

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики та комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та
робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

«Система управління енергоспоживанням виробничого підприємства»
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,
групи КТРСм-24-2

Ілля ЛЕВЕНЕЦЬ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ю-
терно-інтегровані технології та робототехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Ірина СЕЗОНОВА
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Левенець Ілля Олександрович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«11» грудня 2025р.



Ілля Левенець

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики та комп'ютеризованих технологій
Кафедра КІТАР
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)
« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Левенцю Іллі Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система управління енергоспоживанням виробничого підприємства

Затверджена наказом по університету від 19.11.2025 р. № 1018 Ст _____

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 15.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Модель системи автоматизованого управління енергоспоживанням виробничого підприємства; метод статистичного аналізу та регресії, методи часових рядів; експертна система, база даних, програма на мові програмування C++, керівництво користувача

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Вступ;

Аналіз технічного завдання;

Аналіз сучасного стану автоматизованих систем управління енергоспоживанням на виробничому підприємстві;

Розробка моделі системи управління енергетичною системою;

Програмна реалізація розробленої системи;

Розробка керівництва користувача;

Охорона праці;

Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал у форматі презентації PowerPoint (*.pptx) – 11с.

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання до кваліфікаційної роботи	01.08.2025	виконано
1	Аналіз технічного завдання	02.08 – 11.09.25	виконано
2	Аналіз існуючих систем управління	12.09 – 18.10.25	виконано
3	Розробка моделі та аналіз інструментів розробки	19.10 – 21.11.25	виконано
4	Розробка бази даних та бази знань	22.11 – 30.11.25	виконано
5	Розробка програми	01.12 – 10.12.25	виконано
6	Охорона праці	11.12 – 12.12.25	виконано
7	Подання роботи на перевірку академічної доброчесності	13.12 – 15.12.25	виконано
9	Подання роботи на рецензію	15.12 – 16.12.25	виконано
10	Подання роботи на підпис зав. кафедри	17.12 – 18.12.25	виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	19.12.2025	виконано

Дата видачі завдання 01.08.2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Ілля ЛЕВЕНЕЦЬ
(власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Ірина СЕЗОНОВА
(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 94 с., 15 табл., 18 рис., 3 дод., 21 джерело.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПІДСИСТЕМА, БАЗА ДАНИХ, ПІДПРИЄМСТВО.

Об'єкт дослідження – процеси моніторингу та прогнозування споживання виробничим підприємством енергетичних ресурсів (електричної, теплової енергії, газу).

Предмет дослідження – методи, засоби та алгоритми автоматизованого управління енергоспоживанням виробничого підприємства з використанням інформаційних технологій.

Метою роботи є підвищення ефективності системи управління енергоспоживанням виробничого підприємства, яка забезпечує моніторинг, аналіз і оптимізацію витрат енергії в реальному часі.

Розроблювана підсистема автоматизує процес прийняття рішень в реальному часі, які базуються на технологіях штучного інтелекту.

Наукова новизна полягає у розробленні концепції інтелектуальної системи управління енергоспоживанням, що поєднує принципи автоматизації, енергетичного моніторингу та аналітичного прогнозування споживання ресурсів.

Особливістю запропонованого підходу є використання адаптивного алгоритму прийняття рішень на основі аналізу поточних і історичних даних енергоспоживання, який дозволяє не лише контролювати процес, а й оптимізувати режими роботи обладнання у реальному часі.

Також отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 7 “Доступна та чиста енергія”, а саме п. 7.1 “Розширити інфраструктуру та модернізувати мережі для забезпечення надійного та сталого енергопостачання на основі впровадження інноваційних технологій”.

ABSTRACT

Explanatory note: 94 p., 15 tabl., 18 fig., 3 app., 21 sources.

AUTOMATED SYSTEM, ENERGY EFFICIENCY, INTELLIGENT
SUBSYSTEM, DATABASE, ENTERPRISE.

The object of research is processes for monitoring and forecasting the consumption of energy resources (electricity, heat, gas) by the manufacturing enterprise. The subject of research is methods, means, and algorithms for automated energy consumption management of a manufacturing enterprise using information technologies.

The purpose of the work is to increase the efficiency of the energy consumption management system of the production enterprise, which provides monitoring, analysis and optimization of energy consumption in real time.

The scientific novelty lies in the development of a concept for an intelligent energy consumption management system that combines the principles of automation, energy monitoring, and analytical forecasting of resource consumption.

A distinctive feature of the proposed approach is the use of an adaptive decision-making algorithm based on the analysis of current and historical energy consumption data, which allows not only to control the process, but also to optimize equipment operating modes in real time.

The results of the work can also be attributed to Sustainable Development Goal 7 “Affordable and Clean Energy”, namely item 7.1 “Expand infrastructure and modernize networks to ensure reliable and sustainable energy supply based on the implementation of innovative technologies”.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ.....	11
1 Аналіз сучасного стану питання та обґрунтування технічного завдання.....	14
1.1 Аналіз предметної області	14
1.2 Огляд існуючих систем енергоспоживання виробничого підприємства.....	16
1.2.1 SCADA-системи промислового рівня.....	19
1.2.2 Корпоративні системи енергоменеджменту (EMS).....	19
1.2.3 Інтелектуальні IoT-рішення.....	19
1.3 Інтелектуальні лічильники та датчики	20
1.3 Постановка завдання	27
1.4 Висновки до розділу 1	31
2 Розробка підсистеми енергоспоживання виробничого підприємства	34
2.1 Розробка структури бази даних енергетичної системи підприємства	34
2.2 Розробка концептуальної моделі системи	49
2.3 Інтелектуальний модуль системи керування енергоспоживанням...	53
2.3.1 Алгоритм прийняття рішень.....	53
2.3.2 Формування керуючих рекомендацій.....	54
2.4 Математична модель прогнозування енергоспоживання	55
2.4.1 Формування часового ряду енергоспоживання	55
2.4.2 Регресійна модель прогнозування.....	56
2.4.3 Урахування сезонних коливань.....	56
2.4.4 Оцінювання параметрів та прогнозування.....	57
2.5 Висновки до розділу 2.....	57
3 Реалізація системи управління EnergyForecastSystem.....	58

	8
3.1 Заповнення таблиць бази даних.....	58
3.2 Програмна реалізація прогнозування енергоспоживання.....	63
3.3 Керівництво користувача.....	64
3.4 Робота з автоматизованою системою EnergyForecastSystem.....	65
3.5 Висновки до розділу 3.....	68
4 Охорона праці.....	69
4.1 Загальні положення.....	70
4.2 Характеристика робочого місця.....	70
4.3 Висновки до розділу 4.....	72
Висновки.....	73
Перелік джерел посилання.....	74
Додаток А Апробація роботи.....	77
Додаток Б Код програми.....	85
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	96

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АСЕМ – автоматизована система енергетичного моніторингу;
- АСКОЕ – автоматизована система комерційного обліку електроенергії;
- БД – база даних;
- ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
- ПЗ – програмне забезпечення;
- ІС – інформаційна система;
- ІС ІТС – інформаційна система ІТС (інформаційно-технічний супровід);
- ІТ – інформаційна технологія;
- РДН – ринок «на добу наперед»;
- СППР – система підтримки прийняття рішень;
- СЕС – сонячна електростанція;
- СНЕ – система накопичення енергії;
- СУБД – система управління базами даних;
- APS (Advanced Planning and Scheduling) – детальне планування і розклад виробничих операцій у реальному часі;
- AI (Analog Input) – аналоговий вхід;
- VOC (Volatile Organic Compounds) – летючі органічні сполуки;
- EMS (Energy Management System) – система управління енергоспоживанням підприємства;
- ERP (Economic Requirements Planning) – інтегроване планування бізнесресурсів підприємства;
- IoT (Internet of Things) – інтернет речей;
- MU (Merging Unit) – об'єднувальний пристрій;
- PLC (Power Line Communication) – зв'язок, побудований на лініях електропередач;

Smart Grids – «розумні» електромережі, які можуть одночасно генерувати та споживати електроенергію;

RTU (Remote Terminal Unit) – віддалений термінальний пристрій;

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – диспетчерське управління і збір даних

VS (Visual Studio) – середовище розробки.

ВСТУП

Основним завданням кваліфікаційної роботи є створення інформаційної системи управління енергоспоживанням виробничого підприємства, яка забезпечуватиме ефективне використання енергетичних ресурсів, зниження витрат і підвищення рівня енергетичної безпеки підприємства.

Завданням роботи є розроблення концепції інтелектуальної системи управління енергоспоживанням, що поєднує принципи автоматизації, енергетичного моніторингу та аналітичного прогнозування споживання ресурсів.

Особливістю запропонованого підходу є використання адаптивного алгоритму прийняття рішень на основі аналізу поточних і історичних даних енергоспоживання, який дозволяє не лише контролювати процес, а й оптимізувати режими роботи обладнання у реальному часі.

Розроблювана система передбачає інтеграцію з ERP-, SCADA- та іншими системами виробничого підприємства, що сприяє підвищенню ефективності функціонування підприємства загалом.

Практична цінність полягає у створенні прикладного програмного рішення, яке може бути впроваджене на промислових підприємствах для автоматизації обліку, аналізу та управління енергоспоживанням.

Метою роботи є підвищення ефективності системи управління енергоспоживанням виробничого підприємства, яка забезпечує моніторинг, аналіз і оптимізацію витрат енергії в реальному часі.

Розроблювана система автоматизує процес прийняття рішень в реальному часі, які базуються на технологіях штучного інтелекту.

Об'єкт дослідження – процеси моніторингу та прогнозування споживання виробничим підприємством енергетичних ресурсів (електричної, теплової енергії, газу).

Предмет дослідження – методи, засоби та алгоритми автоматизованого управління енергоспоживанням виробничого підприємства з використанням

елементів штучного інтелекту.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати наступні задачі:

- здійснити аналіз предметної області, дослідити сучасні підходи до управління енергоспоживанням на виробничих підприємствах, визначити основні проблеми неефективного використання енергоресурсів;

- провести порівняльний аналіз сучасних програмно-технічних засобів і систем автоматизації енергоменеджменту (SCADA, IoT-платформи, системи моніторингу);

- визначити архітектуру системи управління енергоспоживанням, її основні модулі, інформаційні потоки та взаємодію компонентів;

- спроектувати структуру бази даних для збирання, зберігання та обробки інформації про споживання електроенергії різними підрозділами підприємства;

- створити алгоритми для виявлення аномалій, прогнозування енергоспоживання та визначення оптимальних режимів роботи обладнання;

- провести моделювання функціонування системи, оцінити економічний та енергетичний ефект від її впровадження;

- створити програмний продукт або модуль, що забезпечує автоматизований моніторинг і управління енергоспоживанням;

- оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1] і методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка освітньої програми «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» [2].

Результати кваліфікаційної роботи сприяють Цілям сталого розвитку, зокрема цілі 7 Доступна та чиста енергія, п. 7.в До 2030 року розширити інфраструктуру і модернізувати технології для сучасного та сталого

енергопостачання всіх у розвинених країнах.

Публікація за темою кваліфікаційної роботи подана в додатку А.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Аналіз предметної області

Енергоспоживання є одним із ключових факторів, що визначають ефективність функціонування виробничого підприємства. В умовах підвищення вартості енергоресурсів, глобальних кліматичних викликів і потреби у підвищенні енергоефективності особливої актуальності набувають системи управління енергоспоживанням, здатні забезпечити оптимальне використання електричної енергії, газу, тепла та інших енергоносіїв.

На сучасних підприємствах енергоспоживання має складну структуру та включає безліч споживачів: технологічне обладнання, системи освітлення, вентиляції, опалення, охолодження, допоміжні механізми. Через значну кількість змінних параметрів і непередбачуваність виробничих навантажень контроль за споживанням енергії потребує автоматизації [5].

Традиційні методи обліку, засновані на періодичному знятті показників лічильників і статистичному аналізі, не дозволяють забезпечити оперативний моніторинг та оптимізацію енергоспоживання. Тому сучасні підприємства впроваджують інтелектуальні системи управління енергоспоживанням (Energy Management Systems, EMS), що базуються на використанні датчиків, контролерів, інтернету речей (Internet of Things, IoT), SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) та ERP/APS технологій.

SCADA та IoT на підприємствах – це системи для моніторингу, управління та автоматизації виробничих процесів у реальному часі, де SCADA відповідає за централізоване керування та візуалізацію, а IoT додає "інтелект" датчиків, збираючи масиви даних, що в сукупності підвищує ефективність, знижує витрати, покращує безпеку та надає інструменти для аналітики та

предиктивного обслуговування, інтегруючись від водопостачання до складних виробництв, створюючи «розумні» підприємства [5, 6].

SCADA представляє собою апаратно-програмний комплекс, що збирає, обробляє та відображає дані з промислових об'єктів (датчиків, контролерів) та дозволяє операторам керувати процесами через графічний інтерфейс, отримувати сповіщення та зберігати дані.

