

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ “ _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ** **ВИЩОЇ ОСВІТИ**

на тему:

«Оцінка ефективності використання індукційного електричного опалення в житлових приміщеннях»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи ЕЕ-24М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____ Дмитро КОВАЛЬОВ

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи доцент, канд. техн. наук,

_____ Руслан ТЕЛЮТА

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор

_____ Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ “ _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Ковальов Дмитро Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Оцінка ефективності використання індукційного електричного опалення в житлових приміщеннях

Assessment of the efficiency of induction electric heating in residential premises

2. керівник роботи (проекту) Телюта Руслан Васильович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 12.12.2025 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою магістерської роботи є проведення всебічного аналізу та теоретичне обґрунтування впровадження індукційного нагріву, а також оцінка ефективності його використання у складі опалювальних систем житлових будівель. Ключовим аспектом є використання нічних провалів навантаження в енерг Завдання роботи: Вступ. 1.Огляд стану та використання обладнання і технологій для електроопалення житлових приміщень 2. Аналіз регулювання графіків навантаження в об'єднаній енергосистемі України.3. Дослідження використання електроіндукційного нагріву в системах опалення. 4 Розроблення стартап-проекту з впровадження системи опалення з електроіндукційним нагрівом. 5. Охорона праці. 6. Висновки.

5. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н., доц. Савеленко І.В.</i>		

6. Дата видачі завдання 01. 09. 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ. Розвиток обладнання та технологій для електроопалення житлових приміщень</i>	<i>06.10.2025</i>	
2	<i>Аналіз стану об'єднаної енергосистеми України та проблеми регулювання графіків навантаження</i>	<i>10.10.2025</i>	
3	<i>Дослідження ефективності використання електроіндукційного нагріву</i>	<i>21.10.2025</i>	
4	<i>Розробка стартап-проекту з впровадження системи опалення «Титан»</i>	<i>01.11.2025</i>	
5	<i>Охорона праці</i>	<i>24.11.2025</i>	
7	<i>Загальні висновки</i>	<i>02.12.2025</i>	
8	<i>Перелік посилань</i>	<i>08.12.2025</i>	
9	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>10.12.2025</i>	
10	<i>Оформлення презентації магістерської роботи та подання магістерської роботи до захисту</i>	<i>12.12.2025</i>	

Дата видачі завдання

« 01 » вересня 2025 р.

Підпис керівника

_____ Руслан ТЕЛЮТА

Завдання прийнято до виконання

« 01 » вересня 2025 р.

Підпис здобувача

_____ Дмитро КОВАЛЬОВ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 94 с.; 23 рис.; 24 табл.; 39 джерел.

Ковальов Д. О. Оцінка ефективності використання індукційного електричного опалення в житлових приміщеннях. – Рукопис.

Ключовою метою кваліфікаційної роботи визначено проведення комплексного аналізу та теоретичне обґрунтування ефективності впровадження систем індукційного нагріву в інфраструктуру теплозабезпечення житлових будівель. За результатами огляду сучасних технологій електротеплообігріву встановлено, що наявна вітчизняна технічна база та чинне нормативне забезпечення дозволяють розпочати широкомасштабне впровадження індукційних систем, зокрема в їх електротеплоаккумуляційній модифікації.

Визначальним результатом дослідження є підтвердження технічної можливості забезпечення нормативних параметрів мікроклімату виключно за рахунок роботи обладнання в години нічного «провалу» навантаження ОЕС України. Розрахунки доводять, що навіть за умови екстремально низьких температур (холодної п'ятиденки), накопиченого вночі теплового ресурсу достатньо для автономного обігріву протягом доби.

Запропоновано концепцію використання вузла індукційного нагріву як активного «споживача-регулятора». В умовах дефіциту маневрових потужностей, таке рішення дозволяє: ефективно заповнювати нічну зону графіка навантажень; використовувати переваги диференційованих за часом тарифів, знижуючи експлуатаційні витрати; уникати необхідності збільшення приєднаної потужності об'єкта, оскільки споживання відбувається в години мінімального навантаження на мережу.

Таким чином, в кліматичних та енергетичних реаліях України, впровадження акумуляційного індукційного обігріву є не просто технічною модернізацією, а стратегічно обґрунтованою альтернативою традиційному централізованому теплопостачанню, що забезпечує надійність, автономність та економічну доцільність.

ключові слова: електроопалення, індукційний обігрів, вузол нагріву, електротеплоаккумуляція, енергоефективність, об'єднана енергетична система.

ABSTRACT

Qualification work: 94 p.; 23 fig.; 24 tables; 24 sources

Kovalov D.O. Assessment of the efficiency of induction electric heating in residential premises. - Manuscript.

The key objective of the qualification work is to conduct a comprehensive analysis and theoretical justification of the effectiveness of introducing induction heating systems into the heat supply infrastructure of residential buildings. According to the results of a review of modern electric heating technologies, it was established that the existing domestic technical base and current regulatory support allow for the large-scale introduction of induction systems, in particular in their electric heat storage modification.

The decisive result of the study is confirmation of the technical possibility of ensuring the regulatory parameters of the microclimate exclusively due to the operation of the equipment during the hours of night "failure" of the load of the Unified State Electric Power System of Ukraine. Calculations prove that even under conditions of extremely low temperatures (cold five-day period), the accumulated heat resource at night is sufficient for autonomous heating during the day.

The concept of using the induction heating unit as an active "consumer-regulator" is proposed. In conditions of a shortage of maneuvering capacities, such a solution allows: to effectively fill the night zone of the load schedule; use the advantages of time-based tariffs, reducing operating costs; avoid the need to increase the connected capacity of the facility, since consumption occurs during hours of minimum load on the network.

Thus, in the climatic and energy realities of Ukraine, the introduction of storage induction heating is not just a technical modernization, but a strategically sound alternative to traditional centralized heat supply, which ensures reliability, autonomy and economic feasibility.

keywords: electric heating, induction heating, heating unit, electric heat storage, energy efficiency, unified energy system.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. РОЗВИТОК ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЕЛЕКТРООПАЛЕННЯ ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ.....	11
1.1 Історичний огляд та еволюція вітчизняного електроопалення	11
1.2 Сучасний стан та перспективи технологій електротеплопостачання в умовах дефіциту енергоресурсів.....	11
1.3 Методологічні засади децентралізованого теплопостачання на базі електрообігріву.....	13
1.4 Досвід впровадження систем прямого та акумуляційного нагріву в житловому секторі.....	16
1.5 Технічна база та потенціал застосування акумуляційного електроопалення (ЕТА).....	18
1.6 Порівняльна характеристика сучасного котлоустраткування (ТЕНові, електродні, індукційні).....	20
1.7 Аналіз переваг та недоліків різних типів електрокотлів.....	24
1.8 Висновки до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СТАНУ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ ТА ПРОБЛЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ГРАФІКІВ НАВАНТАЖЕННЯ....	27
2.1. Структура генерації та споживання електричної енергії в ОЕС України ..	27
2.2. Динаміка змін в роботі ОЕС України внаслідок втрати маневрових потужностей	29
2.3. Баланс виробництва та споживання електроенергії в кризових умовах.....	31
2.4 Добові режими навантаження та особливості побутового електроспоживання	33
2.5 Проблеми покриття пікових навантажень та дефіцит маневрової генерації	36
2.6. Способи та технічні засоби ущільнення добового графіка навантажень (DSM).....	37

2.7 Використання нічного провалу навантаження як стратегічного ресурсу для електроопалення.....	40
2.8 Висновки до розділу 2	41
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ	43
3.1. Теоретичні засади процесів перетворення енергії в індукційному нагрівачі	43
3.2 Математичне моделювання електромагнітних процесів у "котушці зі сталлю"	50
3.3 Дослідження перехідних процесів при комутації індукційного перетворювача.....	53
3.4 Вплив роботи вузла «ТИТАН» на вирівнювання добового графіка навантаження мережі	63
3.5 Висновки до розділу 3.....	70
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ З ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ «ТИТАН».....	71
4.1 Опис ідеї проєкту: концепція енергетичної безпеки та автономності	71
4.2 Технологічний аудит та аналіз здійсненності проєкту	72
4.3 Фінансово-економічний аналіз в умовах тарифної політики 2025 року.....	73
4.4 Аналіз ринкових можливостей та конкурентного середовища (SWOT-аналіз)	76
4.5 Розроблення маркетингової стратегії: орієнтація на B2B та B2G сектори....	78
4.6 Висновки до розділу 4	82
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ	84
5.1 Нормативні вимоги безпеки при експлуатації електронагрівальних установок	84
5.2 Електротехнічні аспекти підключення та захисту вузла «ТИТАН»	85
5.3 Розрахунок захисного заземлення для електроустановки з індукційним нагрівом	87
6. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	90
7. ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	92

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕТА – електротеплоаккумуляція

АЕС – атомна електростанція

АСУ – автоматизована система управління

БіоЕС – електростанція

ВВП – внутрішній валовий продукт

ВЕЗ – вільна економічна зона

ВЕС – вітроелектростанція

ГАЕС – гідроакumuлюючі електростанції

ГЕС – гідроелектростанції

ДГН - добовий графік навантажень

ДП – державне підприємство

ЕТЗ – електротеплозабезпечення

ЄС – європейська співдружність

ЖКК – житлово-комунальний комплекс

КТП – комплектна трансформаторна підстанція

ЛЕП – лінія електропередачі

НКРЕКП - національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг

ОЕС – об'єднана електроенергетична система

СДТ – системи децентралізованого теплопостачання

СЕС – сонячна електростанція

СЦТ – система централізованого теплопостачання

ТА – теплоаккумулятор

ТВЕЛ - тепловиділяючий елемент

ТЕН – трубчатий електронагрівач

ТЕЦ - теплоелектроцентраль

ТП – трансформаторна підстанція

SWOT – аналіз (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troublez) та можливостей (Opportunities))

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Історія розвитку вітчизняних систем електричного опалення налічує не одне десятиліття, проте цей напрям тривалий час залишався на периферії енергетичної стратегії. Причиною цього була домінуюча роль природного газу, який залишався ключовим первинним енергоресурсом (ПЕР) за обсягами використання. Вартість газу на внутрішньому ринку України, на відміну від вугілля чи ядерного палива, довгий час була значно нижчою за світові показники. Таке економічне тло не стимулювало належної уваги до розвитку технологій електрообігріву.

Ситуація почала змінюватися внаслідок цінових шоків на газ у 2005 та 2014 роках. Саме ці кризи змусили активізувати роботи у напрямку диверсифікації енергозабезпечення та поставили на порядок денний гострі питання енергетичної незалежності держави. Події після 2022 року кардинально змінили парадигму. Повномасштабне вторгнення та систематичні цілеспрямовані атаки на енергетичну інфраструктуру, особливо на об'єкти теплової генерації (ТЕС та ТЕЦ) протягом 2023-2025 років, призвели до критичного дефіциту генеруючих потужностей. У цих умовах відбулася фундаментальна переоцінка засобів енерготеплопостачання. Стратегія виживання та розвитку енергосистеми змістилася в бік децентралізації, підвищення стійкості (resilience) та пошуку гнучких рішень для локального теплозабезпечення.

Саме тому особлива увага приділяється електрообігріву. Попередні розрахунки та аналіз практики застосування енергоефективних електричних систем продемонстрували високу доцільність їхнього розвитку в сучасних соціально-економічних та воєнних реаліях.

Нове бачення енергетичної безпеки України полягає у зміщенні фокусу з промисловості чи транспорту на комунально-побутову сферу. Найбільший потенціал енергозбереження знаходиться саме у житловому секторі, де на цілі опалення досі неефективно витрачається колосальна частка (близько половини) усіх споживаних у країні ПЕР. Перехід на децентралізовані електричні системи також підвищує загальну стійкість, оскільки зменшує залежність від великих,

вразливих об'єктів централізованого теплопостачання.

Чинне законодавство не створює суттєвих нетехнічних перешкод для поширення електроопалення. Навпаки, для заохочення споживачів до перенесення навантаження на нічні години (період «провалу» у графіку споживання) та сприяння розвитку акумуляційного обігріву, впроваджено спеціальні багатозонні тарифи, диференційовані за періодами часу (ТДПЧ). Урядові розпорядження також кардинально покращили процедури приєднання електроустановок, зокрема акумуляційного типу, до мереж.

Розвиток опалювальних систем в умовах стабілізації економіки, а тим більше вихід із глибокої кризи в енергетиці, неможливий без впровадження новітніх енергозберігаючих технологій. Однією з найбільш прогресивних є технологія електротеплоакумуляційного обігріву. Процеси перетворення, передачі, розподілу та споживання енергії залучають багато галузей економіки. Вони вимагають злагодженої дії фінансових, господарських, правових та нормативно-технічних механізмів, у тому числі на міжнародному рівні.

Тому вивчення її ключових аспектів — моделі гуртового ринку електроенергії (в умовах інтеграції з ENTSO-E), інституційних та організаційних засад застосування електрики для обігріву, особливостей електроенергобалансу (з урахуванням воєнних втрат генерації), а також добових та сезонних режимів навантаження Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України — є надзвичайно актуальним науково-практичним завданням.

Мета і задачі дослідження. Метою магістерської роботи є проведення всебічного аналізу та теоретичне обґрунтування впровадження індукційного нагріву, а також оцінка ефективності його використання у складі опалювальних систем житлових будівель. Ключовим аспектом є використання нічних провалів навантаження в енергосистемі через інтеграцію електротеплоакумуляційних комплексів, що базуються на розроблених індукційних перетворювачах електричної енергії в теплову.

Досягнення поставленої мети реалізується через формулювання та розв'язання наступних задач: провести огляд існуючих технологій та наявного устаткування для систем електротеплообігріву приміщень; виконати аналіз

річних та добових графіків навантаження, з особливою увагою до характеристик нічного «провалу» в Об'єднаній електроенергетичній системі; систематизувати теоретичні основи та принципи роботи електроіндукційного обігріву; дослідити та змодельовати вплив вузла індукційного нагріву на добовий графік електричного навантаження; розробити концепцію стартап-проєкту для впровадження системи опалення, що використовує електроіндукційний нагрів; розглянути комплекс питань, пов'язаних з електробезпекою під час експлуатації електроіндукційних нагрівачів у складі опалювальної системи.

Об'єкт дослідження – процеси, що відбуваються у вузлі електроіндукційного нагріву.

Предмет дослідження – електрокотел на базі індукційного нагріву як елемент системи опалення.

Методи досліджень. У процесі виконання роботи застосовувалися методи розрахунку електричних кіл з використанням прикладних програмних пакетів (Microsoft Excel). Дослідження спирається на фундаментальні положення теорії електроіндукційного нагріву. Для моделювання та візуалізації схемних рішень використовувалися комп'ютерні програми Matlab та Microsoft Visio.

Наукова новизна роботи полягає у подальшому розвитку теоретичних та практичних засад використання електроіндукційного нагріву для опалення приміщень. Зокрема, обґрунтовується використання нічного провалу добового графіка навантаження ОЕС України як базового енергетичного ресурсу для функціонування систем електроопалення.

Практична цінність отриманих результатів полягає у сприянні подальшому розвитку та впровадженню індукційного електроопалення як ефективної технології теплоаккумуляційного обігріву приміщень, що є особливо актуальним в умовах дефіциту генеруючих потужностей.

Структура роботи. Магістерська робота складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 106 сторінок. Основна частина викладена на 97 сторінках друкованого тексту та містить 23 рисунки і 28 таблиць. Список використаних джерел налічує 39 найменувань та викладений на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1. РОЗВИТОК ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЕЛЕКТРООПАЛЕННЯ ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ.

1.1 Історичний огляд та еволюція вітчизняного електроопалення

Протягом тривалого часу розвиток вітчизняного електроопалення стримувався домінуванням природного газу. Цей енергоресурс (близько 41% споживання) мав на внутрішньому ринку ціну, суттєво нижчу за світову, що нівелювало економічні стимули для електрифікації обігріву.

Газові кризи 2005, 2008 та 2014 років активізували пошук шляхів до енергонезалежності. Вже тоді переоцінка засобів теплопостачання підтвердила доцільність впровадження енергоефективних електричних технологій. Однак кардинальна зміна парадигми відбулася після 2022 року. Систематичні атаки на об'єкти генерації, особливо ТЕС та ТЕЦ у 2023-2025 роках, спричинили критичний дефіцит потужності та довели вразливість централізованих систем. Це надало розвитку децентралізованого електрообігріву статусу стратегічного завдання для забезпечення стійкості енергосистеми.

Електроопалення є комплексною сферою на стику електротехніки та теплофізики, причому остання потребує додаткових досліджень. Найбільший потенціал для впровадження нових технологій мають сектори з високими питомими втратами енергії – житлово-комунальний та агропромисловий комплекси. Дослідженням енергоефективності, зокрема технологій електротеплоакумуляції, історично приділяли увагу профільні міністерства та Національна академія наук України.

1.2 Сучасний стан та перспективи технологій електротеплопостачання в умовах дефіциту енергоресурсів

Технології теплопостачання належать до критичних, оскільки забезпечують життєво важливі потреби населення та є складовою стратегічної безпеки держави [1-3]. Вони вирізняються величезним споживанням

енергоресурсів та значним антропогенним тиском.

Особливо гостро ця проблема постала в Україні у 2024-2025 роках, коли цілеспрямовані атаки на енергосистему виявили крайню вразливість інфраструктури. Нагальним завданням стала розробка сучасних технологій обігріву для житлово-комунального (ЖКК) та агропромислового (АПК) комплексів, де питомі втрати енергії є надмірними.

У міському середовищі досі домінують системи централізованого теплопостачання (ЦТ). Їхніми головними недоліками є велика теплова інерція, матеріалоемність та низька загальна енергоефективність. Законодавство ЄС [1] вже давно вимагає при будівництві чи реконструкції великих будівель (понад 1000 м²) розглядати децентралізовані та альтернативні системи, зокрема теплонасосні.

Наразі в ЖКК України для обігріву переважно використовуються традиційні системи, що спалюють органічне паливо. Водночас, хоча промислова електротермія є добре дослідженою, питання ефективності електрообігріву в комунальному та аграрному секторах досі системно не розглядалося. З огляду на обсяги споживання енергії в ЖКК та АПК, такий стан є неприпустимим.

Сьогодні існують усі передумови для подальшої електрифікації побуту та сільського господарства. Проте це потребує впровадження нових електротехнологій, які мають відповідати сучасним вимогам (особливо в умовах дефіциту генеруючої потужності):

Здатність використовувати «провальний» нічний інтервал у добовому графіку навантаження електромережі.

Бути максимально керованими та регульованими.

Забезпечувати економію ресурсів та можливість комп'ютеризованого on-line обліку й контролю витрат [2].

Бути компактними, надійними та мати невисоку вартість для масового впровадження.

Усі зазначені соціальні та технічні задачі успішно вирішуються при

застосуванні технологій теплоакumuляційного обігріву.

Оцінити реальний рівень поширення електрообігріву в Україні складно, оскільки офіційна статистика не веде окремого обліку теплової енергії, виробленої з електричної. Історично ця частка вважалася занадто малою для включення у загальнодержавну звітність.

Попри це, досвід застосування електроенергії для опалення існує. Докризисний аналіз (до 2022 року) показував, що лідерами за споживанням електрики на опалення житла та соціальних об'єктів були переважно центральні, південні та східні регіони, зокрема Запорізька, Житомирська, Київська та Вінницька області.

Варто зазначити, що після 2022 року та масованих атак на енергосистему у 2023-2025 роках, відбувся вимушений, неконтрольований сплеск використання індивідуальних електричних нагрівачів. Це значно збільшило фактичне, хоч і невраховане, навантаження, але воно не є частиною керованого електроопалення.

Загалом, встановлена потужність керованих систем електротеплопостачання в Україні оцінюється на рівні, що не перевищує 2% від загального навантаження ОЕС. Цей показник є критично низьким у порівнянні з розвиненими країнами, де аналогічна частка може сягати десятків відсотків.

1.3 Методологічні засади децентралізованого теплопостачання на базі електрообігріву

Концептуальні питання електрообігріву спочатку стосувалися електротеплозабезпечення села. Територіально розсіяні споживачі (домогосподарства, ферми) часто змушені використовувати невеликі автономні котельні або вогневі печі, що супроводжується підвищеними витратами та складнощами з регулярною доставкою палива.

На відміну від вогневих генераторів, електрообігрів характеризується компактністю, меншими капітальними і експлуатаційними витратами (особливо

при порівнянні з будівництвом та обслуговуванням теплотрас). Він є більш надійним, пожежобезпечним, не має продуктів горіння та дозволяє точне регулювання мікроклімату завдяки виділенню енергії безпосередньо у робочому просторі.

Ключовим є те, що розвиток електротеплоакумуляційного обігріву дозволяє ущільнити графік навантаження ОЕС, зменшуючи потребу у частих запусках та зупинках маневрових енергоблоків. Зазначені переваги формують методологічну основу для сучасних систем децентралізованого теплопостачання (СДТ) на базі електроенергії.

Питання електрифікації опалення сільських будинків ретельно розглядалися ще на початку 90-х років, що було закріплено низкою урядових та відомчих постанов (наприклад, Наказ Міненерго №45 від 1991 р.) та детально проаналізовано у працях В.Г. Стафійчука та С.Я. Меженного [4, 6].

Однак практичне втілення цих планів затрималося щонайменше на 15 років. Причиною стала не лише системна економічна криза, але й стійкий дефіцит генеруючих потужностей та брак ресурсів для докорінної реконструкції електричних мереж. (Закордонний досвід, навпаки, базувався саме на наявності вільних потужностей).

Ця історична проблема набула нової, ще більшої гостроти у 2024-2025 роках внаслідок цілеспрямованого руйнування ворогом української генерації, що робить питання ефективного використання електроенергії, особливо в нічні години, ще більш критичним.

Електроенергія як енергоносіє має беззаперечні переваги: легкість транспортування до розосереджених споживачів, виняткова зручність регулювання, екологічна чистота та простота у використанні. В умовах України 2024-2025 років до цих переваг додалася критично важлива — вища стійкість (resilience) та швидкість відновлення мереж порівняно з пошкодженими магістральними теплотрасами чи газогонами.

При виборі електрики як базового енергоносія, автори [15] виділили чотири групи питань, що не втратили актуальності:

системи та пристрої електротеплозабезпечення (ЕТЗ);

адаптація систем електропостачання населених пунктів з урахуванням навантажень ЕТЗ;

системи керування (прямого і тарифного) та обліку електроенергії;

принципи обґрунтування та вибору доцільних зон застосування ЕТЗ.

