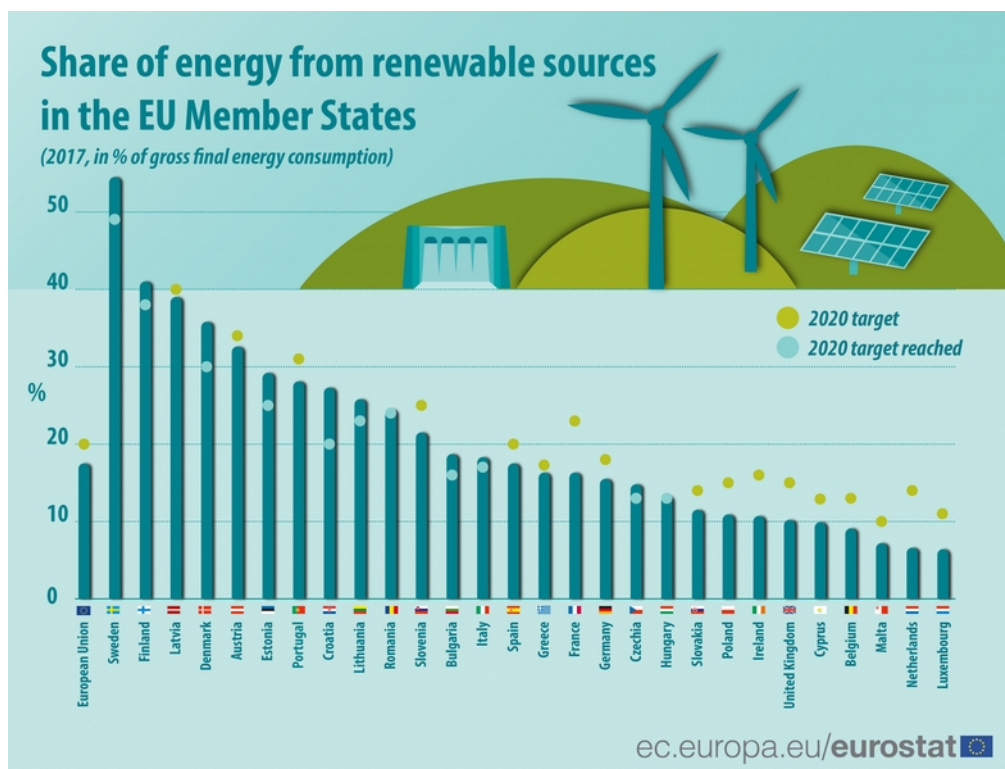


Рисунок 1.2 – Частка енергії з відновлювальних джерел у країнах членах Європейського союзу за даними Євростату

Обсяги споживання первинних енергетичних ресурсів у світовій енергетичній сфері за 2001–2015 рр. за статистичними даними компанії British Petroleum наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 1.1 – Виробництво та споживання первинних енергетичних ресурсів у світі у 2001-2015 рр. за їх видами, млн. т. н. е.

Роки	Усього Споживання	За видами енергетичних ресурсів								
		Нафта		Природний газ		Вугілля		Ядерна енергія	Гідро-енергія	ПДЕ
		Виробництво	Споживання	Виробництво	Споживання	Виробництво	Споживання			
2001	9501,3	3618,0	3620,9	2246,9	2223,7	2423,9	2416,5	600,9	586,9	52,5
2005	10940,0	3937,8	3933,9	2519,4	2504,5	3033,6	3130,6	626,4	661,4	83,2
2010	12181,4	3979,1	4079,9	2893,9	2886,7	3627,6	3634,3	626,3	784,2	169,9
2014	13020,6	4228,7	4251,6	3130,2	3081,5	3988,9	3911,2	575,5	884,3	316,6
2015	13147,3	4361,9	4331,3	3199,5	3135,2	3830,1	3839,9	583,1	892,9	364,9

Джерело: BP Statistical Review of World Energy June 2016

В Україні частка виробництва електричної енергії з відновлювальних джерел також активно зростає.

На кінець вересня 2018 року вона досягла 1,8% від усієї кількості виробленої енергії. Загальна потужність досягла 1803,6 МВт. Згідно з Планом реформування енергетичного сектору до 2020 року її обсяг має становити 11%. На кінець 2017 загальна потужність складала 1319 МВт, тобто мало місце зростання на 36,7%.

1.2 Аналіз стану проблеми

Однією із важливих задач, пов'язаних із розвитком енергетики є автоматизація і удосконалення методів планування виробітку енергетичних ресурсів.

Для розв'язку задачі оптимального планування обсягів виробітку, транспортування, споживання електричної енергії, необхідно спрогнозувати виробіток та споживання електричної енергії у наступний період. Для цього необхідно знати для наступного періоду обсяги виробітку електроенергії з кожної приєднаної до електромережі електростанцією та обсяги споживання електроенергії кожним споживачем електроенергії.

Обсяги виробітку електричної енергії із відновлювальних джерел та споживання електричної енергії залежить від багатьох факторів, зокрема, від температурного режиму, часу доби, погодних умов тощо. Від точності і достовірності прогнозу електроспоживання істотно залежить точність рішення задач оптимального розподілу навантаження між генеруючими потужностями, ефективність управління режимами енергетичних систем і управління електроспоживанням.

Обсяги споживання електричної енергії також залежать від багатьох факторів. Вони мають виражену періодичність. Один із періодів має сезонний характер. Мають місце також значні коливання в обсягах виробітку та споживання електричної енергії з періодами 24 години та 7 діб. Спостерігається тенденція зниження споживання, пов'язані з підвищенням середньодобової температури. Отже, однією з особливостей процесу прийняття рішень щодо планування поставок електричної енергії є циклічність повторюваність

Відомо, що перевищення значень навантаження понад допустимі значення, призводить до порушень у роботі транспортної електромережі, зростання витрат, аварій, додаткових витрат на введення в експлуатацію генеруючих блоків.

Зниження значень призводить до витрат на експлуатацію додаткових блоків та до перевиробництва електричної енергії. Такі коливання, в свою чергу, призводять до збільшення виробничих витрат виробників електричної енергії та системних витрат на управління енергетичною системою. Також, – ціна електричної енергії у виробників впливає на ціну продажу електричної енергії на ринку електричної енергії.

Характерною рисою процесів виробітку і споживання електричної енергії є те, що ці процеси визначаються досить складним характером взаємодії сукупності взаємозалежних стаціонарних, нестаціонарних і неоднорідних випадкових величин. Нестаціонарність цих процесів обумовлена залежністю ймовірнісних характеристик випадкових процесів (математичного очікування, дисперсії і т.д.) від часу. Неоднорідність процесів визначається різними ймовірнісними характеристиками у різні часові інтервали: сезони року, робочі та неробочі дні.

1.3 Способи вирішення проблеми

Для прогнозування процесів виробітку і споживання електричної енергії на сьогодні використовують багато різних методів.

Аналіз підходів до розробки математичних моделей, алгоритмів їх реалізації і створення програмних засобів розв'язку задач короткострокового (добу – тиждень), середньострокового (місячного, від будь-якої довільної дати до кінця поточного місяця) та довгострокового (на майбутній місяць, квартал, рік) прогнозування електроспоживання і активного навантаження в електричній мережі [10], показує, що на вибір відповідного методу прогнозування, впливають такі чинники, як: форма прогнозу, період і інтервал прогнозування; доступність даних; необхідність точності; поведінка прогнозованого процесу; вартість розробки, установки і роботи з системою; простота роботи з системою; розуміння і співпрацю осіб приймають рішення.

У дослідженнях [11] сформульовано такі основні вимоги, що ставляться до сучасних комп'ютерних моделей прогнозування :

- інтервальність – можливість обчислення прогнозованої величини для вибраного часового інтервалу від будь-якої дати до кінця розрахункового періоду;
- адаптивність – можливість коригування для досягнення необхідної точності прогнозування;
- рекурсивність – можливість додаткового навчання системи впродовж надходження нових фактичних даних для підвищення якості прогнозування;
- робастність – надійність результатів прогнозу, за рахунок застосування оптимальних моделей, а також стійкість до помилок у вхідних даних;
- стійкість – стійкість математичних прогностичних моделей до помилок у вхідних даних або до часткового відсутності деякої їх частини;
- інтерактивність – можливість роботи кінцевих користувачів в інтерактивному режимі для введення коригувальної інформації;

– повнота – можливість реалізації функцій, властивих об'єкту прогнозування досягнення необхідної точності прогнозування;

– економність – можливість мінімізації витрат на використання інформаційних ресурсів та засобів автоматизації.

Вибір оптимального методу для вирішення конкретної практичної задачі являє собою окрему і досить непросте завдання. До сьогодні, в багатьох енергетичних системах світу при створенні прогностичних моделей використовуються статистичні методи аналізу: динамічні (часові) ряди, тобто впорядковані послідовності даних спостережень за процесом, що змінюється в часі. Відомо достатню кількість математичних стохастичних методів прогнозування графіків електричного навантаження, що базуються на застосуванні для аналізу часових рядів регресійних моделей.

При їх практичній реалізації, для зменшення похибки розрахунків потрібно, збирати, зберігати і обробляти значні обсяги первинних даних погодинного фактичного виробництва електричної енергії. Крім того, потрібно зберігати великий обсяг додаткових даних, призначених для визначення і виправлення помилок, забезпечення коректності даних, врахування сторонніх факторів, що впливають на результат прогнозу.

Аналіз джерел, дозволяє зробити висновок про те, що універсального методу, який дозволяє вирішити проблему прогнозування характеристик випадкових процесів різної природи на сьогодні немає. Однак, вироблені підходи, застосування яких при вирішенні конкретних прикладних задач, дають можливість побудови прогностичної моделі, що забезпечує прийнятну для практики достовірність і точність.

У зв'язку з переходом до ринку двосторонніх договорів між безпосередніми виробниками і постачальниками електричної енергії, для розв'язку завдання прогнозування електричного навантаження в енергетичній системі знаходять застосування нові інформаційні технології, які розробляються на основі

використання апарату штучних нейронних мереж, генетичного алгоритму, методу групового обліку аргументів.

1.4 Огляд методів прогнозування виробітку та споживання електроенергії

Одним з методів, яким можна вирішити задачу прогнозування виробітку та споживання електричної енергії, є алгоритми штучної еволюції (генетичні алгоритми, ГА). Вони є однією з складових еволюційного моделювання як наукового напрямку, яке базується на принципах природного відбору. Генетичний алгоритм був запропонований в 1975 році в Мічиганському університеті Джоном Голландом. Він отримав назву репродуктивного плану Голланда і надалі активно використовувався в якості базового алгоритму в еволюційних обчисленнях. ГА використовуються у випадках, коли комбінаторна складність методу повного перебору робить його непридатним через великий час, необхідний для знаходження розв'язку [12].

Способи застосування ГА відрізняються інструментами, які використовуються при в алгоритмі для вибору батьківських пар. Знаходять застосування такі підходи [13]:

- панмиксія, при якій батьки вибираються з популяції випадковим чином, таким щоб один з батьків може бути в парі з самим собою або брати участь у декількох парах;

- інбридінг, якщо перший батько вибирається випадковим чином, а другий визначається, як найближчий з найбільшою ймовірністю до першого в популяції;

- аутбридінг, якщо перший батько вибирається випадковим чином, а другий є з більшою імовірністю самим віддаленим від першого в популяції;

- пропорційний, якщо батьки вибираються з вірогідністю, пропорційними їх значенням функції пристосованості.

– селекція, якщо значення функції пристосованості батьків вище середнього значення у популяції;

Чинником, який обмежує використання алгоритмів штучної еволюції, є потреба повторної оцінки функції пристосованості для складних проблем. Пошук оптимального рішення для складної задачі високої розмірності нерідко вимагає дуже витратної оцінки функції пристосованості.

Для розв'язку багатьох задач, також виникає проблема розмірності, тобто при великому розмірі області пошуку рішень, кількість елементів, які будуть змінюватися (мутувати), також стає дуже великою. що робить використання наявної обчислювальної техніки надзвичайно проблематичним завданням. До того ж, у багатьох задачах генетичні алгоритми виявляють тенденцію сходитися до локального оптимуму або до критичних точок, замість глобального оптимуму у цих задачах.

Для розв'язання задачі планування також можуть використовуватися штучні нейронні мережі (ШНМ). Вони є класом узагальнених нелінійних моделей, які є прототипом структур подібних структурам людському мозку. Їхньою головною перевагою є те, що вони можуть апроксимувати будь-яку нелінійну функцію з довільним ступенем точності, за допомогою відповідної кількості прихованих нейронів. ШНМ мають здатність до адаптації, створення асоціативних зв'язків і навчання. Для розв'язку задачі прогнозування з допомогою ШНМ, отримання інформації з масиву даних полягає у формулюванні математичного опису закономірностей між цими даними. Однак, неможливо з цих даних отримати інформацію про структуру математичної моделі, і тому в ШНМ її необхідно ставити апріорі. У випадку ШНМ, дослідник описує цю структуру, шляхом вибору кількості шарів і нейронів у них, а також вибору виду активаційної функції. Це вимагає глибокого знання не тільки теорії ШНМ, але і глибоких знань про природу досліджуваного об'єкту. Крім того, виникає необхідність трансформувати об'єкт так, щоб до нього можна було застосувати методи ШНМ.

Можна зазначити такі недоліки ШНМ [14]:

- відсутність формалізованих алгоритмів налаштування мережі через високу складності самої процедури налаштування;
- значний час навчання ШНМ ;
- непрозорість формування результатів аналізу і їх формалізації у встановлені закономірності;
- висока складність внутрішньої структури мережі і відсутність чіткого формалізованості апарату вибору структури ШНМ.

Таким чином, успішність застосування ШНМ зумовлена особливостями реалізації процесів вибору структури мережі та її навчання для конкретного завдання

Ще одним способом розв'язання задачі є використання регресійного аналізу

Регресійний аналіз – статистичний дослідний прийом встановлення впливу однієї або кількох незалежних змінних на залежну змінну. незалежні змінні називають, також – регресорами або предикторами, а залежні – критеріальними змінними. Ця термінологія залежних і незалежних змінних відображає лише їх математичну залежність, а не причинно-наслідкові зв'язки. Регресійний аналіз виконується на основі побудованого рівняння регресії і визначає частку кожної незалежної змінної у варіації досліджуваної (прогнозованої) залежної змінної величини. У результаті, основним завданням регресійного аналізу є визначення впливу чинників на результативний показник в абсолютних показниках. Передусім, для цього необхідно підібрати і обґрунтувати рівняння зв'язку, яке відповідає характеру аналітичної стохастичної залежності між досліджуваними ознаками. Рівняння регресії показує як у середньому змінюється результативна ознака під впливом зміни факторних ознак.