IoT на підприємстві відповідає за підключення фізичних об'єктів (машин, пристроїв, сенсорів) до Інтернету та масовий збір даних з цих пристроїв для їх аналізу та прийняття рішень.

Їх взаємодія здійснюється в наступних напрямках:

- збір даних. IoT-датчики збирають величезні обсяги даних з усього підприємства (температура, тиск, вібрація, споживання енергії);
- передача та обробка даних. Дані надходять до SCADA-систем, які їх агрегують та аналізують;
- візуалізація та управління. SCADA надає інтуїтивні панелі (dashes) для операторів, які бачать весь процес та можуть віддалено керувати ним;
- аналітика. Дані використовуються для прогнозування аварій, оптимізації ресурсів (предиктивне обслуговування).

SCADA/IoT – це сучасний стандарт для розумних (Smart) виробництв, який дозволяє підприємствам перетворити дані на дію, досягаючи максимальної продуктивності та конкурентоспроможності.

SCADA та IoT системи використовуються для розумного моніторингу, збору даних та автоматизації енергоспоживання на підприємствах, дозволяючи в реальному часі відслідковувати споживання, виявляти нераціональне використання, оптимізувати процеси та знижувати витрати енергії, переходячи до енергоменеджменту, що веде до значної економії та ефективності.

ERP (Enterprise Resource Planning) для підприємства – це комплексна програмна система, яка інтегрує та автоматизує всі ключові бізнес-процеси

(фінанси, виробництво, логістику, кадри, продажі) в єдиному інформаційному просторі, створюючи централізовану базу даних для ефективного управління, планування та прийняття обґрунтованих рішень, що підвищує прозорість та конкурентоспроможність бізнесу.

APS підприємства (Advanced Planning and Scheduling) – це програмні системи для вдосконаленого планування та складання графіків виробництва, що допомагають оптимізувати розклади роботи обладнання, персоналу та ресурсів, враховуючи складні бізнес-критерії та інтегруючи планування в ланцюжки поставок, що забезпечує підвищення ефективності, продуктивності та зниження витрат на підприємстві.

ERP- та APS-системи можуть інтегрувати функціонал для управління енергоспоживанням підприємства, забезпечуючи облік, моніторинг та оптимізацію використання енергоресурсів.

Функціонал ERP/APS може використовуватись для управління енергоспоживанням підприємства.

Хоча спеціалізовані системи, такі як АСКОЕ (автоматизована система комерційного обліку електроенергії) або АСЕМ (автоматизована система енергетичного моніторингу), часто є основними інструментами для збору даних, ERP/APS системи використовують ці дані для комплексного управління та планування.

В рамках ERP-системи система енергоспоживання використовує:

- фінансовий облік і звітність. ERP інтегрує дані про споживання енергії з фінансовими модулями для точного розрахунку собівартості продукції, бюджетування енерговитрат та формування управлінської звітності;

- управління закупівлями. Дозволяє планувати закупівлі енергоресурсів (електроенергії, газу, води) на основі історичних даних та прогнозів, оптимізуючи витрати та вибір постачальників;

- управління активами. Модулі управління технічним обслуговуванням і ремонтами обладнання допомагають забезпечити його ефективну роботу, запобігаючи втратам енергії через несправності або неоптимальні режими

експлуатації;

- інтеграцію даних. ERP слугує центральною платформою, що об'єднує дані від різних систем моніторингу енергоспоживання (АСКОЕ, АСЕМ, SCADA) для забезпечення єдиної картини енергоефективності підприємства.

В рамках APS-системи система енергоспоживання використовує:

- детальне планування виробництва. APS-системи, які часто працюють як надбудови або модулі всередині ERP, дозволяють оптимізувати графіки виробництва з урахуванням енергетичних обмежень та тарифів;

- оптимізацію використання обладнання. APS може планувати завантаження найбільш енергоефективного обладнання у пікові години низьких тарифів, або ж знижувати навантаження під час високих тарифів, мінімізуючи загальні витрати на енергію;

- моделювання та прогнозування. Використовуючи алгоритми та розширену аналітику, APS може моделювати різні сценарії виробництва та їхній вплив на енергоспоживання, допомагаючи приймати обґрунтовані рішення.

Популярні системи цього класу працюють на європейських та вітчизняних підприємствах.

Багато великих ERP-систем, таких як SAP S/4HANA, Oracle ERP Cloud, або українські рішення на базі OneBox OS чи BAS ERP, мають функціонал або партнерські модулі для управління енергоресурсами [8].

Впровадження таких систем допомагає не тільки знизити витрати, але й відповідати вимогам законодавства України щодо впровадження систем енергетичного менеджменту.

У системі управління енергоспоживанням (Energy Management System, EMS) ці підсистеми взаємодіють так (рис.1.1):

- ERP зберігає дані про витрати енергії, бюджети, контракти, звіти;
- APS оптимізує виробничий розклад з урахуванням енергоспоживання та тарифів;

- EMS здійснює моніторинг і аналіз енергоспоживання в реальному часі;
- SCADA / IoT збирає дані з лічильників, контролерів, сенсорів.

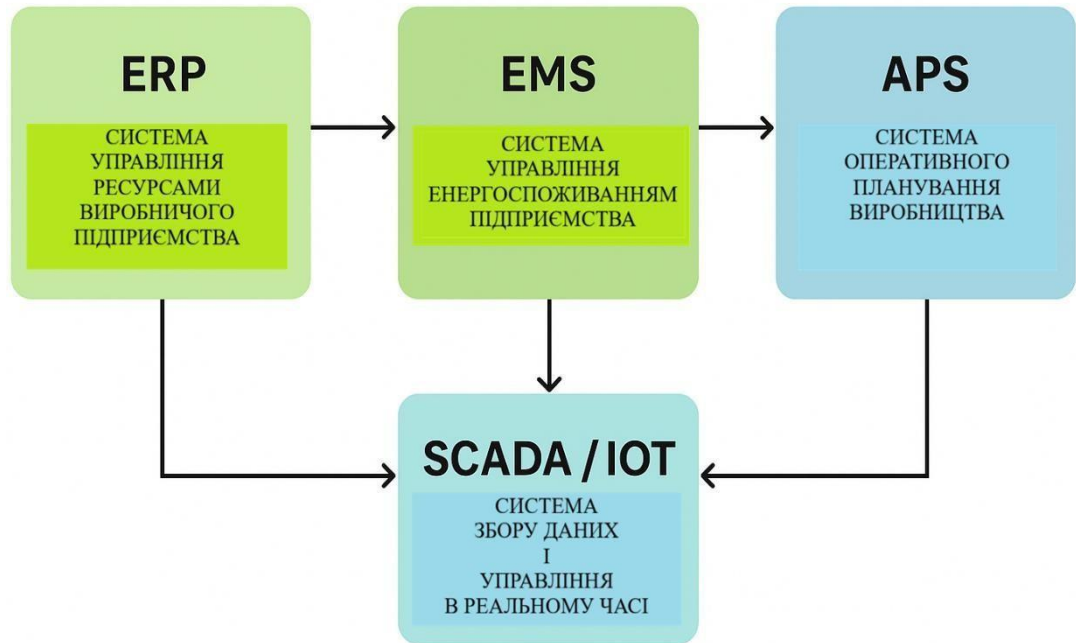


Рисунок 1.1 – Взаємодія систем управління сучасного підприємства

Основними функціями таких систем є:

- збір і візуалізація даних про споживання енергоресурсів у реальному часі;
- аналіз ефективності використання енергії;
- виявлення перевитрат та аномалій;
- автоматичне керування режимами роботи обладнання;
- формування аналітичних звітів і рекомендацій для підвищення енергоефективності.

Важливим етапом побудови системи є створення інформаційної моделі енергоспоживання, яка описує структуру енергетичних потоків підприємства, взаємозв'язки між підсистемами та об'єктами контролю. На основі цієї моделі реалізуються алгоритми управління, прогнозування та оптимізації.

У контексті енергетичної безпеки України впровадження таких систем має стратегічне значення. Відповідно до Стратегії енергетичної безпеки України (EUEA, 2024), одним із пріоритетів є підвищення енергоефективності виробничого сектору через цифровізацію енергетичної інфраструктури та інтеграцію підприємств у європейський енергетичний простір [9,10].

Таким чином, створення системи управління енергоспоживанням виробничого підприємства дозволить забезпечити:

- прозорість процесів енергоспоживання;
- зменшення енергетичних витрат;
- підвищення надійності енергопостачання;
- автоматизацію прийняття рішень у сфері енергоменеджменту.

1.2 Огляд існуючих систем управління енергоспоживанням

На сучасному ринку представлено широкий спектр рішень для автоматизації енергоменеджменту, які різняться за масштабом, архітектурою та функціональністю. Умовно їх можна поділити на три основні групи: промислові SCADA-системи, корпоративні системи енергоменеджменту (EMS) та інтелектуальні платформи на базі IoT і Big Data.

1.2.1 SCADA-системи промислового рівня

До цієї групи належать системи Siemens WinCC, Schneider Electric EcoStruxure, ABB Ability, InduSoft Web Studio тощо. Вони забезпечують збір даних із сенсорів та контролерів у реальному часі, моніторинг енергетичних показників і відображення технологічних процесів у вигляді мнемосхем [3, 4].

Основні переваги SCADA-підходу:

- висока точність та надійність даних;
- підтримка промислових протоколів (Modbus, OPC, Profibus);
- можливість інтеграції з системами автоматичного керування.

Однак такі рішення зазвичай є дорогими у впровадженні, вимагають складної конфігурації й орієнтовані переважно на великі підприємства.

1.2.2 Корпоративні системи енергоменеджменту (EMS)

До цього класу належать Siemens Desigo CC, Honeywell Energy Management, EnergyCAP, DEXMA Energy Intelligence Platform. Вони поєднують функції SCADA з аналітичними інструментами, що дозволяє виконувати прогнозування енергоспоживання, планування витрат та формування звітності відповідно до міжнародних стандартів ISO 50001.

Основні переваги:

- комплексна інтеграція з ERP і MES системами;
- розширена аналітика й візуалізація даних;
- автоматичне виявлення неефективних зон енергоспоживання.

Недоліком є висока вартість ліцензій, складність масштабування та залежність від виробника [9].

1.2.3 Інтелектуальні IoT-рішення

Сучасні тенденції розвитку енергетичного менеджменту спрямовані на використання інтернету речей (IoT), хмарних технологій та машинного навчання. Прикладами таких систем є Microsoft Azure IoT Energy Platform, Siemens MindSphere, OpenEMS (відкритий стандарт), а також різноманітні національні розробки на базі Arduino, Raspberry Pi чи ESP32.

Їхні переваги:

- низька вартість впровадження;
- масштабованість і доступ до даних з будь-якої точки мережі;
- гнучкість у побудові власних алгоритмів управління;
- можливість інтеграції з мобільними або Web-додатками.

Саме ця група систем є найперспективнішою для малих і середніх виробничих підприємств України, оскільки дозволяє створити адаптивну,

інтелектуальну систему управління енергоспоживанням, що враховує особливості конкретного об'єкта без надмірних витрат [10].

1.3 Інтелектуальні лічильники та датчики

Інтелектуальні лічильники (смарт-лічильники) зустрічаються зараз всюди. Ці пристрої займаються обліком і моніторингом ресурсів. Наприклад, світло, вода і газ. Їх функціональні можливості набагато перевершують традиційні методи обліку. Вони забезпечують точність, зручність і ефективність управління споживанням.

Дистанційний моніторинг є однією з основних функцій інтелектуальних лічильників. Він допомагає збирати дані автоматично, що сильно економить час і забезпечує більш оперативний доступ до інформації для постачальників послуг. А це, в свою чергу, допомагає швидше реагувати на зміни в споживанні.

Точний облік споживання – ще одна ключова перевага інтелектуальних лічильників. За допомогою нього відбувається менше помилок, ніж при звичайному знятті показань. Споживачі бачать детальні рахунки і це сприяє більш прозорому відношенню до фінансових витрат на споживані ресурси. Важливо зазначити, що час використання впливає на ціну. А це означає, що споживач може знизити витрати за рахунок вибору часу для використання енергії [11].

Моніторинг в реальному часі теж вкрай важливий. Споживач може стежити за витратами, що допомагає помітити аномалії в споживанні. Наприклад, витік або зловживання ресурсами. Споживачеві майже відразу приходить повідомлення про подібні відхилення, що допомагає уникнути великих витрат.

Аналіз даних відіграє не менш важливу роль у функціональності інтелектуальних лічильників, він допомагає споживачам приймати обґрунтовані рішення щодо оптимізації споживання. Завдяки аналізу люди

можуть побачити, як витрачаються ресурси і отримувати звіти за різні терміни. Такі звіти дають шанс виявити тенденції використання ресурсів .

Інтелектуальні лічильники можуть працювати з іншими пристроями, це відбувається через інтегрування в інтелектуальні системи (Smart Grids). Наприклад, вони можуть працювати з термостатами, освітленням і технікою. Це дозволяє автоматизувати управління витратами [11, 12].