Подальший розвиток електропостачання, особливо у сільській місцевості, має відбуватися у напрямку зниження собівартості передачі енергії. В умовах гострого дефіциту генеруючих потужностей, це насамперед означає реалізацію енергозберігаючої політики для зниження розрахункових навантажень.

Необхідно зіставити варіанти акумулюючих систем ЕТЗ:

Децентралізовані (з індивідуальними нагрівниками у кожному приміщенні).

Централізовані (на базі водяного опалення з єдиним баком-акумулятором).

Оскільки розрахункові навантаження прямо залежать від теплоізоляційних властивостей будівель, пріоритетом є підвищення термічного опору огорожувальних конструкцій.

Варто зазначити, що децентралізовані системи (індивідуальні нагрівачі) дають змогу суттєво заощаджувати електроенергію за рахунок точного покімнатного регулювання температури. Крім того, у порівнянні з централізованими водяними системами, вони мають значно меншу металоємність. Також перспективним є проектування енергоактивних будинків, де ЕТЗ інтегроване з тепловими насосами.

Ефективний розвиток системи електропостачання з урахуванням навантажень від обігріву вимагає комплексного підходу [5, 8]. Ключовими напрямками є зниження теплових витрат за рахунок покращення теплоізоляції будівель та проектування енергоекономічних будинків. Також це вимагає впровадження пооб'єктного обліку, розробки раціональних схем енергопостачання та координації розвитку електричних і газових мереж.

Саме тому праця [7] обґрунтовує нагальну необхідність розробки вітчизняних електроакумуляційних систем теплопостачання (ЕАСТ) для

комунального та аграрного секторів. Досвід показує, що накопичення тепла в періоди спаду навантажень (вночі) є одним з ключових шляхів підвищення техніко-економічних показників енергосистем. Це дозволяє ущільнити графік та заощадити органічне паливо (мазут), що використовується для маневрування.

Найважливішою умовою надійної роботи енергосистеми є гнучке регулювання генерації відповідно до споживання. Для ОЕС України, що базується на ТЕС та АЕС, ця проблема є вкрай гострою, оскільки резерви добового регулювання на сьогодні практично вичерпані.

Актуальний контекст (2024-2025): Ця проблема особливо загострилася внаслідок масованих атак на енергосистему та руйнування значної частини маневрових потужностей ТЕС. Це робить добову нерівномірність (зимовий нічний «провал» сягає ~12 млн кВт) ще більш деструктивною та дорогою для балансування.

Водночас, розподільчі електричні мережі (110 кВ і вище), як правило, мають значні резерви пропускної здатності у нічні години. Це створює пряму технічну можливість для використання дешевої позапікової електроенергії в акумуляційних системах опалення.

На даний момент технічні передумови для цього значно покращились. Стали доступними надійні теплоізоляційні матеріали, прості прилади автоматики та, що найважливіше, доступні багатотарифні лічильники та устаткування позапікового включення. Це дозволяє легко встановлювати в кожному будинку автономну систему керування, що працює вночі.

1.4 Досвід впровадження систем прямого та акумуляційного нагріву в житловому секторі

Існують ситуації, коли електроопалення є безальтернативним. Це стосується віддалених районів, де будівництво систем централізованого теплопостачання (СЦТ) неможливе. В умовах України 2024-2025 років, після руйнувань енергоінфраструктури, децентралізоване теплопостачання стало

єдиною можливістю для багатьох об'єктів отримати якісні та, головне, *стійкі* послуги з опалення та гарячого водопостачання.

Проблема традиційних СЦТ полягає у їхній катастрофічній неефективності. Навіть якщо ККД ТЕЦ при перетворенні палива на тепло сягає 45%, то подальші втрати у магістральних теплотрасах (35-40%) та на проміжних бойлерних призводять до того, що до кінцевого споживача доходить лише 9,4% початкової енергії палива (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1 - Втрати палива при використанні базового варіанту (СЦТ)

Технологічна операція	Корисне тепло, т.у.п	Втрати тепла, т.у.п
Завезено на ТЕЦ	100	-
Перероблено на тепло 45 %	45	55
Втрати на передачу бойлеру 30 %	31,5	68,5
Втрати в бойлері 55 %	14,1	85,9
Втрати при доставці споживачу 30 %	9,4	90,1

Якщо ж перевести ТЕЦ на виробництво виключно електроенергії (де ККД вищий, до 60%) і жити нею локальні електричні бойлери, скоротивши довжину теплотрас, то ККД системи зростає до 38,7% (див. табл. 1.2). При цьому електричні бойлери не створюють локальних екологічних проблем.

Найбільш ефективною є схема прямого електрообігріву (табл. 1.3), де відсутня ланка теплотрас. У цьому випадку корисне тепло, що доходить до споживача, становить 58,2% від початкової енергії палива.

Таблиця 1.2 - Втрати палива при використанні електричних бойлерів (гібридна схема)

Технологічна операція	Корисне тепло, т.у.п	Втрати тепла, т.у.п
Завезено на ТЕЦ	100	-
Перероблено на електроенергію 60 %	60	40
Втрати в ЛЕП до бойлера 3 %	58,2	41,8
Втрати в електробойлері 5 %	55,3	44,7
Втрати теплотрасі при доставці споживачу 30 %	38,7	61,3

Таблиця 1.3 - Втрати палива при використанні індивідуальних електричних генераторів тепла

Технологічна операція	Корисне тепло, т.у.п	Втрати тепла, т.у.п
Завезено на ТЕЦ	100	-
Перероблено на електроенергію 60 %	60	40
Втрати в ЛЕП до споживача 3 %	58,2	41,8

Порівняльний аналіз (табл. 1.1–1.3) доводить, що перехід на електроенергію як основний енергоносіє вивільняє резервні запаси палива (близько 50-52%) без залучення нових генеруючих потужностей. Електрика має мінімальні втрати при транспортуванні (в ЛЕП) та є екологічно безпечною на місці споживання. Враховуючи наявність на ринку широкого спектру технічних засобів (котлів, конвекторів, інфрачервоних систем), електроенергія є економічно обґрунтованим джерелом тепла, що дозволяє значно економити умовне паливо.

1.5. Технічна база та потенціал застосування акумуляційного електроопалення (ЕТА)

Широкі впровадження електрообігріву повинно бути обумовлене його техніко-економічною доцільністю. Найбільший потенціал тут має електротеплоакумуляційний (ЕТА) обігрів. Його ключова перевага — ущільнення добового графіка навантаження ОЕС. Це підвищує коефіцієнт використання базових генеруючих потужностей (АЕС) та знижує потребу у залученні дорогих маневрових енергоблоків.

Актуальний контекст (2024-2025): В умовах критичного дефіциту генеруючих потужностей, спричиненого масованими атаками на енергосистему (особливо на маневрові ТЕС), здатність ЕТА-систем споживати енергію вночі («провал» навантаження) та не навантажувати мережу в пікові години стає не просто заходом економії, а однією з ключових умов забезпечення стабільності та виживання всієї енергосистеми.

Саме тому технології ЕТА-обігріву є першочерговою рекомендацією в програмах енергоменеджменту у ЖКГ, адже раціональне споживання є пріоритетом. Технології ЕТА-обігріву базуються на принципі акумуляції теплоти [3]. Найбільш відомими є:

- Активна акумуляція: Використання водяних баків-акумуляторів або масивних сердечників з теплоємних матеріалів (наприклад, магнезиту).
- Пасивна акумуляція: Використання теплової інерції самих будівель. Конструкції приміщень (стіни, підлога, стеля) та навіть меблі мають власні теплоакумуляційні властивості.

Через це будь-який нагрівач, навіть прямої дії (конвектор), певною мірою є «теплоакумуляційним», оскільки після його вимкнення температура у приміщенні завдяки тепловій інерції деякий час залишається комфортною [3]. Класичним прикладом системи з "природною" акумуляцією є традиційна вогнева піч. Для ефективної роботи електротеплоакумуляційного (ЕТА) обігріву ключовим є вибір матеріалу осердя. Цей матеріал має поєднувати високу питому теплоємність, належну теплопровідність для швидкого «заряджання» та високу щільність, що дозволяє накопичити значну кількість енергії в обмеженому об'ємі. Порівняльний аналіз ключових теплофізичних властивостей поширених матеріалів наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Теплофізичні властивості деяких матеріалів

Номер матеріалу	Матеріал	масова	Коефіцієнт	Коефіцієнт	Коефіцієнт
		щільність	тепло-	теплопро-	теплоза-
		матеріалів	ємності	відності	своєння
		ρ	c	λ	$0,27(\lambda c \rho)^{0,5}$
		кг/м ³	кДж/(кг·°C)	Вт/(м·°C)	Вт/(м ² ·°C)
1	Гнейс, базальт	2800	0,88	3,49	25,01
2	Цегла магнезитова (t=60 °C)	2560	1,05	3,77	27 2
3	Цегла магнезитова (t=600 °C)	2560	1,05	16,75	57,3
4	Бетон	2400	0,84	1,2	13,26
5	Керамічна плитка	1800	0,994	0,814	10,29
6	Вода (t=60 °C)	983,1	4,179	0,659	14,0

Теплоакумуляційні властивості матеріалу характеризуються комплексним

коефіцієнтом теплосасвоєння $0,27\sqrt{\lambda c \rho}$, що поєднує теплопровідність (λ), питому теплоємність (c) та щільність (ρ) (див. табл. 1.4). Згідно з таблицею 1.4, вода є доступним та ефективним теплонакопичувачем, її акумуляційні властивості не поступаються бетону. У системах на базі води теплоносій накопичується в ізольованій ємності вночі (під час дії пільгового тарифу) і витрачається вдень. Це дозволяє гнучко профілювати подачу тепла: інтенсивніше вдень для підтримки комфортних 18-22 °С та в ощадному режимі (8-12 °С) вночі. Однак, крім *активних* накопичувачів (як вода чи магнезит), існує пасивна акумуляція – власна теплова інерція самої будівлі. Теплоємні характеристики приміщення визначаються коефіцієнтом теплосасвоєння його внутрішніх поверхонь s . Разом із коефіцієнтом тепловіддачі α_3 (зазвичай 4-8 Вт/м²К), він формує характеристику теплотривкості (або тепловбирання) приміщення $B=1$, при $(1/\alpha_3 + 1/s_3)$.

Актуальний контекст (2024-2025): В умовах України, коли через дефіцит генерації відбуваються стабілізаційні відключення, саме пасивна теплоакумуляційна здатність будівлі стає ключовим фактором. Висока теплова інерція (великий s стін та перекриттів) дозволяє «пережити» 3-4 годинні відключення без критичного падіння температури.

Якщо приміщення має масивні огорожувальні конструкції (великий s) та якісну зовнішню теплоізоляцію (малі тепловтрати), його «теплоакумуляційна» здатність буде високою [3]. Температура в такій кімнаті після вимкнення нагрівача знижується повільно. Тому, у контексті ЕТА, доцільно враховувати навіть електронагрівачі прямої дії, оскільки в добре ізольованих масивних будівлях вони ефективно «заряджають» пасивну масу самої конструкції.

1.6 Порівняльна характеристика сучасного котлоустраткування (ТЕНові, електродні, індукційні)

ТЕНові електрокотли, які стали одним із найпоширеніших рішень при масовому переході до децентралізованого опалення в Україні (2024-2025 рр.),

працюють за принципом непрямого нагріву.

Теплова енергія передається рідинному теплоносію від ТЕНів – металевих трубок, всередині яких розміщена нагрівальна спіраль (зазвичай ніхромова). Спіраль надійно ізольована від корпусу спеціальним наповнювачем, який має одночасно високі електроізоляційні та теплопровідні властивості (як правило, це плавлений оксид магнію).

Сучасні котли є автономними, оснащені системами захисту та регулювання температури. Можливість ступінчастого регулювання потужності дозволяє працювати в економічному режимі, знижуючи навантаження на мережу. Також вони зазвичай передбачають підключення циркуляційного насоса та виносних програматорів.

Побутові моделі (до 15 кВт) часто можуть працювати без примусової циркуляції та не потребують узгодження з органами котлонагляду. Однак ТЕНові котли мають суттєвий експлуатаційний недолік: утворення накипу.

Поверхня ТЕНа з часом покривається шаром малотеплопровідних мінеральних відкладень. Цей накип діє як теплоізолятор, блокуючи нормальну передачу тепла воді. Внаслідок цього ТЕН локально перегрівается (механізм «гарячої плями») і зрештою перегорає. Це особливо актуально для потужних котлів і вимагає обов'язкової водопідготовки (пом'якшення теплоносія) та регулярного профілактичного обслуговування.

Електродні електрокотли.

Електродні котли є другим типом резистивного обладнання, що реалізує принцип прямого електронагріву. На відміну від ТЕНових, тут теплова енергія генерується безпосередньо в об'ємі самого теплоносія, коли електричний струм проходить через нього між двома або більше заглибленими електродами.

Таким чином, рідина одночасно виконує дві функції:

1. Активного опору (нагрівального елемента).
2. Теплоносія (для транспортування тепла до радіаторів).

Конструктивно вони простіші та дешевші за ТЕНові аналоги, проте їхня експлуатація пов'язана із трьома суттєвими недоліками:

1. Вимоги до теплоносія. Котли працюють лише зі струмопровідними рідинами, що вимагає точного коригування солемісту (номінально ~ 30 Ом·м при 20 °С) шляхом додавання солі або, навпаки, дистильованої води.

2. Електрохімічні процеси. Проходження струму через теплоносії (особливо непідготовлену воду) викликає електроліз. Це призводить до інтенсивної корозії обладнання та утворення вибухонебезпечних газів (зокрема, водню). Це вимагає обов'язкового влаштування систем вентиляції та безпеки, що нівелює початкову дешевизну, та знижує загальний ККД через побічні хімічні реакції.

3. Операційна нестабільність. Ключовою проблемою є фізика процесу. Питомий електричний опір рідини ($\rho_{\text{р-на}}$) має негативний температурний коефіцієнт ($\partial \rho_{\text{р-на}} / \partial T < 0$).

Це створює небезпечний позитивний зворотний зв'язок:

- Зростання температури \rightarrow Падіння опору рідини.
- Падіння опору (при $U = \text{const}$) \rightarrow Зростання струму та потужності ($P = U^2/R$).
- Зростання потужності \rightarrow Ще більше зростання температури.

Цей процес, відомий як «саморозігрів» (або зворотний - «самозатухання»), означає, що електродний котел принципово позбавлений механізму саморегуляції. Він не може підтримувати сталий робочий режим без складних зовнішніх регуляторів потужності.

Індукційні електрокотли

Індукційні нагрівачі [9-10] є новим поколінням електрокотлів, що усувають фундаментальні недоліки резистивних моделей. Їхня ключова перевага — використання стандартної промислової частоти 50 Гц. Це усуває потребу в дорогих та складних перетворювачах частоти, що значно знижує капітальні витрати та час нагріву.

Конструктивно такий котел є трансформатором.

1. Первинний контур – це котушка (магнітна система), що живиться від мережі ($220/380$ В або $6/10$ кВ).

2. Вторинний контур – це короткозамкнена обмотка, яка одночасно є теплообмінним пристроєм (ТВЕЛ). Зазвичай це лабіринт або система трубок зі спеціального сплаву, крізь які протікає теплоносій.

Змінне магнітне поле котушки індукує у металі вторинного контуру потужні вихрові струми (струми Фуко), які його і розігрівають. Теплоносій знімає це тепло з поверхонь теплообмінника.

Це рішення має низку фундаментальних переваг:

- Висока безпека та надійність. Теплоносій повністю гальванічно ізольований від електромережі, що виключає ризик ураження струмом (на відміну від електродних) та утворення вибухонебезпечного водню.

- Виняткова довговічність. У котлі відсутні елементи, що зношуються. На відміну від ТЕНів, тут повністю відсутня проблема утворення накипу на нагрівачі, оскільки нагрів відбувається у масі металу, а не на поверхні перегрітого елемента. Термін служби визначається лише ізоляцією котушок (понад 100 000 годин).

- Мінімальні експлуатаційні витрати. Відсутність накипу та елементів, що виходять з ладу, усуває потребу в регулярному обслуговуванні чи заміні запасних частин.

- Гнучкість та стабільність. Як теплоносій може використовуватися будь-яка рідина (на відміну від електродних котлів, що вимагають певної солоності). Найважливіше те, що, на відміну від електродних котлів з їхнім небезпечним «саморозігрівом» ($\partial \rho / \partial T < 0$), індукційний нагрівач має позитивний температурний коефіцієнт опору. При збільшенні температури опір теплообмінника зростає, індуквані струми зменшуються, і потужність автоматично знижується. Це створює ефект самообмеження, що робить систему стабільною та керованою.

Завдяки високому ККД (до 98%) та надійності, установки не потребують постійного нагляду. Їх можна розміщувати у будь-яких підсобних приміщеннях, мінімізуючи довжину теплотрас. Накопичений досвід та промисловий випуск (наприклад, котли ЕНАТС, сертифіковані за ГОСТ 15150 для клімату УХЛ4)

підтверджують універсальність та високі експлуатаційні характеристики даної технології [9-10].

Враховуючи стратегію децентралізації та підвищення відмовостійкості теплопостачання в Україні (2024-2025 рр.), саме поєднання високої надійності, безпеки та відсутності потреби в обслуговуванні робить індукційні котли пріоритетною технологією.

1.7 Аналіз переваг та недоліків різних типів електродних котлів

Результати порівняльного аналізу ключових технічних, експлуатаційних та фінансових параметрів для ТЕНових, електродних та індукційних котлів наведено у табл. 1.5. Економічна оцінка базується на припущенні використання пільгових нічних тарифів (в межах «провалу» добового графіка ОЕС), що є фундаментальною умовою для систем теплоаккумуляції.

Як видно з аналізу, і ТЕНові, і електродні типи, попри нижчу початкову вартість, мають суттєві недоліки. Головною проблемою є недостатній рівень електробезпеки. В електродних системах теплоносій (вода) є частиною електричного кола, що створює небезпечний потенціал на корпусі.

Крім того, згідно з «Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів» [№1143/13017] та санітарними нормами (ДСанПін 3.3.6.096-2002), ТЕНові та електродні котли часто вимагають встановлення у спеціально обладнаних приміщеннях та підлягають обов'язковій реєстрації в державних наглядових органах.

Актуальний контекст (2024-2025): Цей значний регуляторний та безпековий тягар робить їх менш придатними для швидкої та масової децентралізації теплопостачання, яка стала нагальною потребою для України в умовах енергетичної кризи. На противагу їм, індукційні котли (як буде показано в таблиці) позбавлені цих недоліків.

Таблиця 1.5 - Результати порівняння технічних характеристик електродних котлів

Характеристика (показник, особливість)	ТЕНовий котел	Електродний котел	Індукційний котел
ІНВЕСТИЦІЙНІ ВИТРАТИ			
Питомі витрати, у.о./кВт	16 – 34	22 – 200	~ 214
Строк служби обладнання, рік	<< 24	< 24	> 24
Середній строк окупності, рік	0,5 – 2	0,4 – 2	до 2
Стан вітчизняного виробництва	Середньосерійне	Малосерійне	Одиничне
Спеціальні вимоги до приміщень	Відсутні	Підвищені (висота, вентиляція)	Відсутні
Потреба у ТП	Наявна	Наявна	Відсутня
ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ			
Мін. одинична потужність, кВт	3 (220, 380 В)	2 (220, 380, 660 В)	4,7 (220, 380, 660 В)
Макс. одинична потужність, кВт	1200	8000 (6, 10 кВ)	1600 (6, 10 кВ)
Головний обмежуючий фактор	Обмежений термін служби ТЕНів	Електрохімічна корозія, нестабільність	Відсутній
ККД, %	~ 95	~ 99,2 (є втрати на газовиділення)	~ 98
ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА НАДІЙНІСТЬ			
Чутливість до якості теплоносія	Висока (потрібна хімоводопідготовка)	Критична (потрібна питома електропровідність)	Відсутня (працює з будь-яким теплоносієм)
Потреба у профілактиці/ремонті	Високі	Середні	Низькі
Витрати на підтримку в роб. стані	Високі	Високі	Низькі
Ступінь ризику виходу з ладу	Середньоризикова (бажане резервування)	Середньоризикова (бажане резервування)	Низькоризикований
БЕЗПЕКА ТА СТАБІЛЬНІСТЬ			
Забезпечення електробезпеки	Потрібні ізолювальні уставки	Потрібні ізолювальні уставки	Високий рівень (гальванічна розв'язка)
Сталість роботи (саморегуляція)	Висока ($\delta p/\delta T > 0$)	Низька ($\delta p/\delta T < 0$, ризик "саморозігріву")	Висока ($\delta p/\delta T > 0$)
Пожежонебезпека	Висока (перегрів ТЕНів > 700 °С у "сухому" стані)	Середня (виділення вибухонебезпечного водню)	Низька
РЕГУЛЯТОРНІ ВИМОГИ			
Потреба у постійному нагляді	Цілодобовий нагляд, профілактика	Періодичний нагляд, профілактика	Нагляд практично не потрібен
Реєстрація (Держгірпромнагляд)	Обов'язкова	Обов'язкова	Не розповсюджуються (ДНАОП 0.00-1.07-94)
Обмеження на розташування	Потрібне спец. приміщення та теплотраси	Потрібне спец. приміщення та теплотраси	Можна встановлювати у будь-якому місці

1.8 Висновки до розділу 1

Проведений аналіз свідчить, що застосування електричної енергії для теплопостачання перебуває у фазі активного розвитку. Ринок пропонує широкий спектр обладнання, і доведено, що при раціональному підході (наприклад, з нічними тарифами) воно не є найбільш витратним видом опалення. Високі споживчі властивості (комфорт, безпека, точність регулювання) роблять його доцільним для масового впровадження.

Ключовим та найбільш перспективним напрямком для України є електротеплоакумуляційний (ЕТА) обігрів. Його розвиток дозволяє ущільнити добовий графік навантаження ОЕС, підвищити коефіцієнт використання базових потужностей (АЕС) та знизити потребу у залученні дорогих маневрових енергоблоків.

В умовах критичного дефіциту маневрової генерації (2024-2025 рр.), спричиненого руйнуванням ТЕС, ця здатність ЕТА-систем споживати енергію вночі та не навантажувати мережу в пікові години набуває стратегічного значення для стабільності всієї енергосистеми.

Електрообігрів є, по суті, єдиною технологією, що дозволяє організувати системне та масове впровадження індивідуального (поквартирного) теплозабезпечення. Це є ключовим елементом у стратегії децентралізації та підвищення стійкості (resilience) житлового фонду.