Визначення параметрів множинної регресії вимагає трудомістких розрахунків із застосуванням комп'ютерних систем. Однак отримані результати будуть достовірними і можуть широко використовуватися для складання довгострокових прогнозів, а однофакторна модель може бути використана для короткострокових прогнозів.

Можна відзначити такі недоліки регресійного аналізу [15]:

– моделі, які мають дуже маленьку складність, можуть виявитися неточними, а моделі, які мають надлишкову складність, можуть виявитися важкими при практичній реалізації;

– цей метод є статистичним і не враховує аргумент часу, а отже, не цілком придатний для випадку прогнозування показників електроспоживання.

Для розв'язку задачі використовують також метод групового урахування аргументів.

В алгоритмах самоорганізації моделей складних систем застосовується поділ масиву вихідних даних на дві частини, які називаються навчальною і перевіркою послідовністю, причому середньоквадратична помилка, яка визначається з перевіркою послідовності, служить критерієм для вибору структури моделі, яка синтезується за даними навчальної послідовності.

У результаті, виникає необхідність оптимального розподілу даних на навчальну і перевірку послідовність, що призводить до виділення і формування третьої частини масиву даних – екзаменаційної послідовності. Таким чином, помилка, яка визначається за екзаменаційними даними, буде служити критерієм оцінки перевіркою послідовності. У результаті, критерії вибору моделей діляться на внутрішні і зовнішні. Критерій вважається внутрішнім, якщо його визначення базується на використанні тих самих даних, що і сама синтезована модель. Зовнішніми вважаються ті критерії, які будуються на нових даних не використаних при синтезі моделі. Таким чином, структура синтезованої моделі з оптимальною складністю буде відповідати мінімуму зовнішнього критерію.

Перебираючи моделі від найпростішої до більш складних (або навпаки, від складних до більш простих), завжди знаходиться модель оптимальної складності, єдиної для кожного зовнішнього критерію. Для успішності вирішення завдання моделювання, важливо вибрати зовнішній критерій відповідно до типу розв'язуваної задачі моделювання.

У МГВА, застосовуються дві основні структури генерації моделей (часткових описів), які оцінюються за умовою селекції:

- комбінаторні алгоритми МГВА з обнуленням коефіцієнтів;
- багаторядні порогові алгоритми МГВА.

У комбінаторних алгоритмах задається деякий повний опис – модель у вигляді полінома високого ступеня. Часткові описи утворюються з повного за допомогою прирівнювання до нуля (обнулення) тих чи інших коефіцієнтів повного опису. Решта коефіцієнтів оцінюються з використанням всіх точок таблиці вихідних даних за методом найменших квадратів.

Вибір кращої структури моделі виконується за одним із зовнішніх критеріїв – критерію селекції (наприклад, за критерієм регулярності або мінімуму зсуву). З множини часткових описів вибирається єдиний поліном – модель оптимальної складності. Комбінаторні непорогові алгоритми рекомендуються при $n < N$, де n – кількість вхідних змінних, N – кількість вихідних змінних, а число членів повного опису не більше 20. При більш складних завданнях моделювання при $n > N$ застосовуються багаторядні селекційні порогові алгоритми МГВА.

Деякі з багаторядних алгоритмів МГВА можуть вирішувати задачі моделювання при кількості вхідних змінних близько 1000.

Можна відзначити такі недоліки:

- масштабованість одержуваної моделі внаслідок можливої зміни або уточнення вхідних даних;
- високі вимоги до повноти і несуперечності вхідних даних.

Проведений аналіз показує, що усім методам моделювання, які на сьогодні можуть бути використані для розв'язку задачі вибору і побудови моделі прогнозування електроспоживання, притаманні певні недоліки, що обмежують їх застосування. Зокрема, моделі, побудовані на методі ГА, мають тенденцію сходиться до локального мінімуму, структури ШНМ необхідно формувати попередньо, класичний регресійний аналіз не враховує змінну часу, точність синтезованих моделей для МГВА залежить від обсягів вхідних початкових даних.

У результаті підтверджується теза про неможливість побудови універсальної оптимальної моделі, позбавленої всіх недоліків розглянутих методів моделювання.

На сьогодні, перевагу віддають ШНМ та МГВА, який дозволяє отримувати формалізовану модель із даних з урахуванням змінної часу, і таким чином дозволяє створювати, як короткострокові, так і довгострокові прогнози.

1.5 Огляд алгоритмів для розв'язання задачі розподілу електричної енергії.

Задача оптимального розподілу електричної енергії полягає у розв'язку транспортної задачі (Transportation theory), яка є однією із задач лінійного програмування. Розробка загальних методів розв'язування задач лінійного програмування і їх математичне дослідження викладене у роботах Л. В. Канторовича [16]. Основний метод розв'язування цієї задачі – симплекс метод – опублікував у 1949 році Дж. Данциг. Транспортну задачу також досліджували М. К. Гавурін, Т. Купманс.

Транспортну задачу можна сформулювати наступним чином:

Нехай у m пунктах X_1, X_2, \dots, X_m виробляється однорідна продукція. Обсяги виробництва цієї продукції в пункті X_i дорівнює x_i одиниць, де $i = \{1 \dots m\}$. Вироблена у пунктах виробництва продукція повинна бути доставлена до n пунктів споживання Y_1, Y_2, \dots, Y_n . Обсяги споживання у пункті Y_j становлять y_j одиниць продукції, де $j = \{1 \dots n\}$. Вважається, що транспортування продукції можливе з будь-якого пункту виробництва X_i у будь-який пункт споживання Y_j . Транспортні витрати, що припадають на перевезення одиниці продукції з пункту X_i в пункт Y_j , складають z_{ij} одиниць. Задача полягає в організації такого плану перевезень, при якому сумарні транспортні витрати були б мінімальними.

Умови транспортної задачі можна подати в вигляді матриці транспортних витрат, представленої у таблиці 3.1:

Таблиця 1.2 – Матриця транспортних витрат

	y_1	y_2	...	y_n
x_1	z_{11}	z_{21}	...	z_{n1}
x_2	z_{21}	z_{22}	...	z_{n2}
...
x_m	z_{m1}	z_{m2}	...	z_{mn}

Результатом розв'язку задачі буде матриця обсягів транспортування продукції представлена у таблиці 3.2:

Таблиця 1.3 – Матриця обсягів транспортування

	y_1	y_2	...	y_n
x_1	v_{11}	v_{21}	...	v_{n1}
x_2	v_{21}	v_{22}	...	v_{n2}
...
x_m	v_{m1}	v_{m2}	...	v_{mn}

Елемент v_{mn} цієї матриці містить значення обсягу продукції, що буде транспортуватися від виробника m до споживача n .

Матриця обсягу транспортування продукції описує план перевезень продукції.

У транспортній задачі розглядають два плани перевезень: опорний та оптимальний.

Опорний план описує транспортування усього обсягу виробленої продукції від виробників до споживачів. Оптимальний план описує план транспортування, при якому, витрати на транспортування продукту є мінімальними.

Для розв'язання задачі спершу знаходять опорний план транспортування та у подальшому покращують його до оптимального.

Для знаходження опорного плану використовують: метод мінімального елемента, метод подвійної переваги, метод північно-західного кута, метод (апроксимації) Фогеля, метод диференціальних рент.

У методі мінімального елемента, усі витрати на перевезення продукту впорядковують у порядку зростання і в цій послідовності будують матрицю транспортування для опорного плану .

Для цього, елементам матриці транспортування присвоюють значення, що відповідають найбільшим можливими значенням обсягу транспортування, починаючи з елемента, якому відповідають найменші транспортні витрат у матриці транспортних витрат.

Нехай задано таку матрицю транспортних витрат, див. таблиця 3.2:

Таблиця 1.4 – Приклад матриці транспортних витрат

	8	9	13	8	12
19	5	15	3	6	10
21	23	8	13	27	12
10	30	1	5	24	25

Впорядкуємо витрати на транспортування z_{mn} із матриці транспортних витрат у порядку зростання значення цих витрат: 1,3, 5, 6, 10, 12, 13, 15, 23, 24, 25, 27, 30.

У визначеному порядку побудуємо матрицю обсягів транспортування продукції, див. таблиця 3.3, і кожному елементу цієї матриці присвоїмо максимально можливий обсяг транспортування продукції від виробника.

У результаті, отримаємо опорний план транспортування продукції, нульові значення у якому вказуватимуть, що продукція від виробника до споживача не постачатиметься.

Таблиця 1.5 – Матриця обсягів транспортування продукції, отримана методом мінімального елемента.

	8	9	13	8	12
19	6	1	13	0	0
21	2	0	0	7	12
10	0	9	0	1	0

Ще одним з методів розв'язку задачі є метод подвійної переваги.

Перед початком заповнення матриці обсягів транспортування, у матриці транспортних витрат визначають елементи, які мають найменші витрати на транспортування у рядках і стовпчиках матриці. Матрицю обсягів починають заповнювати з елементів, позначених двічі (як мінімальні і в рядку, і в стовпчику). Далі заповнюють елементи, позначені один раз (або у рядку, або у стовпчику), а вже потім – за методом мінімального елемента.

Задачу можна розв'язати також методом північно-західного кута.

У цьому методі, на кожному кроці розглядають перший з ще повністю нерозподілених виробників і перший з ще повністю незабезпечених споживачів. Значення елементам матриці обсягів починаємо присвоювати від елемента z_{11} і закінчуємо елементом z_{mn} матриці витрат. У таблиці 3.4 наведено результат отриманий методом північно-західного кута із матриці транспортних витрат наведеній у таблиці 3.3.

Таблиця 1.6 – Матриця обсягів транспортування продукції, отримана методом північно-західного кута.

	8	9	13	8	12
19	8	9	2	0	0
21	0	0	11	8	2
10	0	0	0	0	10

Цей результат відрізняється від результату отриманого методами найменшого елемента та методом подвійної переваги.

Для розв'язку задачі може використовуватися також метод апроксимації Фогеля. За цим методом на кожному кроці визначають різницю між двома найменшими вартостями в кожному рядку і стовпчику транспортної таблиці. Ці різниці записують у спеціально відведених місцях таблиці. Серед усіх різниць вибирають найбільшу і у відповідному рядку чи стовпчику заповнюють клітинку з найменшою вартістю. Якщо однакових найбільших різниць кілька, то вибирають

будь-який відповідний рядок або стовпчик. Коли залишається незаповненим лише один рядок або стовпчик, то обчислення різниць припиняють, а таблицю продовжують заповнювати за методом мінімальної вартості.

Після побудови першого опорного плану одним із розглянутих методів у таблиці має бути заповнено $(m + n - 1)$ клітинок, де m – кількість постачальників; n – кількість споживачів у задачі, у тому числі фіктивних. Такий план називають не виродженим. Якщо кількість заповнених клітинок перевищує $(n + m - 1)$, то початковий план побудовано неправильно і він є неопорним. Ознакою опорності плану транспортної задачі є його ациклічність, тобто неможливість побудови циклу. Циклом у транспортній задачі називають замкнену ламану лінію, вершини якої розміщуються в заповнених клітинках таблиці, а сторони проходять уздовж рядків і стовпчиків таблиці.

Якщо заповнених клітинок у таблиці менш як $(m + n - 1)$, то опорний план називають виродженим. У такому разі необхідно заповнити відповідну кількість порожніх клітинок, записуючи в них "нульове перевезення", але так, щоб при цьому не порушилася ациклічність плану.

Опорний план перевіряють на оптимальність за допомогою потенціалів u_i та v_j відповідно постачальників та споживачів.

За допомогою розрахованих потенціалів перевіряють умову оптимальності $u_i + v_j \leq c_{ij}$ для порожніх клітинок таблиці. Якщо хоча б для однієї клітинки ця умова не виконується, тобто $u_i + v_j > c_{ij}$, то поточний план є неоптимальним і від нього необхідно перейти до нового опорного плану.

Перехід від одного опорного плану до іншого виконують заповненням клітинки, для якої порушено умову оптимальності. Якщо таких клітинок кілька, то для заповнення вибирають таку, що має найбільше порушення, тобто $u_i + v_j - c_{ij}$. Для вибраної порожньої клітинки будують цикл перерахування та виконують перерозподіл продукції в межах цього циклу за такими правилами:

– кожній вершині циклу приписують певний знак, причому вільній клітинці – знак "+", а всім іншим по черзі – знаки "-" та "+";

– у порожню клітинку переносять менше з чисел x_{ij} , що стоять у клітинках зі знаком "-". Одночасно це число додають до відповідних чисел, які розміщуються в клітинках зі знаком "+".

Отже, клітинка, що була вільною, стає заповненою, а відповідна клітинка з мінімальним числом x_{ij} вважається порожньою. У результаті такого перерозподілу продукції, дістанемо новий опорний план транспортної задачі.

Новий опорний план перевіряють на оптимальність, як описано раніше.

Ще одним способом є метод диференціальних рент.

За цим способом спочатку найкращим способом розподіляють частину продукту (умовний оптимальний розподіл), а на наступних кроках зменшують величину нерозподілених продуктів.

Спершу, у кожному з стовпчиків знаходять мінімальний тариф. Знайдені значення позначають і елементи матриці з ними заповнюють максимально можливими числами. У результаті отримують певний розподіл, який у більшості випадків не задовольняє обмеженням задачі.

Далі визначають додатні і від'ємні рядки. Рядки, що відповідають виробникам запаси яких розподілені, а потреби споживачів не задоволені, вважають від'ємними. Рядки, запаси яких повністю не вичерпані, вважають додатними.

Далі знаходять різницю між позначеним значенням і найближчим до нього тарифом у додатному рядку. Якщо позначене значення знаходиться у додатному рядку, то різницю не шукають. Серед знайдених чисел шукають найменше. Воно називається проміжною рентою.

Тепер переходять до нової матриці. Цю матрицю отримують із попередньої додаванням до тарифів у від'ємних рядках проміжної ренти. Решта тарифів зберігається. Матрицю з новими тарифами заповнюють спочатку. В цій матриці число заповнених елементів буде на одну більше. Далі процедуру повторюють поки не буде розподілений весь продукт. В цьому випадку приходять до оптимального плану. Заповнення починають з рядків (стовпчиків), які мають

тільки одну позначку. При переході до нової матриці, перед усім, заповнюють елементи з новими позначками.

1.6 Визначення транспортних витрат у розподільчій частині мережі

Для розв'язку транспортної задачі, необхідно визначити транспортні витрати.