Величезною перевагою є те, що постачальники пропонують додатки зі зручним доступом до даних. Ці програми дозволяють стежити за витратами, перевіряти рахунки. А про особливо важливі події приходять повідомлення, що сильно спрощує управління своїм споживанням.

Ще інтелектуальні лічильники сприяють енергетичній ефективності. Вони показують, скільки витрачається енергії і іноді дають поради щодо економії, що сильно знижує витрати на ресурси. Таким чином споживачі отримують можливість оптимізувати свої витрати на ресурси, що в свою чергу сприяє зменшенню навантаження на енергетичні мережі.

Однофазні інтелектуальні електролічильники – це пристрої, які використовуються для обліку споживаної електроенергії в будинках або квартирах, де підключення однофазне (тобто, використовується тільки одна фаза для споживання).

Інтелектуальні лічильники з функцією підтримки енергетичних мереж (Smart Grids) дуже важливі для мереж, вони допомагають управляти енергією. Ці лічильники здатні взаємодіяти з іншими пристроями в мережі, що знижує навантаження і ризик перевантажень. Вони також можуть взаємодіяти з сонячними панелями, а це дозволяє ефективніше використовувати ресурси.

Комерційні та промислові електролічильники з аналітичною функцією вважаються важливими для підприємств. Вони можуть контролювати витрати на електроенергію, що дозволяє підприємствам виявляти неефективності та знаходити можливості для економії. Також споживачі отримують доступ до детальних звітів, які допомагають приймати обґрунтовані рішення щодо управління споживанням.

Таким чином, можна сказати, що лічильники для обліку електроенергії бувають дуже різні, вони допомагають точно вимірювати споживання електроенергії. Ці пристрої можна контролювати віддалено, а ще вони можуть працювати з розумними мережами. Все це покращує ефективність роботи енергетичних систем, такі прилади допомагають знизити витрати і підвищують енергоефективність.

Сучасні інтелектуальні лічильники електроенергії оснащені різноманітними технологіями та протоколами. За для передачі даних через електричні мережі використовують технологію Power Line Communication (PLC). Лічильники, що використовують цю технологію, можуть обмінюватися інформацією з центром обліку без необхідності прокладання додаткових комунікаційних ліній.

Інтелектуальні лічильники використовують бездротові технології, такі як Zigbee або LoRaWAN [12].

ZigBee – це бездротовий стандарт передачі даних. Підтримується і розвивається однойменним альянсом ZigBeeTM, який був створений в 2002 році з метою об'єднання зусиль з розроблення найефективніших протоколів і забезпечення сумісності пристроїв різних виробників.

LoRaWAN – це технологія, яка використовується в комплексних рішеннях IoT для збору та обробки даних з розподілених датчиків.

Вони працюють на радіозв'язку та дозволяють лічильникам взаємодіяти з центральними системами в режимі реального часу.

Для передачі даних через стільникові мережі використовують лічильники, що оснащуються модулями GSM/GPRS. Це стає необхідно для збору інформації в віддалених або важкодоступних місцях.

Існують різного роду інтелектуальні лічильники і з кожним роком використання цих пристроїв стає дедалі популярнішим.

На рисунку 1.2 представлено трьох фазний лічильник Z-Wave Plus Qubino 3-Phase Smart Meter.



Рисунок 1.2 – Z-Wave Plus Qubino 3-Phase Smart Meter

Z-Wave Plus Qubino 3-Phase Smart Meter стануть у пригоді для компаній, що потребують гнучкість доступу. Мобільні додатки й веб-портали надають зручний доступ до інформації, а функції аналізу якості енергії оптимізують роботу мереж. Такі рішення корисні для виробничих підприємств.

На рисунку 1.3 представлено лічильник Elster A1700.



Рисунок 1.3 – Elster A1700

Elster A1700 стане оптимальним рішенням для підприємств, які прагнуть надійності. Він забезпечує точний облік і підтримує популярні протоколи

зв'язку. Підходить для систем, які потребують підвищення продуктивності та ефективності.

Ці моделі забезпечують індивідуальний підхід до різних потреб. Обираючи відповідний пристрій, підприємства зможуть досягти більш ефективного управління енергетичними ресурсами.

Smart energy management controller зображено на рисунку 1.4.

Смарт контролер мікрогрід призначений для мінімізації експлуатаційних витрат завдяки керуванню пріоритетом споживання електроенергії залежно від ціни на оптовому ринку РДН, скорочення споживання електроенергії завдяки генерації сонячної електростанції (СЕС), поліпшення якості енергії та автономний режим роботи підприємства в разі вимкнення електроенергії.

При постійному зростанні вартості на електроенергію в Україні, економічно доцільним рішенням стає європейська модель роботи підприємства під управлінням мікрогрід мережі в складі гібридної СЕС і системи накопичення електроенергії (СНЕ).



Рисунок 1.4 – Smart energy management controller

Найбільший недолік мережевих СЕС – це обмеження генерації електроенергії потужністю споживання підприємства та відсутністю можливості зберігання енергії. Гібридна СЕС та СНЕ є ідеальним рішенням

для балансування генерації СЕС та обсягів споживання. Завдяки наявності мікрогрід мережі у підприємства з'являються додаткові можливості економії на рахунках за електрику як “споживача класу А” на оптовому ринку електроенергії РДН:

- закупівля обсягу електроенергії поза годиною пік (за найнижчою ціною з 0:00 до 6:00 ранку);

- споживання накопиченої електроенергії в СНЕ та генерації СЕС (не купуючи кошовну електрику в ранкову годину пік на ринку РДН з 7:00 до 10:00);

- споживання електрики від СНЕ накопиченої енергії в обідній пік генерації СЕС у вечірній час пік (з 16-00 до 19-00).

Контролер використовується як центральний елемент керування мікрогрід мережею з системою онлайн-моніторингу та підключених до неї декількох інверторів і СНЕ. Цей контролер керування сонячної станції та СНЕ буде цікавий тим виробництвам, які хочуть модернізувати вже встановлену СЕС або тільки планують її будівництво. Запропонований контролер аналізує обсяг споживання енергії підприємством та автоматично вмикає додаткові навантаження (холодильне обладнання, бойлери тощо) опівдні під час максимального обсягу генерації СЕС.

Окрім того, він може керувати та стежити за обсягом і режимом більш ефективного споживання через платформу моніторингу з можливістю онлайн керування з пріоритетом обсягів генерації. Є також технічна можливість зміни налаштувань СНЕ та інверторів, діагностики та віддаленого сервісного обслуговування комплексу обладнання в онлайн-режимі.

Розумні датчики газу можуть виконувати різні функції, основні з яких рахування об'єму спожитого газу та контроль аварійних ситуацій, пов'язаних із витоком газу.

Прикладом датчику для контролю може слугувати багатофункціональний датчик MCO Home Multi Sensor – MCOEA8-9 (рис.1.5).

МСОHomeA8-9 – це об'єднання кількох датчиків моніторингу навколишнього середовища з підтримкою технології Z-Wave, з чітким дисплеєм TFT з діагоналлю 3,5 дюйми та відповідними стандарту Z-Wave Plus. Він має вбудовані рецептори: температури, вологості, запиленості PM2,5, рівня вуглекислого газу CO₂, летючих органічних сполук VOC, руху, освітленості, шуму, диму.



Рисунок 1.5 – Багатофункціональний датчик МСО Home Multi Sensor MCOEA8-9

Для контролю теплопостачання використовують комплекс датчиків, основні з яких температурні (терморезистори, термопари типу Pt100/Pt500), тиску та витрат (ультразвукові/електромагнітні витратоміри), а також теплотічильники, що інтегрують дані для точного обліку та раціонального споживання тепла. Ці датчики передають дані на терморегулятори або контролери для автоматичного управління опалювальними системами (теплыми підлогами, котлами, радіаторами).

Комплексні теплотічильники об'єднують датчики температури та витрати для точного розрахунку спожитої теплової енергії. Наприклад, QALCOMET HEAT1 призначений для вимірювання та спостереження

опалювальної й охолоджувальної енергії в закритих або відкритих опалювальних/охолоджувальних системах, встановлених у житлових будинках, офісних будівлях або електростанціях (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Модель QALCOMET HEAT 1 / 2 x WPD FS 125-100

У підсумку, інтелектуальні лічильники надають широкі можливості для керування енергетичною системою підприємства. Вони допомагають контролювати витрати, дають можливість оптимізувати споживання.

Ці пристрої вкрай важливі для роботи енергомереж, вони ілюструють дані і можуть їх надавати для подальшого аналізу та керування енергоживленням. Такі пристрої відіграють велику роль у розвитку розумних мереж.

1.4 Постановка завдання

Проведений аналіз існуючих рішень у сфері управління енергоспоживанням виробничих підприємств показав, що сучасні системи розвиваються у напрямі інтелектуалізації, автоматизації та інтеграції з цифровими технологіями. Найбільш поширеними підходами є застосування

SCADA-систем, корпоративних платформ енергоменеджменту (EMS) та IoT-рішень.

Класичні SCADA-системи відзначаються високою точністю контролю та стабільністю роботи, але вимагають значних фінансових і технічних ресурсів. Корпоративні EMS-платформи забезпечують широкий спектр аналітичних функцій, однак їхнє впровадження доцільне переважно на великих промислових об'єктах. Натомість IoT-орієнтовані рішення характеризуються гнучкістю, адаптивністю та економічною доцільністю, що робить їх оптимальними для малих і середніх виробничих підприємств України.

З огляду на це, постає необхідність розроблення інтелектуальної системи управління енергоспоживанням виробничого підприємства, здатної забезпечити:

- моніторинг параметрів споживання енергії (електричної, теплової та газопостачання) у реальному часі;
- аналітичну обробку даних з урахуванням режимів роботи обладнання;
- автоматичне виявлення неефективних ділянок споживання;
- формування рекомендацій або керуючих дій для зменшення витрат енергії;
- інтеграцію з виробничими процесами для оптимізації загальної ефективності.

Таким чином, основним завданням кваліфікаційної роботи є створення інформаційної системи управління енергоспоживанням виробничого підприємства, яка забезпечуватиме ефективне використання енергетичних ресурсів, зниження витрат і підвищення рівня енергетичної безпеки підприємства.

Завдання роботи полягає у розробленні концепції інтелектуальної системи управління енергоспоживанням, що поєднує принципи автоматизації, енергетичного моніторингу та аналітичного прогнозування споживання ресурсів.

Особливістю запропонованого підходу є використання адаптивного алгоритму прийняття рішень на основі аналізу поточних і історичних даних енергоспоживання, який дозволяє не лише контролювати процес, а й оптимізувати режими роботи обладнання у реальному часі.

Розроблювана система повинна мати можливість взаємодіяти з іншими системами управління виробничого підприємства, що підвищить ефективність функціонування підприємства загалом.

Практична цінність полягає у створенні прикладного програмного рішення, яке може бути впроваджене на промислових підприємствах для автоматизації обліку, аналізу та управління енергоспоживанням.

Система забезпечує наступні переваги:

- зниження витрат на електроенергію, тепло та газ за рахунок оптимізації навантаження;
- підвищення енергоефективності виробництва;
- своєчасне виявлення аномалій або перевитрат енергії;
- можливість прийняття обґрунтованих управлінських рішень на основі реальних даних.

Розроблена система може бути адаптована для різних типів виробничих підприємств і інтегрована з наявними ERP або SCADA-рішеннями.

Формальна постановка задачі.

Метою розроблення системи управління енергоспоживанням є мінімізація сумарних енергетичних витрат виробничого підприємства за умови забезпечення необхідного рівня продуктивності та технологічних обмежень.

Вхідні дані системи:

- $N = \{1, 2, \dots, n\}$ – множина енергоспоживаючих об'єктів (агрегатів, ділянок, цехів);
- $T = \{1, 2, \dots, t\}$ – множина дискретних моментів часу (інтервалів планування);
- $P_i(t)$ споживана потужність i -го об'єкта у момент часу t ;

- $C(t)$ вартість одиниці електроенергії у момент часу t ;
- P_i^{max}, P_i^{min} – допустимі межі потужності для кожного об'єкта;
- Q_i – кількість виробленої продукції (або виконаних операцій) за інтервал часу.

Необхідно мінімізувати загальні витрати на енергію:

$$F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C(t) * P_i(t) \quad (1.1)$$

Матричне представлення системи можна записати у вигляді матриці потужностей:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \cdots & P_{1T} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \cdots & P_{2T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & P_{N3} & \cdots & P_{NT} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

де кожен елемент P_{ij} відображає споживану потужність i -го об'єкта у момент часу j .

Вектор вартості енергії:

$$C = [C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad \cdots \quad C_T] \quad (1.3)$$

Цільова функція у матричному вигляді:

$$F = C * P^T \quad (1.4)$$

Система обмежень залежить від складу та потужності обладнання, часових обмежень та ін.