Вищезазначене підкреслює гостру необхідність у подальшій розробці науково-технічних засад та теплотехнічних основ для електрообігріву, розглядаючи його як комплексну енергозберігаючу електротехнологію, що вимагає нових схемотехнічних рішень.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СТАНУ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ ТА ПРОБЛЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ГРАФІКІВ НАВАНТАЖЕННЯ

2.1 Структура генерації та споживання електричної енергії в ОЕС України.

Основою електроенергетичної галузі України є Об'єднана електроенергетична система (ОЕС). Вона являє собою єдиний комплекс виробників, споживачів та пов'язаної інфраструктури, що функціонує в загальному операційному режимі. Історичною подією, що докорінно змінила конфігурацію системи, стала синхронізація ОЕС України з європейською континентальною мережею ENTSO-E у березні 2022 року. Це замінило стару взаємодію з мережами РФ та Білорусі, інтегрувавши Україну в європейський енергетичний ринок та відкривши широкі можливості для імпорту та експорту електроенергії. Відповідно до Закону України «Про електроенергетику», держава забезпечує цілісність системи. Функції єдиного диспетчерського (оперативно-технологічного) управління для забезпечення надійного функціонування ОЕС покладено на ДП НЕК «Укренерго» [11].

Стан генерації: Історичні дані (2020) та реалії (2025)

Важливо розуміти, наскільки кардинально змінилася структура генерації. Дані, наведені у вашій роботі (рис. 2.1 та 2.2), є історичним зрізом станом на вересень 2020 року (до повномасштабного вторгнення). На той момент (2020 р.) загальна *встановлена* (паперова) потужність ОЕС становила 53 874,62 МВт.

Структура встановленої генерації у 2020 році була такою:

- Теплові (ТЕС, ТЕЦ, блок-станції): ~51,8%
- Атомні (АЕС): ~25,7%
- Гідро (ГЕС та ГАЕС): ~11,7%
- Відновлювані (ВДЕ): ~8,5%

Однак станом на 2025 рік ці дані мають виключно історичний характер. Внаслідок масованих цілеспрямованих атак на енергосистему протягом 2022-

2025 років, реальна доступна потужність (особливо теплової та гідрогенерації) є в рази меншою за встановлену. Окупація Запорізької АЕС (найбільшої АЕС в Європі) вивела з балансу системи ~6 ГВт базової потужності. Десятки ключових об'єктів ТЕС та ГЕС зазнали критичних руйнувань.

Таким чином, у 2025 році ОЕС України функціонує в умовах критичного та стійкого дефіциту генеруючих потужностей, особливо маневрових. Управління попитом (Demand Side Management) та ефективне використання нічних «провалів» навантаження, за що також відповідає НЕК «Укренерго», стало головним викликом для виживання системи.

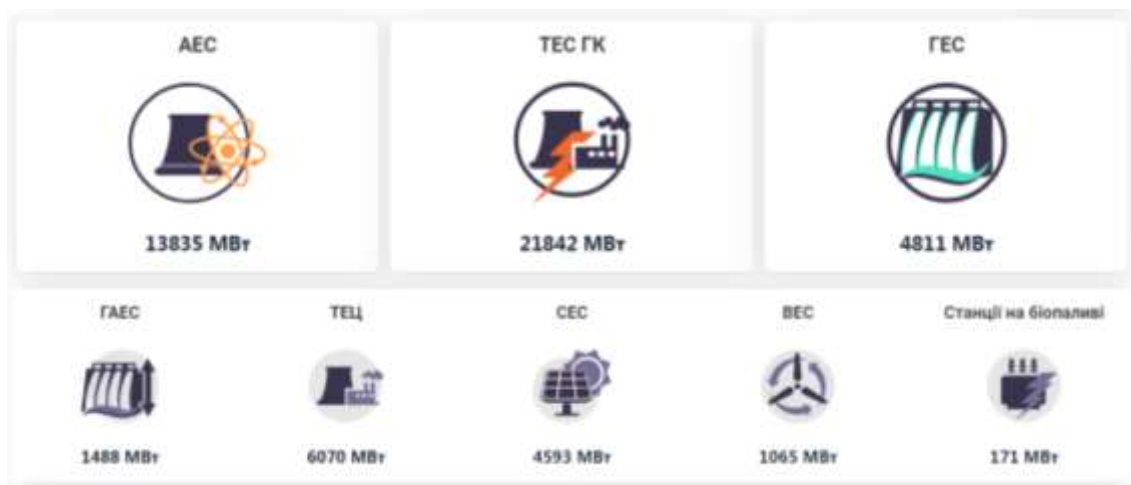


Рисунок 2.1 - Встановлена потужність енергосистеми України на 09.2020 року.

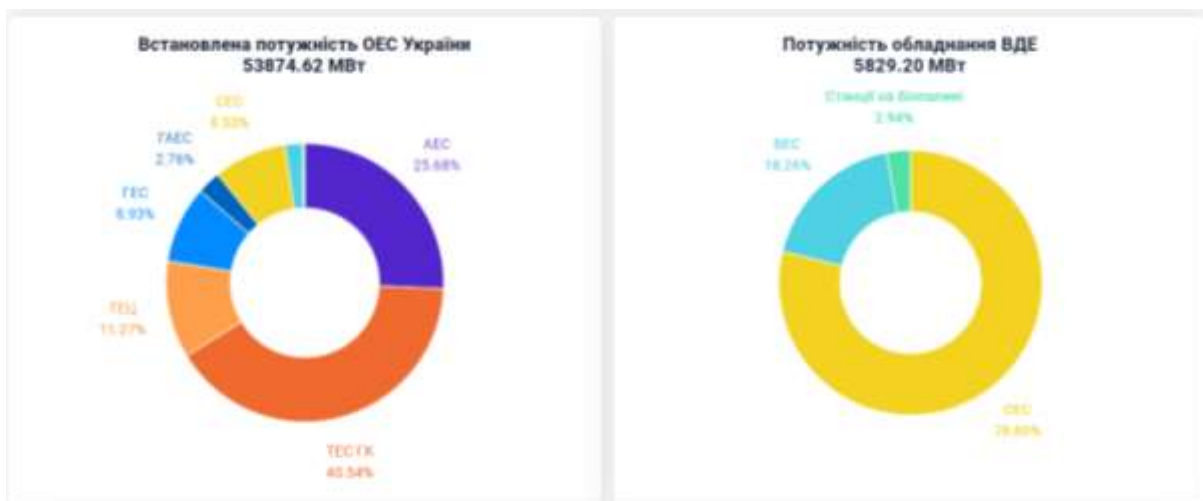


Рисунок 2.2 - Встановлена потужність ОЕС та обладнання ВДЕ на 09.2020 року.

Структура генеруючих потужностей ОЕС України завжди була неоптимальною для ефективного регулювання частоти та потужності, але події

2022-2025 років перетворили цю хронічну проблему на критичну. Ця неоптимальність (а сьогодні - криза) зумовлена наступними факторами:

Домінуюча частка АЕС. Атомні електростанції, згідно з технологічним регламентом, використовуються виключно для покриття базової частини графіка споживання. Вони не залучаються до добового регулювання (маневрування). Окупація Запорізької АЕС (~6 ГВт) лише поглибила цей структурний дисбаланс, поклавши ще більше навантаження на решту атомних блоків.

Катастрофічне знищення маневрових потужностей. Енергоблоки ТЕС, що працюють на твердому паливі, історично виконували роль маневрування. Ще до 2022 року вони мали проблеми через зношеність обладнання. Проте внаслідок цілеспрямованих атак 2022-2025 років більша частина цієї маневрової теплової генерації була фізично знищена.

Нестабільність відновлюваних джерел (ВДЕ). Сонячні та вітрові електростанції (значна частина яких також втрачена або знаходиться в окупації) мають змінний та важко прогнозований графік роботи. Їхня нестабільність вимагає наявності швидких резервів для балансування, яких в системі (через знищення ТЕС) практично не залишилося.

2.2 Динаміка змін в роботі ОЕС України внаслідок втрати маневрових потужностей

Аналіз споживання електроенергії за докризовий період 2013-2020 рр. (без урахування АР Крим та ТНКТ з 2015 р.) демонструє дві ключові тенденції:

1. Сезонна нерівномірність, зумовлена температурними коливаннями.
2. Структурний зсув споживання: Частка промисловості стабільно знижувалася (з ~45% у 2013 р. до 38,9% у 2019 р.), тоді як частка населення зростала (з 28,1% до 31,3%) разом із комунально-побутовим сектором.

Актуальний контекст (2025): Ця тенденція до зростання ролі населення та ЖКГ у загальному споживанні різко прискорилося після 2022 року через

руйнування централізованого теплопостачання та вимушений перехід населення на електроопалення.

Якщо розглядати *встановлену* потужність ОЕС на кінець 2019 року (52,8 ГВт), то її структура була такою: Теплові (ТЕС, ТЕЦ): 52,95%; Атомні (АЕС): 26,2%; Гідро (ГЕС, ГАЕС): 11,9%; Відновлювані (ВДЕ): 8,95%.

Таблиця 2.1 - Рівні та структура споживання електроенергії в Україні за 2012-2022 роки (млн кВт·год)

Основні групи споживачів	2012 р. (пік)	2013 р.	2014 р.	2015 р.	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.	2020 р. COVID	2021 р. Відновл.	2022 р. Виторгненн
	млн кВт·год	млн кВт·год	млн кВт·год	млн кВт·год	млн кВт·год	млн кВт·год	млн кВт·год	млн кВт·год	млн кВт·год	млн кВт·год	млн кВт·год (розрах.)
Споживання (нетто), всь	~150 720	147264	134653	118727	118258	118720	122145	108997	117907	125483	~85 916
1. Промисловість	Н/Д	66339	60930	50200	49995	50858	52023	42402	49307	52274	Н/Д (падіння >35%)
1.2 Металургійна	Н/Д	35093	33933	28755	28872	28995	29560	22341	27135	28873	~13 859 (падіння - 52%)
2. С/г споживачі	Н/Д	3936	3483	3342	3513	3636	3868	3066	3797	3692	Н/Д
3. Транспорт	Н/Д	8690	7342	6807	6796	7011	6955	6356	5713	6171	Н/Д
4. Будівництво	Н/Д	1003	852	748	814	879	964	1017	957	1064	Н/Д
5. Комунал.- побутові сп	Н/Д	18545	16581	15155	15191	14941	15506	14368	14196	15024	Н/Д
6. Інші непромисло	Н/Д	7373	6493	5955	6032	6292	6880	7675	7383	8599	Н/Д
7. Населення	Н/Д	41378	38972	36430	35917	35054	35947	34112	36554	38659	~32 992

Таблиця 2.2 - Історична структура встановленої потужності ОЕС України (2012-2021 рр.), ГВт

РІК	Сумарна встановлена потужність	АЕС	%	ТЕС ГК	%	ТЕЦ та інші ТЕС	%	ГЕС та ГАЕС	%	ВЕС, СЕС, БіоЕС	%
2012	53,8	13,8	25,7	33,9	63,1	5,5	10,2	0,6	1,1	0,6	1,1
2013	54,5	13,8	25,4	34,2	62,9	5,5	10,0	0,9	1,7	0,9	1,7
2014*	55,1	13,8	25,1	34,3	62,3	5,9	10,6	1,1	2,0	1,1	2,0
2015*	54,8	13,8	25,2	34,3	62,5	5,9	10,7	0,8	1,5	0,8	1,5
2016	55,3	13,8	25,0	34,3	62,1	6,2	11,2	1,0	1,7	1,0	1,7
2017	51,7	13,8	26,7	30,5	59,0	6,2	12,0	1,2	2,3	1,2	2,3
2018	49,7	13,8	27,8	27,9	56,2	6,2	12,6	1,7	3,4	1,7	3,4
2019	52,8	13,8	26,2	27,9	52,9	6,3	11,9	4,7	8,9	4,7	8,95
2020	54,5	13,8	25,3	27,6	50,6	6,3	11,6	6,8	12,5		
2021	55,8	13,8	24,7	27,3	48,9	6,3	11,3	8,4	15,1		

Станом на 2025 рік, внаслідок масованих руйнувань, ця історична структура встановленої потужності втратила актуальність. Критичне пошкодження саме теплової та гідрогенерації (тобто >64% маневрових потужностей станом на 2019) перетворило докризовий виклик балансування ВДЕ на фундаментальну кризу операційної безпеки та нестачу диспетчерського резерву в ОЕС України.

Вже тоді значне зростання ВДЕ (тільки у 2019 р. було додано 3 ГВт) створювало дедалі більшу потребу в маневрових потужностях (ТЕС та ГЕС) для балансування системи, особливо в години пікової інсоляції.

Таблиця 2.3 - Динаміка встановленої потужності ВДЕ в Україні (2012-2021 рр.), МВт

Рік	ВЕС (Вітрові)	СЕС (Сонячні)	БіоЕС (Біомаса, біогаз)	Всього (пром.+домогосп.)
2012	193,8	371,6	6,2	571,6
2013	372,0	563,0	10,0	945,0
2014*	509,0	582,0	35,0	1126,0
2015*	428,0	359,0	54,0	841,0
2016	439,0	458,0	65,0	962,0
2017	328,0	758,0	97,0	1183,0
2018	389,0	1225,0	99,0	1713,0
2019	1025,0	3555,0	142,0	4723,0
2020	~1314,0	~6855,0	~180,0	~8349,0
2021	~1673,0	~7586,0	~244,0	~9656,0

* Примітки: Дані за 2014 рік включають пік до окупації. Різке падіння у 2015 році (особливо ВЕС та СЕС) — це прямий наслідок анексії АР Крим, де була сконцентрована значна частина «зелених» потужностей.

2.3 Баланс виробництва та споживання електроенергії в кризових умовах

Добовий графік навантаження (виробництва/споживання) - це справді фундаментальний інструмент в оперативно-технологічному управлінні ОЕС України, який планується «сьогодні на завтра». Його головна мета - забезпечити баланс між попитом (споживанням) та пропозицією (виробництвом), враховуючи необхідні резерви потужності для покриття непередбачуваних відхилень чи аварій. За розробку та дотримання цього балансу відповідає НЕК

«Укренерго» як оператор системи передачі. Оскільки ви посилаєтесь на рисунки 2.3 і 2.4 (але не надали їх), важливо описати їхню класичну, історичну форму. Зазвичай це «дво-горба» крива, що має чотири характерні зони:

Нічний провал (00:00 – 06:00): Найнижчий рівень споживання в добі. Навантаження покривається базовою генерацією (АЕС).

Ранковий пік (08:00 – 11:00): Споживання різко зростає, коли починається робочий день, вмикаються підприємства.

Денне просідання (13:00 – 16:00): Невелике зниження активності.

Вечірній пік (19:00 – 23:00): Найкритичніший момент. Споживання промисловості ще триває, але до нього додається максимальне побутове навантаження (населення повертається додому, вмикає світло, електроприлади, обігрів).

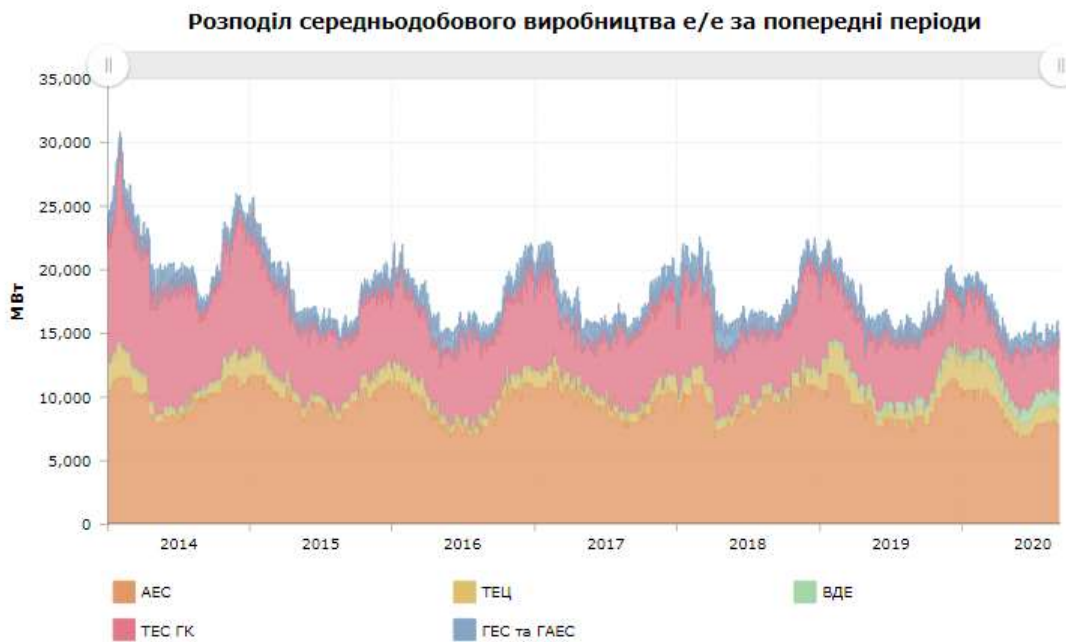


Рисунок 2.4 – Графік виробництва та споживання електроенергії за попередні роки. [11]

Актуальний контекст (2024-2025): Від балансування до управління дефіцитом. Важливо розуміти, що історично завданням диспетчера було економічне балансування: вночі працюють дешеві АЕС, а на ранковий та вечірній піки для покриття попиту підключаються дорогі, але гнучкі (маневрові) ТЕС та ГЕС. Станом на 2025 рік, внаслідок масованих атак та фізичного

знищення більшості маневрових потужностей (ТЕС, ТЕЦ та ГЕС), ОЕС України функціонує в стані перманентного жорсткого дефіциту. Тому сьогодні «графік» - це не стільки документ економічної оптимізації, скільки інструмент виживання. Завдання диспетчера «Укренерго» - не «підключити» маневрову генерацію (якої фізично немає), а примусово «зрізати» піки споживання шляхом графіків погодинних відключень (ГПВ) для населення та промисловості.



Рисунок 2.3 – Графік споживання електроенергії за попередні роки. [11]

2.4 Добові режими навантаження та особливості побутового електроспоживання

Ключовою негативною властивістю електроенергії як товарного продукту залишається одномоментність її генерації та споживання. На відміну від газу чи вугілля, її неможливо виробляти «про запас» і складувати. Цей факт, у поєднанні з добовою та сезонною нерівномірністю попиту, змушує виробництво постійно та миттєво слідувати за споживанням. Рисунок 2.4, що демонструє добовий графік навантаження ОЕС України за 26.02.2020 року, є показовим історичним зрізом докризової, стабільної енергосистеми. На ньому чітко видно дві ключові проблеми:

Глибокий «нічний провал» (00:00–06:00): Період надлишкової базової генерації (АЕС), яку ніхто не споживає.

Гострі «піки» (ранковий та вечірній): Періоди максимального попиту, для покриття яких доводилося залучати дорогу маневрову генерацію (ТЕС).

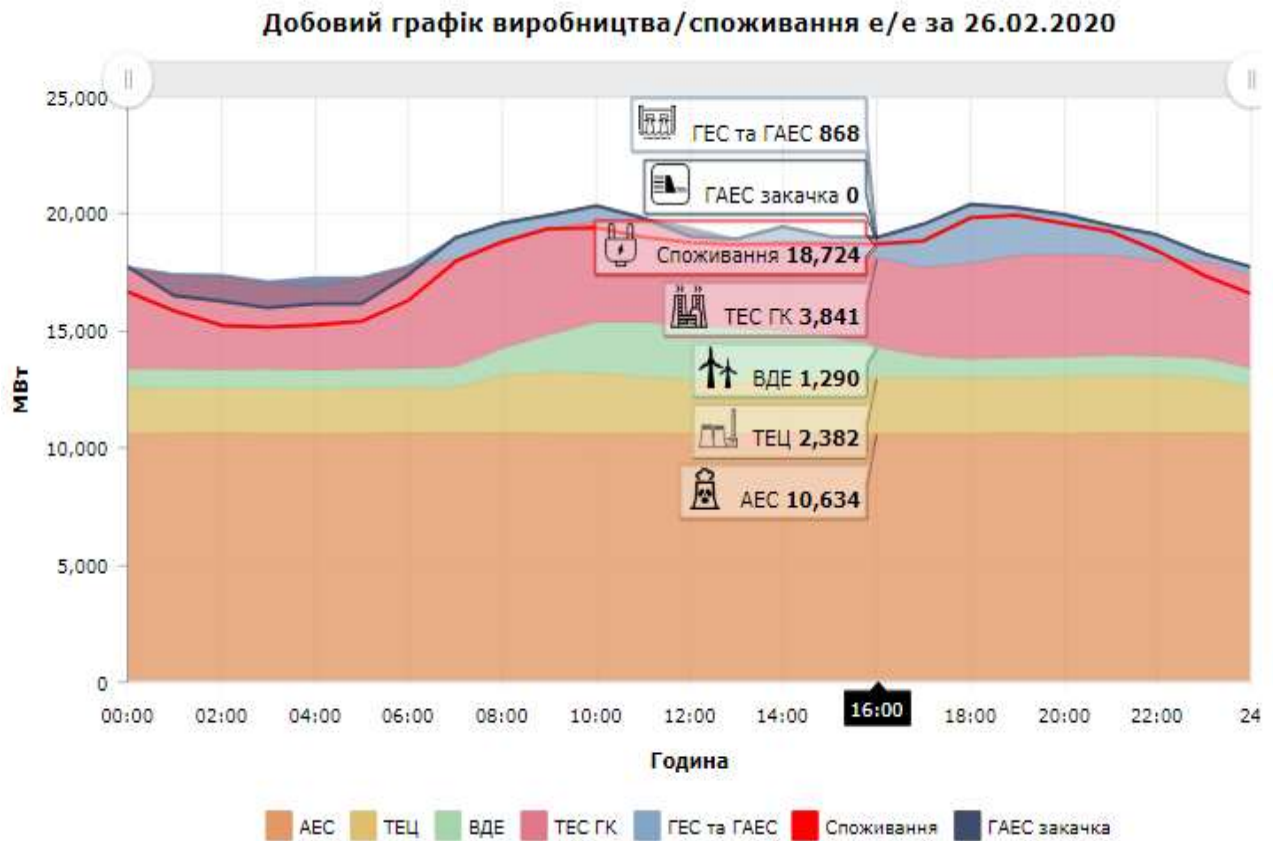


Рисунок 2.4 – Добовий графік виробництва та споживання електроенергії за 26.02.2020 р. [11]

Так само, кільцевий графік (рис. 2.5), побудований на даних ДП «Енергоринок» (оператора старої моделі ринку), ілюструє історичну структуру генерації, де значну частку займали ТЕС та АЕС. Аналіз типового добового графіка навантаження ОЕС України (наприклад, за 2020-2021 рр.) показує максимальне навантаження на рівні ~22 ГВт, яке покривалося різними типами генерації. *Історично*, ОЕС України була з'єднана як з енергосистемами країн ЄС (Угорщина, Словаччина), так і з системами СНД (Білорусь, Молдова).