Мережа електропостачання складається із однієї транспортної мережі та багатьох, приєднаних до неї, розподільчих мереж електропостачання.

Будова типової розподільчої мережі електропостачання показана на рисунку 1.

Ця схема може бути представлена у вигляді дерева, коренем якого є точка приєднання цієї розподільчої мережі до транспортної мережі, вузлами – точки обліку електричної енергії у мережі, точки встановлення у ній розподільчого устаткування (РУ), виробники та споживачі електричної енергії.

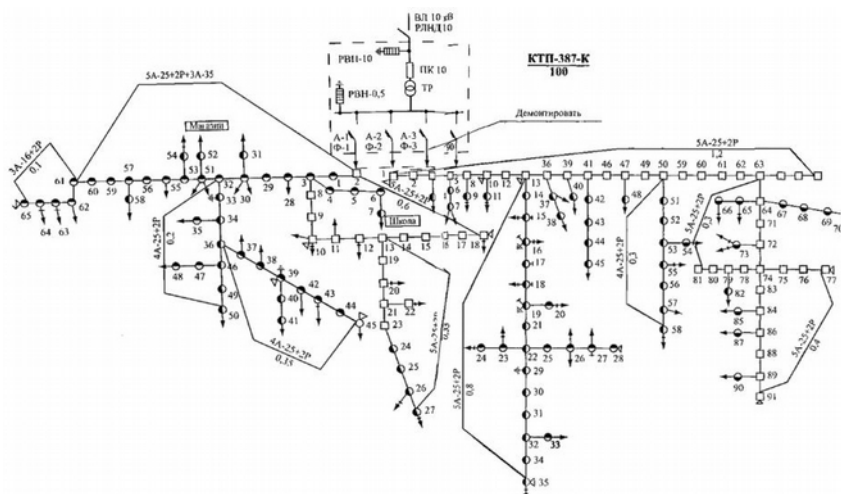


Рисунок 1.3 – Однолінійна схема типової розподільчої мережі електропостачання

Приклад такого дерева наведено на рисунку 3.2.

Виробники та споживачі можуть бути представлені кінцевими вузлами, або листками цього дерева.

Для визначення транспортних витрат, необхідно знайти найкоротший шлях від виробника до споживача продукції.

Ця задача зводиться до задачі пошуку мінімального шляху між визначеними вузлами графа та до задачі пошуку найкоротшого шляху між кінцевими вузлами (листками) дерева.

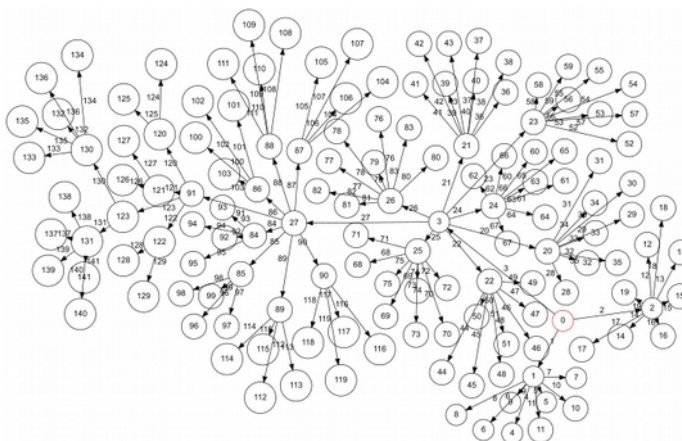


Рисунок 1.4 – Типова розподільча мережа електропостачання представлена у вигляді дерева

Задача знаходження найкоротшого шляху дерева може бути розв'язана як задача пошуку найменшого спільного предка на дереві (LCA, Lowest common ancestor) для двох визначених кінцевих вершин (листіків) дерева.

Найменшим спільним предком вершини u та вершини v в кореневому дереві T вважається найвіддаленіша від кореня дерева вершина, що лежить на обох шляхах від u та v до кореня дерева, тобто є предком обох вершин.

Таким чином, сума шляхів від вершини u до її спільного предка з вершиною v та шляху від цього спільного предка до вершини v буде найкоротшим шляхом від вершини. Ця задача може бути розв'язана такими методами:

Простим алгоритмом для знаходження найменшого спільного предка є алгоритм, який полягає у тому, щоб обчислити глибину вершин u і v і поступово

підійматися у дереві з кожної вершини вгору, поки не буде знайдено спільну вершину:

```

Процедура LCA ( u , v ) :
// depth ( x ) = глибина вершини x
  h1: = depth ( u )
  h2: = depth ( v )
  while h1 <> h2:
    if h1 > h2:
      u  := parent ( u )
      h1: = h1 - 1
    else :
      v  := parent ( v )
      h2: = h2 - 1
  while u ≠ v :
    // parent ( x ) – безпосередній предок вершини x
    u  := parent ( u )
    v  := parent ( v )
  return u

```

Час роботи цього алгоритму становить $O(h)$, де h – висота дерева. Крім того, у цьому алгоритмі може бути потрібно виконати передобробку, для того щоб знайти безпосереднього предка для всіх вершин дерева. Такай передобробка вимагає $O(n)$ часу

Ефективнішими алгоритмами пошуку спільного предка є: алгоритм двійкового підйому, офлайновий алгоритм Тарджана (Robert Tarjan), алгоритм Бендера – Фараха-Колтона (Bender, Farach-Colton).

Алгоритм двійкового підйому потребує $O(n \log n)$ часу на передобробка та $O(\log n)$ часу на запит для обчислення найменшого спільного предка двох вершин. Робота алгоритму полягає у тому, щоб обчислити для кожної вершини предка, віддаленого від неї на відстань 2^k для всіх k та використовувати цю інформацію для прискорення наведеного вище простого алгоритму.

Алгоритм Тарджана виконується за час $O(n \alpha(n) + m)$, де m – число запитів. Однак у цьому алгоритмі потрібно, щоб усі запити були доступні заздалегідь, до початку роботи.

Алгоритм Бендера – Фараха-Колтона, вимагає $O(n)$ часу на передобробку та $O(1)$ часу на запит.

1.7 Визначення транспортних витрат у транспортній частині мережі

Розподільча мережа електропостачання приєднується до транспортної мережі. Схема транспортної мережі наведено на рисунку 3.3.

Така мережа може бути представлена у вигляді графа, вершинами або вузлами якого є точки обліку електричної енергії у транспортній мережі, а ребрами – відтинки електричної транспортної мережі із вагою, рівною числовому значенню параметра, за яким будується найкоротший шлях, або кільком таким параметрам.

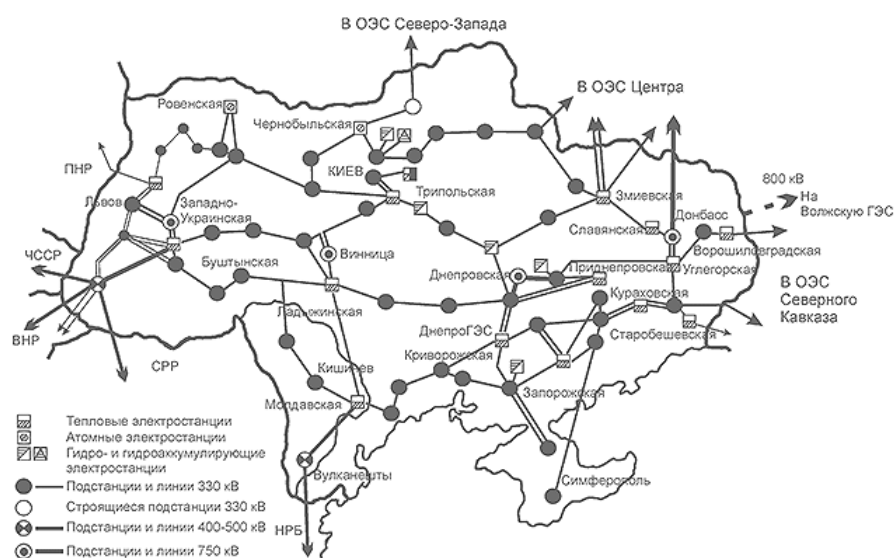


Рисунок 1.5 – Схема транспортної мережі електропостачання

Одним із параметрів є втрати електричної енергії, що виникають при транспортуванні електричної енергії на відтинку мережі.

У теорії графів задача про найкоротший шлях полягає у знаходженні шляху між двома вершинами або вузлами такого графу, що сума ваги ребер з яких він складається є мінімальною.

Таку задачу називають – задачею про найкоротший шлях між парою вершин.

У теорії графів також розглядаються:

– задача про найкоротші шляхи з одного входу, у якій потрібно знайти найкоротші шляхи між вхідною вершиною v та всіма іншими вершинами графа;

– задача про найкоротші шляхи з одним виходом, у якій потрібно знайти найкоротші шляхи з усіх вершин графа до однієї вихідної v (вона може бути зведена до задачі з одним входом, шляхом зміни ваги ребер графа на зворотню);

– задача про найкоротші шляхи для всіх пар (тут потрібно знайти найкоротші шляхи між кожною парою вершин v, v' у графі).

Найважливішими алгоритмами для розв'язання задачі пошуку найкоротшого шляху є:

– алгоритм Дейкстри, з допомогою якого розв'язується задача з однією парою – одним входом і одним виходом;

– алгоритм Беллмана-Форда, з допомогою якого розв'язується задача з одним входом, якщо ребра можуть мати від'ємну вагу;

– алгоритм пошуку A^* , з допомогою якого розв'язується задача для однієї пари із використанням евристики, що дозволяє пришвидшити пошук;

– алгоритм Флойда-Воршелла, з допомогою якого розв'язується задача для всіх пар;

– алгоритм Джонсона, який розв'язує задачу для всіх пар, і може бути швидшим за алгоритм Флойда-Воршелла на розріджених графах;

– теорія збурень, що в найгіршому випадку знаходить локально найкоротший шлях.

Знаходять широке застосування також і удосконалені алгоритми:

- D* (Dynamic A *) – переобчислює шлях у процесі зміни графа;
- Focused D* – цілеспрямований D*;
- LPA* (Lifelong Planning A*, Планування впродовж життя A*) ;
- D*-Lite (легкий D*) – подальше удосконалення методів із LPA*;
- MTD *-Lite.

Алгоритм Дейкстри (англ. Dijkstra) знаходить довжини найкоротших шляхів із заданої вершини s до всіх інших в орієнтованому зваженому графі $G = (V, E)$, Вага ребер цього графа є невід'ємною і визначається ваговою функцією $w : E \rightarrow \mathbb{R}$,

В алгоритмі визначається множина вершин U , для яких вже обчислено довжини найкоротших шляхів до них від заданої вершини s . На кожній ітерації основного циклу вибирається вершина $u \notin U$, якій, на поточний момент, відповідає мінімальна оцінка найкоротшого шляху. Вершина u додається у множину U і виконується оцінювання для всіх вихідних із неї ребер.

Алгоритм A* (англ. A star) – алгоритм пошуку, який знаходить у зваженому графі маршрут найменшої вартості від початкової вершини до обраної кінцевої [17].

Він працює подібно алгоритму Дейкстри і переглядає поміж усіх маршрутів, які ведуть до цілі, спочатку ті, які у цей момент є найкращими, завдяки наявній інформації з евристичної функції.

Цей алгоритм належить до поінформованих алгоритмів пошуку, гарантує отримання кращого з можливих рішень і завжди знаходить рішення, якщо таке існує.

У процесі роботи алгоритму, для вершин обчислюється функція:

$$f(v) = g(v) + h(v) \quad (1.1)$$

де: $g(v)$ – найменша вартість шляху в v з початкової вершини;

$h(v)$ – евристичне наближення вартості шляху від v до кінцевої цілі.

Функція $f(v)$ визначає довжину шляху до мети, яка складається з пройденої відстані $g(v)$ та відстані $h(v)$, що залишилася. Таким чином, чим менше значення $f(v)$, тим раніше буде досягнута вершина v , через яку, можливо, буде побудовано шлях до кінцевої вершини за коротшим маршрутом. Пройдені алгоритмом вершини зберігаються у списку за пріоритетом обчисленого у $f(v)$ значення.

Для того, щоб A^* був оптимальним, обрана функція $h(v)$ повинна бути допустимою евристичною функцією, тобто такою, щоб значення $h(v)$ для будь-якої вершини v було менше або дорівнювало вазі найкоротшого шляху від v до цілі.

Крім того, функція $h(v)$ повинна бути монотонною, тобто, для будь-якої вершини v_1 і її наступної вершини v_2 , різниця між $h(v_1)$ та $h(v_2)$ не повинна перевищувати ваги ребра $c(v_1, v_2)$ від v_1 до v_2 , а евристична оцінка для кінцевої вершини повинна дорівнювати нулю.

LPA^* – версія алгоритму A^* , яка адаптується до змін у графі без переобчислення всього графа [17]. Робота цього алгоритму полягає у наступному:

Задано зважений орієнтований граф $G(V, E)$ та його вершини – початкова вершина f та кінцева вершина t . Потрібно після кожної зміни графа G обчислювати функцію $g(s)$ для кожної відомої вершини $s \in V$.

Функція $g(s)$ повертає найменшу вартість шляху від вершини f до s . Її значення для алгоритму буде подібним її значенню в алгоритмі A^* , за винятком того, що у LPA^* алгоритмі використовуються значення цієї функції лише для відомих вершин на кожній ітерації.

Для кожної вершини розглядається дві множини суміжних з нею вершин:

множина $Succ(s) \subseteq V$ – вершини, що виходять із вершини;

множина $Pred(s) \subseteq V$ – вершини, що входять у вершину s .

Функція $c(s, s')$ повертає вартість ребра (s, s') у діапазоні від 0 до $+\infty$

При цьому $c(s, s') = +\infty$ тоді, коли ребра (s, s') не існує.

Функція $rhs(s)$ (англ. right-hand side value) повертає потенційно мінімальну відстань від f до s за такими правилами:

$$\text{rhs}(s) = 0, \text{ якщо } s = f \quad (1.2)$$

$$\text{rhs}(s) = \min(g(s') + c(s', s)) \text{ для } s' \in \text{Pred}(s), \text{ якщо інакше.}$$

Оскільки, rhs-значення використовує мінімальне значення серед мінімальних відстаней від f до тих вершин, що входять в дану вершину s , то воно надаватиме інформацію про оцінкову відстань від f до s .

Нехай вершина s називається:

насиченою (англ. *locally consistent*), якщо $g(s) = \text{rhs}(s)$;

переповненою (англ. *locally overconsistent*), якщо $g(s) > \text{rhs}(s)$;

ненасиченим (англ. *locally underconsistent*), якщо $g(s) < \text{rhs}(s)$.