Обмеження потужності обладнання:

$$P_{i}^{\min} \leq P_{i}(t) \leq P_{i}^{\max}, \forall i \in N, \forall t \in T \quad (1.5)$$

Обмеження сумарної потужності (максимум для підприємства):

$$\sum_{i=1}^N P_{i}(t) \leq P_{\text{total}}^{\max}, \forall t \in T \quad (1.6)$$

Забезпечення обсягу виробництва:

$$\sum_{i=1}^N f_{i}(P_{i}(t)) * \Delta t \geq Q_{\text{req}}, \quad (1.7)$$

де $f_{i}(P_{i}(t))$ – функція продуктивності обладнання залежно від потужності;
 Q_{req} – запланований обсяг виробництва.

Оптимізаційне рішення: знайти матрицю U^* керування потужностями

$$U^* = \begin{bmatrix} P_{11}^* & P_{12}^* & \dots & P_{1T}^* \\ P_{21}^* & P_{22}^* & \dots & P_{2T}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N1}^* & P_{N2}^* & \dots & P_{NT}^* \end{bmatrix}, \quad (1.8)$$

яка мінімізує цільову функцію F при виконанні всіх наведених обмежень.

1.4 Висновки до розділу 1

У результаті аналізу існуючих систем управління енергоспоживанням виробничих підприємств встановлено, що сучасні рішення забезпечують базовий моніторинг та облік енергоресурсів, однак у більшості випадків мають обмежені можливості щодо прогнозування та інтелектуальної підтримки прийняття рішень.

Виявлено, що значна частина наявних систем орієнтована переважно на фіксацію фактичних показників енергоспоживання та формування звітності,

без урахування сезонних коливань, виробничих особливостей та динаміки навантажень. Це знижує ефективність управління енергоресурсами та ускладнює своєчасне реагування на пікові режими споживання.

Аналіз також показав, що інтеграція інтелектуальних методів аналізу та прогнозування в існуючих системах або відсутня, або реалізована у спрощеному вигляді, що не дозволяє повною мірою використовувати потенціал накопичених даних.

На підставі проведеного огляду обґрунтовано доцільність розроблення автоматизованої системи управління енергоспоживанням підприємства, яка поєднує централізоване зберігання даних, математичні методи прогнозування та інтелектуальний модуль підтримки прийняття рішень. Такий підхід дозволяє підвищити енергоефективність підприємства та забезпечити більш обґрунтоване управління енергоресурсами.

2 РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ВИРОБНИЧОГО ПІДПРИЄМСТВА

2.1 Розробка структури бази даних енергетичної системи підприємства

Розглянемо типовий і найпоширеніший варіант – створення SQL-бази даних (БД) у Visual Studio з використанням SQL Server (LocalDB).

База даних призначена для обліку, моніторингу та аналізу енергоспоживання виробничого підприємства, включаючи:

- джерела енергії;
- споживачів (цехи, обладнання);
- засоби вимірювання;
- показники енергоспоживання;
- аварійні події;
- тарифні параметри.

Логічна структура БД (сутності) включає наступні таблиці:

- джерела енергії EnergySources;
- виробничі підрозділи Workshops;
- обладнання Equipment;
- лічильники та датчики Meters;
- показники споживання EnergyReadings;
- тарифні параметри Tariffs;
- аварійні події EnergyAccidents.

Таблиця EnergySources (табл. 2.1) призначена для зберігання інформації про джерела енергії виробничого підприємства, включаючи тип енергії, номінальну потужність та ознаку відновлюваності. В таблиці 2.1 наведені ідентифікатори полів та їх призначення. Первинним ключем таблиці є поле SourceID, яке формується автоматично.

Таблиця 2.1 – Таблиця джерел енергії EnergySources

Поле	Призначення
SourceID	Унікальний ідентифікатор (створюється автоматично)
SourceName	Назва джерела енергії
EnergyType	Тип енергії (електрика, газ, тепло)
NominalPower	Номінальна потужність, кВт
IsRenewable	Відновлюване джерело (1 – так, 0 – ні)

Створення бази даних відбувається за допомогою VS, в проєкті з назвою EnergyForecastSystem.

БД має назву ProductionDB. Запит на створення таблиці EnergySources в VS відображено на рис. 2.1.

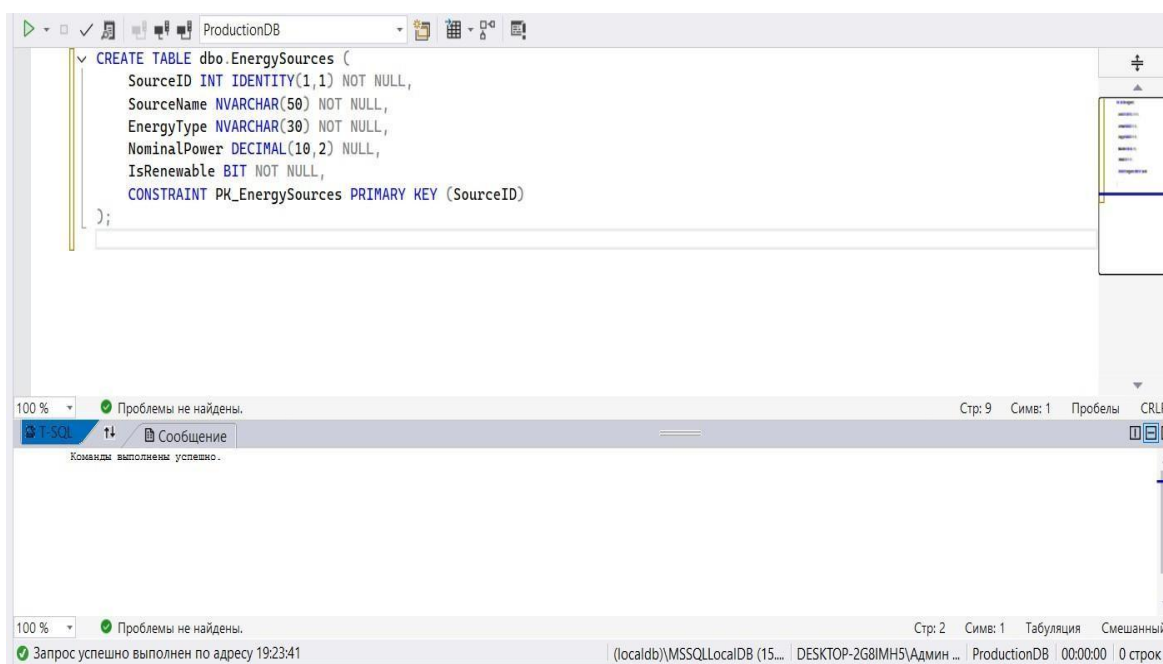


Рисунок 2.1 – Запит на створення таблиці EnergySources в БД ProductionDB

В БД з'явилась таблиця dbo.EnergySources з 5-тю стовбцями та максимальною кількістю строк – 1000 (рис. 2.2).

	SourceID	SourceName	EnergyType	NominalPower	IsRenewable
*	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Рисунок 2.2 – Вид таблиці dbo.EnergySources в VS

Заповнюємо її за допомогою скрипта:

```
INSERT INTO dbo.EnergySources
(SourceName, EnergyType, NominalPower, IsRenewable)
VALUES
('City Power Grid', 'Electricity', 500.00, 0),
('Solar Power Plant', 'Electricity', 120.50, 1),
('Gas Boiler House', 'Heat Energy', 300.00, 0);
```

В таблиці dbo.EnergySources міська електромережа має назву City Power Grid, сонячна електростанція – Solar Power Plant, газова котельня – Gas Boiler House. Типи енергоресурсів: електроенергія – Electricity, тепла енергія – Heat Energy.

Усі ідентифікатори та текстові значення в БД подано англійською мовою, що забезпечує коректну обробку даних у програмному середовищі та сумісність із засобами розробки. Українська термінологія використовується виключно в пояснювальній записці.

Таблиця Workshops (табл. 2.2) відображає структуру підприємства, цехи та їх локацію. В проєктованій базі даних вона створена за допомогою наступного скрипта:

```
CREATE TABLE dbo.Workshops
(WorkshopID INT IDENTITY(1,1) NOT NULL,
WorkshopName NVARCHAR(100) NOT NULL,
Location NVARCHAR(100),
CONSTRAINT PK_Workshops PRIMARY KEY (WorkshopID));
```

Таблиця 2.2 – Таблиця Workshops для відображення структури підприємства

Поле	Тип даних / Тип обмеження	Опис/Обмеження
WorkshopID	INT IDENTITY(1,1) NOT NULL	Унікальний ідентифікатор цеху. Автоматично генерується, починаючи з 1 з кроком 1.
WorkshopName	NVARCHAR(100) NOT NULL	Назва цеху або підрозділу (наприклад, "Цех №1", "Ремонтна дільниця"). Обов'язкове поле.
Location	NVARCHAR(100)	Фізичне місцезнаходження або адреса цеху. Це необов'язкове поле (NULL).
CONSTRAINT PK_Workshops PRIMARY KEY (WorkshopID)	Первинний ключ	Визначає WorkshopID як первинний ключ таблиці, забезпечуючи унікальну ідентифікацію кожного запису.

Ця структура дозволяє створювати простий довідник цехів для використання в інших таблицях бази даних (наприклад, для прив'язки обладнання чи персоналу до певного цеху).

Вона має назву dbo.Workshops та має наступний вигляд (рис. 2.3):

	WorkshopID	WorkshopName	Location
*	NULL	NULL	NULL

Рисунок 2.3 – Таблиця структури підприємства dbo.Workshos

Заповнюємо таблицю dbo.Workshops за допомогою скрипта:

```
INSERT INTO dbo.Workshops (WorkshopName, Location)
```

```
VALUES
```

```
('Mechanical workshop', 'Building A'),
```

```
('Electrical installation workshop', 'Building B');
```

Ключова таблиця Equipment (табл. 2.3) проекту відображає перелік обладнання підприємства і допомагає деталізувати управління енергоспоживанням та підтримувати зв'язки з іншими ERP-системами підприємства.

Вона має назву dbo.Equipment і створюється за допомогою скрипта:

```
CREATE TABLE dbo.Equipment (
```

```
EquipmentID INT IDENTITY(1,1) NOT NULL,
```

```
EquipmentName NVARCHAR(100) NOT NULL,
```

```
WorkshopID INT NOT NULL,
```

```
RatedPower DECIMAL(8,2),
```

```
CONSTRAINT PK_Equipment PRIMARY KEY (EquipmentID),
```

```
CONSTRAINT FK_Equipment_Workshops
```

```
FOREIGN KEY (WorkshopID) REFERENCES
```

```
dbo.Workshops(WorkshopID));
```

Таблиця 2.3 – Опис полів таблиці Equipment обладнання підприємства

Поле	Тип даних / Тип обмеження	Опис/Обмеження
EquipmentID	INT IDENTITY (1,1) NOT NULL	Унікальний ідентифікатор одиниці обладнання. Автоматично генерується, починаючи з 1 з кроком 1.
EquipmentName	NVARCHAR (100) NOT NULL	Назва або модель обладнання ("Токарний верстат ЧПУ" тощо)
WorkshopID	INT NOT NULL	Ідентифікатор цеху або майстерні, де знаходиться обладнання. Обов'язкове поле, що посилається на таблицю dbo.Workshops.
RatedPower	DECIMAL (8,2)	Номінальна потужність обладнання (наприклад, у кВт). Може зберігати числа загальною довжиною до 8 цифр, з двома знаками після коми. Це необов'язкове поле (NULL).
CONSTRAINT PK_Equipment PRIMARY KEY (EquipmentID)	Первинний ключ	Визначає EquipmentID як первинний ключ таблиці.
CONSTRAINT FK_Equipment_Workshops FOREIGN KEY (WorkshopID) REFERENCES dbo.Workshops (WorkshopID)	Зовнішній ключ	Встановлює зв'язок із таблицею dbo.Workshops через поле WorkshopID, гарантуючи, що обладнання прив'язане до існуючого цеху.

Така структура дозволяє вести облік основного обладнання, пов'язувати його з конкретними виробничими підрозділами та фіксувати ключові технічні характеристики. Створена за допомогою VS таблиця `dbo.Equipment` відображена на рисунку 2.4.

	EquipmentID	EquipmentName	WorkshopID	RatedPower
▶*	NULL	NULL	NULL	NULL

Рисунок 2.4 – Таблиця `dbo.Equipment`

Таблиця `Meters` (табл. 2.4) зберігає типи датчиків та лічильників, які працюють в системі енергопостачання підприємства та створюється за допомогою скрипта:

```
CREATE TABLE dbo.Meters (
    MeterID INT IDENTITY(1,1) NOT NULL,
    MeterSerial NVARCHAR(50) NOT NULL UNIQUE,
    EquipmentID INT NULL,
    SourceID INT NOT NULL,
    InstallDate DATE,
    CONSTRAINT PK_Meters PRIMARY KEY (MeterID),
    CONSTRAINT FK_Meters_Equipment
        FOREIGN KEY (EquipmentID) REFERENCES
        dbo.Equipment(EquipmentID),
    CONSTRAINT FK_Meters_EnergySources
        FOREIGN KEY (SourceID) REFERENCES
        dbo.EnergySources(SourceID));
```

Структуру таблиці `Meters` створюваної бази даних подано в таблиці 2.4.