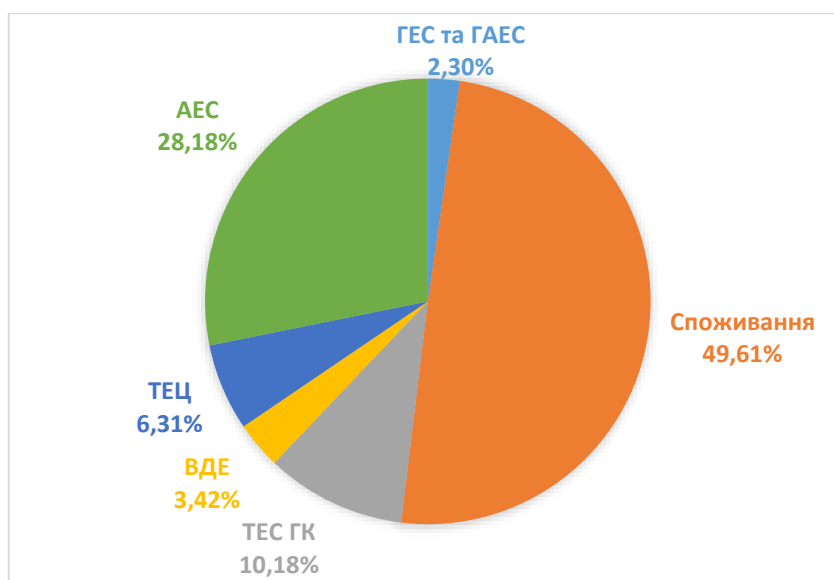


Рисунок 2.5 – Добовий кільцевий графік виробництва та споживання електроенергії за 26.02.2020 р.

Ключовою проблемою завжди була добова нерівномірність:

1. Нічний «провал» (мінімум): Надлишкова базова енергія (АЕС) використовувалася для «закачування» води на гідроакumuлюючих станціях (ГАЕС).

2. Денний та вечірній «піки» (максимум): Попит різко зростає. Саме ГАЕС, разом із маневровими блоками теплових електростанцій (ТЕС), покривали до 30-40% цього пікового навантаження.

До 2022 року саме ТЕС несли основний тягар добового регулювання. Їхні вугільні блоки змушували працювати у вкрай неекономічних, непроектних режимах «старт/стоп». Це призводило до катастрофічних наслідків: достроковий знос обладнання; величезні перевитрати палива (за орієнтовними розрахунками, втрати на пуски/зупинки сягали \$1 млрд); скорочення експлуатаційного ресурсу (втрати ще \$2 млрд). Більше того, старі системи регулювання ТЕС технічно не могли підтримувати стабільну частоту в межах європейських норм ($50 \pm 0,02$ Гц), ледь дотримуючись стандарту $50 \pm 0,2$ Гц.

Таким чином, історична проблема ОЕС полягала у хронічній нестачі ефективних маневрових потужностей, що змушувало неекономно «вбивати» базові ТЕС.

2.5 Проблеми покриття пікових навантажень та дефіцит маневрової генерації

Історично (до 2022 р.) добовий графік ОЕС України характеризувався значною нерівномірністю: співвідношення між нічним мінімумом та вечірнім піком навантаження становило в середньому 0,76. Ця незбалансованість була спричинена структурною вадою: низькою часткою високоманеврових потужностей (ГЕС та ГАЕС), яка складала лише ~9,7%. Цей дефіцит [11] критично перешкоджав ефективному регулюванню, ускладнював проходження нічних «провалів» споживання та знижував загальну стійкість роботи ОЕС (як показано на рис. 1.3 для 2020 р.). Ця проблема поглиблювалася змінами у структурі споживання після 2014 року. Внаслідок окупації промислових регіонів (Донбас, АР Крим) та загальноекономічних чинників, загальне споживання промисловістю впало. Водночас невпинно зростала частка побутового та комунального секторів. З точки зору режимів ОЕС, це мало негативний ефект: зростання комунального споживання ще більше посилювало добову нерівномірність (підвищувало вечірні піки), що створювало додаткові вимоги до маневрових потужностей, яких і раніше катастрофічно бракувало.

Актуалізація (станом на 2025 рік): Від дефіциту до катастрофи

Важливо підкреслити, що наведений вище аналіз описує історичну проблему. Станом на 2025 рік, внаслідок масованих ракетних атак 2022-2025 рр., ця проблема перейшла з розряду «дефіциту маневру» у розряд «катастрофи генерації». Відбулося фізичне знищення більшості тих самих маневрових потужностей (ТЕС, ТЕЦ та ГЕС), яких і раніше бракувало (тих 9,7%). Тому зростання частки побутового споживання, яке у 2020 році було *проблемою* (бо збільшувало піки), сьогодні стає ключем до вирішення. Якщо це споживання зробити керованим (завдяки технологіям на кшталт електротеплоаккумуляції), воно може добровільно перенести попит з вечірніх піків (які зараз нічим крити) на нічні провали (де ще є базова генерація вцілілих АЕС).

2.6 Способи та технічні засоби ущільнення добового графіка навантажень (DSM)

Одномоментність генерації та споживання електроенергії робить стабілізацію добового графіка навантаження (ДГН) ключовою проблемою. Традиційно, баланс підтримується регулюванням генерації, використанням маневрових потужностей (зокрема ГАЕС) та перетоками в межах великих енергосистем. Проте ОЕС України історично (до 2022 р.) перебувала у стані хронічного дефіциту маневрових потужностей. Це змушувало оператора залучати до регулювання навіть базові блоки ТЕС та АЕС, що є неприпустимим, оскільки призводить до їх дострокового зносу.

Ця застаріла система регулювання також була нездатна забезпечити стабільність частоти за нормами ENTSO-E (UCTE). Прогнози [11] до 2030 року лише погіршували ситуацію, оскільки планувалося зростання генерації за домінування негнучких АЕС та ТЕС. Отже, пошук нових засобів ущільнення графіків навантаження став одним із найактуальніших завдань для української енергетики. У табл. 2.4 наведено порівняльний аналіз трьох основних способів вирішення цієї проблеми.

Таблиця 2.4 - Способи ущільнення добового графіка навантажень

Показник або фактор	ГАЕС	Газотурбінна пікова генерація	Акумуляційне електроопалення [3]
Ефективність, %	$k_{\text{ef}} \approx 65...70$	ККД = 50...52	$k_{\text{ef}} \approx 95...100$
Технічна база	Агрегат «насос-турбіна»	ПГУ-325	Електрокотел, печі, нагрівальні кабелі
Потужність, МВт	150	325	0,005...1,0 (одинична)
Питома вартість	680 у.о./кВт*	200 у.о./кВт	20...150 у.о./кВт
Капітальні затрати, млн у.о.	1125	300	30...75
Екологія	Погана (затоплення земель)	Помірна (викиди)	Добра (у місці споживання)
Економія газу	Повна	Часткова	Повна
Ступінь готовності	5...15 років	4...5 років	Повна

Хоча ГАЕС вважаються раціональним способом ущільнення ДГН, їх тривале будівництво змушує Україну історично покладатися на традиційне, неефективне маневрування енергоблоками.

Як життєздатна альтернатива, у роботах [3-5, 12-15] був запропонований «споживач-регулятор», повністю адаптований до українських реалій. Ця концепція базується на акумуляційному електроопаленні (ЕТА) у житловій та соціальній сферах, яке призначене для споживання енергії переважно в години нічного «провалу» ДГН. Такий підхід є логічним, оскільки муніципальна енергетика (ЖКГ) є набагато менш ефективною, ніж сектор електрогенерації.

ЕТА-опалення здатне синхронізувати виробництво та споживання в єдиному ланцюзі. Воно поєднує переваги централізованої генерації (наприклад, на АЕС) із гнучкістю децентралізованого споживання. Це відповідає новій концепції енергоефективності, що оцінює мінімізацію витрат первинних енергоресурсів на всьому шляху їх трансформації — від генерації до кінцевого споживача. Отже, ефективними «споживачами-регуляторами» можуть стати саме масові, хоча й малопотужні, споживачі (наприклад, системи ЕТА-опалення). Їхній режим споживання, керований диспетчерською службою, дозволяє ущільнити ДГН без введення нової дорогої генерації.

Історично (до 2022 р.) економічні та технічні переваги такого підходу були комплексними:

- Підвищення ефективності базової генерації: Забезпечується суттєве (понад 10%) підвищення коефіцієнта використання встановленої потужності (КВВП) АЕС і ТЕС, що працюють рівним графіком.
- Збереження маневрових потужностей: Різко знижуються втрати та знос маневрового обладнання (ТЕС, ГЕС) через усунення шкідливих, непроєктних режимів «пуск/зупинка» та глибоких розвантажень.
- Економія первинних ресурсів: Досягається значне заміщення дорогого природного газу в секторі ЖКГ (історичний потенціал до 300 млн м³/рік) та зниження емісії CO₂ (до 0,6 млн т).

- Стабілізація мережі: Знижуються технологічні втрати в мережах (наприклад, втрати холостого ходу у нічні години) та забезпечується швидке регулювання частоти, що знижувало витрати на модернізацію систем для синхронізації з ENTSO-E (UCTE).

Актуалізація (станом на 2025 рік): Від економії до виживання

Важливо підкреслити, що наведений вище аналіз описував *економічні* переваги у *докризовий* період. Станом на 2025 рік, внаслідок фізичного знищення більшості маневрових ТЕС та пошкодження ГЕС/ГАЕС, ці переваги набули нового, екзистенційного значення:

1. Не «зниження зносу», а «пряма заміна»: Сьогодні мова йде вже не про *економію* ресурсу маневрових блоків, а про пряму заміну їхньої втраченої потужності.

2. Не «стабільність для ENTSO-E», а «порятунок від колапсу»: «Споживач-регулятор» — це вже не засіб для *досягнення* норм ENTSO-E, а єдиний реалістичний спосіб використати нічну базову генерацію вцілілих АЕС, щоб уникнути повного колапсу системи під час вечірніх піків, на покриття яких генерації фізично не залишилося.

Впровадження акумуляційного електрообігріву (ЕТА) є способом модернізації комунальної енергетики, що одночасно ущільнює графік навантаження (ДГН) та надає населенню високоякісне опалення.

Історично [3, 13], цей підхід не вимагав нової генерації, оскільки базувався на використанні нічного «провалу» ОЕС (з потенціалом ~1100 МВт) у сегментах мережі, що вже мали вільні потужності. Політика, що звідси випливає, полягала у заміщенні дорогих маневрових потужностей масовими керованими «споживачами-регуляторами» (ЕТА-системами), що є регіональним завданням.

Вітчизняна елементна база для цього вже визначена [3]. Принципово неважливо, як акумулюється теплова енергія вночі: у водяному баці; у масивних будівельних конструкціях; у магнезитовому сердечнику. Джерелом тепла може бути широкий спектр пристроїв: різні типи електроднів (ТЕНові, електродні, індукційні), теплові насоси або кабельні системи. Проблемою залишалася

мотивація споживача (через поверхнєве порівняння ККД електростанції ~40% з ККД локальної котельні ~90%). Це вимагало детальних техніко-економічних обґрунтувань (ТЕО), які враховують *весь* ланцюг трансформації первинних ресурсів, а не лише кінцевий прилад.

Актуалізація (станом на 2025 рік): Від «виведення» до «фізичної відсутності»

Важливо підкреслити: текст вище описує *історичну* логіку. У 2020 році «виведення маневрових потужностей» [ТЕС] було економічною політикою енергоефективності. Станом на 2025 рік, внаслідок масованих ракетних атак, ці маневрові потужності (ТЕС, ТЕЦ, ГЕС) вже фізично знищені. Тому ЕТА-обігрів - це вже не «політика заміщення», а безальтернативний механізм виживання для компенсації втраченої генерації. Так само, «парадокс ККД» (40% на ТЕЦ проти 90% у котельні) втратив сенс. В умовах зруйнованої інфраструктури та дефіциту, єдиним надійним джерелом енергії залишається нічна базова генерація вцілілих АЕС. Акумуляція тепла - це єдиний спосіб доставити цю енергію до споживача у потрібний час.

2.7 Використання нічного провалу навантаження як стратегічного ресурсу для електроопалення

Впровадження акумуляційного електрообігріву (ЕТА) є способом модернізації комунальної енергетики, що одночасно ущільнює графік навантаження (ДГН) та надає населенню високоякісне опалення.

Історично [3, 13], цей підхід не вимагав нової генерації, оскільки базувався на використанні нічного «провалу» ОЕС (з потенціалом ~1100 МВт) у сегментах мережі, що вже мали вільні потужності. Політика, що звідси випливає, полягала у заміщенні дорогих маневрових потужностей масовими керованими «споживачами-регуляторами» (ЕТА-системами), що є регіональним завданням.

Вітчизняна елементна база для цього вже визначена [3]. Принципово неважливо, як акумулюється тепла енергія вночі: у водяному баці; у масивних будівельних конструкціях; у магнезитовому сердечнику. Джерелом тепла може бути широкий спектр пристроїв: різні типи електрододів (ТЕНові, електродні,

індукційні), теплові насоси або кабельні системи. Проблемою залишалася мотивація споживача (через поверхневе порівняння ККД електростанції ~40% з ККД локальної котельні ~90%). Це вимагало детальних техніко-економічних обґрунтувань (ТЕО), які враховують *весь* ланцюг трансформації первинних ресурсів, а не лише кінцевий прилад.

Актуалізація (станом на 2025 рік): Від «виведення» до «фізичної відсутності»

Важливо підкреслити: текст вище описує *історичну* логіку. У 2020 році «виведення маневрових потужностей» [ТЕС] було економічною політикою енергоефективності. Станом на 2025 рік, внаслідок масованих ракетних атак, ці маневрові потужності (ТЕС, ТЕЦ, ГЕС) вже фізично знищені. Тому ЕТА-обігрів — це вже не «політика заміщення», а безальтернативний механізм виживання для компенсації втраченої генерації. Так само, «парадокс ККД» (40% на ТЕЦ проти 90% у котельні) втратив сенс. В умовах зруйнованої інфраструктури та дефіциту, єдиним надійним джерелом енергії залишається нічна базова генерація вцілілих АЕС. Акумуляція тепла — це єдиний спосіб доставити цю енергію до споживача у потрібний час.

2.8 Висновки до розділу 2

Історично, структура генеруючих потужностей ОЕС України завжди була неоптимальною, з гострим дефіцитом маневрових потужностей. Це змушувало оператора нерационально використовувати великі теплові енергоблоки (ТЕС) для добового регулювання, що призводило до втрати їхнього ресурсу та перевитрат палива. Водночас, аналіз добових графіків навантаження (ДГН) демонструє глибокі нічні «провали». Найефективнішим способом вирішення обох проблем є акумуляція теплової енергії (електроопалення). Цей підхід підтримується довгостроковою державною політикою пільгових нічних тарифів. Таким чином, з огляду на капітальні витрати, екологічність та високий рівень керованості,

впровадження електротеплоаккумуляційного обігріву (ЕТА) для ущільнення ДГН є техніко-економічно обґрунтованим.

Важливо підкреслити, що наведений аналіз описує *докризову* ситуацію. Станом на 2025 рік, внаслідок фізичного знищення більшості маневрових ТЕС та ГЕС під час атак 2022-2025 років, проблема перестала бути «дефіцитом» і перетворилася на «катастрофу генерації». Раніше ЕТА-обігрів вважався *економічно доцільним* для оптимізації. Сьогодні — це безальтернативний механізм виживання для ОЕС. Він дозволяє використати єдину доступну нічну енергію (вцілілих АЕС) та зрізати вечірні піки, на покриття яких генерації в країні фізично не залишилося.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

3.1 Теоретичні засади процесів перетворення енергії в індукційному нагрівачі

Активні втрати потужності в сталевому осерді котушки ($P_{стали}$) складаються з двох основних компонентів [16]: втрати на гістерезис (P_z) та втрати на вихрові струми ($P_в$). Для нашого проекту (індукційного нагрівача) приймемо, що саме ці сумарні втрати є корисною тепловою потужністю, яка нагріває теплоносії.

Втрати на гістерезис. Розглянемо спочатку втрати на гістерезис. Щоб виділити їх, припустимо, що котушка "ідеальна" - тобто активний опір її обмотки дорівнює нулю ($R_{обм} = 0$). Миттєва активна потужність, що споживається котушкою, визначається як:

$$P_z = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt, \quad (3.1)$$

де T – період, u – миттєва напруга, i – миттєвий струм.

1. Визначення напруги (u): В ідеальній котушці без опору, вся прикладена напруга u компенсує ЕРС самоіндукції e :

$$u = -e = w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.2)$$

де w – число витків, а Φ – миттєвий магнітний потік. Оскільки потік $\Phi = B \cdot S$ (де B – індукція, S – площа осердя), отримуємо:

$$u = wS \frac{dB}{dt}. \quad (3.3)$$

2. Визначення струму (i): Із закону повного струму для однорідного поля (де H – напруженість поля, l – довжина магнітопроводу):

$$H \cdot l = i \cdot w \Rightarrow i = \frac{Hl}{w}, \quad (3.4)$$

3. Підстановка у формулу потужності: Підставимо вирази для u та i у формулу (3.1). При цьому dt скорочується з dB/dt , і інтегрування за часом (T) перетворюється на інтегрування за циклом перемагнічування:

$$P_z = \frac{1}{T} \int_0^T (wS \frac{dB}{dt}) \cdot (\frac{Hl}{w}) dt = \frac{Sl}{T} \int_{\text{цикл}} HdB = fV \oint HdB, \quad (3.5)$$

Оскільки $Sl = V$ (об'єм магнітопроводу) і $l/T = f$ (частота струму):

$$P_z = fV \oint HdB$$

Інтеграл $\oint HdB$ - це площа петлі гістерезису матеріалу осердя. Таким чином, втрати потужності на гістерезис прямо пропорційні об'єму осердя (V), частоті струму (f) та площі петлі гістерезису.

Для моделювання в електричних колах, ці втрати можна представити через еквівалентний активний опір r_{ez} :

$$P_z = r_{ez} I_a^2, \quad (3.6)$$

де I_a – діюче значення активної складової струму.

Втрати на вихрові струми (Струми Фуко). Змінний магнітний потік Φ наводить ЕРС не лише в обмотці, але й у самому сталевому осерді. Під дією цієї ЕРС в осерді виникають замкнені вихрові струми (також відомі як струми Фуко). Ці струми, протікаючи матеріалом осердя, нагрівають його (за законом Джоуля-Ленца), що і є втратами активної потужності P_e . В індукційному котлі - це головний механізм нагріву. Загалом, ці втрати прямо пропорційні квадрату частоти (f^2), квадрату магнітної індукції (B^2) та квадрату товщини осердя (d^2).

Для зменшення небажаних втрат в трансформаторах, осердя роблять шихтованим (з тонких, ізольованих одна від одної пластин). В індукційних нагрівачах, навпаки, конструкція осердя (ТВЕЛа) оптимізується для максимізації цих струмів.

В еквівалентній схемі ці втрати також моделюються опором r_{ee} :

$$P_e = I_a^2 \cdot r_{ee}, \quad (3.7)$$

де k у вашій формулі (3.7) враховано у r_{ee} .

Загальні втрати в сталі. Сумарні втрати активної потужності в котушці (які і є її тепловою потужністю) дорівнюють сумі втрат на гістерезис та вихрові струми:

$$P_c = P_z + P_v = (r_{ez} + r_{ev}) I_a^2 = r_e I_a^2, \quad (3.8)$$

де r_e – загальний еквівалентний активний опір, що враховує всі втрати в сталі.

Складаємо розрахункову схему ідеальної котушки в сталі (рис. 3.1)

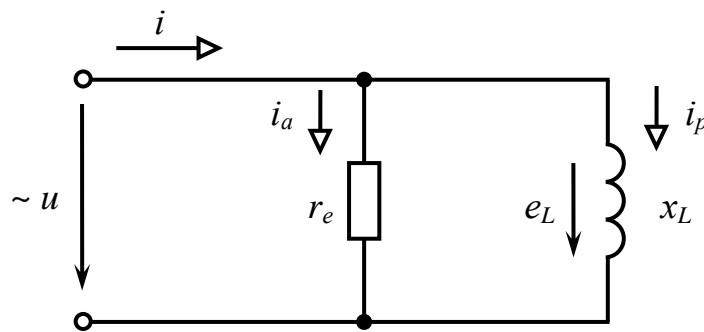


Рисунок 3.1 - Розрахункова схема ідеальної котушки.

На розрахунковій схемі (рис. 3.1) ми маємо:

r_e – еквівалентний активний опір, який враховує сумарні втрати потужності в сталі (на гістерезис та вихрові струми), Ом.

x_L – індуктивний опір ідеальної котушки в сталі, Ом.

У свою чергу, індуктивний опір x_L дорівнює:

$$x_L = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L \quad (3.9)$$

де: ω – кругова частота струму, рад/с; f – промислова частота струму (50 Гц); L – індуктивність ідеальної котушки в сталі, Гн.

Складаємо розрахункову схему ідеальної котушки в сталі в комплексній формі (рис. 3.2).

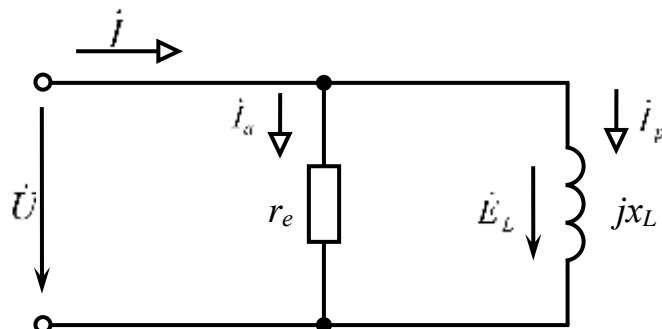


Рисунок 3.2 - Розрахункова схема ідеальної котушки в сталі в комплексній формі.