Якщо всі вершини графа є насиченими, то ми можемо знайти відстань від стартової вершини до будь-якої іншої. Такий граф називають стійким (насиченим).

Евристична функція $h(s, s')$ повинна бути невід'ємною і виконувати нерівність трикутника, тобто:

$$h(s, s) = 0 \text{ та } h(s, t) \leq c(s, s') + h(s', t) \text{ для всіх } s \in V \text{ та } s' \in \text{Succ}(s) \quad (1.3)$$

Focused D* (Цілеспрямований D*) – евристичний алгоритм, що поєднує методи із A* та оригінального алгоритму D*.

D* Lite (легкий D*) – побудований на основі LPA* евристичний алгоритм, який поєднує методи алгоритму A* та алгоритму динамічного пошуку найкоротшого шляху з однієї вершини – Dynamic SWSF-FP.

1.8 Пошук мінімального шляху з допомогою алгоритму Дейкстри.

Алгоритм Дейкстри дозволяє знайти усі найкоротші шляхи з однієї вибраної вершини графа до всіх інших. Він не дозволяє обробляти графи, в яких є ребра з від'ємною вагою.

Для програмної реалізації алгоритму потрібно створити два масиви: логічний `visited` – для зберігання інформації про відвідані вершини та чисельний `distance`, у який будуть заноситися знайдені найкоротші шляхи.

Нехай, є граф $G = (V, E)$. Кожну з вершин, що входять в множину V , спершу позначають як невіддану. Для цього елементам масиву `visited` присвоюють логічне значення `false`.

Оскільки найвигідніші шляхи ще не знайдено, в кожен елемент вектора `distance` записується число, яке є більшим будь-якого потенційного шляху.

Це число позначає нескінченно довгий шлях, але у програмі можна використовувати максимальне значення для конкретного типу даних.

У якості вихідного пункту вибирається вершина s і у масиві `distance` їй присвоюється нульовий шлях: $distance[s] = 0$, тобто немає ребра, яке зв'язує вершину s з вершиною s , оскільки метод не передбачає петель.

Далі знаходять усі сусідні вершини, які мають з вершиною s спільне ребро (нехай це будуть вершини t і u) і по чергово досліджують, а саме – обчислюють вартість маршруту з вершини s до кожної з них:

$$distance[t] = distance[s] + \text{вага_інцидентного } s \text{ та } t \text{ ребра};$$

$$distance[u] = distance[s] + \text{вага_інцидентного } s \text{ та } u \text{ ребра}.$$

Цілком ймовірно, що з вершини s у ту чи іншу вершину існує кілька шляхів, тому ціну шляху в таку вершину в масиві `distance` доведеться переглядати.

У цьому випадку, більше (неоптимальне) значення ігнорується, а менше ставиться вершині u відповідність.

Після обробки усіх суміжних з вершиною s вершин, вона позначається як відвідана: `visited[s] = true ()`

Активною стає та вершина, шлях до якої з вершини s є мінімальним.

Припустимо, що шлях з вершини s у вершину u є коротшим, ніж від вершини s до вершини t , отже, вершина u стає активною.

Тим самим методом досліджують її сусідів вершини s , за винятком її самої.

Після цього, вершину u позначають як пройдену: $visited[u] = true$

Активною стає вершина t , і вся описана процедура повторюється вже для цієї вибраної вершини.

Алгоритм Дейкстри виконується, допоки не будуть досліджені всі вершини, доступні з вершини s .

Розглянемо роботу алгоритму на вибраному графі, рисунок 3.1, знайдемо всі найкоротші шляхи між вибраною початковою і всіма іншими вершинами.

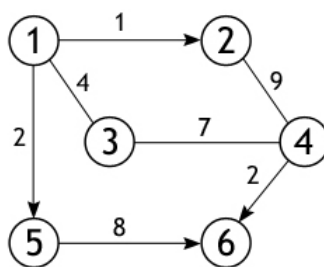


Рисунок 1.6 – стан графу перед початком визначення найкоротшого шляху

Розмір (кількість ребер) зображеного на рисунку 3.1 графа дорівнює 7 ($|E| = 7$), а порядок (кількість вершин) – 6 ($|V| = 6$).

Це зважений граф, кожному з його ребер поставлено у відповідність деяке числове значення, тому вартість маршруту необов'язково визначається числом ребер, що лежать між парою вершин.

З усіх вершин, що входять в множину V , виберемо ту, від якої необхідно знайти найкоротші шляхи до інших доступних вершин.

Нехай це буде вершина 1 (один).

Довжина шляху до всіх вершин, крім першої, спочатку дорівнює нескінченності, а до неї – 0 (нулю), оскільки граф не може мати петель, рисунок 3.2.

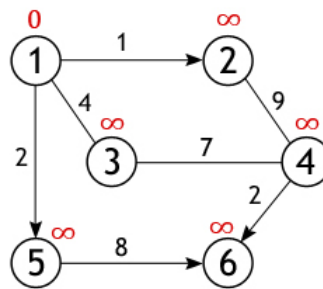


Рисунок 1.7 – довжини шляху на початку роботи алгоритму

Вершина 1 (один) має сусідство з трьома вершинами: 2, 3, 5.

Щоб обчислити довжину шляху до них, потрібно скласти вагу ребер, що лежать між першою вершиною і цими вершинами (1 та 2, 1 та 3, 1 та 5), зі значенням для першої вершини, тобто, з нулем:

$$2 \leftarrow 1 + 0$$

$$3 \leftarrow 4 + 0$$

$$5 \leftarrow 2 + 0$$

Як уже зазначалося, отримані значення присвоюються вершині лише у випадку, якщо ці значення є меншими (оптимальнішими) тих, які вже присвоєні. Оскільки кожне з трьох чисел менше нескінченності, вони стають новими величинами, що визначають довжину шляху з вершини 1 до вершин 2, 3 і 5.

Вигляд графу на цьому кроці наведено на рисунку 3.3.

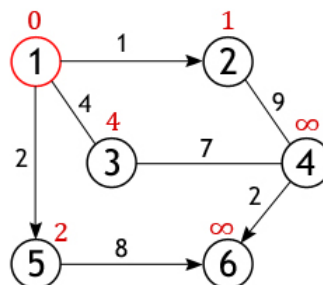


Рисунок 1.8 – визначення довжини шляху з вершини 1

Далі активна вершина позначається як відвідана і активною (червоне коло) стає одна з сусідніх вершин, а саме – вершина 2, оскільки вона найближча до раніше активної вершини, рисунок 3.4.

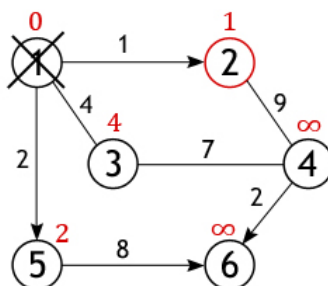


Рисунок 1.9 – визначення довжини шляху з вершини 2

Вершина 2 має лише одну не розглянуту сусідню вершину (вершина 1 позначена як відвідана), відстань до якої від вершини 1 дорівнює 9.

Проте, необхідно обчислити довжину усього шляху від вихідної вершини до вершини 2. Для цього потрібно додати величину присвоєну вершині 2 з вагою ребра від неї до вершини 4: $4 \leftarrow 1 + 9$

Умова меншого значення ($10 < \infty$) при цьому виконується, отже, — вершині 4 присвоюється нове значення довжини шляху, рисунок 3.5.

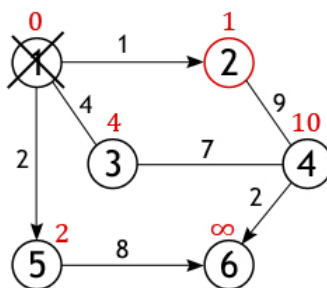


Рисунок 1.10 – визначення довжини шляху для вершини 4

Вершина 2 перестає бути активною, також як і вершина 1 вилучається із переліку не відвіданих вершин. Тепер таким самим способом досліджують вершини, сусідні до вершини 5, і обчислюють відстань до них, рис. 3.6.

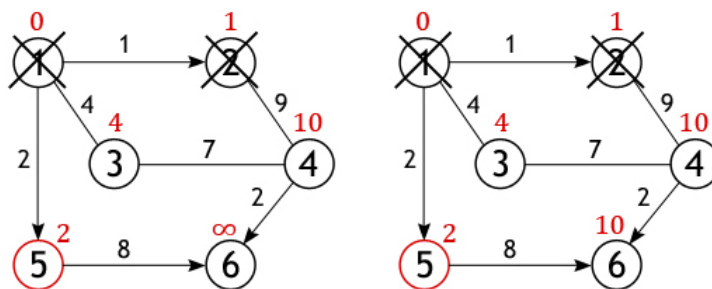


Рисунок 1.11 – визначення довжини шляху для вершини 5

При розгляді вершини 3, буде з'ясовано, що вершина 4 вже була раніше досліджена, і відстань одного з можливих шляхів від початкової вершини до неї вже обчислено.

Якщо рухатися до неї через вершину 3, то шлях складе: $4 + 7 = 11$, а оскільки $11 > 10$, то нове значення присвоєне не буде і залишиться старе – оптимальніше значення, рис. 3.7.

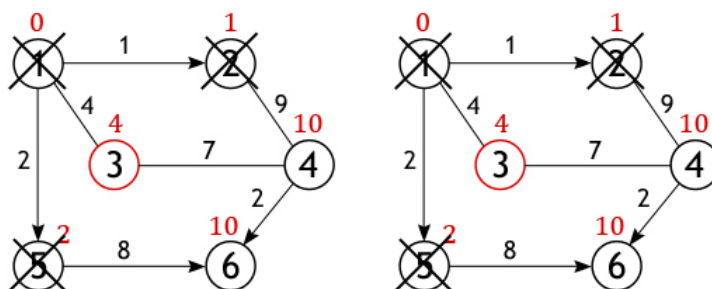


Рисунок 1.12 – визначення довжини шляху з вершини 3

Та ж ситуація складається із вершиною 6. Значення найближчого шляху до неї з вершини 1 дорівнює 10 і цей шлях можливий тільки через вершину 5, рим. 3.8.

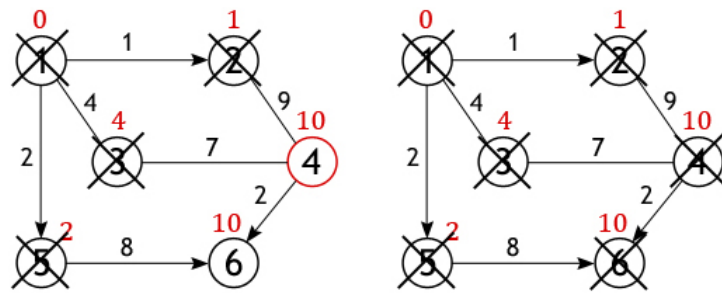


Рисунок 1.13 – визначення довжини шляху з вершини 6

Робота алгоритму Дейкстри завершиться тоді, коли всі вершини графа, або всі ті, що доступні з витоку, будуть позначені як відвідані. При цьому, знайдені шляхи будуть найкоротшими.

Так, наприклад, виглядатиме список найоптимальніших відстаней, що лежать між вершиною 1 і всіма іншими вершинами, розглянутого графа:

$$1 \rightarrow 1 = 0$$

$$1 \rightarrow 2 = 1$$

$$1 \rightarrow 3 = 4$$

$$1 \rightarrow 4 = 10$$

$$1 \rightarrow 5 = 2$$

$$1 \rightarrow 6 = 10$$

У програмі, що знаходить найближчі шляхи між вершинами за допомогою методу Дейкстри, граф можна представити у вигляді масиву, що зберігатиме небінарну матрицю суміжності. У ній, більші від нуля значення вказуватимуть вагу ребер, а нульові значення показуватимуть, що між цими вершинами немає ребер, або ж вони є, але ці ребра спрямовані негативно і не можуть розглядатися.

1.9 Методи розв'язку задач багатокритерійного вибору

Ще однією задачею, яку потрібно розв'язати для пошуку використання ресурсів електромережі, є задача багатокритерійного вибору.

У кожного альтернативного джерела є оптимальні умови роботи, які передбачають його довготривале використання за умови отримання необхідного об'єму енергії. Наприклад, надмірне сонячне опромінення, викликає вигорання фотоелементів сонячних батарей та призводить до зниження їх коефіцієнта корисної дії..

Крім того, у нічний час сонячні батареї не працюють, і навпаки є навантаженням, на якому розсіюється енергія, що також необхідно враховувати при їх експлуатації.

При застосуванні вітрових установок, при надмірній силі вітру або перевищенні допустимої швидкості обертання вітряків, лопаті та внутрішні механічні частини піддаються великому тиску, що також може стати причиною їх виходу з ладу.

Оскільки, працездатність альтернативних джерел суттєво залежить від багатьох факторів, необхідно розробити способи вибору джерела живлення залежно від погодних умов та вимог споживача.

Таким чином, постає задача багатокритерійного вибору, яка може вирішуватися одним із таких методів [18]:

- принцип Парето;
- метод головного критерію;
- метод аналізу ієрархій;
- метод лінійної згортки.

Принцип Парето – це субоптимальне рішення багатокритерійної задачі, знайдене за якимось одним критерієм без урахування інших критеріїв.

Принцип Парето дозволяє звужити множину можливих претендентів на остаточне рішення, обмежившись елементами множини Парето, і виключити з розгляду свідомо неконкурентоспроможні варіанти, а остаточний вибір здійснювати на основі додаткової інформації від особи, що приймає рішення.

Недоліком принципу Парето є те, що він пропонує множину рішень, що не завжди є прийнятним, оскільки, для того, щоб вибрати з неї єдине рішення потрібні додаткові відомості, припущення, домовленість про те, що ж вважати найкращим рішенням (тобто, деяка додаткова інформація).

При застосуванні методу головного критерію в якості цільової функції обирається один з функціоналів і розв'язується однокритерійна задача, в якій інші функціонали беруть участь лише у вигляді обмежень. Застосування такого методу викликає труднощі, пов'язані з можливою наявністю декількох "головних" критеріїв, що знаходяться у протиріччі один з одним.

Основні труднощі, що виникають при формуванні та використанні узагальнених критеріїв, полягають у складності визначення вагових коефіцієнтів, на які покладено функцію адекватного відображення ступеня важливості критерію, його фізичної розмірності і, іноді, інших факторів. До недоліків узагальнених критеріїв також відносять і те, що при оцінці вони не дозволяють враховувати ієрархічну залежність сумарного показника від значень часткових показників.