Ця структура забезпечує централізоване зберігання даних про лічильники, їх прив'язку до фізичного обладнання та джерел енергії, а також гарантує унікальність серійних номерів.

Таблиця 2.4 – Опис полів таблиці Meters лічильників системи

Поле	Тип даних / Тип обмеження	Опис/Обмеження
MeterID	INT IDENTITY(1,1) NOT NULL	Унікальний ідентифікатор лічильника. Автоматично збільшується, починаючи з 1 з кроком 1.
MeterSerial	NVARCHAR(50) NOT NULL UNIQUE	Серійний номер лічильника. Є обов'язковим полем і повинен бути унікальним для кожного лічильника в системі.
EquipmentID	INT NULL	Ідентифікатор пов'язаного обладнання. Це необов'язкове поле (NULL), що посилається на таблицю dbo.Equipment.
SourceID	INT NOT NULL	Ідентифікатор джерела енергії (наприклад, електроенергія, газ). Обов'язкове поле, що посилається на таблицю dbo.EnergySources.
InstallDate	DATE	Дата встановлення лічильника. Необов'язкове поле.
CONSTRAINT PK_Meters PRIMARY KEY (MeterID)	Первинний ключ	Визначає MeterID як первинний ключ таблиці, забезпечуючи унікальну ідентифікацію кожного запису.

Продовження таблиці 2.4

Поле	Тип даних / Тип обмеження	Опис/Обмеження
CONSTRAINT FK_Meters_Equipment FOREIGN KEY (EquipmentID) REFERENCES dbo.Equipment (EquipmentID)	Зовнішній ключ	Встановлює зв'язок із таблицею dbo.Equipment через поле EquipmentID.
CONSTRAINT FK_Meters_EnergySources FOREIGN KEY (SourceID) REFERENCES dbo.EnergySources (SourceID)	Зовнішній ключ	Встановлює зв'язок із таблицею dbo.EnergySources через поле SourceID.

На рисунку 2.5 зображено її вигляд в проєкті.

	MeterID	MeterSerial	EquipmentID	SourceID	InstallDate
*	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Рисунок 2.5 – Таблиця dbo.Meters в базі даних

Таблиця EnergyReadings (табл. 2.5) відображає показники споживання та створена в VS за допомогою скрипта:

```
CREATE TABLE EnergyReadings (
    ReadingID INT IDENTITY PRIMARY KEY,
    MeterID INT NOT NULL,
    ReadingDate DATETIME NOT NULL,
    EnergyValue DECIMAL(10,3) NOT NULL, -- кВт·год
```

FOREIGN KEY (MeterID) REFERENCES Meters(MeterID));.

Таблиця 2.5 – Опис таблиці споживання енергоресурсів EnergyReadings

Поле	Тип даних / Тип обмеження	Опис/Обмеження
ReadingID	INT IDENTITY PRIMARY KEY	Унікальний ідентифікатор кожного показника. IDENTITY автоматично генерує значення, а PRIMARY KEY забезпечує його унікальність.
MeterID	INT NOT NULL	Ідентифікатор лічильника, який зафіксував показник. Це обов'язкове поле (NOT NULL), і воно посилається на таблицю Meters через зовнішній ключ (FOREIGN KEY).
ReadingDate	DATETIME NOT NULL	Точна дата і час фіксації показника. Обов'язкове поле (NOT NULL).
EnergyValue	DECIMAL(10,3) NOT NULL	Значення спожитої енергії в кВт·год. Може зберігати числа загальною довжиною до 10 цифр, з трьома знаками після коми для забезпечення точності. Обов'язкове поле.
FOREIGN KEY (MeterID) REFERENCES Meters(MeterID)	Обмеження	Встановлює зв'язок із таблицею Meters, гарантуючи, що кожен MeterID, зазначений у цій таблиці, існує в таблиці Meters.

Ця структура дозволяє ефективно реєструвати показники з різних лічильників та відстежувати споживання енергії з часом.

Її вигляд подано на рисунку 2.6.

	ReadingID	MeterID	ReadingDate	EnergyValue
*	NULL	NULL	NULL	NULL

Рисунок 2.6 – Таблиця dbo. EnergyReadings

Таблиця Tariffs (табл. 2.6) зберігає тарифні параметри на всі види задіяної енергії (табл. 2.6). Скрипт, за допомогою якого вона додана в проект, має наступний зміст:

```
CREATE TABLE Tariffs (
    TariffID INT IDENTITY PRIMARY KEY,
    EnergyType NVARCHAR(30) NOT NULL,
    PricePerUnit DECIMAL(8,4) NOT NULL, -- грн/кВт·год
    ValidFrom DATE NOT NULL,
    ValidTo DATE
);
```

Таблиця 2.6 – Опис структури та типів даних таблиці Tariffs

Поле	Тип даних / Тип обмеження	Опис/Обмеження
TariffID	INT IDENTITY(1,1)	Первинний ключ (PRIMARY KEY). Унікальний ідентифікатор тарифу. Генерується автоматично (починаючи з 1, крок 1). Не може бути пустим (NOT NULL).

Продовження таблиці 2.6

Поле	Тип даних / Тип обмеження	Опис/Обмеження
EnergyTypeID	INT	Зовнішній ключ (FOREIGN KEY). Ідентифікатор типу енергії, що посилається на таблицю dbo.EnergyTypes. Не може бути пустим (NOT NULL).
PricePerUnit	DECIMAL(8,4)	Ціна за одиницю енергії (наприклад, за кВт·год або м ³). Точність: 8 цифр загалом, 4 після коми. Не може бути пустим (NOT NULL).
ValidFrom	DATE	Дата початку дії тарифу. Не може бути пустою (NOT NULL).
ValidTo	DATE	Дата закінчення дії тарифу. Може бути пустою (NULL), якщо тариф діє безстроково.

Ця структура дозволяє вести історію тарифів, визначати їх тип, точну вартість і період дії.

Незаповнена таблиця dbo.Tariffs відображена на рисунку 2.7.

The screenshot shows a SQL Server query window displaying the results of a query on the dbo.Tariffs table. The table has six columns: TariffID, EnergyType, PricePerUnit, ValidFrom, and ValidTo. All values in the table are NULL. The window title is 'dbo.Tariffs [Данные]' and the query is 'SQLQuery12.sql *'. The maximum number of rows is set to 1000.

	TariffID	EnergyType	PricePerUnit	ValidFrom	ValidTo
*	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Рисунок 2.7 – Таблиця dbo.Tariffs

Таблиця для фіксації аварійних подій EnergyAccidents (табл. 2.7) в енергосистемі створена за допомогою скрипта:

```
CREATE TABLE EnergyAccidents (
    AccidentID INT IDENTITY PRIMARY KEY,
    EquipmentID INT NOT NULL,
    AccidentDate DATETIME NOT NULL,
    Description NVARCHAR(255),
    DowntimeHours DECIMAL(5,2),
    FOREIGN KEY (EquipmentID) REFERENCES
    Equipment(EquipmentID));
```

В таблиці 2.7 описуються поля, їх типи та призначення в таблиці EnergyAccidents створюваної БД.

Таблиця 2.7 – Опис структури та типів даних таблиці EnergyAccidents

Поле	Тип даних	Опис
AccidentID	INT IDENTITY PRIMARY KEY	Унікальний ідентифікатор кожної аварійної події. IDENTITY автоматично генерує значення, а PRIMARY KEY забезпечує його унікальність.
EquipmentID	INT NOT NULL	Ідентифікатор обладнання, з яким сталася аварія. Це обов'язкове поле (NOT NULL), і воно посилається на таблицю Equipment через зовнішній ключ (FOREIGN KEY).
AccidentDate	DATETIME NOT NULL	Точна дата і час аварійної події. Обов'язкове поле (NOT NULL).

Продовження таблиці 2.7

Поле	Тип даних	Опис
Description	NVARCHAR(255)	Детальний опис аварії (наприклад, тип поломки, причина). Може містити до 255 символів.
DowntimeHours	DECIMAL(5,2)	Тривалість простою обладнання в годинах (наприклад, 12.50). Може зберігати числа загальною довжиною до 5 цифр, з двома знаками після коми.
FOREIGN KEY (EquipmentID) REFERENCES Equipment (EquipmentID)	Обмеження	Встановлює зв'язок із таблицею Equipment, гарантуючи, що кожне EquipmentID, зазначене в цій таблиці, існує в таблиці Equipment.

Ця структура дозволяє ефективно реєструвати та відстежувати інциденти, пов'язуючи їх із конкретними одиницями обладнання та фіксуючи ключові деталі (рис. 2.8).

	AccidentID	EquipmentID	AccidentDate	Description	DowntimeHours
*	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Рисунок 2.8 – Таблиця dbo.EnergyAccidents

Наведемо короткий опис зв'язків між створеними таблицями. Діаграма зв'язків відображена на рисунку 2.9.

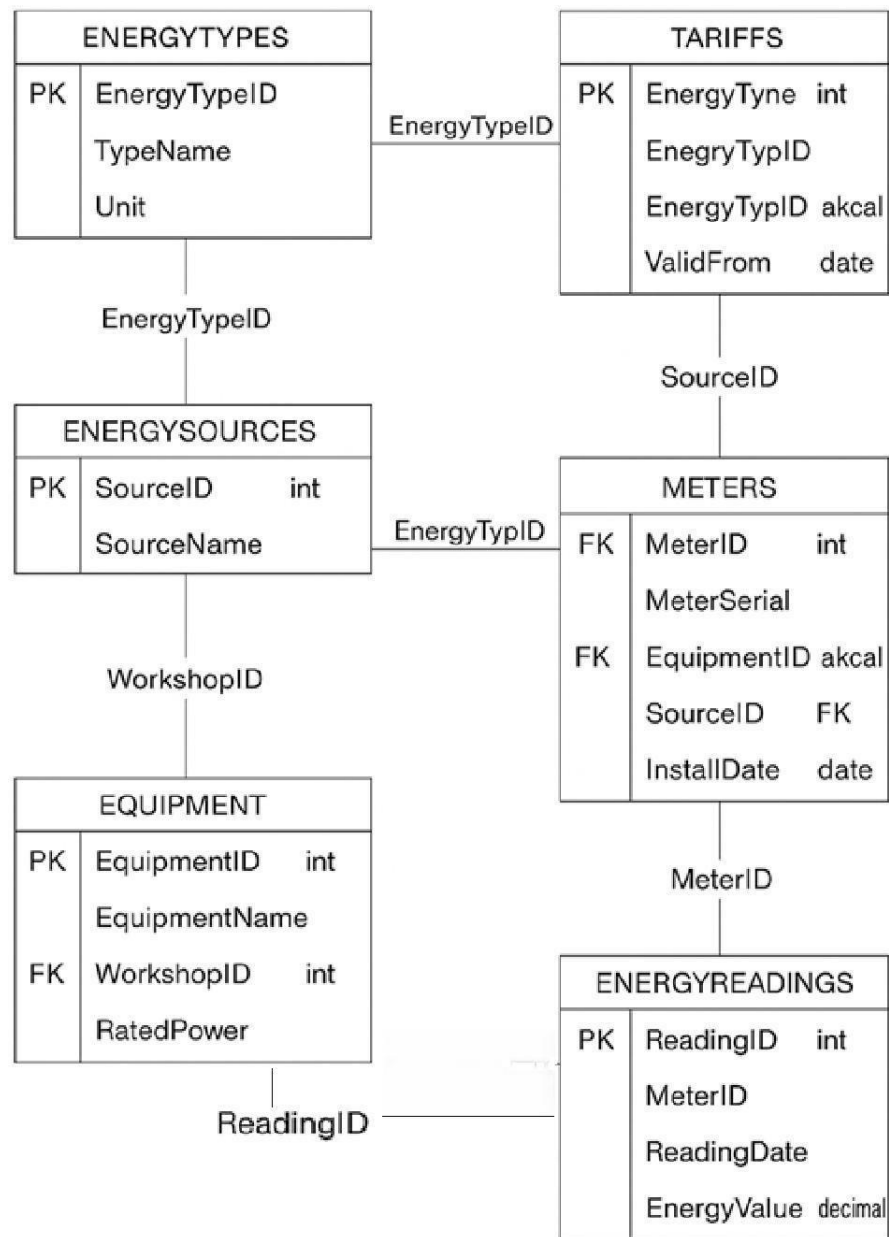


Рисунок 2.9 – ERD-діаграма зв'язків таблиць бази даних ProductionDB

Таблиця *EnergyTypes* пов'язана із таблицею *EnergySources* за полем *EnergyTypeID*. Тип зв'язку – один-до-багатьох (One-to-Many).