На розрахунковій схемі (рис. 3.2) ми використовуємо наступні комплекси діючих значень: \dot{U} - комплекс діючого значення напруги на затискачах ідеальної котушки, (В); \dot{E} - комплекс діючого значення ЕРС самоіндукції ідеальної котушки, (В). (В ідеальній котушці $\dot{U} = \dot{E}$). \dot{I} - комплекс діючого значення повного струму ідеальної котушки, (А).

Цей повний струм \dot{I} складається з двох компонентів, що зсунуті по фазі на 90° : \dot{I}_a - комплекс діючого значення активної складової струму, (А). Цей струм збігається по фазі з напругою \dot{U} і протікає через активну провідність g_e , визначаючи теплові втрати в сталі. ($\dot{I}_a = \dot{U} \cdot g_e$). \dot{I}_p (або \dot{I}_μ - струм намагнічування) - комплекс діючого значення реактивної (індуктивної) складової струму, (А). Цей струм відстає від напруги \dot{U} на 90° і протікає через реактивну провідність b_L , визначаючи потужність, що йде на створення магнітного потоку. ($\dot{I}_p = \dot{U} \cdot (-jb_L)$). Будуємо векторну діаграму ідеальної котушки в сталі (рис. 3.3)

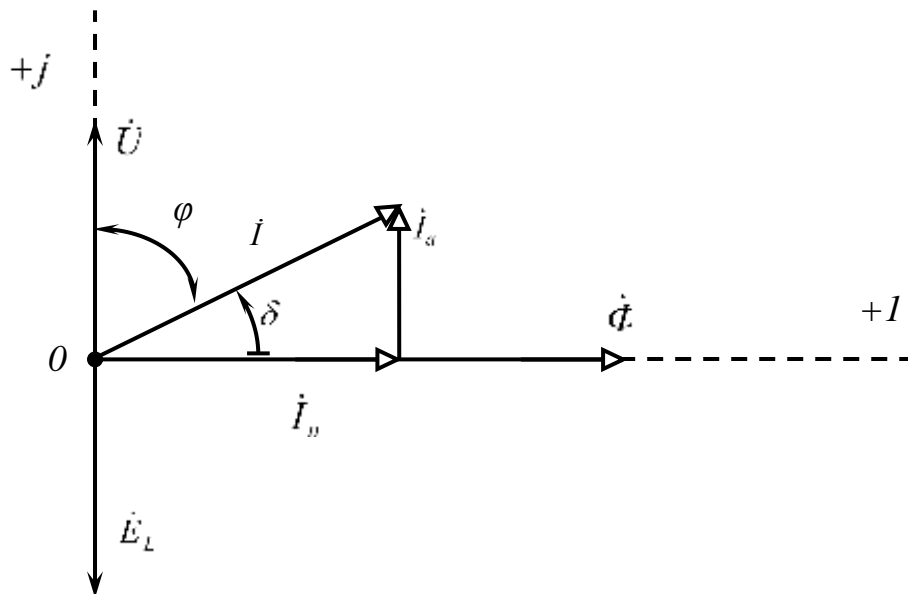


Рисунок 3.3 - Векторна діаграма ідеальної котушки в сталі

На векторній діаграмі (рис. 3.3, який логічно слідує за цим): $\dot{\Phi}$ - комплекс діючого значення магнітного потоку, (Вб). φ - кут зсуву фаз, (град). Це кут між вектором загальної напруги \dot{U} та вектором загального струму \dot{I} .

Сформулюємо основне рівняння електричної рівноваги для ідеальної

індуктивної котушки, встановленої в сталевому магнітопроводі. Це рівняння описує взаємозв'язок між прикладеною напругою, струмом у обмотці та зміною магнітного потоку в осерді. Воно використовується для моделювання електромагнітних процесів у котушках з феромагнітним матеріалом та служить базою для подальшого аналізу їх динаміки:

$$u = -e_L = w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.10)$$

Запишемо вираз, що описує миттєве значення напруги на виводах ідеальної індуктивної котушки, розміщеної в сталевому осерді. Такий математичний запис дозволяє врахувати зміну магнітного потоку в матеріалі осердя та встановити зв'язок між струмом обмотки й індукованою електрорушійною силою. Отриманий вираз є основою для подальшого аналізу роботи індуктивних елементів у феромагнітних середовищах та розрахунку їх електромагнітних характеристик:

$$u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (3.11)$$

Визначимо аналітичний вираз для миттєвого значення магнітного потоку, що створюється струмом у обмотці:

$$\Phi = \frac{1}{w} \int u dt = \frac{1}{w} \int U_m \sin(\omega t + 90^\circ) dt = \frac{U_m}{w \cdot \omega} \sin \omega t = \Phi_m \cdot \sin \omega t, \quad (3.12)$$

де

$$\Phi_m = \frac{U_m}{w \cdot \omega}. \quad (3.13)$$

Сформулюємо рівняння електричної рівноваги для ідеальної індуктивної котушки в сталевому осерді у комплексній формі. Використання комплексних величин дає змогу описати поведінку котушки в усталеному синусоїдному режимі, поєднуючи змінну напругу, струм та реактивні властивості магнітного кола в одному математичному виразі:

$$\dot{U} = -\dot{E} = j\omega w \dot{\Phi}. \quad (3.14)$$

Складемо спрощену розрахункову схему реальної котушки: винесемо

активний опір обмотки r_k на затискачі ідеальної котушки в сталевому осерді, щоб у схемі видно було еквівалентну послідовну складову втрат обмотки (рис. 3.4).

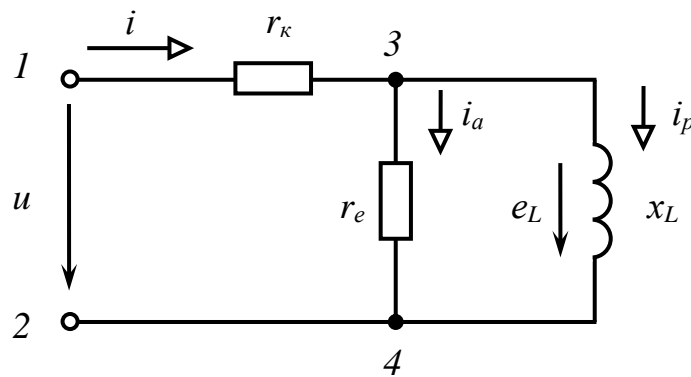


Рисунок 3.4 - Розрахункова схема реальної котушки в сталі

Реальна котушка в сталі відрізняється від ідеальної тим, що її обмотка (зазвичай мідна) має власний активний опір R , який ми більше не можемо ігнорувати. Цей опір враховує теплові втрати в самій обмотці (втрати в міді). Рівняння електричної рівноваги реальної котушки в сталі для оригіналів:

$$u = r_k \cdot i - e_L. \quad (3.15)$$

Розрахункова схема реальної котушки в сталі враховує активний опір самої обмотки (R), який ми раніше ігнорували. Цей опір (R) вмикається послідовно до "ідеальної" моделі осердя (паралельних r_e та x_L), оскільки повний струм \dot{I} проходить спочатку через обмотку (рис. 3.5). Для розрахункової схеми реальної котушки в сталі, яка враховує активний опір обмотки R , рівняння електричної рівноваги для комплексів:

$$\dot{U} = r_k \cdot \dot{I} - \dot{E}_L \quad (3.16)$$

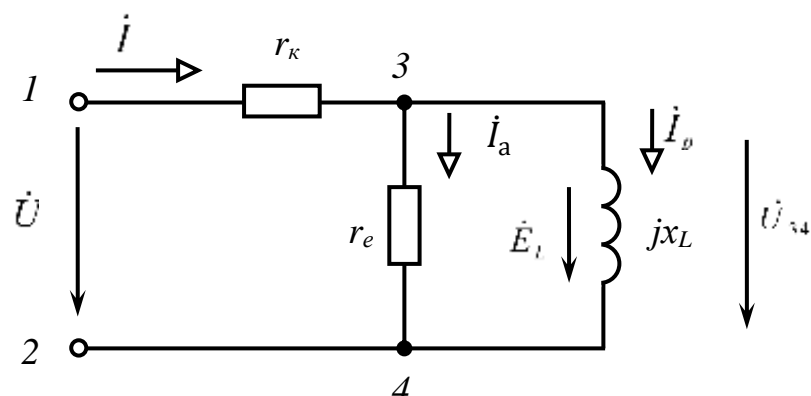


Рисунок 3.5 - Розрахункова схема реальної котушки в сталі в комплексній формі.

Побудуємо векторну діаграму реальної котушки в сталі (рис. 3.6)

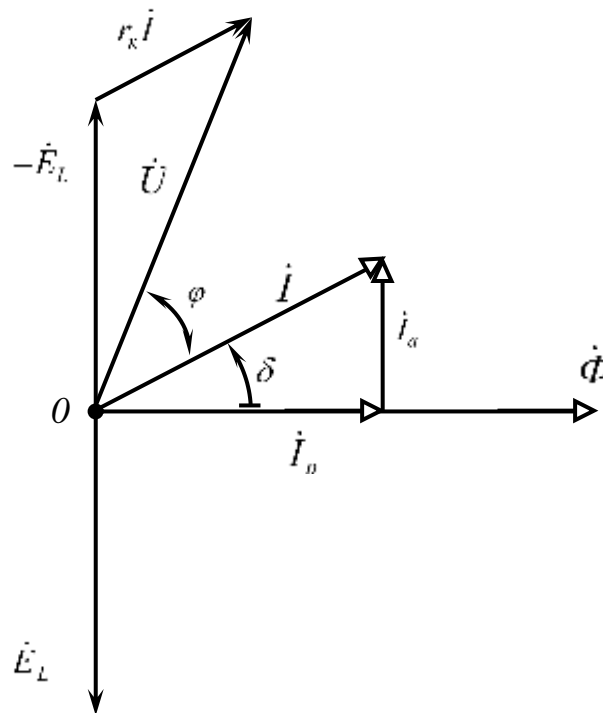


Рисунок 3.6 - Векторна діаграма реальної котушки в сталі в комплексній

Аналітичне вивчення залежностей струму та активної потужності у котушці зі сталевим осердям ускладнене через яскраво виражену нелінійність її параметрів, насамперед індуктивності.

З отриманого теоретичного аналізу випливають такі ключові висновки: гістерезисні втрати активної потужності зростають пропорційно частоті струму, об'єму осердя, площі гістерезисної петлі та властивостям матеріалу; втрати на вихрові струми зростають приблизно пропорційно квадрату частоти, квадрату магнітної індукції та товщині елементів осердя; додатково в котушці присутні теплові (J^2R) втрати обмотки, які залежать від опору дроту та величини струму. Через ці механізми котушка може ефективно виконувати функцію перетворювача електричної енергії в тепло.

Щоб зменшити втрати в осерді, практично застосовують ламінування осердя тонкими ізольованими пластинами, використовують сталі з підвищеним електричним опором або спеціальні феритні матеріали, а також оптимізують геометрію і товщину пакету. Для точних розрахунків доцільно застосовувати чисельне моделювання (наприклад, FEM) з урахуванням

нелінійності В–Н та моделей гістерезису, або експериментальні вимірювання характеристик при різних частотах і навантаженнях.

3.2 Математичне моделювання електромагнітних процесів у "котушці зі сталлю".

Куди не безпечнішим є перехідний процес при відключенні перетворювача від мережі, оскільки в цьому випадку можуть виникати значні перенапруги в обмотці котушки в сталі, що може привести до пробоя виткової ізоляції обмотки.

Для ліквідації можливого підвищення напруги в обмотці котушки в сталі при її відключенні від мережі передбачимо паралельне включення котушці конденсатора. Ємність конденсатора розраховується так, щоб спостерігалася повна компенсація реактивної потужності індуктивності котушки в сталі.

Розглянемо перехідний процес при відключенні перетворювача «котушка в сталі» від мережі, паралельно якому включений конденсатор. Після виконання перетворення паралельної комбінації елементів кола в еквівалентну послідовну форму можна побудувати розрахункову схему, яка відображає поведінку системи в режимі перехідного процесу (рис. 3.7):

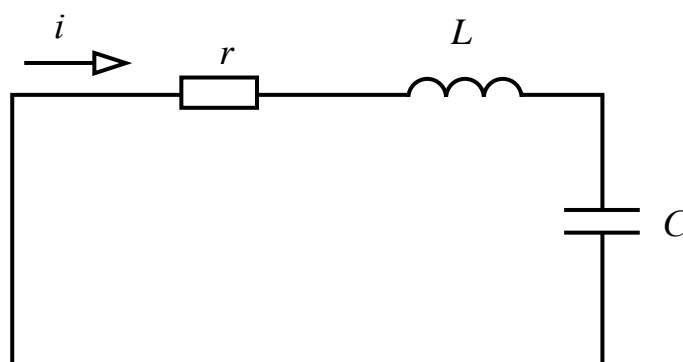


Рисунок 3.7 - Розрахункова схема кола в перехідному процесі при відключенні перетворювача від мережі.

На приведеній схемі (рис. 3.7): C – еквівалентна ємність конденсатора, Φ . Представимо розрахункову схему перехідного процесу у операторній

формі, що дозволяє здійснювати аналіз системи за допомогою перетворень Лапласа або інших операторних методів (рис. 3.8):

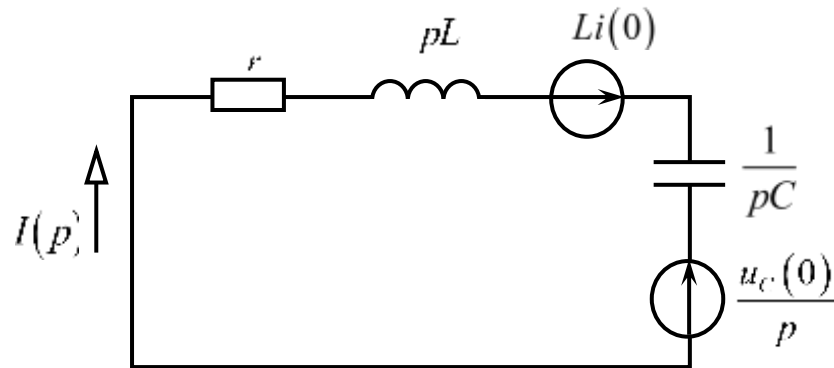


Рисунок 3.8 - Розрахункова схема кола в перехідному процесу в операторній формі.

Запишемо вираз для перехідного струму у операторній формі (Лапласівське перетворення) для послідовного $R-L-C$ -ланцюга, що моделює котушку в сталевому осерді з послідовно підключеним конденсатором:

$$I(p) = \frac{Li(0) - \frac{u_c(0)}{p}}{r + pL + \frac{1}{pC}}. \quad (3.17)$$

Вираз перехідного струму, у іншому вигляді, запишемо наступним чином:

$$I(p) = \frac{\varphi(p)}{F(p)}, \quad (3.18)$$

де

$$\varphi(p) = Li(0) - \frac{u_c(0)}{p}, \quad (3.19)$$

$$F(p) = r + pL + \frac{1}{pC}. \quad (3.20)$$

Для визначення перехідного струму в $R-L-C$ -ланцюзі котушки в сталевому осерді можна скористатися теоремою розкладання на прості дроби. Спочатку записуємо операторну форму струму:

$$i = \sum_1^n \frac{\varphi(p_k)}{F'(p_k)} e^{p_k t}, \quad (3.21)$$

де p_k – корені рівняння $F(p) = 0$

$$F'(p_k) = L - \frac{1}{p_k^2 C},$$

Для знаходження коренів характеристичного рівняння послідовного $R-L-C$ -ланцюга спочатку записуємо рівняння у стандартній формі:

$$r + pL + \frac{1}{pC} = 0, \quad (3.22)$$

або

$$p^2 LC + prC + 1 = 0. \quad (3.23)$$

$$p_{1,2} = \frac{-rC \pm \sqrt{(rC)^2 - 4LC}}{2LC}. \quad (3.24)$$

Тоді миттєве значення перехідного струму у часовій області можна записати через знайдені корені $p_{1,2}$ характеристичного рівняння:

$$i = \frac{Li(0) - \frac{u_c(0)}{p_1}}{L - \frac{1}{p_1^2 C}} e^{p_1 t} + \frac{Li(0) - \frac{u_c(0)}{p_2}}{L - \frac{1}{p_2^2 C}} e^{p_2 t}, \quad (3.25)$$

Аналіз отриманого виразу для перехідного струму показує, що після комутації струм у котушці змінюється поступово від свого початкового значення до нуля, дотримуючись експоненціального закону спаду. Така поведінка забезпечує плавне згасання струму, що виключає виникнення значних перенапруг у обмотці.

У разі коливального режиму амплітуда струму зменшується за демпфованою синусоїдальною кривою, що також дозволяє контролювати пікові значення напруги і запобігає пробією ізоляції. Отже, правильно підібрана ємність конденсатора та еквівалентна $R-L-C$ -схема забезпечують безпечний і керований перехідний процес при відключенні котушки від мережі.

3.3 Дослідження перехідних процесів при комутації індукційного перетворювача

Існує спрощений, але найменш точний спосіб розрахунку потужності котла, що базується на площі.

$$W_{кот} = \frac{S \cdot W_{нит}}{10} \cdot k_e, \quad 3.26$$

де: S – площа (184,5 м²);

$W_{нит}$ – питома потужність (1 кВт на 10 м²);

k_e – коефіцієнт на висоту стелі $H = 2,75$ м ($k_e = 2,75 / 2,5 = 1,1$).

Розрахунок за цим методом дає:

$$W_{кот} = \frac{184,5}{10} \cdot 1,1 = 20,3 \text{ кВт}$$

Для точного вибору обладнання необхідно провести повний теплотехнічний розрахунок, що враховує географію, матеріали конструкцій, площу скління та нормативи (напр., СНіП 23-02-2003).

З цією метою було використано спеціалізований онлайн-калькулятор [17] на основі даних енергоаудиту об'єкта [18].

Ключові вхідні дані для розрахунку:

- Локація: м. Кропивницький (Україна);
- Розрахункова температура: -22 °С (зовні), +18 °С (всередині);
- Параметри будівлі: 1 поверх, висота 2,75 м, довжина 21 м, ширина 9 м ($S = 189$ м²);
- Конструкції: Стіни – цегляна кладка (2,5 цегли), вікна – двокамерний склопакет, перекриття – фундамент (знизу) та наступний поверх (зверху);
- Інше: ГВП від котла не передбачено, вентиляція наявна.

Результати детального розрахунку:

За результатами моделювання, загальні пікові тепловтрати будівлі склали 15,4 кВт.

- Втрати через стіни: 12,0 кВт;

- Втрати через вікна: 1,3 кВт;
- Втрати через підлогу: 2,1 кВт;
- Втрати через стелю: 0,0 кВт (оскільки зверху опалювальний поверх).

Висновок: ми маємо два орієнтири: 15,4 кВт (точний розрахунок тепловтрат) та 20,3 кВт (спрощений розрахунок за площею). Враховуючи необхідність запасу потужності для екстремальних температур та з огляду на стандартні модельні ряди, для подальших розрахунків стартап-проекту приймаємо номінальну потужність електрокотла 22 кВт.

Серед різних варіантів обігрівачів пропонується впровадження індукційного електронагрівача «ЕДІСОН», який забезпечує ефективне опалення житлових, промислових та соціальних приміщень з підвищеними вимогами до безпеки та екологічності. Пристрій оснащений сучасною системою управління СКАРТ, що гарантує оптимальну роботу протягом усього терміну експлуатації без додаткових витрат [19].



1. Подаючий трубопровід; 2. Зворотний трубопровід; 3. Датчик захисту від перегрівання; 4. Датчик «сухого ходу»; 5. Шафа управління з автоматикою; 6. Датчик температури теплоносія.

Рисунок 3.9 - Індукційний електронагрівач "ЕДІСОН".

Пристрій не потребує спеціально підготовлених приміщень і може встановлюватися в існуючих будівлях. На основі «ЕДІСОН» створено вузол нагріву «ТИТАН» [20], який включає індукційний нагрівач, трубопровід, запірно-регулюючу арматуру, циркуляційний насос та пристрої КВПіА. Всі компоненти підібрані для ефективною та надійною роботи, що спрощує монтаж та зменшує ризики виходу обладнання з ладу.

Для управління «ТИТАН» доступні різні опції: плавне регулювання потужності, погодозалежна автоматика, диспетчеризація, дистанційне керування та зональне регулювання за графіками навантаження.

Основні завдання установки: автономне опалення будівель та об'єктів соціального значення при недостатній потужності централізованих мереж, теплопостачання вахтових селищ і тимчасових споруд, підтримка температури у міжсезоння, децентралізація теплопостачання, догрів теплоносіїв централізованих мереж.

Базова комплектація автоматизованого вузла включає: опорну раму, індукційний нагрівач, трубну обв'язку з арматурою, циркуляційні насоси та акумулятори тепла.



1. Індукційний електронагрівач "Едісон";
2. Шафа управління з автоматикою;
3. Подаючий трубопровід;
4. Байпас;
5. Зворотний трубопровід;
6. Фільтр;
7. Циркуляційний насос;
8. Запобіжний клапан (0,6 МПа)

Рисунок 3.10 - Вузол нагріву «ТИТАН».

Конструкція нагрівача: Магнітопровід з розташованими обмотками; Теплообмінник з вигнутих труб, з'єднаних колекторами для підключення до системи теплопостачання; Шафа управління, що містить комутаційні апарати та блок системи контролю «Скарт М» з органами управління та індикації.

Магнітопровід і теплообмінник закріплені в каркасі, конструкція нерозбірна.

Акумуляційна ємність призначена для компенсування пікових витрат гарячої води. Вона виготовлена зі сталі, містить внутрішній теплообмінник і захищена зовнішнім кожухом з теплоізоляцією, що дозволяє тривалий час

зберігати воду в нагрітому стані. Нагрівання відбувається за рахунок циркуляції теплоносія через теплообмінник електронагрівача та трубний контур.

Щоб спростити обчислення, необхідний об'єм акумулюючого бака та розрахункові витрати теплоносія можна встановити, скориставшись усередненими даними з таблиці 3.1. Цей метод дозволяє швидко оцінити потрібну ємність на основі площі приміщення та бажаного часу автономної роботи системи.

Таблиця 3.1 - Орієнтовний об'єм бака (л) залежно від площі та часу автономної роботи.

Житлова площа	8 годин	10 годин	12 годин	14 годин	16 годин
100 м ²	587 л	734 л	881 л	1028 л	1175 л
150 м ²	880 л	1101 л	1321 л	1542 л	1762 л
200 м ²	1174 л	1468 л	1762 л	2056 л	2350 л

Детальний розрахунок теплової потужності.