Враховуючи переваги та недоліки розглянутих методів, для розв'язку багатокритерійної задачі вибору джерела альтернативної енергії доцільно обрати метод лінійної згортки, як найбільш простий у реалізації, але при цьому достатньо об'єктивний. Ідея такого методу полягає в побудові єдиної цільової функції на основі заданої множини цільових функцій.

1.10 Постановка задачі

У роботі потрібно розв'язати такі задачі:

– розробити модель для визначення обсягів генерації електричної енергії сонячною електростанцією;

– вибрати метод моделювання режиму роботи розподільчої мережі електропостачання для визначення можливих обсягів постачання електричної енергії сонячною електростанцією у розподільчу мережу електропостачання, за умови мінімізації витрат на передачу електричної енергії та з врахуванням граничних режимів на ділянках транспортування у такій мережі.

2 РОЗВ'ЯЗОК ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

2.1 Огляд будови мережі електропостачання

На сьогодні, типова система виробітку постачання та споживання електричної енергії має будову наведену на рисунку 3.2

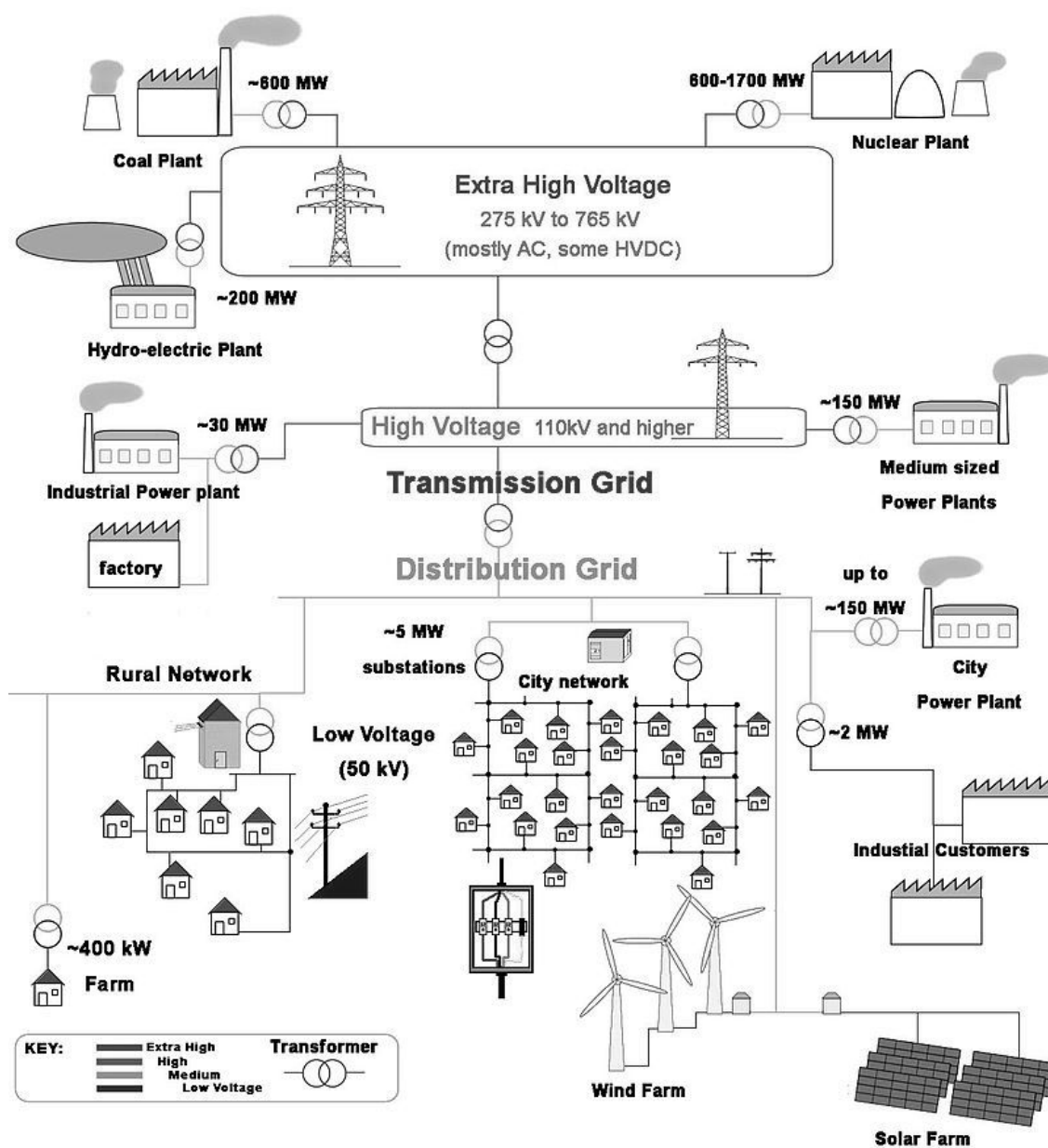


Рисунок 2.1 – типова будова енергетичної системи

Для управління енергетичною мережею на ділянці транспортної мережі використовуються методи прогнозування які базуються на штучних нейронних мережах та на алгоритмах штучної еволюції

Особливістю експлуатації розподільчій мережі є те, що потужність окремого об'єкту цієї мережі є обмеженою, і на сьогодні не може перевищувати 30 кВт. Таке обмеження пов'язане із технічними можливостями таких мереж.

У наслідок цього, вже на сьогодні, кількість окремих виробників електричної енергії, що приєднані до розподільчої мережі електропостачання становить кілька сотень одиниць, а при подальшому розвитку, типова кількість таких об'єктів у окремій розподільчій мережі може зрости до кількох тисяч.

Для кожного такого об'єкта необхідно спрогнозувати виробництво та споживання електричної енергії.

2.1 Розробка моделі прогнозування виробітку електричної енергії сонячною електростанцією

Як вже зазначалося у попередніх розділах, для прогнозування виробітку та споживання електричної енергії можуть використовуватися різні методи. прогнозування виробництва електричної енергії виробниками

Обсяги споживання електричної енергії сонячною електростанцією мають виражену періодичність. Один із періодів має сезонний характер. Мають місце також значні коливання в обсягах виробітку та споживання електричної енергії з періодами 24 години та 7 діб. Спостерігається тенденції зниження споживання, пов'язані з підвищенням середньодобової температури. Отже, однією з особливостей процесу прийняття рішень щодо планування поставок електричної енергії є циклічність та повторюваність.

Щодо наявності такої періодичності можна переконатися на рисунках А.1.. А.2 та Б.1..Б.2.

Розглянемо зміну потужності електричної енергії протягом доби, рис 2.2 із з даних отриманих із сонячної електростанції максимальною потужністю 30 кВт

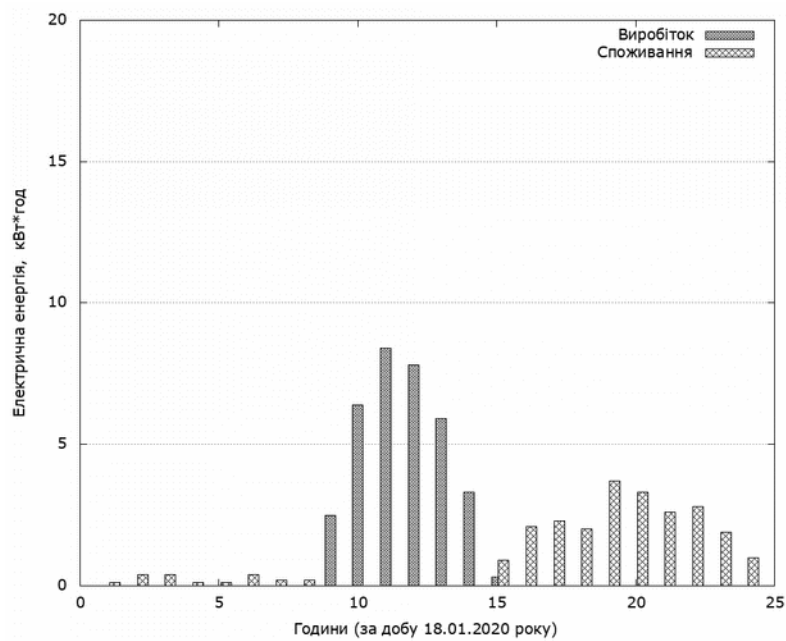


Рисунок 2.2 – зміна потужності сонячної електростанції протягом доби

Зміна потужності СЕС протягом протягом місяця показана на рисунку 2.3.

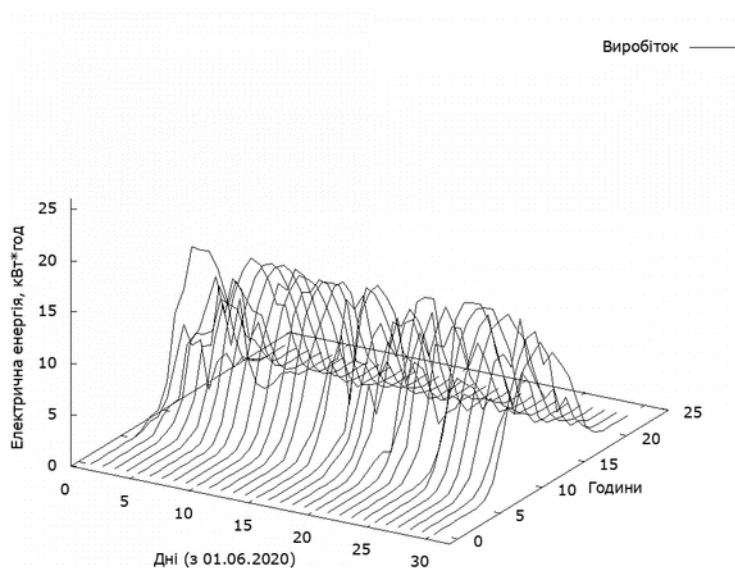


Рисунок 2.3 – зміна потужності сонячної електростанції протягом місяця

Зміна потужності СЕС протягом року показана на рисунку 2.4

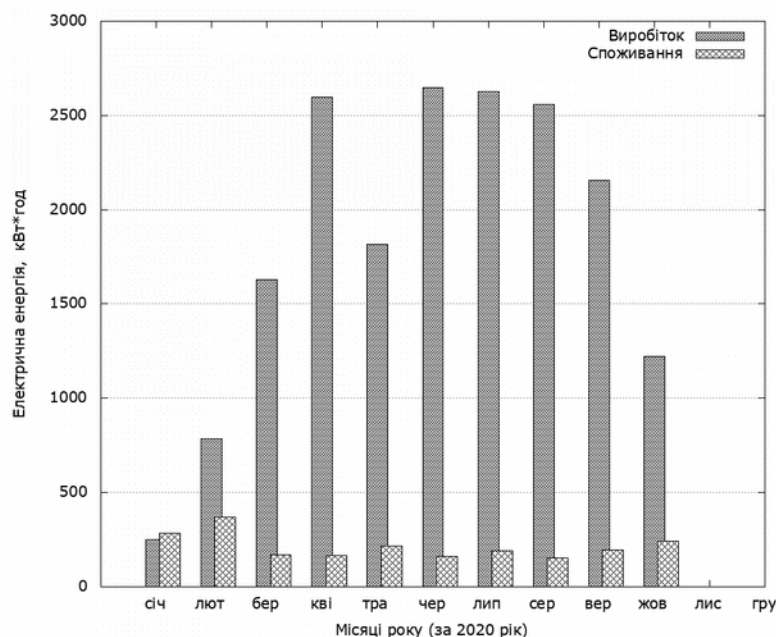


Рисунок 2.4 – зміна потужності сонячної електростанції протягом року

Більше графіків за період одного року наведено у додатках Б, В, Г.

Це дозволяє гіпотетично припустити, що імітаційна модель виробітку електричної енергії СЕС, що забезпечує достатню для оперативного планування точність, може бути представлена у вигляді простої математичної моделі, що описує виробіток електричної енергії сонячною електростанцією у залежності від ступеня інсоляції протягом доби та зміни рівня інсоляції протягом року у такому вигляді:

$$P = k_1 * \sin(k_2 * t + k_3) + k_4 * \sin(k_5 * t + k_6) + k_7, \text{ якщо } P > 0 \quad (2.1)$$

$$P = 0, \text{ якщо } P < 0$$

де: t – час,

k_1 – коефіцієнт, що визначає зміну потужності СЕС протягом доби,

k_2 – коефіцієнт, що встановлює тривалість доби,

k_3 – зміщення у добі,

k_4 – коефіцієнт, що визначає зміну потужності СЕС протягом року,

k_5 – коефіцієнт, що встановлює тривалість року,

k_6 – зміщення у році.

Ця гіпотеза також може бути підтверджена з допомогою аналізу даних із сонячної електростанції з допомогою спектрального аналізу.

Дані з сонячної електростанції, у цьому випадку, розглядаються як сигнал, для якого, з допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ), можна визначити його гармонійні складові. Це може бути описано такою формулою:

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)(\cos(2\pi nm/N) - j \sin(2\pi nm/N)) \quad (2.2)$$

де: $X(m)$ – m -ий компонент ДПФ

m – індекс ДПФ в частотній області, $\{m=0,1,2,3,\dots,N-1\}$

$x(n)$ – послідовність вхідних відліків,

n – часовий індекс вхідних відліків,

N – кількість відліків вхідної послідовності та кількість частотних відліків результату перетворення.

Для реалізації такого перетворення доцільно використовувати алгоритм швидкого перетворення Фур'є.

На рисунку 3.3 наведено отриману амплітудно-частотну характеристику потужності сонячної електростанції.

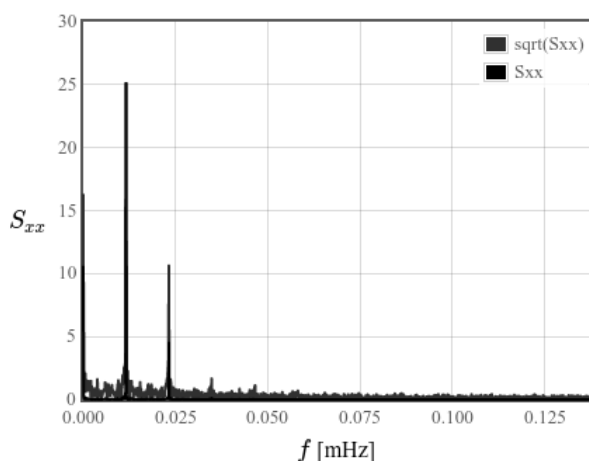


Рисунок 2.5 – амплітудно-частотна характеристика потужності СЕС

Ця амплітудна-частотна характеристика підтверджує присутність у зміні генерованої сонячною електростанцією потужності гармонійних складових і дозволяє стверджувати, що імітаційну модель, що описує обсяги виробітку електричної енергії сонячною електростанцією з більшою точністю, можна представити математичною залежністю 2.2.