Таблиця *EnergyTypes* пов'язана із таблицею *Tariffs* за полем *EnergyTypeID* (тарифи по типах енергії).

Таблиця Workshops пов'язана із таблицею Equipment за полем Equipment.WorkshopID.

Таблиця EnergySources пов'язана із таблицею Meters за полем Meters.SourceID (лічильник прив'язаний до джерела енергії).

Таблиця Equipment пов'язана із таблицею Meters, при цьому Meters.EquipmentID може бути NULL (лічильник може бути не прив'язаний до конкретного обладнання).

Таблиця Meters пов'язана із таблицею EnergyReadings за полем EnergyReadings.MeterID. Всі типи зв'язків – One-to-Many.

2.2 Розробка концептуальної моделі системи

Склад системи управління енергоспоживанням виробничого підприємства можна представити у вигляді взаємопов'язаної сукупності функціональних підсистем, технічних засобів і програмних модулів, що забезпечують контроль, аналіз та оптимізацію споживання енергії [11, 12].

Метою побудови моделі є формалізація процесів збору, зберігання, аналізу та прогнозування енергоспоживання з подальшою підтримкою управлінських рішень.

Система складається з підсистеми збору даних, підсистеми зберігання, аналітично-прогнозної підсистеми, інтелектуального модуля підтримки прийняття рішень та підсистеми представлення результатів.

Підсистема збору даних забезпечує отримання первинної інформації з лічильників енергоресурсів у вигляді накопичувальних показників із часовою прив'язкою. Отримані дані передаються до централізованої бази даних для подальшої обробки.

Підсистема зберігання даних реалізована на основі реляційної бази даних ProductionDB, яка забезпечує структуроване збереження історичних даних про енергоспоживання, джерела енергії, обладнання та лічильники, а також підтримує цілісність і узгодженість інформації.

Концептуальна модель системи управління енергоспоживанням виробничого підприємства зображена на рисунку 2.10.

<p>Енергетичні підсистеми</p> <p>підсистема електропостачання</p> <p>підсистема теплопостачання</p> <p>підсистема водопостачання та вентиляції</p> <p>підсистема альтернативної енергетики</p>	<p>Підсистема вимірювань та збору даних</p> <p>smart-лічильники</p> <p>датчики навантаження</p> <p>контролери збору даних</p> <p>канали зв'язку</p>
<p>Підсистема моніторингу та керування</p> <p>scada-системи</p> <p>панелі операторів (виконавців)</p> <p>модуль аварійного реагування</p>	<p>Аналітико-облікова підсистема</p> <p>база даних енергетичних показників</p> <p>аналітичні модулі</p> <p>підсистема звітності</p>
<p>Підсистема оптимізації та планування</p> <p>алгоритми оптимального розподілу навантажень</p> <p>планування енергоспоживання</p> <p>інтелектуальні модулі</p>	<p>Інтерфейс користувача та інтеграційний рівень</p> <p>Web-додаток або диспетчерська панель</p> <p>інтеграція з ERP/MES-системами</p> <p>система доступу користувачів</p>

Рисунок 2.10 – Концептуальна модель системи управління енергоспоживанням виробничого підприємства

Аналітично-прогнозна підсистема виконує формування часових рядів енергоспоживання та побудову математичної моделі прогнозування. Для прогнозування використовується регресійна модель із трендовою та сезонною складовими, що дозволяє враховувати як довгострокову динаміку споживання, так і періодичні коливання, зумовлені виробничими та сезонними факторами.

Інтелектуальний модуль підтримки прийняття рішень аналізує результати прогнозування шляхом порівняння прогнозованих значень із базовим рівнем енергоспоживання. На основі експертних правил система класифікує поточний стан енергоспоживання та формує рекомендації щодо оптимізації режимів роботи або попередження перевантажень.

Підсистема представлення результатів забезпечує відображення результатів аналізу, прогнозування та рекомендацій користувачу у зрозумілій формі, що дозволяє оперативно приймати управлінські рішення.

Енергетична підсистема підприємства складається з декількох модулів або підсистем, склад яких залежить від профілю підприємства. Розглянемо концептуальну модель управління енергоспоживанням для приладобудівного підприємства.

Енергетична підсистема для такого підприємства складається з модулів:

- електропостачання, який включає трансформаторні підстанції, розподільчі щити, кабельні лінії, системи аварійного резервування;
- альтернативної енергетики, який може складатися із сонячних панелей, вітрових установок (вітрогенераторів), систем накопичення енергії (акумуляторів);
- теплопостачання, який включає котельні, теплообмінники, мережі теплопостачання, прилади контролю температури;
- водопостачання та вентиляції, який складається із систем подачі технологічної води, повітря, компресорних установок.

Підсистема вимірювання та збору даних складається із:

- smart-лічильників електроенергії, води, газу, тепла;

- датчиків навантаження на енергетичне обладнання;
- контролерів збору даних (PLC, RTU) для передачі інформації у центральну систему керування;
- каналів зв'язку – дротові (Ethernet, Modbus TCP) та бездротові (Wi-Fi, LoRa, Zigbee, Bluetooth).

Підсистема моніторингу та керування включає:

- SCADA-систему для візуалізації параметрів енергоспоживання, контролю в реальному часі, видачі команд;
- панелі операторів для локального керування обладнанням;
- модуль аварійного реагування для виявлення перевантажень, витоків, аварій, із подальшим сповіщенням.

Аналітично-облікова підсистема складається з:

- бази даних енергетичних показників, яка зберігає історію споживання, навантаження, аварій;
- аналітичних модулів для аналізу ефективності споживання, прогнозування навантажень;
- підсистеми звітності для формування звітів для енергоменеджменту, бухгалтерії та керівництва.

Підсистема оптимізації та планування включає:

- алгоритми оптимального розподілу навантажень для автоматичного балансування між джерелами енергії;
- планувальника енергоспоживання, який коригує графік роботи обладнання для зменшення пікових навантажень;
- інтелектуальні модулі (AI/ML) – прогнозування енергетичних потреб підприємства.

Інтерфейс користувача та інтеграційний рівень включає:

- Web-додаток або диспетчерську панель для віддаленого моніторингу, керування та звітності;

- інтеграція з ERP/MES-системами для обміну даними про виробничі процеси для оптимізації споживання енергії;
- систему доступу користувачів таких як адміністратор, енергоменеджер, диспетчер, оператор.

Підсистема управління енергоспоживанням представляє собою вбудований комплекс програм в загальну ERP-систему підприємства і має з нею низку загальних модулів.

2.3 Інтелектуальний модуль системи керування енергоспоживанням

Інтелектуальний модуль призначений для підтримки прийняття рішень щодо режимів енергоспоживання підприємства на основі даних вимірювань і результатів прогнозування. На відміну від звичайного обчислювального модуля, інтелектуальний модуль не лише формує прогноз, а й інтерпретує його, виявляє ризикові стани та генерує рекомендації для диспетчера або керівника виробництва.

Структурно модуль складається з трьох логічних компонентів:

- модуль прогнозування будує прогноз енергоспоживання для кожного лічильника підсистеми на наступний період;
- модуль оцінювання відхилень порівнює прогноз із базовими значеннями (середнім або нормативом) та обчислює відносне відхилення;
- експертний модуль правил на основі набору правил класифікує стан (норма/попередження/критично/резерв) і формує рекомендацію.

2.3.1 Алгоритм прийняття рішень

Для прийняття рішень використано експертний підхід (rule-based system), який відноситься до класичних методів штучного інтелекту. Вхідними даними є прогнозоване споживання \hat{E}_t та базове значення \bar{E} , обчислене за попередні періоди (наприклад, середнє за (k) місяців).

Відносне відхилення визначається:

$$\delta = (\hat{E}_{(t+1)} - \bar{E}) / \bar{E} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

де δ – відносне відхилення прогнозу,

%; $\hat{E}_{(t+1)}$ – прогнозоване ергоспоживання на наступний період;

\bar{E} – базове (середнє) енергоспоживання за попередні періоди.

Далі система правил виконує класифікацію стану та формує керуючу рекомендацію. Пороги можуть бути адаптовані під конкретне підприємство (тип виробництва, сезонність, наявність пікових режимів). Експертні правила інтелектуального модуля згруповані в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Експертні правила інтелектуального модуля

№	Умова (за відхиленням δ)	Клас стану	Рекомендація
1	$\delta > 15\%$	Критичний ріст	Негайно зменшити навантаження/перерозподілити споживачів, перевірити причини піку
2	$5\% < \delta \leq 15\%$	Попередження	Оптимізувати графік роботи, перенести частину процесів на менш завантажені години
3	$5\% \delta < -5\%$	Резерв потужності	Можливе підключення додаткових споживачів/виконання енергоємних робіт у цей період

2.3.2 Формування керуючих рекомендацій

Виходом інтелектуального модуля є набір повідомлень/рекомендацій, що містять:

- ідентифікатор лічильника (або підсистеми/цеху);
- прогнозоване споживання на наступний період;

- базове значення та відсоток відхилення;
- клас стану (норма/попередження/критично/резерв);
- текстова рекомендація для менеджера, який здійснює керування.

Такий підхід забезпечує практичну цінність системи: прогноз стає підставою для управлінського рішення (оптимізація, попередження аварійних піків, планування навантажень).

2.4 Математична модель прогнозування енергоспоживання

2.4.1 Формування часового ряду енергоспоживання

Вихідні дані для прогнозування формуються на основі накопичувальних показників лічильників електричної та теплової енергії, що зберігаються в базі даних системи. Оскільки лічильники фіксують сумарне споживання з моменту встановлення, для отримання фактичного споживання за окремий місяць використовується операція різниці споживання.

Місячне енергоспоживання визначається за формулою (2.2):

$$E_t = V_t - V_{t-1}, \quad (2.2)$$

де E_t – обсяг спожитої енергії за t -й місяць;

V_t – накопичувальне значення показника лічильника у t -му місяці;

V_{t-1} – накопичувальне значення показника лічильника у попередньому місяці.

Таким чином, формується дискретний часовий ряд енергоспоживання, у якому кожна точка відповідає фактичному обсягу споживання енергії за певний календарний період.

2.3.2 Регресійна модель прогнозування

Для прогнозування значень енергоспоживання використано метод

множинної лінійної регресії, який дозволяє встановити залежність між обсягом споживаної енергії та часовими факторами.

Загальний вигляд регресійної моделі має форму:

$$E_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{12}\right) + \beta_3 \cos\left(\frac{2\pi t}{12}\right) + \varepsilon_t, \quad (2.3)$$

де t – порядковий номер місяця в часовому ряді;

m – номер місяця календарного року ($m = 1, \dots, 12$); β_0 – вільний член регресійної моделі;

β_1 – коефіцієнт трендової складової;

β_2, β_3 – коефіцієнти сезонної складової;

ε_t – випадкова похибка моделі.

Трендова складова моделі дозволяє врахувати довгострокові зміни в енергоспоживанні, зумовлені розвитком виробництва або модернізацією обладнання.

2.4.3 Урахування сезонних коливань

Сезонний характер енергоспоживання підприємства пов'язаний із кліматичними умовами, режимами роботи виробничих підрозділів та опалювальними періодами. Для математичного опису сезонності застосовано гармонічні функції синуса та косинуса.

Формули (2.4)–(2.5) описують сезонні гармонічні компоненти,

$$S_1(m) = \sin\left(\frac{2\pi m}{12}\right), \quad (2.4)$$

$$S_2(m) = \cos\left(\frac{2\pi m}{12}\right). \quad (2.5)$$

Ці функції описують періодичні сезонні коливання енергоспоживання з річним періодом, забезпечують моделювання періодичних коливань з періодом один рік. Такий підхід дозволяє коректно врахувати повторювані щорічні зміни рівня енергоспоживання без ускладнення моделі.

Використання двох гармонічних функцій забезпечує більшу гнучкість моделі та підвищує точність прогнозування.

2.4.4 Оцінювання параметрів та прогнозування

Оцінювання параметрів регресійної моделі здійснюється методом найменших квадратів, який полягає у мінімізації суми квадратів відхилень фактичних значень енергоспоживання від модельних.

Формула (2.6) — критерій методу найменших квадратів

$$\sum_{t=1}^n (E_t - E_t^{\wedge})^2 \rightarrow \min, \quad (2.6)$$

де E_t^{\wedge} — значення енергоспоживання, отримане за регресійною моделлю;

n — кількість спостережень у часовому ряді.

Після визначення параметрів моделі виконується прогнозування значення енергоспоживання на наступний розрахунковий період шляхом підстановки відповідних часових параметрів у побудовану регресійну залежність.

Запропонований математичний апарат забезпечує достатню точність короткострокового прогнозування та може бути використаний у системах інтелектуального керування енергоресурсами підприємства для підтримки процесів планування та оптимізації енергоспоживання.

2.4 Висновки до розділу 2

У другому розділі дипломної роботи було виконано проектування та розробку підсистеми управління енергоспоживанням виробничого підприємства, яка забезпечує збір, зберігання, аналіз та прогнозування енергетичних показників. Розроблена підсистема орієнтована на автоматизацію процесів енергомоніторингу та підтримку прийняття управлінських рішень.