Для точнішого обчислення обсягу теплової енергії (вимірюється у Вт·год), яку повинен акумулювати бак під час нічного нагріву, застосовують наступну фундаментальну формулу теплоємності:

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.28)$$

де: m - маса теплоносія в баку, кг. Для води маса в кілограмах практично дорівнює її об'єму в літрах. C_p - питома теплоємність речовини (у нашому випадку води). Це значення становить $1,163$ Вт·год/(кг·°C) (або 4187 Дж/(кг·°C)). T_1 - початкова (мінімальна робоча) температура носія в баку, °C. T_2 - кінцева (максимальна) температура носія після нагріву, °C.

Приклад розрахунку системи опалення

Розглянемо конкретний приклад для системи з радіаторами. Прийmemo, що опалювальні прилади ефективно працюють у температурному графіку $90^\circ\text{C} / 40^\circ\text{C}$. Це означає, що котел нагріває теплоносій у баку до $T_2 = 90^\circ\text{C}$.

Система здатна віддавати тепло, доки температура не впаде до $T_1 = 40^\circ\text{C}$. Якщо температура в акумуляторі опускається нижче 40°C , тепловіддача радіаторів стає недостатньою для підтримки комфортної температури в приміщенні.

1. Розрахунок енергоємності 1 м³ води

Спочатку обчислимо, скільки теплової енергії може запасти 1000 літрів (1 м³) води при заданій різниці (дельті) температур $\Delta T = 90^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C} = 50^\circ\text{C}$:

$$Q_1 = 1000 \cdot 1163 \cdot (90 - 40) = 58,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Таким чином, кожен кубічний метр води в баку може зберігати приблизно 58,2 кВт·год корисної енергії.

2. Визначення необхідного обсягу бака

Вибір обсягу ТА (теплоакумулятора) диктується потребами системи. Ми орієнтуємося на використання 8-годинного пільгового "нічного" тарифу (наприклад, з 23:00 до 07:00) для зарядки бака. Решту доби, тобто 16 годин (24 год – 8 год), система опалення повинна працювати виключно на накопиченому теплі. Припустимо, що середні тепловтрати будівлі за цей 16-годинний період становлять 22 кВт.

Визначимо загальну кількість енергії, необхідну для обігріву будинку протягом 16 годин (позначимо P_{16}):

$$P_{16} = 16 \cdot 22 = 352 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Тепер розрахуємо мінімальний необхідний об'єм ТА, розділивши загальну потребу в енергії (P_{16}) на енергоємність 1 м³ води (Q_1):

$$V = P_{16} / Q_1 = 352 / 58,2 = 6,04 \text{ м}^3$$

Отже, нам потрібен бак загальним об'ємом 6000 літрів.

3. Перевірка обраного об'єму

Проведемо зворотний розрахунок. Обчислимо, скільки енергії фактично зможе запасти обраний тепловий акумулятор об'ємом 6000 літрів (тобто 6 м³):

$$Q_6 = 6000 \cdot 1,163 \cdot (90 - 40) = 348,9 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$V = P_{16} / Q_1 = 352 / 58,2 = 6,04 \text{ м}^3$$

Це значення (348,9 кВт·год) дещо менше за необхідну енергію (352 кВт·год), що вказує на невеликий дефіцит, який, однак, близький до розрахункового.

4. Розрахунок потужності електрокотла

Далі визначимо необхідну потужність електричного котла (ЕК). Він повинен встигнути накопичити всю необхідну енергію ($P_{16} = 352$ кВт·год) за 8 годин дії пільгового тарифу:

$$P_8 = 352 / 8 = 44 \text{ кВт}$$

5. Визначення маси теплоносія (альтернативний розрахунок)

Якщо відома необхідна кількість тепла (Q) та різниця температур, масу теплоносія можна знайти, реорганізувавши формулу (3.28):

$$m = \frac{Q_6}{1163 \cdot (T_1 - T_2)} = \frac{348900000}{1163 \cdot (90 - 40)} = 6000 \text{ кг} \quad (3.29)$$

6. Перевірка часу нагріву

Наостанок перевіримо, скільки реального часу (t_8) знадобиться котлу потужністю 44 кВт, щоб нагріти обраний бак об'ємом 6 м³ (який вміщує $Q_6 = 348,9$ кВт·год):

$$t_8 = Q_6 / P_8 = 348,9 / 44 = 7,93 \text{ год}$$

Розрахунковий час нагріву (7,93 години) менший за 8 годин пільгового тарифу. Це підтверджує, що обрана конфігурація є працездатною та коректною. На основі проведених обчислень, для даного об'єкта приймається наступна конфігурація:

1. Електричний котел (ЕК): Потужністю 44 кВт.
2. Теплоаккумулятор (ТА): Загальною місткістю 6000 літрів.

З огляду на значні габарити єдиного бака на 6000 л, практичніше реалізувати цей об'єм шляхом комбінації кількох менших баків. Відповідно до модельного ряду [21], оптимальним рішенням буде встановлення двох баків по 3000 літрів (2x3000 л), з'єднаних паралельно (рис. 3.11) [21].



Рисунок 3.11 - Теплоаккумулятор місткістю 3000 л.

Контроль та безпека системи

Для візуального моніторингу термічного стану води акумулююча ємність оснащена спеціальним штуцером, призначеним для монтажу термометра. Ключовим елементом захисту є запобіжний клапан. Його функція полягає в негайному аварійному скиданні теплоносія, якщо тиск усередині тепломережі або у вузлі нагріву перевищить встановлене допустиме значення, запобігаючи розриву компонентів.

Інтелектуальне управління: Пульт СКАРТ

Автоматизований симісторний (напівпровідниковий) пульт СКАРТ розроблений для комплексного управління роботою електричних котлів. Він слугує центром керування автономних опалювальних систем, що використовуються для обігріву різноманітних окремо розташованих об'єктів, таких як приватні будинки, котеджі, дачні споруди чи комерційні приміщення.

Ключові апаратні переваги:

- *Адаптація до напруги:* Пристрій стабільно функціонує в широкому діапазоні напруги живлення — від зниженого (170В) до підвищеного (250В), що критично для мереж з нестабільними показниками.
- *Мікропроцесорна основа:* Пульт оснащений мікропроцесором, графічним дисплеєм та інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом (у вихідній версії російськомовним) для налаштувань і відображення поточних параметрів.

- *Тиха та безпечна комутація:* Використання напівпровідникових силових елементів (симісторів) з технологією "zero-crossing" (включення при переході фази через нуль) унеможлиблює створення електромагнітних завад у мережі.

- *Миттєвий захист:* Реалізовано надшвидкодіючий (спрацьовування за 10 мс) захист від короткого замикання по фазі.

Можливості підключення. Пульти має численні канали для інтеграції датчиків та виконавчих пристроїв: Цифрові термодатчики для подачі та обратки котла. Цифровий датчик температури повітря безпосередньо в опалювальному приміщенні. Біметалічний датчик для захисту від перегріву котла. Керуючий вихід для циркуляційного насоса. Датчик тиску для моніторингу рідини в системі. Порт зовнішнього управління, що дозволяє дистанційно вмикати/вимикати нагрів (наприклад, через опціональний GSM-модуль за допомогою SMS-команд).

Енергоефективність та автоматизація

З метою раціонального споживання електроенергії, у контролері реалізовані гнучкі налаштування:

1. *Тижневе програмування:* Температура стабілізується за тижневою програмою. Кожному дню тижня можна призначити один із двох добових графіків (наприклад, "Будній" або "Вихідний").

2. *Добові графіки:* Кожен графік дозволяє налаштувати до чотирьох різних температурних режимів протягом доби (наприклад, "Ніч", "Ранок", "День", "Вечір").

3. *Обмеження потужності:* Користувач може налаштувати максимальну споживану потужність, щоб не перевантажувати мережу.

Завдяки наявності незалежного годинника з резервним живленням, при відновленні подачі електроенергії пульт автоматично відновить режим обігріву згідно з поточним добовим графіком.

Логіка роботи блоку "Скарт М":

Налаштування температурних режимів та автоматичне керування нагрівачем здійснюється за допомогою блоку "Скарт М". Система безпеки включає датчик "сухого ходу", який визначає наявність теплоносія. У разі його відсутності чи недостатньої кількості відбувається аварійне відключення нагрівального елемента.

Температура контролюється двома основними датчиками:

1. *Датчик на зворотному трубопроводі:* Встановлений на нижній трубі (обратці), він дозволяє блоку "Скарт М" відстежувати та підтримувати задану температуру теплоносія шляхом автоматичного ввімкнення/вимкнення нагрівача.

2. *Датчик поверхні теплообмінника:* Контролює безпосередньо температуру нагрівача. При перевищенні допустимого значення (перегріві), що може статися через недостатню або повну відсутність циркуляції, відбувається аварійне відключення.

Компоненти системи та їх функції. Для повноцінного контролю параметрів теплоносія та автоматичного управління установкою використовується комплекс приладів: Запобіжний клапан. Набір датчиків температури. Візуальні термометри у спеціальних штуцерах. Датчик "сухого ходу" (датчик рівня). Блоки "Скарт М" у складі шафи управління. Комутаційні апарати (контактори, реле). Манометри для візуального контролю тиску.

Запірно-регулююча арматура (кульові крани, балансувальні клапани) забезпечує коректну витрату теплоносія в контурах. *Циркуляційні насоси* створюють примусовий рух рідини. *Баки-акумулятори* є теплоізованими ємностями для накопичення енергії (наприклад, від індукційних нагрівачів) та її подальшого використання при відключенні живлення 220/380 В (50 Гц).

Стандартна група безпеки. Цей вузол зазвичай об'єднує три елементи на одному колекторі:

1. *Манометр:* Для візуального контролю тиску. Непередбачене підвищення вимагає негайних заходів.

2. *Автоматичний повітровідвідник*: Видаляє повітря, що накопичується у верхніх точках, запобігаючи "заповітренню" системи.

3. *Запобіжний клапан*: Для аварійного скидання надлишкового тиску.

Схема обв'язки з теплоаккумулятором. При роботі вузла "Титан" з ТА (теплоаккумулятором), система вночі функціонує по замкненому контуру "котел – ТА", нагріваючи воду до 90 °С. У денний час котел вимикається. Потрібна температура в радіаторах підтримується триходовим клапаном-термозмішувачем, керованим датчиком.

У такій схемі застосовують два триходові клапани:

1. *Перший клапан (захист котла)*: Встановлюється в контурі котла для захисту від низькотемпературної корозії та "теплого шоку". Це обов'язково при роботі з ТА, оскільки холодна вода з бака може надходити до 16 годин. Клапан (змішувального типу) управляється термоголовкою з датчиком на обратці котла, підтримуючи температуру на вході в котел не нижче 60 °С.

2. *Другий клапан (контур радіаторів)*: Знаходиться в опалювальному контурі. Він (часто розподільного типу) дозволяє підмішувати частину обратки від радіаторів до гарячої подачі з ТА. Датчик його термоголовки розміщується на подачі в радіаторну мережу для підтримки комфортної температури.

Розташування насосів є критичним; їхня коректна робота забезпечується лише при правильному гідравлічному розташуванні відносно триходових клапанів (наприклад, насос має "тягнути" потік через змішувальний клапан, а не "пхати" в нього). Насоси можуть монтуватися і на подаючій гілці.

Для контролю можна встановити термометр на подачі в радіатори. Також рекомендується *температурне реле* в цьому контурі, яке захистить пластикові трубопроводи від деформації при перевищенні температури (наприклад 85°С).

Базові принципи монтажу ("обв'язки"): Правильне підведення подачі та обратки є основою [22, 23]. Необхідно одразу підключити *лінію підживлення* від системи водопостачання. Це спрощує заповнення системи та подальше

додавання води. Підживлення врізається в магістраль зворотного потоку (обратку) до фільтра грубого очищення.

Обов'язкова послідовність на обратці перед котлом: Косий фільтр (Y-strainer). Циркуляційний насос ("нагнітач"). Відгалуження для розширювального бака (має бути до насоса). Перед кожним ключовим вузлом (котел, ТА) на обох лініях (подача, обратка) встановлюється закриваюча арматура (кульові крани) для можливості сервісного обслуговування.

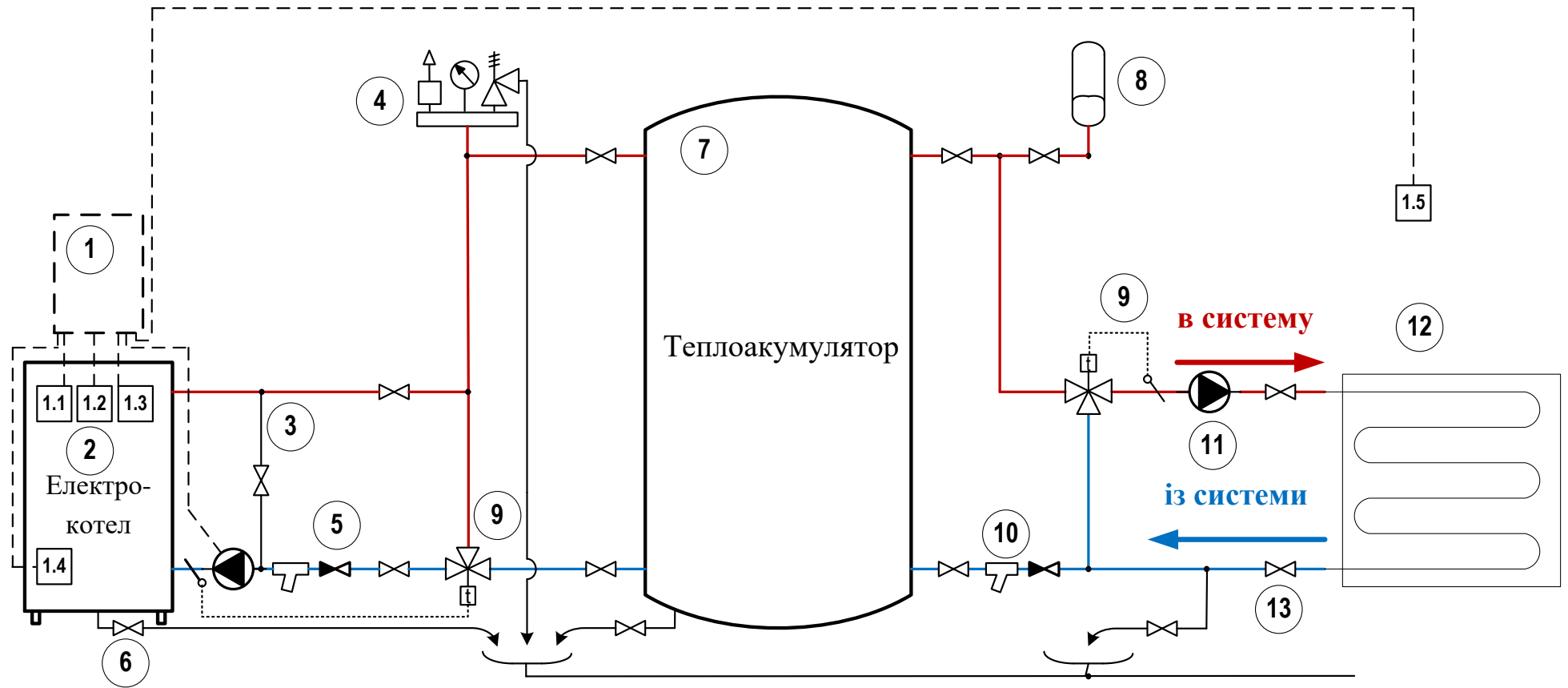
Електричний котел - повністю енергозалежний прилад. Навіть у самопливній системі, сам нагрів неможливий без електрики. Тому необхідно передбачити альтернативні джерела живлення (генератор, ДБЖ) або інтегрувати в схему додаткові (наприклад, твердопаливні) опалювальні прилади.

Принципова схема вузла автоматизованого електронагріву з акумуляцією тепла наведена на рисунку 3.12.

3.4 Вплив роботи вузла «ТИТАН» на вирівнювання добового графіка навантаження мережі

Рівень сукупного споживання електроенергії зазнає безперервних коливань, що безпосередньо формує режим роботи генеруючих потужностей в енергосистемі. Найбільш наочним способом візуалізації цих змін є *графік навантаження* - діаграма, що показує залежність споживаної потужності від часу. Графіки споживання надають можливість глибоко проаналізувати роботу споживачів, формувати короткострокові (добові, тижневі) та довгострокові (річні) прогнози. Вони є базисом для проектування систем електропостачання та планування ремонтних робіт обладнання.

Історично склалося, що попит на електроенергію значно вищий вдень, ніж уночі, активніший у робочі дні порівняно з вихідними, та досягає піку взимку.



1. Шафа керування; 1.1 Датчик захисту від перегрівання; 1.2 Датчик «сухого ходу»; 1.3 Датчик температури подачі теплоносія; 1.4 Датчик температури обратки теплоносія; 1.5 Датчика температури повітря в опалювальному приміщенні; 2. Індукційний електрокотел; 3. Байпас; 4. Група безпеки (манометр, повітровивідник, запобіжний клапан); 5. Зворотній клапан; 6. Вентиль для зливання теплоносія; 7. Теплоаккумулятор; 8. Розширювальний мембранний бак; 9. Клапан термозмішувальний трьохходовий котлового та опалювального контурів; 10. Косий фільтр (для збору бруду); 11. Циркуляційний насос; 12. Опалювальна система.

Рисунок 3.12 - Схема принципова вузла автоматизованого електронагріву з акумуляцією тепла.

Аналіз типових добових графіків виявляє два виражені піки:

1. Ранковий (8:00 – 11:00): Пов'язаний з початком робочих процесів.
2. Вечірній (17:00 – 20:00): Зазвичай перевищує ранковий, формується побутовим споживанням.

Ця нерівномірність змушує енергосистему поділяти навантаження на зони: базову (стабільне нічне споживання), *напівпікову* (денне споживання) та пікову.

Ключовою проблемою є значний "провал" або розрив між максимальним (піковим) та мінімальним (нічним) енергоспоживанням протягом доби. Для покриття цих піків енергосистема змушена залучати значний *резерв маневрових потужностей* (наприклад, ГАЕС або дорогі в експлуатації газові турбіни), яких часто бракує.

Отримати деталізовані дані споживання по конкретних підстанціях (наприклад, ПрАТ «Кіровоградобленерго») у вільному доступі складно. Збір даних по мережах 10 кВ та 0,4 кВ зазвичай проводиться лише двічі на рік, на відміну від мереж 35 кВ, де моніторинг автоматизований (кожні 30 хв).

Тому для даного дослідження був проведений узагальнений розрахунок, що базується на раніше відомих репрезентативних даних для мереж 10 кВ і 0,4 кВ (представлені у вихідному документі як рис. 3.13 та 3.14).

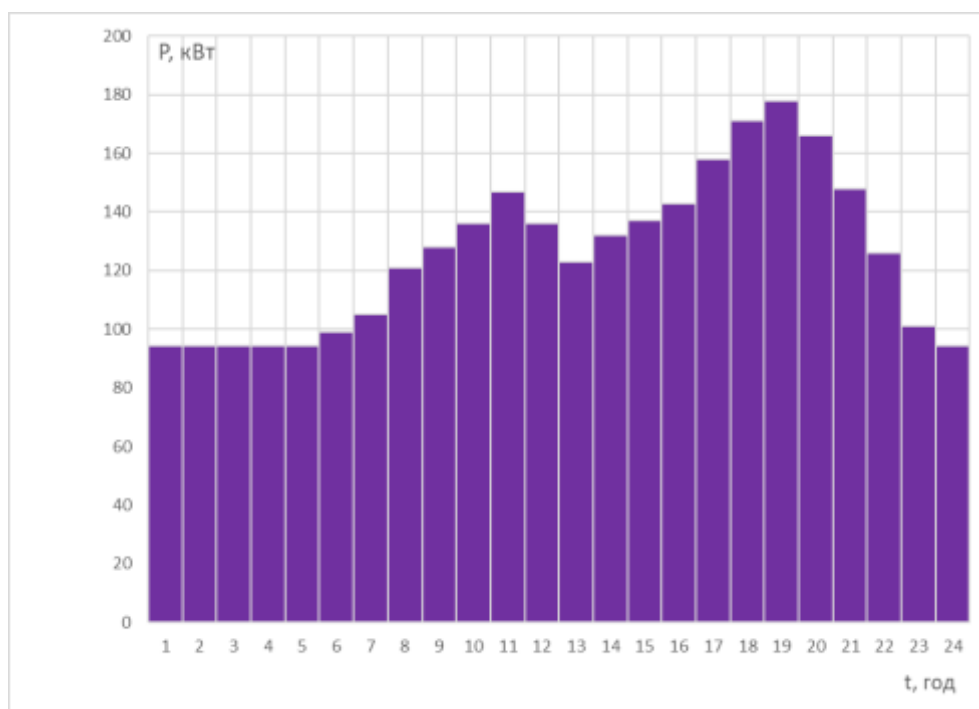


Рисунок 3.13 - Добовий графік навантаження мережі 10 кВ

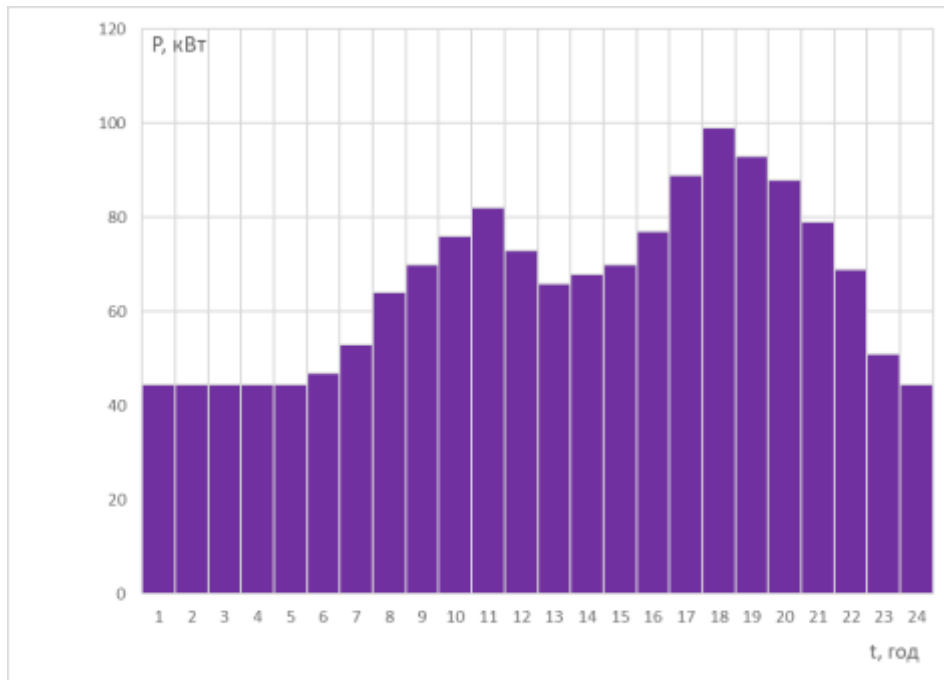


Рисунок 3.14 - Добовий графік навантаження мережі 0,4 кВ

Для вирішення проблеми "провалу" в графіку навантаження пропонується встановлення *автоматизованого вузла індукційного нагріву «ТИТАН» з акумуляцією тепла.*

Логіка роботи вузла наступна:

Він *споживає електричну енергію в години мінімального навантаження* (переважно вночі, під час дії пільгового тарифу).