Для визначення параметрів цієї моделі може використовуватися метод лінійної регресії.

Для побудови імітаційної моделі запропоновано використовувати такий алгоритм:

Крок 1 Отримати дані про виробіток за попередній період (три доби).

Крок 2 З допомогою методу лінійної регресії побудувати модель виробітку для кожної попередньої доби.

Крок 3 Із отриманих параметрів лінійної регресії для кожної попередньої доби з допомогою методу лінійної регресії отримати прогнозовані параметри імітаційної моделі на наступну добу.

Крок 4 Побудувати імітаційну модель дня наступної доби і обчислити графік виробітку електроенергії.

За результатами досліджень було створено програмну модель сонячної електростанції. Для перевірки цієї моделі використовувалися дані отримані з сонячної електростанції встановленої у місті Харкові за період з 1 січня до 25 листопада 2020 року. Див додатки Б, В, Г.

При порівнянні роботи програмної моделі із реальними даними отримано такі результати:

Date	Time	Predict	Meter
2020-08-05	00:00:00	0.00	0.00
2020-08-05	01:00:00	0.00	0.00
2020-08-05	02:00:00	0.00	0.00
2020-08-05	03:00:00	0.00	0.00
2020-08-05	04:00:00	0.00	0.00

2020-08-05 05:00:00	0.00	0.00
2020-08-05 06:00:00	1.58	0.08
2020-08-05 07:00:00	5.08	1.52
2020-08-05 08:00:00	8.23	3.75
2020-08-05 09:00:00	10.81	8.27
2020-08-05 10:00:00	12.66	12.34
2020-08-05 11:00:00	13.65	14.18
2020-08-05 12:00:00	13.71	14.47
2020-08-05 13:00:00	12.83	14.28
2020-08-05 14:00:00	11.08	12.86
2020-08-05 15:00:00	8.57	10.35
2020-08-05 16:00:00	5.48	7.36
2020-08-05 17:00:00	2.02	3.59
2020-08-05 18:00:00	0.00	1.05
2020-08-05 19:00:00	0.00	0.12
2020-08-05 20:00:00	0.00	0.00
2020-08-05 21:00:00	0.00	0.00
2020-08-05 22:00:00	0.00	0.00
2020-08-05 23:00:00	0.00	0.00
2020-08-06 00:00:00	0.00	0.00

Predict Sum Power =105.71

Meter Sum Power =104.22

Slope = 1.00

Intercept = -0.07

Correlation = 0.96

Model coefficients: k1=13.80 k3=0.11

Equation of best fit is: $y = 1.00 * x + -0.07$

Отримані результати показують, що запропонована імітаційна модель може забезпечити достатню для моделювання точність прогнозування обсягів виробітку електричної енергії сонячною електростанцією.

2.2 Розв'язок задачі оперативного планування виробітку електроенергії

Для розв'язку задачі оперативного планування виробітку електричної енергії сонячною електростанцією запропоновано наступний алгоритм:

Підготовча стадія:

Крок 1.1 Побудувати графову імітаційну модель мережі електропостачання.

Крок 1.2 Виокремити у графі частини із циклами та без циклів (поділити імітаційну модель на центральний граф та приєднані до нього дерева).

Крок 1.3 Визначити втрати на транспортування електричної енергії та граничні навантаження на кожній ділянці (за різницями показів приладів обліку) і присвоїти ці значення ребрам графа та дерев.

Стадія пошуку шляхів передачі електричної енергії у графовій частині мережі

Крок 2.1 Спрогнозувати обсяги виробітку та споживання електричної енергії.

Крок 2.2 Обчислити обсяги електричної енергії, що транспортуватиметься через центральний граф як суму небалансів у деревах.

Крок 2.3 Обчислити загальний небаланс (визначити обсяг електричної енергії, що передаватиметься із мережі або споживатиметься нею із зовні).

Крок 2.4 Присвоїти обчислений небаланс вершині, що позначає точку приєднання електромережі до зовнішньої енергосистеми.

Крок 2.4 Побудувати шляхи передачі електричної енергії як найкоротші шляхи між вузлами графа.

Крок 2.5 Визначити гранично допустимі навантаження для кожного шляху, як найменше значення із множини значень допустимих навантажень на ділянках шляху.

Крок 2.6 Розв'язати транспортну задачу з врахуванням граничних обмежень на транспортування.

Крок 2.7 Визначити навантаження на кожній ділянці транспортування електричної енергії.

Крок 2.8 Визначити перевантажені ділянки.

Крок 2.9 Вилучити (заблокувати) ребра графа, що описують перевантажені ділянки.

Крок 2.10 Повторювати кроки 2.4 .. 2.8, поки мережа матиме перевантажені ділянки.

Крок 3.1 Визначити небаланс у дереві та присвоїти його кореню дерева.

Крок 3.2 Присвоїти листкам дерева спрогнозовані значення виробітку та споживання електричної енергії

Крок 3.2 Усім ребрам дерева присвоїти нульове значення передачі електричної енергії

Крок 3.1 Обійти дерево від кореня у глибину і пронумерувати вузли та ребра дерева.

Крок 3.2 Виконати обхід дерева у ширину від листків до кореня.

Крок 3.3 Обчислити небаланс електричної енергії в кожному вузлі на шляху обходу

Крок 3.4 Присвоїти небаланс ребру, що веде до кореня.

Крок 3.5 Перевірити, що навантаження на ребрах не перевищує гранично допустимі навантаження на ділянки мережі.

Крок 3.6 Перейти на один рівень ближче до кореня.

Крок 3.7 Повторювати кроки 3.2..3.6 поки не буде досягнуто кореня дерева.

Блок-схема для цього алгоритму наведена на рисунку Е.1 у додатках.

Описані методи та алгоритми дозволяють побудувати програмну інформаційну систему для оперативного планування виробітку електричної енергії сонячною електростанцією.

Алгоритм роботи системи:

Крок 1. Отримати дані про виробіток та споживання електричної мережі за попередній період з усіх об'єктів розподільчої мережі.

Крок 2. Визначити прогнозовані обсяги виробітку електричної енергії на наступний період з допомогою запропонованого методу імітаційного моделювання.

Крок 3. Визначити планові обсяги виробітку електричної енергії у наступний період з допомогою запропонованого методу оперативного планування.

На основі описаних алгоритмів були реалізовані програмні модулі для програмної системи автоматизованого обліку енергоресурсів.

3 ОПИС ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

3.1 Опис будови системи автоматизованого обліку енергоресурсів

Проведені дослідження дозволили реалізувати програмний модуль для модуль для вимірювально-обчислювального комплексу автоматизованої системи обліку енергоресурсів Promenergy/E7 ("ВОК АСОЕ Promenergy/E7")

Цей комплекс має клієнт-серверну архітектуру. Компоненти системи взаємодіють між собою з використанням протоколів TCP/IP, HTTPS, SMTP, POP3, SSH та спеціалізованого протоколу УППДВ [додаток 3].

Діаграма розгортання системи наведена на рисунку 3.1.

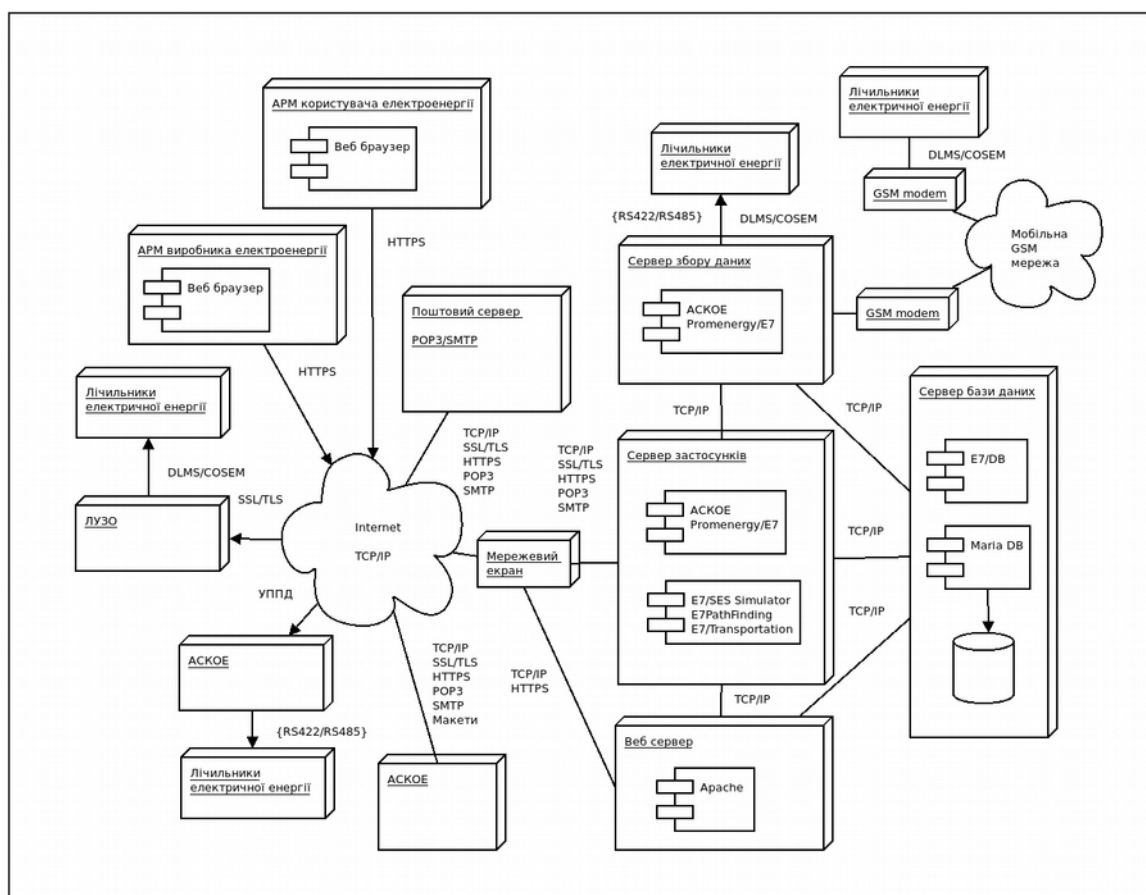


Рисунок 3.1 – діаграма розгортання системи

Користувачі взаємодіють з системою у режимі стандартного Web-доступу. Діаграма варіантів використання наведена на рисунку 3.2.

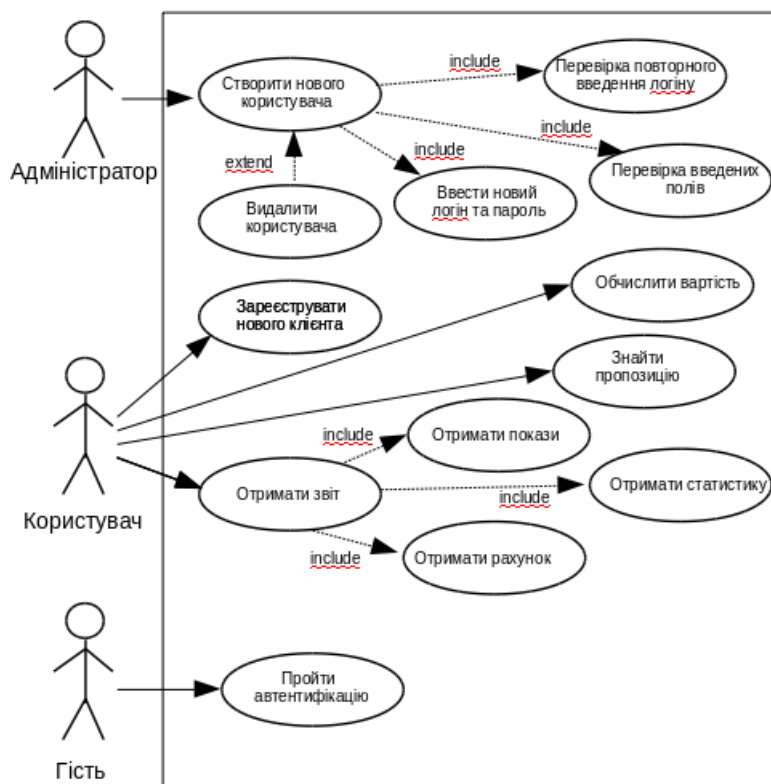


Рисунок 3.2 – діаграма варіантів використання системи

Система має модульну будову та становить собою сукупність програмних модулів призначених для побудови автоматизованої системи комерційного обліку електричної енергії (АСКОЕ). Модулі утворюють функціонально цілісну систему.

До складу Promenergy/E7 входять:

- програмні модулі зчитування даних із пристроїв обліку електричної енергії (e7dev2raw, e7zmb2raw.bin, e7zmd2raw.bin, e7elv2raw.bin, e7dev2raw.bin);
- програмні модулі обробки первинних даних (e7raw2txt, e7zmb2txt.bin, e7zmd2txt.bin, e7elv2txt.bin, e7raw2txt.bin);
- програмні модулі ведення баз даних (e7clk2db, e7pfl2db, e7pfl2db.bin, e7dat2db, e7log2db);
- база даних та завантажувані процедури системи управління базою даних (e7db, e7getsetdata) програмні модулі адміністрування бази даних (e7dbadm);
- форми ведення бази даних;

- програмні модулі формування звітів (e7group, e7query, e7pfl2txt, e7histo.bin);
- програмні модулі керування роботою Promenergy/E7 (e7adm);

Система є розширюваною і у її склад можуть бути додані інші нові модулі.

Діаграма компонентів системи наведена на рисунку 3.3.