У ході роботи обґрунтовано структуру та склад реляційної бази даних ProductionDB, яка забезпечує централізоване зберігання інформації про джерела енергії, обладнання, лічильники та показники енергоспоживання. Запропонована структура бази даних гарантує цілісність даних і можливість їх подальшого аналітичного опрацювання.

Реалізовано аналітично-прогнозну складову підсистеми на основі математичної моделі, що поєднує трендову та сезонну компоненти. Використання методів аналізу часових рядів дозволило формувати прогноз енергоспоживання на наступний період з урахуванням історичних даних та сезонних коливань.

У межах розділу також розроблено інтелектуальний модуль підтримки прийняття рішень, який на основі експертних правил аналізує результати прогнозування, визначає поточний стан енергоспоживання та формує рекомендації щодо оптимізації режимів роботи або запобігання перевантаженням.

Таким чином, результати, отримані у другому розділі, підтверджують досягнення поставлених завдань щодо розробки функціональної підсистеми управління енергоспоживанням. Створена підсистема є основою для практичної реалізації програмної системи та її подальшого впровадження на виробничому підприємстві, що розглядається у наступному розділі дипломної роботи.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ENERGYFORECASTSYSTEM

3.1 Заповнення таблиць БД

Для початку роботи з системою потрібно виконати правило заповнення таблиць та залежності таблиць між собою.

Довідники EnergyTypes, Workshops та EnergySources не залежать не інших таблиць.

Основною таблицею є Equipment, залежними від неї є Meters та Tariffs.

Операційні дані зберігаються в EnergyReadings та EnergyAccidents.

Для прикладу роботи реалізованого проєкту заповнюємо таблиці бази даних.

Заповнюємо EnergyTypes (рис.3.1):

```
INSERT INTO dbo.EnergyTypes (TypeName, Unit)
```

```
VALUES
```

```
('Electricity', 'kWh'),
```

```
('Heat Energy', 'Gcal'),
```

```
('Natural Gas', 'm3');
```



EnergyTypeID	TypeName	Unit
1	Electricity	kWh
2	Heat Energy	Gcal
3	Natural Gas	m3
* NULL	NULL	NULL

Рисунок 3.1 – Заповнена таблиця EnergyTypes

Заповнюємо EnergySources (рис. 3.2). Скрипт для її заповнення виглядає наступним чином:

```

INSERT INTO dbo.EnergySources
(SourceName, NominalPower, IsRenewable, EnergyTypeID)
VALUES
('City Power Grid', 500.00, 0, 1),
('Solar Power Plant', 120.50, 1, 1),
('Gas Boiler House', 300.00, 0, 2);

```

The screenshot shows a SQL Server query window displaying the results of a query against the 'dbo.EnergySources' table. The table has six columns: SourceID, SourceName, EnergyType, NominalPower, and IsRenewable. The data is as follows:

SourceID	SourceName	EnergyType	NominalPower	IsRenewable
1	City Power Grid	Electricity	500,00	False
2	Solar Power Plant	Electricity	120,50	True
3	Gas Boiler House	Heat Energy	300,00	False
4	City Power Grid	Electricity	500,00	False
5	Solar Power Plant	Electricity	120,50	True
6	Gas Boiler House	Heat Energy	300,00	False
7	City Power Grid	Electricity	500,00	False
8	Solar Power Plant	Electricity	120,50	True
9	Gas Boiler House	Heat Energy	300,00	False
▶*	NULL	NULL	NULL	NULL

Рисунок 3.2 – Заповнена таблиця ресурсів EnergySources

Заповнюємо таблицю Workshops (рис.3.3):

```

INSERT INTO dbo.Workshops (WorkshopName, Location)
VALUES
('Mechanical Workshop', 'Building A'),
('Electrical Workshop', 'Building B');

```

Таблиця Meters даних з датчиків заповнюється за допомогою наступного скрипта:

```

INSERT INTO dbo.Meters
(MeterSerial, EquipmentID, SourceID, InstallDate)
VALUES
('EM-10001', 1, 1, '2024-01-15'),

```

('EM-10002', 2, 1, '2024-02-01'),
 ('HM-20001', NULL, 3, '2024-01-10');

та має вигляд, відображений на рисунку 3.3.

	MeterID	MeterSerial	EquipmentID	SourceID	InstallDate
▶	1	EM-10001	1	1	15.01.2024
	2	EM-10002	2	1	01.02.2024
	3	HM-20001	NULL	3	10.01.2024
*	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

Рисунок 3.3 – Таблиця даних з датчиків та лічильників

Заповнена таблиця БД `dbo.Workshop` відображає структуру підприємства та розрахована на 1000 структурних одиниць та їх локацій (рис. 3.4).

	WorkshopID	WorkshopName	Location
▶	1	Mechanical workshop	Building A
	2	Electrical installation workshop	Building B
*	NULL	NULL	NULL

Рисунок 3.4 – Таблиця `dbo.Workshop` відображає структуру підприємства

Тільки після заповнення всіх попередніх таблиць заповнюємо таблицю `Equipment` (рис. 3.5):

```
INSERT INTO dbo.Equipment (EquipmentName, WorkshopID, RatedPower)
```

```
VALUES
```

```
('CNC Milling Machine', 1, 25.5),
```

('Assembly Line №1', 2, 18.0);.

	EquipmentID	EquipmentNa...	WorkshopID	RatedPower
▶	1	CNC Milling Ma...	1	25,50
	2	Assembly Line ?1	2	18,00
*	NULL	NULL	NULL	NULL

Рисунок 3.5 – Заповнена таблиця Equipment

На початковому етапі база даних містить порожні таблиці, що відповідає класичному підходу до проектування реляційних баз даних. Наповнення таблиць здійснюється поетапно з урахуванням ієрархії зв'язків між сутностями.

Перевірку зв'язків між таблицями можна зробити за допомогою скрипта:

```

SELECT
    fk.name AS FK_Name,
    tp.name AS ParentTable,
    cp.name AS ParentColumn,
    tr.name AS ReferencedTable,
    cr.name AS ReferencedColumn
FROM sys.foreign_keys fk
JOIN sys.foreign_key_columns fkc ON fk.object_id =
fkc.constraint_object_id
JOIN sys.tables tp ON fkc.parent_object_id = tp.object_id
JOIN sys.columns cp ON fkc.parent_object_id = cp.object_id AND
fkc.parent_column_id = cp.column_id
JOIN sys.tables tr ON fkc.referenced_object_id = tr.object_id
JOIN sys.columns cr ON fkc.referenced_object_id = cr.object_id AND
fkc.referenced_column_id = cr.column_id;
результатом якого буде зображення зв'язків між таблицями БД

```

(рис. 3.6).

	FK_Name	ParentTable	ParentColumn	ReferencedTa...	ReferencedColumn
1	FK_Meters_EnergySources	Meters	SourceID	EnergySources	SourceID
2	FK_Equipment_Workshops	Equipment	WorkshopID	Workshops	WorkshopID
3	FK_Meters_Equipment	Meters	EquipmentID	Equipment	EquipmentID
4	FK_EnergyAcc_Equip__34C8D9D1	EnergyAccidents	EquipmentID	Equipment	EquipmentID
5	FK_EnergyRea_Meter__300424B4	EnergyReadings	MeterID	Meters	MeterID
6	FK_Tariffs_EnergyTypes	Tariffs	EnergyTypeID	EnergyTypes	EnergyTypeID

Рисунок 3.6 – Результат перевірки зв'язків між таблицями БД

Перевірку даних можна зробити за допомогою наступного запиту:

```
SELECT * FROM dbo.Equipment e
WHERE NOT EXISTS (
    SELECT 1 FROM dbo.Workshops w
    WHERE w.WorkshopID = e.WorkshopID
);
```

В разі відсутності помилок повертається код 0.

Після перевірок цілісності БД зовнішній ключ дорівнює FK_EnergyReadings_Meters.

Для перевірки роботи системи внесемо тестові показники лічильників (рис. 3.7).

	ReadingID	MeterID	ReadingDate	EnergyValue
▶	1	1	01.01.2025 0:00:...	1250,000
	2	1	01.02.2025 0:00:...	1325,500
	3	1	01.03.2025 0:00:...	1410,750
	4	2	01.01.2025 0:00:...	980,000
	5	2	01.02.2025 0:00:...	1045,250
	6	2	01.03.2025 0:00:...	1120,900
	7	3	01.01.2025 0:00:...	320,000
	8	3	01.02.2025 0:00:...	355,400
	9	3	01.03.2025 0:00:...	390,000
	1002	1	01.04.2025 0:00:...	1495,300
	1003	2	01.04.2025 0:00:...	1198,600
	1004	3	01.04.2025 0:00:...	425,500
	1005	1	01.05.2025 0:00:...	1580,900
	1006	2	01.05.2025 0:00:...	1275,200
	1007	3	01.05.2025 0:00:...	460,800
*	NULL	NULL	NULL	NULL

Рисунок 3.7 – Таблиця EnergyReadings із тестовими даними

Таблиця EnergyReadings є кінцевою в ієрархії зв'язків бази даних та не використовується як довідникова, у зв'язку з чим інші таблиці не містять зовнішніх ключів, що на неї посилаються.

3.2 Програмна реалізація прогнозування енергоспоживання

Програмну частину системи керування енергоживленням підприємства реалізовано у вигляді консольного застосунку мовою C++ у середовищі Visual Studio. Для доступу до бази даних ProductionDB, розгорнутої в Microsoft SQL Server LocalDB, використано стандартний інтерфейс ODBC.

Програма здійснює вибірку накопичувальних показників лічильників з таблиці EnergyReadings та виконує агрегацію даних до помісячного споживання шляхом обчислення різниці між поточним і попереднім місячними показниками. Для цього застосовано аналітичну SQL-функцію LAG(), що забезпечує коректне визначення фактичного обсягу спожитої енергії.

На основі отриманих часових рядів реалізовано модель прогнозування, побудовану на методі множинної лінійної регресії з урахуванням трендової складової та сезонних коливань. Сезонність моделюється за допомогою синусоїдальних функцій, що дозволяє врахувати періодичний характер енергоспоживання протягом року.

Результатом роботи програми є прогнозоване значення енергоспоживання для кожного лічильника на наступний розрахунковий період, що може бути використане для підтримки прийняття рішень у системі інтелектуального управління енергетичною інфраструктурою підприємства.

3.3 Керівництво користувача

Програмна система призначена для аналізу, прогнозування та інтелектуальної підтримки прийняття рішень у системі керування енергоживленням підприємства. Система працює у вигляді консольного застосунку, розробленого мовою C++, та використовує базу даних ProductionDB, розгорнуту в Microsoft SQL Server LocalDB. Програмний продукт орієнтований на використання фахівцями з енергоменеджменту, інженерами та аналітиками підприємства.

Для коректної роботи програмної системи необхідно:

- операційна система: Windows 10 / Windows 11;
- середовище розробки: Microsoft Visual Studio (версія 2019 або новіша);
- встановлений Microsoft SQL Server LocalDB;
- ODBC Driver 17 або 18 for SQL Server;
- процесор: не нижче Intel Core i3 або аналогічний;
- оперативна пам'ять: не менше 4 ГБ.

Підготовка до роботи починається з налаштування бази даних. Перед запуском програми користувач повинен переконатися, що база даних ProductionDB створена та містить необхідні таблиці, зокрема:

- EnergyReadings,
- Meters,
- EnergyTypes,
- EnergySources,
- Tariffs.

У таблиці EnergyReadings мають бути наявні накопичувальні показники лічильників щонайменше за 4 або 5 послідовних місяців, що є необхідною умовою для виконання прогнозування.

Налаштування підключення: параметри підключення до бази даних

задаються безпосередньо у вихідному коді програми через рядок підключення ODBC та не потребують додаткового налаштування з боку користувача.

Для запуску програми необхідно:

- відкрити проєкт у середовищі Visual Studio;
- виконати команду Збірка → Зібрати рішення;
- запустити програму за допомогою команди Відладка → Запуск без відладки (Ctrl + F5).

Після запуску програма автоматично:

- підключається до бази даних;
- зчитує історичні дані енергоспоживання;
- формує помісячні часові ряди;
- виконує прогнозування на наступний період;
- активує інтелектуальний модуль підтримки прийняття рішень.

3.4 Робота з автоматизованою системою EnergyForecastSystem

Програма не потребує введення даних з клавіатури. Уся обробка виконується автоматично на основі інформації, що зберігається в базі даних.

У консольному вікні відображається така інформація:

- ідентифікатор лічильника;
- прогнозоване значення енергоспоживання на наступний місяць;
- базове (середнє) значення споживання;
- відносне відхилення прогнозу;
- поточний стан системи (норма, попередження, критичний ріст, резерв);
- текстова рекомендація для користувача.

Інтерпретація результатів.