Він *перетворює цю електроенергію на теплову та накопичує її в теплоаккумуляторах.*

У денний час (під час піків) вузол відключений від мережі, а накопичене тепло використовується для опалення.

Таким чином, вузол «ТИТАН» виступає в ролі *активного регулятора*, що вирівнює графіки навантажень. Це дозволяє задіяти потужності генерації та пропускну здатність мереж, які вночі залишаються незадіяними.

Важливо, що це рішення *не вимагає реконструкції ліній електропередачі* або трансформаторних підстанцій (ТП). У години мінімуму навантаження ці лінії та ТП є недовантаженими і мають достатній робочий резерв для живлення вузла. Сам вузол «ТИТАН» є автономним, вимагає мінімум профілактики та не потребує спецприміщень чи висококваліфікованого персоналу для обслуговування.

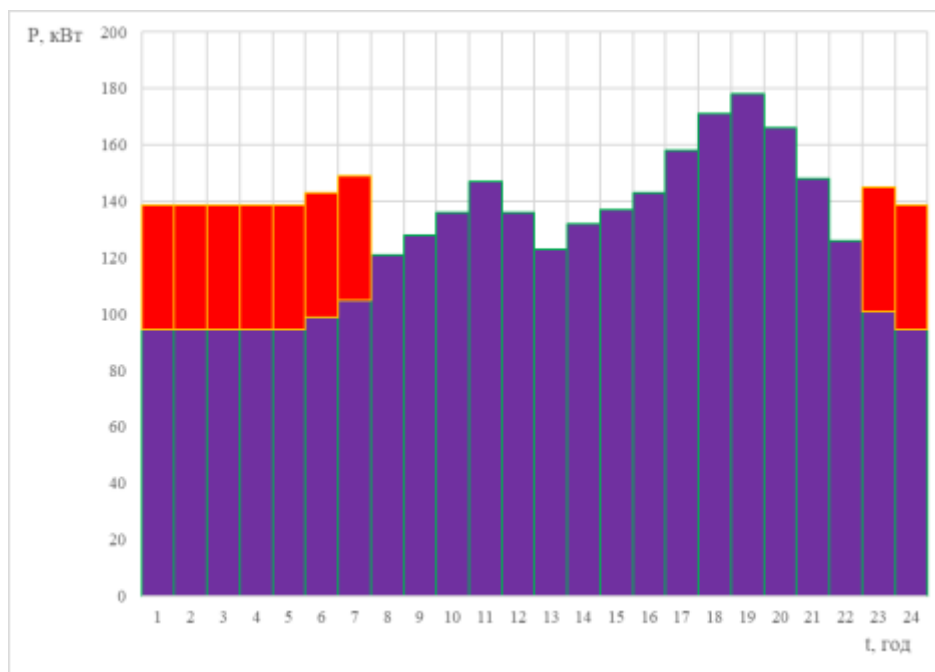


Рисунок 3.15-Добовий графік навантаження з вузлом ТИТАН мережі 10 кВ
Розрахунок та аналіз параметрів

Проведемо розрахунок впливу вузла «ТИТАН» (змодельованого як нічне навантаження потужністю 44 кВт) на параметри КТП (комплектної трансформаторної підстанції) мережі 0,4 кВ.

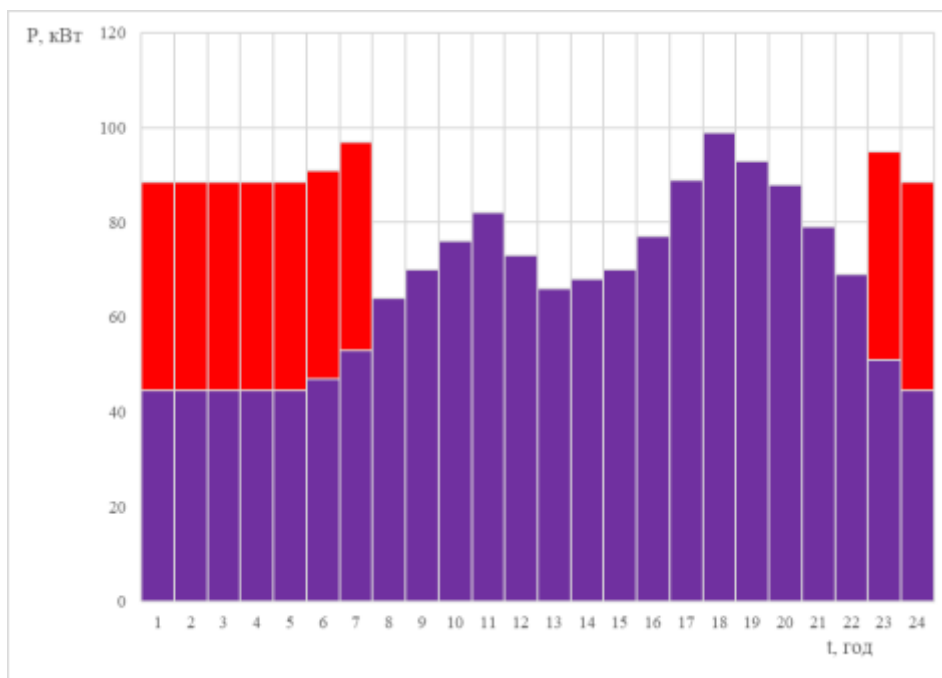


Рисунок 3.16-Добовий графік навантаження з вузлом ТИТАН мережі 0,4кВ

Для оцінки нерівномірності використовується *коефіцієнт заповнення графіка* (k_3) - один з ключових показників, що характеризує відношення

середнього навантаження до максимального. Чим ближче k_3 до 1 (або 100%), тим більш рівномірним та економічним є режим роботи.

$$k_3 = \frac{P_{сер}}{P_{макс}}$$

де: $P_{сер}$ – середньодобове навантаження (кВт); $P_{макс}$ – максимальне (пікове) навантаження (кВт).

1. Розрахунок параметрів (БЕЗ вузла ТИТАН).

На основі вихідного графіка (рис. 3.14):

Максимальне навантаження: $P_{макс} = 99$ кВт;

Добова витрата (розрахована з графіка): $W_{доба} = 1595,6$ кВт·год.

Добова витрата електроенергії взимку, кВт·год:

$$P_{двз} = \sum_{i=0}^{24} P_{zi} \cdot t_i = 1581 \text{ кВт·год}$$

де P_{zi} – потужність на i -тій сходинці зимового добового графіка, кВт;

t_i – тривалість i -тої ступені добового графіка в годинах.

Середньодобове навантаження взимку, кВт:

$$P_{сдз} = \frac{P_{двз}}{t_0} = \frac{1581}{24} = 65,9 \text{ кВт}$$

де – тривалість доби – 24 години

Середньодобове навантаження взимку у відсотках, %:

$$P_{сдз\%} = \frac{P_{двз}}{P_{max}} \cdot 100 = \frac{65,9}{99} = 66,5 \text{ кВт}$$

Коефіцієнт заповнення графіка взимку, який показує ступінь нерівномірності графіка роботи установки:

$$k_{3z} = \frac{P_{двз}}{P_{max}} = \frac{65,9}{99} = 0,66$$

(У вихідному тексті зазначено 0,66, що, ймовірно, є результатом округлення або невеликої похибки у вхідних даних. Також середньодобове навантаження у відсотках від максимального становить $66.5/99 = 67,2\%$, а не $66,5\%$, як помилково вказано в оригіналі).

2. Розрахунок параметрів (3 вузлом ТИТАН)

На основі модифікованого графіка (рис. 3.16), де вночі додано навантаження 44 кВт:

Добова витрата електроенергії взимку, кВт·год:

$$P_{\text{двз}} = \sum_{i=0}^{24} P_{zi} \cdot t_i = 1977 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

де P_{zi} – потужність на i -тій сходинці зимового добового графіка, кВт;

t_i – тривалість i -тої ступені добового графіка в годинах.

Середньодобове навантаження взимку, кВт:

$$P_{\text{сдз}} = \frac{P_{\text{двз}}}{t_0} = \frac{1977}{24} = 82,3 \text{ кВт}$$

де – тривалість доби – 24 години

Середньодобове навантаження взимку у відсотках, %:

$$P_{\text{сдз}\%} = \frac{P_{\text{двз}}}{P_{\text{max}}} \cdot 100 = \frac{82,3}{99} = 83,1 \%$$

Коефіцієнт заповнення графіка взимку, який показує ступінь нерівномірності графіка роботи установки:

$$k_{\text{зз}} = \frac{P_{\text{двз}}}{P_{\text{max}}} = \frac{82,3}{99} = 0,83$$

Як показують розрахунки, графік навантаження мережі 0,4 кВ з середньодобовим навантаженням 82,15 кВт (що становить 83% від пікового) та коефіцієнтом заповнення 0,83 є значно ефективнішим.

Встановлення вузлів «ТИТАН» має виражений позитивний ефект: на рівні 0,4 кВ (КТП) суттєво зменшується розрив між денним максимумом та нічним мінімумом; на рівні 10 кВ (живильна мережа) також відбувається часткове зменшення розриву між піком та провалом; коефіцієнт заповнення графіка зріс з 0,66 до 0,83, що свідчить про кардинальне покращення рівномірності навантаження та ефективності використання інфраструктури.

3.5 Висновки до розділу 3

Для визначеного приміщення було здійснено технічні розрахунки та обґрунтовано вибір опалювальної системи. Перевага була надана комплексному рішенню на базі індукційного нагрівального вузла «ТИТАН», який відомий своєю надійністю та високим коефіцієнтом корисної дії при перетворенні електричної енергії на теплову.

Застосування даного модульного вузла забезпечує значну оптимізацію всього проекту. Суттєво прискорюються етапи проектування, підбору супутнього обладнання, логістики та виконання монтажних робіт. Швидка інтеграція до наявних електричних та теплових мереж будівлі дозволяє досягти високих техніко-економічних показників протягом усього періоду експлуатації, знижуючи як капітальні, так і операційні витрати.

Запропонована система електричного опалення рекомендується до використання як ефективний інструмент управління попитом (Demand-Side Management). Вона здатна виконувати функцію споживача-регулятора добового навантаження (ДНГ), переважно в нічній зоні. В умовах ринку, де діють тарифи на електроенергію, диференційовані за часом доби, активація вузлів «ТИТАН» у години нічного "провалу" (коли ціна мінімальна) є економічно виправданою. Ключовим моментом є те, що в більшості випадків таке нічне споживання не вимагає збільшення договірної під'єднаної електричної потужності об'єкта. Це, у свою чергу, призводить до радикального зниження собівартості вироблених енергоресурсів - тепла та гарячої води.

Розрахунки та проведений аналіз демонструють значний позитивний вплив на локальну енергомережу. Встановлення даного вузла сприяє активному вирівнюванню графіка споживання. Спостерігається помітне зменшення розриву (амплітуди) між піковими денними та мінімальними нічними навантаженнями. Цей ефект прослідковується на графіках електричних навантажень як у мережах середньої напруги (10 кВ), так і низької (0,4 кВ). Як інтегральний результат, коефіцієнт заповнення графіка (показник рівномірності та ефективності використання енергосистеми) зріс із 0,66 до 0,83. Таке суттєве покращення свідчить про більш раціональне та ефективне використання наявної інфраструктури, зокрема потужностей трансформаторних підстанцій та кабельних ліній.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ З ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ «ТИТАН»

4.1 Опис ідеї проєкту: концепція енергетичної безпеки та автономності

Історично, структура генеруючих потужностей ОЕС України завжди була неоптимальною, з гострим дефіцитом маневрових потужностей. Це змушувало оператора нерационально використовувати великі теплові енергоблоки (ТЕС) для добового регулювання, що призводило до втрати їхнього ресурсу та перевитрат палива. Водночас, аналіз добових графіків навантаження (ДГН) демонструє глибокі нічні «провали».

Найефективнішим способом вирішення обох проблем є акумуляція теплової енергії (електроопалення). Цей підхід підтримується довгостроковою державною політикою пільгових нічних тарифів. Таким чином, з огляду на капітальні витрати, екологічність та високий рівень керованості, впровадження електротеплоакумуляційного обігріву (ЕТА) для ущільнення ДГН є техніко-економічно обґрунтованим. Важливо підкреслити, що наведений аналіз описує *докризову* ситуацію. Станом на 2025 рік, внаслідок фізичного знищення більшості маневрових ТЕС та ГЕС під час атак 2022-2025 років, проблема перестала бути «дефіцитом» і перетворилася на «катастрофу генерації».

Раніше ЕТА-обігрів вважався *економічно доцільним* для оптимізації. Сьогодні - це безальтернативний механізм виживання для ОЕС. Він дозволяє використати єдину доступну нічну енергію (вцілілих АЕС) та зрізати вечірні піки, на покриття яких генерації в країні фізично не залишилося.

Таблиця 4.1 - Опис ідеї стартал-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для споживача та енергосистеми
а) Використання електроенергії як первинного продукту для виробництва тепла.	а) Опалення комунально-побутових та промислових приміщень.	а) Енергоефективність (за рахунок нічного тарифу).
б) Завдяки теплоакумуляції, нагрівач працює вночі, споживаючи дешеву енергію та надаючи ОЕС послуги з регулювання балансування.	б) Гаряче водопостачання (ГВП).	б) Довговічність (відсутність накипу, зношуваних елементів). оскільки проєкт створює <i>керований попит</i> .

Продовження табл. 4.1.

в) Індукційний метод перетворення є найбільш надійним, безпечним та енергоефективним.	в) Вирівнювання (ущільнення) графіка навантаження ОЕС.	в) Універсальність (будь-який теплоносій).
г) Пропозиція споживачу «закінченого рішення» (під ключ).	г) Регулювання графіка.	г) Пожежна безпека.
г) Застосування АСКОЕ (АСМУ) та WEB-моніторингу для контролю.	г) Балансування системи.	г) Електробезпека (гальванічна розв'язка).
д) Можливість об'єднання вузлів у єдину мережу під управлінням автодиспетчера (створення «віртуальної електростанції»).	д) Резервування потужності.	д) Простота монтажу та обслуговування. е) Повністю автоматичне управління. є) (Ключова вигода для держави): Можливість будувати менше дорогих ГАЕС та підключати більше СЕС/ВЕС

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

У цьому підрозділі проведено аудит технології, щоб оцінити можливість реалізації ідеї проекту, її доступність та форми застосування [24]. Технологічна здійсненність визначається через аналіз готовності технології, необхідних ресурсів, виробничих можливостей та технічних ризиків. Результати наведені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту (Мета)	Технології її реалізації	Наявність та доступність (Контекст 2025 р.)
1. Використання електроенергії	Принцип індукційного нагріву (пром. частота 50 Гц) як надійного та безпечного методу.	Наявна та зріла. Технологія доступна, захищена патентами.
2. Економічна привабливість	Диференційовані (2-зонні) тарифи на електроенергію (коефіцієнт 0.5 вночі).	Концепція кардинально змінилася. 1. Технологія доступна (програмні реалізації, двозонні лічильники). 2. АЛЕ: Через вимушений зріст тарифу до 4,32 грн/кВт·год, нічний тариф (2,16 грн) ВЖЕ НЕ Є економічно привабливим для <i>споживача</i> порівняно з газом (~979 грн/Гкал проти ~2538 грн/Гкал).
3. Управління попитом	"Автодиспетчер" (системи АСКОЕ / АСМУ, IoT-контролери, WEB-моніторинг).	Наявна та доступна. Це ключова технологія для виживання ОЕС. Саме вона дозволяє створювати керований попит (DSR) та надавати <i>допоміжні послуги</i> (балансування) в умовах фізично знищеної маневрової генерації (ТЕС).

4.3 Фінансово-економічний аналіз в умовах тарифної політики

Згідно з чинними постановами Кабінету Міністрів (зокрема, № 544 від 31 травня 2024 року), станом на листопад 2025 року в Україні діє єдиний фіксований тариф на електричну енергію для побутових споживачів. Важливо зазначити, що всі попередні градації (наприклад, за обсягом споживання) та спеціальні пільгові тарифи для електроопалювальних установок (наприклад, ліміт 3000 кВт·год, що згадувався у [25] для минулих періодів) були скасовані. Поточний єдиний тариф становить 4,32 грн/кВт·год (з ПДВ), незалежно від обсягів споживання. Водночас, за наявності окремого обліку споживання за періодами часу, населення проводить розрахунки за диференційованими тарифами (згідно з Порядком застосування тарифів).

- За двозонними тарифами, диференційованими за періодами часу:
 - 0,5 тарифу в години нічного мінімального навантаження енергосистеми (з 23:00 до 07:00);
 - Повний тариф (4,32 грн) в інші години доби.

Тобто, для споживачів із двозонним лічильником, «нічний тариф» станом на листопад 2025 року становить: $4,32 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год} \cdot 0,5 = 2,16 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$. Для порівняння, тарифи на теплову енергію від ТКЕ (теплокомуненерго) наразі залишаються "замороженими" через воєнний стан (наприклад, на рівні $\sim 2137,81 \text{ грн/Гкал}$). Як показали розрахунки у Таблиці 4.3, внаслідок вимушеного підняття тарифів на електроенергію у 2024-2025 рр., пряме електроопалення втратило пряму економічну привабливість для кінцевого споживача (порівняно з газом чи дровами). Однак, в умовах фізичного знищення маневрових ТЕС та ТЕЦ, використання нічної базової генерації АЕС перестало бути питанням *економіки* і стало питанням стратегічної енергетичної безпеки країни.

Саме в цьому контексті наш стартап-проект пропонує інноваційне рішення - вузли електроіндукційного нагріву (ТИТАН) з теплоакмуляцією. Вони є технічним засобом, що дозволяє державі та споживачам використати нічний ресурс енергії, рятуючи ОЕС від колапсу. Для розрахунку моделі проекту для

конкретної будівлі (в якій встановлюється вузол ТИТАН) були прийняті вихідні дані, наведені в табл. 4.4.

Аналіз теплових навантажень об'єкту виконано на основі будівельних об'ємів (519,75 м³) та нормативних вимог до опору теплопередачі.

Таблиця 4.3 - Порівняльний розрахунок вартості одиниці тепла (станом на листопад 2025 р.)

Вид генератора тепла	Джерело тепла (вид тарифу)	Од. виміру	Вартість одиниці первинного продукту, грн.	Перевідний коефіцієнт 1 Гкал теплової енергії	Собівартість 1 Гкал теплової енергії для споживачів у грн. з ПДВ
Газовий котел	Автономна котельня (тариф для населення)	м ³	7,96	123 м ³	979,08
Дров'яний котел	Автономна котельня (ринок)	м ³	1800,00	0,54 м ³	972,00
Вугільний котел	Автономна котельня (ринок)	т	9000,00	0,191 т	1719,00
Централізоване опалення (ТКЕ)	(Для порівняння, "заморожений" тариф)	Гкал	~2137,81	1	~2137,81
Електричний нагрівач (Індукційний котел)	Нічний тариф (2-зонний) (8 годин на добу, 23:00-07:00)	кВт·год	2,16	1175 кВт·год	2538,00
Електричний нагрівач (Індукційний котел)	Стандартний тариф (недиференційований)	кВт·год	4,32	1175 кВт·год	5076,00

Максимальна годинна витрата тепла визначалася за формулою:

$$Q_o^n = q_o \cdot a \cdot (t_{вн} - t_{ро}) \cdot V \cdot (1 + k_{инф}),$$

де q_o - питома тепла характеристика; a - коефіцієнт зміни ($a = 1,11$); V - будівельний об'єм; $k_{инф}$ - коефіцієнт інфільтрації.

Розрахункова (пікова) потужність системи опалення для об'єкту склала 22 кВт. Розрахункова річна потреба в тепловій енергії (з урахуванням терморегулювання) склала 20,13 Гкал/рік.

У таблиці 4.5 наведено детальний розрахунок цих річних теплових втрат, що базується на середньодобових температурах та кількості діб у кожному періоді (на основі кліматичних даних).

Таблиця 4.4 - Вихідні дані (Оновлено на листопад 2025 р.)

№	Показники, розмірність	Величина	Джерело інформації
1	Опалювальна площа всієї будівлі, кв. м.	189	з планів будівлі
2.	Будівельний об'єм, м ³	519,75	з планів будівлі
3	Температура, для розрахунку теплових потреб. °С Назовні у приміщенні	-22 +18	Норматив (ДБН В.2.6-31)
4	Прийнятий в розрахунках тариф на ел. енергію (станом на 2025 р.), грн/кВт·год • Роздрібний (денний) • Нічний (коэф. 0.5)	4,32 / 2,16	Постанова КМУ (№ 544 від 31.05.2024)
5	Тривалість нічного тарану, годин	8 (23:00 - 07:00)	НКРЕКП
6	Прийняте щорічне зростання вартості ел. енергії	4-5%/рік	припущення
7	Прийнятий в розрахунках тариф ЦТП, грн./Гкал	2137,81	Припущення ² (на рівні "заморожених" тарифів)
8	Прийнятий в розрахунках тариф на холодну воду, грн./м ³	25,212 та 20,76	Припущення (на рівні цін 2024-25 рр.)