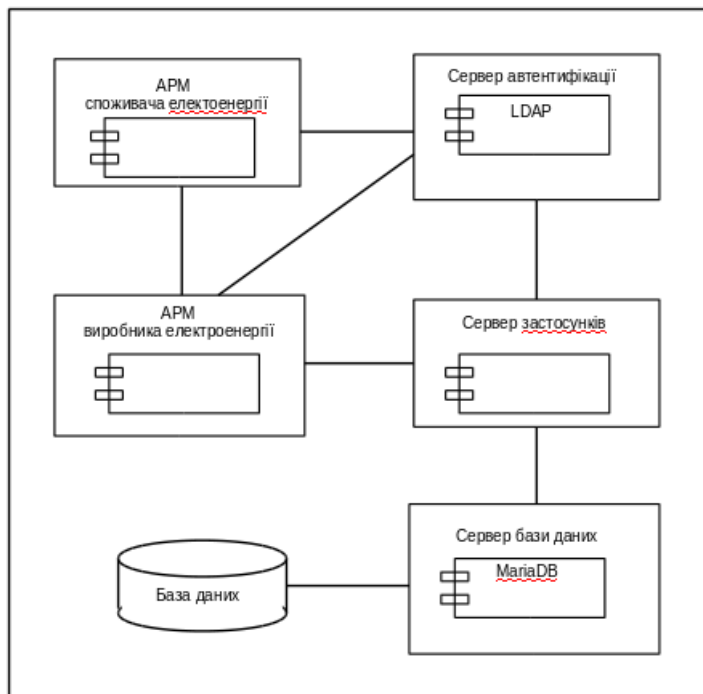


Рисунок 3.3 – діаграма компонентів системи

У системі використовується реляційна база даних, у якій зберігаються дані про структуру локальної системи обліку електричної енергії споживання та генерацію електричної енергії

ER-діаграма бази даних системи наведена на рисунку 3.4.

Система встановлюватися на окремому комп'ютері, що відповідає таким вимогам:

Апаратне забезпечення:

- процесор типу Intel® Xeon® E-2100 або кращий.
- оперативна пам'ять обсягом не менше 2 ГБ
- дискові накопичувачі 2 шт. обсягом не менше 500 ГБ

– порти послідовного введення/виведення (RS232 – 1 шт., RS422 або RS485 – 2 шт.)

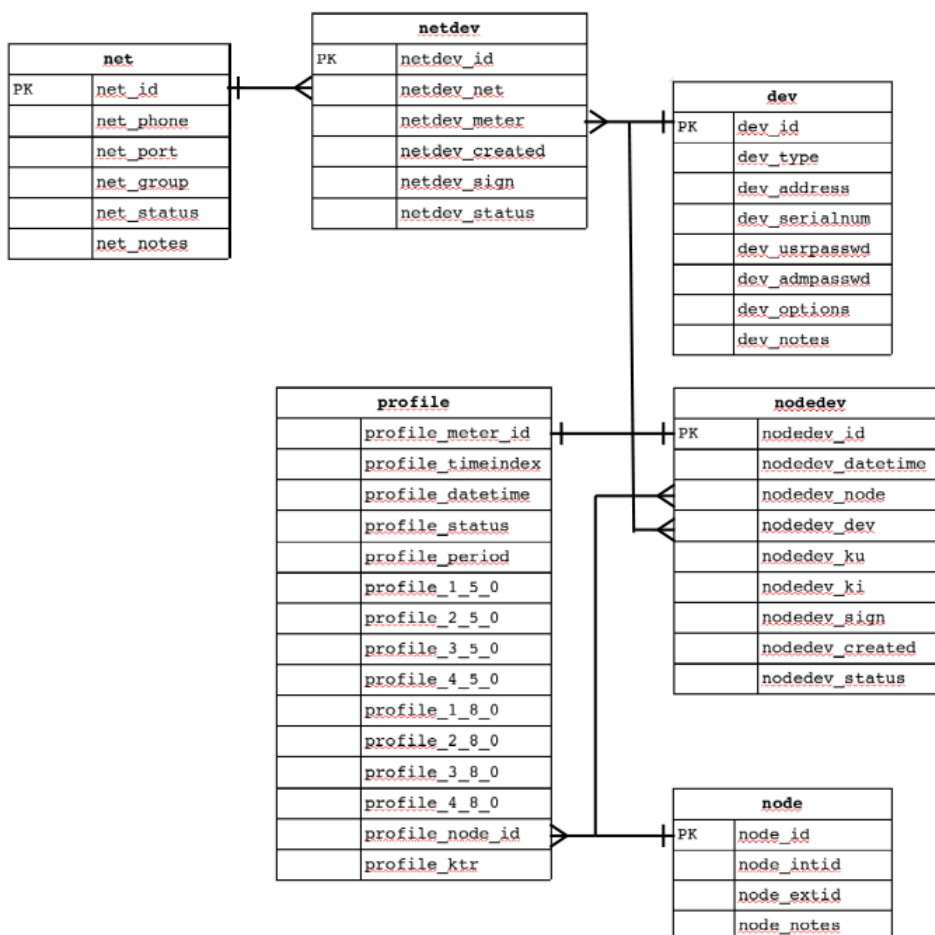


Рисунок 3.4 – діаграма бази даних системи

Система встановлюватися на окремому комп'ютері, що відповідає таким вимогам:

Апаратне забезпечення:

- процесор типу Intel® Xeon® E-2100 або кращий.
- оперативна пам'ять обсягом не менше 2 ГБ
- дискові накопичувачі 2 шт. обсягом не менше 500 ГБ
- порти послідовного введення/виведення (RS232 – 1 шт., RS422 або RS485 – 2 шт.)

Системне програмне забезпечення:

- операційна система – GNU/Linux у складі:
- ядро GNU/Linux версії 2.6.32 або старшої;
- командний інтерпретатор bash версії 4.1;
- служба періодичного запуску процесів cron версії 4.1;
- служба ведення обліку syslog версії 1.4.1;
- служба віддаленого доступу sshd версії 4.3;
- утиліти: chat, date, md5sum, tar, gzip, find;
- інші системні утиліти, утиліти та системні служби необхідні для роботи – операційної системи (ifconfig, route, iptables, udev, upsd тощо).

Базове прикладне програмне забезпечення:

СУБД(SQL) – MySQL версії 5.0.3 (служба mysqld, утиліта mysql тощо).

Веб-служба(HTTP) – mini_httpd версії 1.19(служба mini_httpd, httpasswd).

Програма Promenergy/E7 використовує технологію клієнт-сервер та працює спільно із іншими зовнішніми службами та клієнтськими програмами.

Для роботи Promenergy/E7 в операційній системі сервера повинні бути налаштовані:

- мережа із підтримкою протоколів IP, TCP, UDP, ICMP;
- захист мережі TCP/IP (Firewall) із відкритими для клієнтів TCP,UDP портами http(80), ssh(143), mysql(3306);
- служба періодичного запуску процесів cron;
- служба ведення обліку syslog;
- служба віддаленого доступу sshd;
- Веб-служба (протокол HTTP) із підтримкою CGI;
- служба СУБД mysqld;
- служба керування живленням: upsd, apcd або інша.

Директорія /var або /var/e7 файлової системи повинна мати апаратну або програмну підтримку RAID1.

Комп'ютер повинен житися від системи безперебійного живлення (UPS).

Упродовж встановлення Promenergy/E7 створюється: база даних e7db, директорії /var/e7 та /var/log/e7, спеціальні користувачі з префіксом e7-, спеціальна група e7group, а також вносяться зміни у конфігураційні файли служб cron, syslog, mysqld, mini_httpd та змінюється режими роботи цих служб. Робота інших служб налаштовується адміністратором операційної системи за допомогою системних засобів операційної системи.

На робочих місцях користувачів Promenergy/E7 може бути встановлена будь-яка операційна система, що підтримує роботу у мережі TCP/IP зі встановленими додатками для доступу до даних із Web-серверів через протокол HTTP. Клієнтські додатки повинні підтримувати технології Java Script та SSL. Водночас, підтримується керований доступ до бази даних та завантажених функцій і процедур Promenergy/E7 через засоби доступу до баз даних ODBC або JDBC.

Налаштування роботи програмного забезпечення на робочих місцях користувачів виконується системними засобами встановлених там операційних систем.

3.2 Опис інтерфейсу системи

Вигляд головної сторінки наведено на рисунку 3.5.

Вікно головної сторінки комплексу поділене по горизонталі на дві частини – ліву та праву рамки.

Ліва рамка є навігатором системи.

У ній містяться:

- закладки із переліком груп точок обліку;
- закладка доступу до налаштувань комплексу – "ПАРАМЕТРИ";
- закладка оновлення відображення даних – "ОНОВИТИ";

– закладки доступу до довідкової інформації про комплекс – "Про програму".

Вміст правої рамки залежить від вибраної у лівій рамці закладки.

Перелік груп точок обліку має два рівні.

На першому рівні виводиться перелік груп (див.: Газоросподіл. ст., Берегова насосна, Гребля тощо).

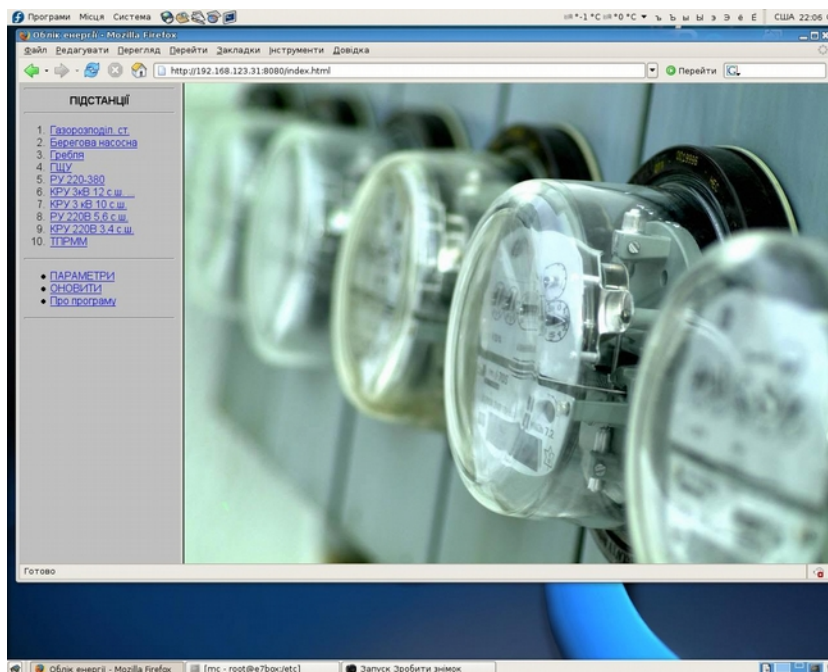


Рисунок 3.5 – головне вікно "PromEnergy/E7" у браузері Mozilla Firefox

Другий рівень містить перелік точок обліку для вибраної групи (див.: будинки, гребля).

Якщо у лівій рамці вибрано одну із точок обліку, то у правій рамці показуються:

- дані для цієї точки обліку;
- гістограма споживання активної енергії за останні дві доби;
- форма для формування запитів до бази даних комплексу.

Стовпчики гістограми є активними елементами.

Вказуючи курсором на потрібний вам стовпчик гістограми, можна одержати дані щодо споживання електричної енергії за цей проміжок інтеграції (див. 21.03.2008 04:00 4,933 kW).

Під гістограмою знаходиться форма для формування запитів до бази даних комплексу.

Форма дозволяє отримати:

- покази вибраного пристрою обліку (див. позначка "Покази");
- профілі показів пристроїв обліку для вибраної точки обліку (див. позначка "Профілі");
- графічне відображення профілів показів у вигляді гістограм (див. позначка "Гістограми");
- покази вбудованого годинника пристрою обліку та годинника комп'ютерної системи (див. позначку "Годинник");
- перелік подій зафіксованих пристроєм обліку (див. позначка "Журнал");

Щоб отримати дані щодо споживання електричної енергії потрібно:

- вибрати потрібну точку обліку в лівій рамці;
- заповнити у правій рамці поля форми "Період від" та "до" у форматі дати – ДД/ММ/РРРР, форматі часу – ГГ:ХХ;

встановити позначки біля необхідних параметрів, якщо потрібно побачити або приховати деяку частину даних;

натиснути кнопку "ОТРИМАТИ".

Позначка "Покази" дозволяє отримати зчитані покази пристроїв обліку за вибраний період у вигляді таблиці.

Параметри показів мають позначення наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – позначення параметрів електричної енергії

Позначення	Опис параметра
1.8.0	активна енергія у кВт*год, спожита протягом усього періоду обліку
2.8.0	активна енергія у кВт*год, згенерована протягом усього періоду обліку
3.8.0	реактивна енергія у кВАр*год, спожита протягом усього періоду обліку
4.8.0	реактивна енергія у кВАр*год, згенерована протягом усього періоду обліку
1.8.1	активна енергія у кВт*год, спожита у першій часовій зоні протягом усього періоду обліку
2.8.1	активна енергія у кВт*год, згенерована у першій часовій зоні протягом усього періоду обліку
3.8.1	реактивна енергія у кВАр*год, спожита у першій часовій зоні протягом усього періоду обліку
4.8.1	реактивна енергія у кВАр*год, згенерована у першій часовій зоні протягом усього періоду обліку

При потребі, перелік показів можна доповнити і іншими показами, що підтримуються встановленими на об'єктах пристроях обліку.

Позначка "Профіль" дозволяє отримати дані у вигляді таблиці із вибраними стовпчиками, рисунок 3.6.

Позначка "К транс." дозволяє отримати дані із врахуванням коефіцієнта трансформації вимірювальних трансформаторів.

Щоб заповнити поля "Період.." потрібно ввести потрібні значення дат та часу із клавіатури, або вказати потрібний період за допомогою кнопок: "За минулі: добу, тиждень, місяць, рік". Ці кнопки дозволяють швидко заповнити поля значеннями, що охоплюють останні 24 години, 7 днів, місяць, рік.

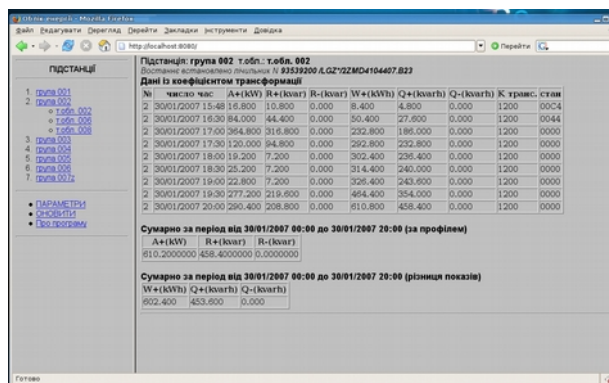


Рисунок 3,6 – вікно PromEnergy/E7 із даними профілю точки обліку "Гребля" у вигляді таблиці.

Таблиця "Сумарно за період.. (за профілем)" містить сумарне споживання енергії за вибраний період, обчислене як сума спрожитої енергії за всі проміжки інтеграції пристрою обліку протягом вибраного періоду.

Таблиця "Сумарно за період.. (різниця показів)" містить сумарне споживання енергії за вибраний період, обчислене як різниця показів пристроїв обліку наприкінці та на початку вибраного періоду.