Інтелектуальний модуль класифікує стан енергоспоживання за такими категоріями:

– норма: прогноз відповідає типовому рівню споживання, втручання не потрібне.

– попередження: можливе підвищене навантаження, рекомендовано оптимізацію режимів роботи.

– критичний ріст: значне перевищення прогнозованого споживання, необхідне негайне управлінське втручання.

– резерв потужності: можливість підключення додаткових споживачів або виконання енергоємних робіт.

Отримані рекомендації можуть бути використані для планування виробничих процесів та оптимізації енергоспоживання підприємства.

Прийняття рішення системою на основі даних за 4 місяці продемонстровано на рисунку 3.8.

```

Database connection OK
Meters with monthly data: 3

MeterID=1 months=4
Прогноз на наступний місяць: 100.131
Базове значення (середнє): 85.1333
Відхилення: 17.6168 %
Стан: Критичний ріст
Рекомендація: Зменшити навантаження або перерозподілити споживачів. Перевірити причини пікового споживання та стан об'єднання.

MeterID=2 months=4
Прогноз на наступний місяць: 78.394
Базове значення (середнє): 76.65
Відхилення: 2.27533 %
Стан: Норма
Рекомендація: Режим роботи стабільний, втручання не потрібне.

MeterID=3 months=4
Прогноз на наступний місяць: 31.4947
Базове значення (середнє): 35.1333
Відхилення: -10.3565 %
Стан: Резерв потужності
Рекомендація: Наявний резерв енергопотужності. Можливе планування додаткових робіт або підключення споживачів у цей період.

```

Рисунок 3.8 – Прогноз енергоспоживання

Завершення роботи.

Після завершення аналізу та прогнозування програма автоматично звільняє всі ресурси та завершує роботу. Додаткових дій від користувача не

потрібно.

Обмеження та зауваження:

- точність прогнозування залежить від повноти та якості історичних даних;
- система орієнтована на короткострокове прогнозування;
- для підвищення точності рекомендується регулярно оновлювати базу даних новими показниками лічильників.

3.5 Висновки до розділу 3

У даному розділі виконано практичну реалізацію розробленої системи управління енергоспоживанням EnergyForecastSystem, що підтверджує працездатність запропонованих у попередніх розділах концептуальних та проєктних рішень. Система реалізована у вигляді консольного застосунку мовою програмування C++ з використанням бази даних ProductionDB.

У процесі реалізації забезпечено підключення до реляційної бази даних через технологію ODBC, коректне зчитування історичних даних енергоспоживання та формування часових рядів на основі накопичувальних показників лічильників. Реалізована структура програмного коду є модульною та дозволяє розширювати функціональні можливості системи.

Було реалізовано аналітично-прогнозний модуль, який використовує математичну модель з трендовою та сезонною складовими для прогнозування енергоспоживання на наступний період. Отримані результати прогнозування підтверджують можливість використання розробленої моделі для короткострокового планування енергоспоживання підприємства.

Також реалізовано інтелектуальний модуль підтримки прийняття рішень, який на основі експертних правил аналізує прогнозовані значення, визначає поточний стан системи та формує рекомендації щодо оптимізації енергоспоживання або попередження перевантажень. Це дозволяє підвищити інформативність результатів та практичну цінність системи.

Таким чином, реалізація системи EnergyForecastSystem підтвердила досягнення мети дипломної роботи та може бути використана як основа для подальшого розвитку та впровадження в інформаційні системи управління енергоспоживанням виробничих підприємств.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні положення

Охорона праці є важливою складовою забезпечення безпечних та здорових умов праці під час розроблення й експлуатації інформаційних систем управління енергоспоживанням підприємства. У межах даної дипломної роботи розглядаються питання охорони праці для фахівців, які працюють з комп'ютерною технікою та програмним забезпеченням.

Основними нормативними документами у сфері охорони праці є Закон України «Про охорону праці», ДСТУ та державні санітарні норми, що регламентують умови праці з персональними електронно-обчислювальними машинами [20].

4.2 Характеристика робочого місця

Робоче місце розробника програмного забезпечення оснащено персональним комп'ютером, монітором, клавіатурою, маніпулятором типу «миша» та допоміжними пристроями. Робота належить до категорії робіт з підвищеним зоровим навантаженням та незначним фізичним навантаженням, але з можливим психоемоційним напруженням.

Робоче місце повинно відповідати ергономічним вимогам, а розміщення обладнання має забезпечувати зручну позу працівника та мінімізувати втому [21].

Під час роботи з комп'ютерною технікою можливий вплив таких шкідливих факторів:

- тривале статичне навантаження;
- перенапруження органів зору;
- електромагнітне випромінювання від монітора;
- підвищене психоемоційне навантаження;

– небезпека ураження електричним струмом у разі порушення правил експлуатації обладнання.

Врахування та мінімізація впливу зазначених факторів є необхідною умовою безпечної роботи.

Приміщення, у якому виконується робота, повинно відповідати санітарно-гігієнічним нормам:

- температура повітря: 20°C – 24 °C;
- відносна вологість: 40 % – 60 %;
- швидкість руху повітря: не більше 0,1 м/с.

Освітлення робочого місця має бути комбінованим (природне та штучне). Рівень освітленості робочої поверхні повинен становити не менше 500 лк. Не допускається виникнення відблисків на екрані монітора.

Вимоги електробезпеки забезпечуються:

- використанням справного електрообладнання;
- наявністю заземлення електричних пристроїв;
- використанням сертифікованих подовжувачів та розеток;
- заборonoю роботи з обладнанням у разі пошкодження ізоляції кабелів.

Перед початком роботи необхідно перевіряти справність обладнання та відсутність видимих пошкоджень.

Необхідною умовою є також організація режиму праці та відпочинку.

Для зменшення втоми та негативного впливу роботи з комп'ютером рекомендується дотримуватися регламентованих перерв:

- після кожної години роботи перерва до 10 хвилин;
- виконання вправ для очей та розминки опорно-рухового апарату.

Раціональний режим праці та відпочинку сприяє збереженню працездатності та профілактиці професійних захворювань.

З метою забезпечення пожежної безпеки необхідно:

- дотримуватися правил експлуатації електрообладнання;
- не перевантажувати електричні мережі;

- мати доступ до первинних засобів пожежогасіння;
- у разі виникнення пожежі негайно вимкнути електроживлення та повідомити відповідні служби.

4.3 Висновки до розділу 4

Дотримання вимог охорони праці під час розроблення та експлуатації системи управління енергоспоживанням забезпечує безпечні умови праці, зменшує ризик професійних захворювань та сприяє підвищенню ефективності роботи персоналу. Запропоновані заходи відповідають чинним нормативним вимогам і можуть бути застосовані на практиці.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі проаналізована предметна область щодо автоматизації управління підприємством, його енергоспоживанням, доведена актуальність обраної теми та сформульовані практичні завдання.

В результаті досліджень розроблена концепція підсистеми управління енергоспоживанням з інтелектуальною складовою, що поєднує принципи автоматизації, енергетичного моніторингу та аналітичного прогнозування споживання ресурсів. Особливістю запропонованого підходу є використання адаптивного алгоритму прийняття рішень на основі аналізу поточних і історичних даних енергоспоживання, який дозволяє не лише контролювати процес, а й оптимізувати режими роботи обладнання у реальному часі.

Новизна запропонованого підходу полягає в структурній інтеграції інформаційної системи енергоменеджменту з виробничими технологічними процесами, що підвищує ефективність функціонування підприємства загалом.

Мета роботи досягнута: запропонована концептуальна модель та програмний продукт забезпечує комплексний підхід до управління енергоспоживанням підприємства та створює основу для підвищення енергоефективності й зниження експлуатаційних витрат.

Практична цінність полягає у створенні прикладного програмного рішення, яке може бути впроваджене на промислових підприємствах для автоматизації обліку, аналізу та управління енергоспоживанням.

Отримані результати роботи відповідають Цілям сталого розвитку 7 “Доступна та чиста енергія”, а саме п. 7.1 “Розширити інфраструктуру та модернізувати мережі для забезпечення надійного та сталого енергопостачання на основі впровадження інноваційних технологій”.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. К.: ДП «УкрНДНЦ». 2016. 30 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.
3. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 05 лютого 2025 р. № 44. – URL: https://nure.ua/wp-content/uploads/2025/polozhennia_z_akademichnoi_dobrochesnosti.pdf (дата звернення: 09.10.2025).
4. Основи наукових досліджень : підручник / І. Ш. Невлюдов, Ю. М. Олександров, А. О. Андрусевич, О. О. Чала ; М-во освіти і науки України, Харків.нац. ун-т радіоелектроніки. – Prague : OKTAN PRINT, 2024. – 468 с. DOI <https://doi.org/10.46489/ONDNP> Режим доступу на ресурсі бібліотеки ХНУРЕ <https://openarchive.nure.ua/handle/document/28574>
5. Ministry of Energy of Ukraine. Energy Strategy of Ukraine. URL: <https://mev.gov.ua/en/reforma/energy-strategy>
6. Невлюдов І. Ш. Техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень в інтелектуальному виробництві : підручник / І. Ш. Невлюдов. - Кривий Ріг : Чернявський Д. О., 2024. – 388 с. : іл. Режим доступу на ресурсі бібліотеки ХНУРЕ <https://openarchive.nure.ua/handle/document/27408>
7. Невлюдов І.Ш. Автоматизована система керування технологічними процесами в SCADA системі TRACE MODE 6: Навчальний посібник / І.Ш.

Невлюдов, А.О. Андрусевич, В.В. Євсєєв, С.С. Максимова, М.Г. Стародубцев, В.В.Невлюдова. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2018. – 320 с.

8. Adenekan, T. K. How IoT is shaping the future of smart grids for better energy management. Obafemi Awolowo University. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/385206981_How_IoT_is_Shaping_the_Future_of_Smart_Grids_for_Better_Energy_Management

9. 3.Schneider Electric «EcoStruxure». URL: <https://www.se.com/ww/en/work/campaign/innovation/platform.jsp>

10. Wyrzykowska, B. Intelligent energy management systems in Industry 5.0. *Energies*, 17(23), 5871. <https://doi.org/10.3390/en17235871>

11. Javaid M. Significance of sensors for Industry 4.0: roles, capabilities and challenges / M. Javaid // *Journal/Conference*. – 2021. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666351121000310>.

12. Intelligent Sensors in the Industry 4.0 and Smart Factory [Special Issue] / *Sensors* (MDPI) – Режим доступу: https://www.mdpi.com/journal/sensors/special_issues/IIoT_Smart_Factory.

13. Missbauer H. Order release in production planning and control systems. *International Journal of Production Research*. 2022. Vol. 60, No. 2. P. 482–499. DOI: 10.1080/00207543.2021.1994165 (date of access: 08.10.2025).

14. Freitas N., Oliveira P. Data management in industry: concepts, systematic review, and future trends. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2025. Vol. 36, No. 4. P. 1458–1472. DOI: 10.1007/s10845-025-02570-z (date of access: 08.10.2025).

15. Holopainen M., Virtanen J. Enhancing the order-to-delivery process with real-time performance measurement based on digital visualization. *Production Planning & Control*. 2023. Vol. 34, No. 12. P. 1172–1185. DOI: 10.1080/21693277.2023.2217237 (date of access: 08.10.2025).

16. Smart Grid Systems: Modeling and Control : monograph / S. Ganesan, V. Ramesh, S. Umashankar. – New York : Routledge, 2021. – 326 p. – Режим

доступу: <https://www.routledge.com/Smart-Grid-Systems-Modeling-and-Control/Babu/p/book/9781774630655>

17. Wyrzykowska B. Intelligent energy management systems in Industry 5.0 / B. Wyrzykowska // *Energies*. – 2024. –Vol. 17, No. 23. Article 5871. DOI: 10.3390/en17235871.

18. Сезонова І., Левенець І. Розробка автоматизованої система підтримки академічної доброчесності / І.Сезонова // XXVIII Міжнародна науково-практична конференція PROSPECTS OF INNOVATIVE DEVELOPMENT IN SCIENCE AND TECHNOLOGY, 19-21 червня 2024, Гетеборг, Швеція. – Режим доступу: <https://isu-conference.com/prospects-of-innovative-development-in-science-and-technology/>

19. Сезонова І.К., Левенець І.О. Система управління енергоспоживанням виробничого підприємства / І.К. Сезонова // 2 Міжнародна науково-практична конференція «Modern Perspectives on Science and Economic Progress», 5-7 листопада, Вільнюс, Литва – Режим доступу: <https://isu-conference.com/en/archive/modern-perspectives-on-science-and-economic-progress-05-11-25/>, DOI: <https://doi.org/10.70286/isu-05.11.2025>

20. Про охорону праці. Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ [Електронний ресурс] / – Режим доступу: [www / URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#](http://www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#).

21. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Організація керування умовами праці» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету / ХНУРЕ [Електронний ресурс] / – Режим доступу: [www / URL: https://catalogue.nure.ua/document=218933](https://catalogue.nure.ua/document=218933).