Позначка "Гістограми" дозволяє отримати ті ж дані подані у вигляді графіків-гістограм.

На рисунку 3ю7 наведено гістограму для активної складової електричної енергії.

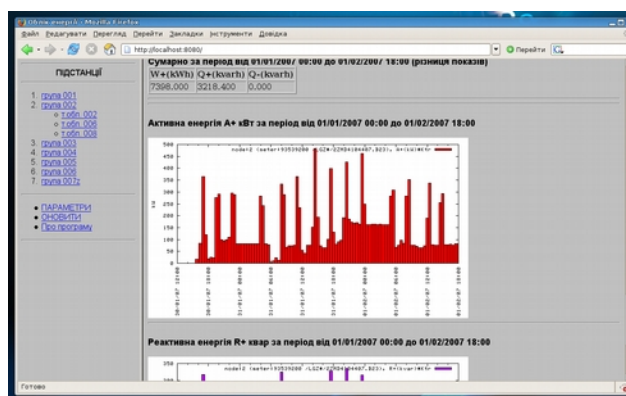


Рисунок 3,7 – вікно PromEnergy/E7 із даними профілю точки обліку "Гребля" у вигляді гістограми (активна енергія).

На рисунку 3.8 наведено гістограму для реактивної складової електричної енергії.

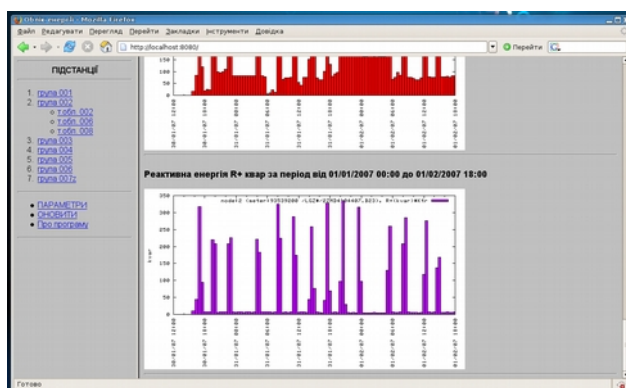


Рисунок 3.8 – вікно PromEnergy/E7 із даними профілю точки обліку "Гребля" у вигляді гістограми (реактивна енергія).

Позначка "Годинник" дозволяє отримати покази вбудованого годинника пристрою обліку та годинника комп'ютерної системи, рисунок 3.9.

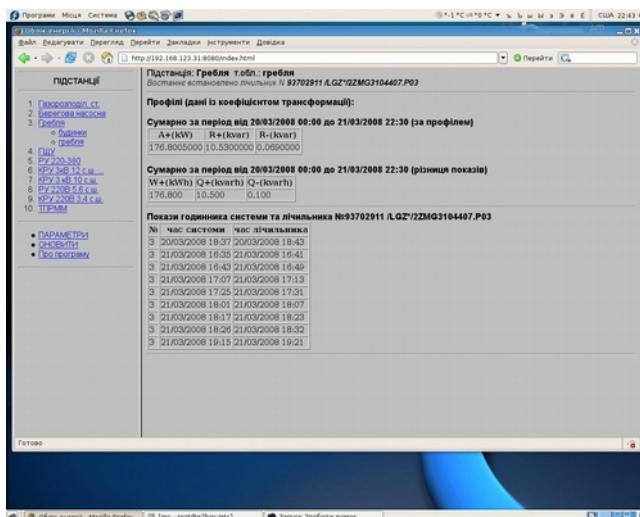


Рисунок 3.9 – вікно PromEnergy/E7 із таблицею показів вбудованого годинника пристрою обліку

Закладка "Макети" відкриває у правому вікні форму для роботи із макетами, рис. 3.10.

Кнопки форми дозволяють створити перевірити та відіслати макети. Кнопка "Скинути" заповнює поля форми із бази даних.

Кнопка "Скоригувати" коригує поля форми за вбудованим алгоритмом. Кнопка "Перевірити" перевіряє за вбудованим алгоритмом поля форми на коректність даних.

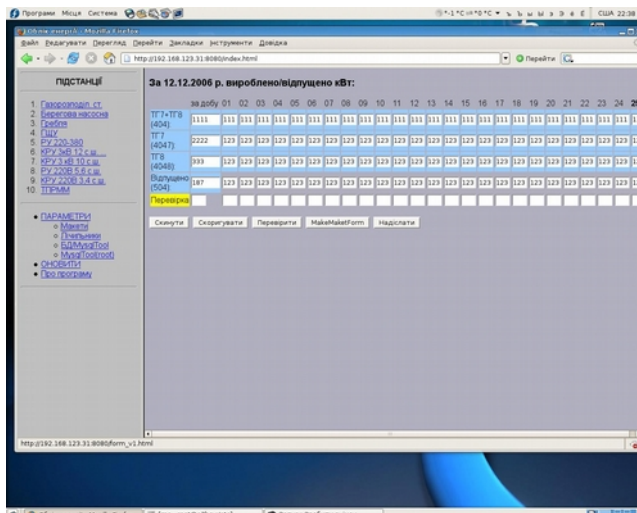


Рисунок 3.10 – вікно PromEnergy/E7 із вибраною закладкою "ПАРАМЕТРИ" у лівій рамці.

Кнопка "Надіслати" передає сформовану форму агенту обміну даними системи, рисунок 3.11.

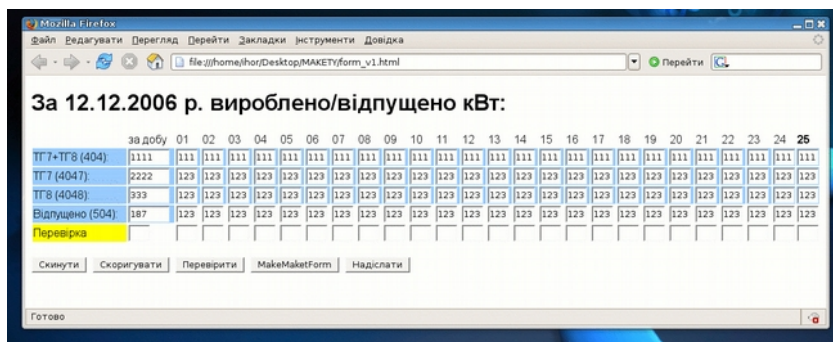


Рисунок 3.11 – закладка "Макети" відкрита у окремому вікні.

Значення у частині полів форми може бути відредагована користувачем.

Алгоритми коригування та перевірки макету залежать від особливостей об'єкту, не повинні змінюватися користувачем системи, і створюються при встановленні системи. Агент обміну налаштовується адміністратором системи засобами адміністрування сервера системи.

Закладка "Лічильники" дозволяє вручну запустити процес опитування пристроїв обліку, переглянути журнал служби опитування пристроїв обліку, отримати файли із первинної бази даних пристроїв обліку, переглянути стан системи забезпеченого живлення сервера, стан дискової системи сервера, оновити структури первинної бази даних сервера.

3.3 Встановлення та тестування розробленого програмного забезпечення

У роботі було розроблено програмні модулі, що розширюють функціональність системи обліку енергоресурсів. Було встановлено: модуль планування виробітку сонячної енергії сонячною електростанцією, модуль пошуку маршрутів передачі електричної енергії, модуль розподілу виробленої електричної енергії.

У роботі було проведено тестування встановлених компонентів

Для тестування було виконано ручні та автоматизовані види тестування:

Проведене модульне тестування, тобто, – тестування окремо взятих програмних компонентів – модулів та функцій.

Модульне тестування проводилося за принципом "білого ящика".

Для цього тестування було створено окреме програмне середовище та написано тести для окремих модулів та функцій.

Для тестування використано інструментальні засоби засоби модульного тестування CUnit, check, PHPUnit, bats та статичний аналізатори коду cppcheck, shellcheck.

Для пошуку дефектів, пов'язаних з помилками в реалізації та інтерпретації взаємодії між модулями у роботі було проведено інтеграційне тестування.

Протестовано взаємодію між основним модулем програми, модулем із функціями, у яких реалізовано математичні операції, та бінарним модулем, у якому реалізовано математичні обчислення.

Для проведення інтеграційного тестування також було створено тестове середовище.

Крім того, було проведене системне тестування програмного продукту для виявлення дефектів, пов'язаних з роботою програмного продукту в цілому, зокрема, проведена перевірка на:

- неправильне використання ресурсів системи;
- несумісність з оточенням;
- непередбачені сценарії використання;
- відсутня або неправильна функціональність;
- незручність у застосуванні.

Системне тестування програмного продукту проводилося за допомогою методу "чорного ящика".

4 АПРОБАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

За результатами виконаного дослідження, було розроблено алгоритми, що розширили функціональність вимірювально-обчислювального комплексу автоматизованої системи обліку енергоресурсів Promenergy/E7 ("BOK ASCOE Promenergy/E7"). Була спроектована та виготовлена підсистема оперативного планування виробітку, транспортування та споживання електричної енергії для цього комплексу. З листопада 2020 року підсистема була введена у дослідну експлуатацію. За час експлуатації вона показала добрі експлуатаційні характеристики і дозволила скоротити період при плануванні обсягів виробітку та споживання електричної енергії з одного місяця, до використання підсистеми, до одного тижня, з її використанням.

Результати дослідження були представлені у трьох доповідях на конференціях та у підготовленій до друку публікації.

Програмні рішення, які були у розроблені під час практичної реалізації дослідження, були представлені у доповідях на чотирьох науково-практичних конференціях.

За результатами роботи, було оформлено заявку на реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерна програма).

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто методи, що використовуються для прогнозування та планування обсягів виробництва, транспортування та споживання електричної енергії у електричних мережах, вибрано методи, які дозволяють розв'язати задачу оптимізації використання електричної енергії в розподільчих мережах електропостачання з врахуванням граничних навантажень на окремі елементи цієї мережі та інших обмежень, пов'язаних із експлуатаційними характеристиками цих елементів, для формування виробничих планів на наступні короткотермінові періоди.

Запропоновано метод імітаційного моделювання для розв'язку задачі прогнозування обсягів виробітку електричної енергії сонячною електростанцією;

Запропоновано використання методу диференційних рент, методу мінімального елемента, методу для розв'язку задачі з визначення обсягів постачання електричної енергії сонячними електростанціями у складі розподільчої мережі електропостачання.

Показана можливість оперативної планування режимів постачання електричної енергії у розподільчі мережі електропостачання на підставі даних, отриманих від встановленого на сонячних електростанціях локального устаткування збору та обробки даних (ЛУЗО) та автоматизованих систем комерційного обліку енергоресурсів (АСКОЕ).

Розроблено програмний модуль для комплексу: "Вимірювально-обчислювальний комплекс автоматизованої системи обліку енергоресурсів Promenergy/E7" ("ВОК АСОЕ Promenergy/E7") та впроваджено його у дослідну експлуатацію на об'єктах, які обслуговуються ТОВ "Харківпроменерго", що дозволило зменшити період планування виробітку і постачання електричної енергії у розподільчій мережі електропостачання з одного місяця до одного тижня;

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Голян В.В, Міхневич І.Д. Програма реалізації безпеки застосувань для обміну інформацією. Сб. научн. тр. По матеріалам 22-го Міжнародного молодіжного форуму "Радиоелектроника и молодежь в XXI веке", 2019. – с.119–120

2. Дудар З.В. Зибіна К.В. Обзор типов нейронных систем для анализа медицинских изображений. Информационные системы и технологии (ИСТ-2018): материалы 7-й Между-народ. Науч.-техн. конф., Коблево -Харьков, 2018, – тезисы докладов. – Х.: МОНУ, ХНУРЕ, 2018

3 Dudar Zoia, Zybina Kateryna, Oliinyk Olena APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR ANALYSIS OF MEDICAL IMAGES Сучасний рух науки: тези доп. VII міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 6-7 червня 2019 р. – Дніпро, 2019. – 501-504 с.

4. Дудар З.В., Кобзев В.Г., Шубин И.Ю. Применение формальных методов при разработке и сопровождении программной системы анализа данных на аномальность. "Материалы 6-й Международной научно-технической конференции Информационные системы и технологии ИСТ-2017" . С. 306

5. Дудар З. В., Четвериков Г.Г., Дудар З.В., Вечірська І.Д. Дискретні структури: навч. посібник друк. Харків: ХНУРЕ, 2014

6. Dudar Z., Kuzochkina A., Shirokopetleva M. Analyzing and Comparison of NoSQL DBMS друк. International Scientific and Practical Conference "Problems of Infocommunications. Science and Technology" (PIC S&T`2018), October 9-12, 2018. – Str. 560-565 **

7 Діючий ринок електричної енергії в Україні // URL: <https://iknet.com.ua/uk/articles/useful-to-know/active-electricity-market-Ukraine/> (дата звернення: 15.10.2020)

8 Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність" // URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80/print> (дата звернення: 15.10.2020)

9 Eurostat Statistics Explained // URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/> (дата звернення: 15.10.2020)

10 Остапченко К. Б., Лисовиченко О. И. //Моделювання та інформаційні технології: Зб.наукових праць/ПІМЕ НАН України. – Київ, 2012. – Вип. 63.– С. 192–199.

11 Остапченко К.Б., Лисовиченко О.И. Выбор модели прогнозирования электропотребления при решении задачи оперативного суточного планирования поставок электроэнергии на оптовом рынке .Міжвідомчий науково-технічний збірник "Адаптивні системи автоматичного управління", 2014, № 1(24)

12 Genetic algorithm based demand side management for smart grid C Bharathi, D Rekha, V Vijayakumar – Wireless Personal Communications, 2017 – Springer

13 Genetic algorithms to optimize the operating costs of electricity and heating networks in buildings considering distributed energy generation and storage P Cortés, J Muñuzuri, I Domínguez – Computers & Operations Research, 2018 – Elsevier

14 Круглов В.В. Нечеткая логика и нейронные сети/В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов.– М.:Физматлит, 2001. – 221 с.

15 Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ/Н. Дрейпер, Г. Смит.– М.: Издательский дом “Вильямс”, 2007. – 912 с.

16 Kantorovich L. On the translocation of masses // С. R. (Doklady) Acad. Sci. URSS (N. S.), 37:199-201, 1942.

17 Koenig S., Likhachev M., Furcy D. Lifelong Planning A* // Artificial Intelligence Journal, 155 (1-2). 2004. С. 93-146

18 Леснік С. В., Хижняк Т. А. Застосування методу лінійної згортки для вибору джерела альтернативної енергії // Електроніка і зв'язь. №3. 2013