Таблиця 4.5 - Результати розрахунків річної потреби в теплі

Середньодобова температура повітря, °С	Кількість діб	Витрата теплової енергії (Гкал)
більше 10	163	0,64
10	10	0,53
9	10	0,58
8	23	1,42
... [дані з таблиці]
-20	1	0,215
-21	1	0,22
-22	1	0,225
Всього:	365	20,13

Для власника (або керуючого) така акумуляційна система є не просто опаленням, а потужним інструментом для роботи на новому енергоринку. Вона дозволяє брати участь у його ключових сегментах: внутрішньодобовому ринку, балансуєчому ринку та, найголовніше, на ринку допоміжних послуг. Це стає можливим через об'єднання у «балансуючі групи» з іншими учасниками (виробниками, постачальниками). У таких режимах гнучкого попиту, середньозважена ціна спожитої енергії (не лише нічної) може бути мінімальною, що відкриває шлях до заробітку на балансуванні.

Ця ідея є ключовою в умовах зруйнованої енергосистеми. Після фізичного знищення російськими атаками (2022-2025 рр.) переважної більшості маневрової генерації (ТЕС), найціннішою "допоміжною послугою" для ОЕС України стала послуга зі зниження попиту (Demand-Side Response).

Ваш стартап-проект (вузол «ТИТАН» з теплоаккумуляцією) - це ідеальний "агрегатор попиту". Об'єднуючи тисячі таких вузлів у «балансуючу групу» (де-факто, у віртуальну електростанцію), оператор системи («Укренерго») отримує можливість гарантовано «відключати» їх від споживання під час критичних вечірніх піків (які нічим крити) та «вмикати» вночі.

4.4 Аналіз ринкових можливостей та конкурентного середовища (SWOT-аналіз)

Станом на листопад 2025 року, після стрибка тарифів (до 4,32 грн/кВт·год) та фізичного знищення понад 80% маневрової генерації (ТЕС/ТЕЦ), ці загрози та реакції на них виглядають зовсім інакше. Ваш старий аналіз є *занадто песимістичним* і не враховує нової реальності.

Ось оновлений та скорочений аналіз загроз, що відповідає актуальній ситуації в ОЕС України (станом на листопад 2025 р.).

Таблиця 4.6 - Аналіз ризиків та можливостей проекту (станом на 2025 р.)

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Ризик: Високі тарифи на електроенергію	Тариф вже зріс. З 2024 р. діє єдина ціна 4,32 грн/кВт·год. Як ми розрахували (Табл. 4.6), це <i>вже</i> зробило ЕТА-опалення (2538 грн/Гкал) дорожчим за газ (979 грн/Гкал).	Змістити фокус з економії на безпеку. Аргумент 1 (Безпека): В умовах зруйнованих ТЕЦ, «ТИТАН» + нічний тариф — це єдиний гарантований спосіб отримати тепло. Аргумент 2 (Перспектива): Тарифи на газ так само штучно занижені та неминуче зростуть після війни.
2	Можливість: «Нічний» коефіцієнт (0.5)	Ризик <i>скасування</i> коефіцієнта 0.5 практично нульовий. В умовах знищеної маневрової генерації, ОЕС України <i>життєво</i> зацікавлена у перенесенні попиту на ніч.	Це наша головна перевага. Скасування пільги призведе до миттєвого колапсу енергосистеми (через вечірні піки). Стратегія: Лобіювати не просто збереження, а подальше зниження коефіцієнту (до 0.25-0.3) для акумуляційних систем.

3	Можливість: Нова модель енергоринку	Нові правила (ринок допоміжних послуг, балансуючий ринок) — це не загроза, а головна бізнес-модель нашого проекту.	Швидке масштабування. «ТИТАН» з автодиспетчером є ідеальним продуктом для агрегаторів попиту (Demand Response). Стратегія: Стати лідером у ніші «віртуальних електростанцій» на базі ЖКГ, надаючи ОЕС послуги з балансування.
---	--	--	---

Далі визначаються основні конкуренти - проекти, товари-аналоги або замітники, що вже представлені на ринку. Після цього здійснюється збір інформації про техніко-економічні показники як власного проекту, так і конкурентів згідно з наведеним переліком у табл. 4.7.

Таблиця 4.7 - Визначення сильних та слабких сторін ідеї проекту (Конкурентний аналіз)

Техніко-економічна характеристика	Газова котельня	ТЕНові котли	Електродні (іонні)	Кавітаційні (гідродинам.)	Індукційні нагрівачі (Проект)	Тепловий насос
Первинні інвестиції (де 100% = ТЕН)	120%	100% (База)	120-150%	від 300%	250-300%	від 400%
Потреба у кваліфі. монтажі та дозволах	Так (++)	Ні (-)	Так (+)	Так (+)	Так (+)	Так (++)
Строк служби (заявлений)	до 10 років	до 10 років	до 20 років	від 15 років	від 30 років	до 20 років
Необхідність заміни основних частин	Так (пальник и, теплообмінник)	Так (ТЕНи кожні 1-3 роки)	Так (Електроди кожні 1-2 роки)	Так (Підшипники, ущільнювачі)	Відсутні	Так (компресор, фреон)
Необхідність хім. підготовки теплоносія	Так (+)	Так (++)	Критично (+++)	Ні (-)	Ні (-)	Так (+)
Необхідність заміни основних частин	Так (пальник и, теплообмінник)	Так (ТЕНи кожні 1-3 роки)	Так (Електроди кожні 1-2 роки)	Так (Підшипники, ущільнювачі)	Відсутні	Так (компресор, фреон)
Необхідність хім. підготовки теплоносія	Так (+)	Так (++)	Критично (+++)	Ні (-)	Ні (-)	Так (+)
Вимоги до обслуговування/нагляду	Високі (++)	Високі (++) (чистка накипу)	Високі (++) (аналіз води)	Середні (+)	Не потрібен (-)	Високі (++)
Ризики зупинки (Надійність)	Середні	Високі	Високі	Середні	Мінімальні	Середні
Пожежна/Вибухобезпека	Низька (Ризик)	Середня	Середня	Висока	Висока	Висока

На основі виділених ринкових чинників було проведено SWOT-аналіз стартап-проєкту. Матриця, що поєднує сильні (Strength) та слабкі (Weak) сторони з можливостями (Opportunities) та загрозами (Threats), зведена у табл. 4.8.

Таблиця 4.8 - SWOT-аналіз стартап-проєкту (Актуалізовано на 2025 рік)

	Сильні сторони (S)	Слабкі сторони (W)
Внутрішні фактори	<p>а) Висока надійність: Відсутність зношуваних частин (ТЕНів, електродів) та проблеми накипу.</p> <p>б) Високий ККД: Близько 98%.</p> <p>в) Безпека: Висока пожежна та електрична безпека (гальванічна розв'язка).</p> <p>г) Стратегічна перевага: Ідеально підходить для акумуляції нічної базової енергії АЕС.</p>	<p>а) Високі капіталовкладення: Питома вартість (250-300% від ТЕНового) є високим бар'єром.</p> <p>б) Втрата економічної переваги: За тарифами 2025 р. нічна Гкал (2538 грн) дорожча за газову (979 грн).</p> <p>в) Обмежена масштабованість: Одиначна потужність (до 1000 кВт) ускладнює конкуренцію з промисловими газовими котельнями.</p>
	Можливості (O)	Загрози (T)
Зовнішні фактори	<p>а) Криза маневрової генерації: Це головна можливість. Фізичне знищення ТЕС (2022-2025) робить балансування попитом (DSR) критично необхідним для виживання ОЕС.</p> <p>б) Стабільність нічного тарифу: Через кризу маневру, ОЕС гарантовано збереже (або поглибить) пільговий нічний коефіцієнт (0.5), щоб уникнути колапсу.</p> <p>в) Новий енергоринок: Можливість для власників заробляти, надаючи ОЕС допоміжні послуги (балансування) через «балансуючі групи».</p>	<p>а) Мораторій на ціну газу: Це головна загроза. Штучно низька ціна на газ (7,96 грн/м³) робить проєкт неконкурентним для кінцевого споживача в короткостроковій перспективі.</p> <p>б) Фізичні обмеження мереж: Локальні ТП 10/0.4 кВ та внутрішньобудинкові мережі часто не мають достатньої вільної потужності для масового підключення нічних накопичувачів.</p> <p>в) Низька платоспроможність: Високі капіталовкладення (W1) у поєднанні з низькою купівельною спроможністю населення (2025 р.).</p>

4.5 Розроблення маркетингової стратегії: орієнтація на B2B та B2C сектори

На завершальному етапі формується загальна маркетингова концепція товару, що визначає кінцевий образ продукції, яку отримає споживач. Вона поєднує технічні, функціональні та естетичні характеристики виробу з потребами і очікуваннями цільової аудиторії, створюючи привабливу ринкову пропозицію.

Таблиця 4.9 - Визначення ключових переваг концепції товару
(Актуалізовано на 2025 р.)

№ п/п	Потреба (Проблема споживача у 2025 р.)	Вигода, яку пропонує товар (Рішення)	Ключові переваги перед конкурентами
1	Потреба у ГАРАНТОВАНОМУ теплі. Централізоване опалення (ТЕЦ) зруйноване або ненадійне. Через дефіцит генерації в ОЕС, вдень та ввечері діють стабілізаційні відключення.	1. Енергетична АВТОНОМНІСТЬ: Система (котел + теплоаккумулятор) працює вночі (23:00-07:00), накопичуючи тепло. Це гарантує тепло та гарячу воду на 16 денних годин, коли електрики немає (відключення) або вона занадто дорога (4,32 грн). 2. СТРАТЕГІЧНА вигода: Дозволяє споживати енергію вцілілих АЕС вночі та рятує ОЕС України від колапсу під час пікових навантажень.	Проти ТЕНових / Електродних котлів: • Над-надійність: Строк служби 30+ років. • Відсутність накипу та зношуваних елементів (ТЕНів, електродів). • Нульове обслуговування. • Універсальність: Працює з будь-яким теплоносієм (не потрібен хім. аналіз води). Проти Газових котлів: • Безпека: Абсолютна пожежна та вибухобезпека. • Інфраструктурна стійкість: Газові мережі так само вразливі до атак, як і електричні.
2	Потреба у ЗАХИСТІ від пікових тарифів та нестабільності. Споживач не хоче "влетіти" на величезні рахунки, якщо йому доведеться вмикати звичайний ТЕНовий обігрівач вдень за тарифом 4,32 грн/кВт·год.	1. Економія на ТАРИФІ: Система споживає енергію виключно за нічним коефіцієнтом 0.5 (тобто по 2,16 грн/кВт·год), що вдвічі дешевше, ніж будь-яке пряме електроопалення вдень. 2. КЕРОВАНІСТЬ: Повна автоматизація та WEB-моніторинг дозволяють власнику брати участь у «балансуючих групах» на енергоринку (заробляти на послугах DSR).	Проти Теплових Насосів: • Нижчі капіталовкладення: Ваш вузол (250-300% від ТЕНа) все одно значно дешевший за систему «повітря-вода» (від 400%). • Надійність в морози: Індукційний нагрів має стабільний ККД 98% при будь-якій температурі, на відміну від ТН, чия ефективність падає при -22 °С.

Для повного опису проекту розробимо трирівневу маркетингову модель, яка деталізує ідею, її фізичні складові та сервісне оточення (Таблиця 4.10).

Після розроблення маркетингової моделі товару передбачається забезпечення його правового захисту від можливого копіювання шляхом отримання патенту на винахід. Захист здійснюється через механізми охорони інтелектуальної власності, зокрема патентування, оформлення декларації відповідності та сертифікації електроводонагрівача. Додаткову унікальність продукції забезпечує поєднання технічних, функціональних і споживчих характеристик, закладених у концепції товару другого та третього рівнів.

Таблиця 4.10 - Опис трьох рівнів моделі товару (Актуалізовано на 2025 р.)

Рівні товару	Сутність та складові
1. Товар за задумом (Базова потреба, яку виріб вирішує)	Актуалізація (станом на 2025 рік): Потреба: ГАРАНТІЯ ТЕПЛА в умовах зруйнованої інфраструктури (ТЕЦ) та постійних стабілізаційних відключень вдень. Функціональна вигода: Індукційний вузол з теплоаккумулятором (ЕТА) - це надійне та безпечне джерело тепла, яке: 1. Накопичує тепло вночі (23:00-07:00), коли ОЕС має надлишок базової генерації (АЕС). 2. Автономно обігріває будівлю вдень та ввечері, коли електрика відсутня або в дефіциті.
2. Товар у реальному виконанні (Сам продукт та його характеристики)	Марка: Вузол електроіндукційного нагріву «ТИТАН 44». Якість: Патент на корисну модель, Декларація відповідності, Сертифікація. Властивості/характеристики (Приклад моделі): • Електрична потужність: 44 кВт • Теплова потужність: ~37 840 ккал/год • Номінальний струм (3ф, 380В): ~73 А • Габарити (ДхШхВ): 1000x750x1500 мм • Вага: 220 кг Пакування: Промислове пакування згідно з нормами.
3. Товар із підкріпленням (Сервіс та додаткові послуги)	До продажу: • Енергоаудит об'єкта та підбір потужності. • Прорахунок економічної моделі (з урахуванням тарифів 2025 р.). • Допомога у фінансуванні (кредитні програми). Після продажу: • Безкоштовна доставка. • Встановлення та монтаж "під ключ" (включаючи обв'язку з ТА). • Налаштування автоматики (АСМУ) та підключення до WEB-моніторингу. • Гарантія (36 місяців) та післягарантійне обслуговування. Захист від копіювання: Патент, комерційна таємниця на унікальні компоненти вузла.

Після цього визначається ціновий діапазон, який використовується як орієнтир під час формування ринкової вартості майбутнього продукту. Остаточна ціна встановлюється у процесі фінансово-економічного аналізу, що включає порівняння з аналогічними товарами або можливими заміниками, а також оцінювання платоспроможності цільової аудиторії. Розрахунки виконуються експертним методом, що дозволяє отримати обґрунтовані результати та забезпечити конкурентоспроможність проєкту.

Таблиця 4.11 - Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники (Конкуренти, напр. Теплові Насоси)	Рівень доходів / бюджет цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар ("ТИТАН")
1	210 000 – 240 000 грн	250 000 – 290 000 грн	170 000 – 180 000 грн

Далі формується оптимальна система збуту продукції, у межах якої приймаються стратегічні рішення щодо способів реалізації товару (табл. 4.12). На цьому етапі визначається, чи доцільно здійснювати реалізацію власними силами підприємства, чи варто залучати зовнішніх посередників, створюючи відповідно власну або комбіновану систему збуту. Також проводиться аналіз і вибір оптимальної глибини каналу збуту, тобто кількості посередницьких ланок між виробником і кінцевим споживачем. Це дозволяє забезпечити ефективне охоплення ринку при мінімальних витратах. Окрім того, визначаються види посередників (оптові, роздрібні, дилери, дистриб'ютори тощо) та обґрунтовується їх вибір залежно від специфіки товару, обсягу виробництва й особливостей цільового ринку.

Таблиця 4.12 - Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки (Проблема 2025 р.)	Функції збуту, які має виконувати постачальник	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Ринок кризи та недовіри. Клієнт (B2B, B2G, B2C) втратив централізоване опалення (ТЕЦ зруйновані). Він <i>терміново</i> шукає надійне, автономне рішення, але боїться "гаражних" розробок та складних технологій (як Теплові Насоси).	1. Експертне консультування: • Проведення енергоаудиту об'єкта. • Демонстрація надійності (30 років служби) на противагу ТЕНам. 2. Продаж "під ключ": • Не просто "котел", а повний вузол (котел + ТА + автоматика). 3. Допомога з фінансуванням: • Супровід у програмах "Green Recovery" та державних кредитних лініях.	Нульовий канал (Прямий продаж) • B2B (Забудовники, ОСББ) • B2G (Муніципалітети, школи, лікарні) • B2C (Преміум-сегмент)	1. B2G / B2B (Пріоритет): • Прямий вихід на муніципалітети та програми відновлення (USAID, GIZ, U-LEAD). • Участь у тендерах на <i>реконструкцію</i> об'єктів соціальної інфраструктури. 2. B2C (Інтернет + Виставки): • Інтернет: Професійний сайт з калькулятором та детальним ТЕО (порівняння з газом/ТН). • Виставки: Демонстрація фізичного вузла для доказу надійності та якості збірки.

Завершальним етапом розроблення маркетингової програми є створення концепції маркетингових комунікацій, яка базується на раніше сформованій стратегії позиціонування товару та враховує особливості поведінки цільової аудиторії (табл. 4.13). На цьому етапі визначаються основні інструменти просування - реклама, стимулювання збуту, PR, цифровий маркетинг, участь у виставках тощо.

Таблиця 4.13 - Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Ринок кризи та дефіциту. Клієнти (B2C, B2B, B2G) втратили централізоване тепло (ТЕЦ зруйновані) та зіткнулися зі стабілізаційними відключеннями (через знищення ТЕС). Вони <i>терміново</i> шукають НАДІЙНЕ , автономне рішення.	1. B2G/B2B (Пріоритет): Платформи відновлення (U-LEAD, GIZ). • Тендери Prozoogo (для шкіл, лікарень). 2. B2C (Інтернет): • Google Search (запити: " <i>тепло під час відключень</i> ", " <i>автономне опалення 2025</i> "). • Профільні виставки.	1. ЕНЕРГЕТИЧ НА БЕЗПЕКА. 2. ГАРАНТІЯ ТЕПЛА. Позиціонування не як "економія", а як "СТІЙКІСТЬ" (Resilience) та "СТРАТЕГІЧ НА ІНВЕСТИЦІЯ" (на 30+ років).	1. Довести, що це єдине рішення, яке <i>гарантує тепло</i> під час денних відключень (за рахунок нічної акумуляції). 2. Виправдати високу ціну (170 тис. грн) не економією, а надійністю (проти ТЕНів) та безпекою (проти газу).	«НІЧ ЗАРЯДЖАСЬ - ДЕНЬ ЗІГРІВАЄ. 'ТИТАН' — ваше гарантоване тепло в епоху відключень»

Розроблена концепція маркетингових комунікацій показала, що для ефективної популяризації продукції, зокрема індукційного електронагрівача, необхідно застосовувати комплексний підхід до просування. Основними інструментами комунікацій виступають участь у галузевих виставках та ярмарках, рекламні кампанії у спеціалізованих виданнях, присутність у мережі Інтернет — на тематичних платформах, у онлайн-магазинах, а також створення та активне просування власного вебсайту підприємства.

4.6 Висновки до розділу 4

У рамках стартап-проєкту було розроблено вузол електроіндуктивного нагріву «ТИТАН».

Ключові переваги проєкту:

1. Технічна надійність: Високий ККД (~98%), довгий строк служби (30+ років) та відсутність потреби в обслуговуванні (завдяки відсутності ТЕНів/електродів).

2. Стратегічна цінність (2025 р.): В умовах фізичного знищення >80% маневрових ТЕС, «ТИТАН» є критично важливим інструментом для ОЕС. Він виконує функцію «споживача-регулятора», дозволяючи заповнити нічний

провал (використовуючи енергію вцілілих АЕС) та гарантувати тепло споживачам під час денних стабілізаційних відключень.

3. Керованість: Вузли повністю автоматизовані та готові до об'єднання в «балансуючі групи» для роботи на ринку допоміжних послуг.

Основні виклики (Недоліки):

1. Високі капіталовкладення: Питома вартість вузла значно вища за ТЕНові чи газові аналоги.

2. Поточна економіка (2025 р.): Через високий базовий тариф на електроенергію (4,32 грн/кВт·год), вартість 1 Гкал тепла за нічним тарифом (~2538 грн) вже не є конкурентною порівняно зі штучно утримуваним тарифом на газ (~979 грн/Гкал).

Загальний висновок: Впровадження вузла «ТИТАН» у 2025 році не є економічно вигідним для кінцевого споживача (якщо порівнювати лише з газом), але є стратегічно доцільним та безальтернативним рішенням для:

1. Держави (ОЕС): Для уникнення колапсу системи через дефіцит маневру.

2. Споживача: Для отримання гарантії тепла в умовах зруйнованих ТЕЦ та постійних відключень.

Успіх проєкту залежить від позиціонування (надійність, а не економія) та від державних стимулів (спеціальних тарифів для акумуляції).

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Нормативні вимоги безпеки при експлуатації електронагрівальних установок

Нормативна база України класифікує водогрійні котли за температурним режимом теплоносія: до 115°C та понад цю межу. Для обладнання першої групи, яке розглядається в контексті систем опалення, ключовим регламентуючим документом залишається НПАОП 0.00-1.08-94 [36]. Цей акт визначає стандарти життєвого циклу устаткування: від проектування та виготовлення до експлуатації та ремонту.

Вимоги до конструкції та матеріалів Конструктивне виконання котла повинно гарантувати надійність та ремонтпридатність протягом усього розрахункового ресурсу. Гідравлічна схема має забезпечувати ефективне охолодження елементів, запобігати утворенню парових пробок та виникненню небезпечних температурних напружень.

Для досліджуваного вузла «ТИТАН» (індукційний нагрів) специфічною вимогою є використання електротехнічних матеріалів, стійких до впливу змінних електромагнітних полів, та посилена діелектрична ізоляція струмопровідних частин.

З метою захисту персоналу від термічних опіків, усі поверхні з підвищеною температурою в робочій зоні повинні мати теплоізоляцію, що обмежує температуру поверхні до 45–55°C. Кожен виріб маркується заводською табличкою та супроводжується технічним паспортом.

Арматура та прилади безпеки Для запобігання аварійним ситуаціям (перевищення тиску, перегрів) котли обов'язково оснащуються: запобіжними скидними клапанами; манометрами та термометрами для контролю параметрів; запірно-регулюючою арматурою; автоматикою захисту, що вимикає нагрів при відхиленні від норми.

Приміщення для розміщення обладнання мають відповідати сучасним будівельним нормам, зокрема ДБН В.2.5-77:2014 «Котельні» [37], які замінили застарілі радянські СНиП.

Організація експлуатації та обслуговування Відповідальність за технічний стан покладається на адміністративно-технічний персонал. Основою безпечної роботи є система планово-попереджувальних ремонтів (ППР), графіки яких затверджуються технічним керівником підприємства.

Регламент технічного опосвідчення включає: Зовнішній та внутрішній огляд (раз на 4 роки) — для виявлення корозії та дефектів. Гідравлічне випробування (раз на 8 років) — для перевірки міцності та щільності елементів під тиском.

Власник обладнання зобов'язаний проводити щорічні профілактичні огляди. До обслуговування допускається лише атестований персонал, старший 18 років, що пройшов медичний огляд та інструктаж з електробезпеки (група допуску не нижче II-III, враховуючи специфіку індукційного нагріву).

5.2. Електротехнічні аспекти підключення та захисту вузла «ТИТАН»

Інтеграція вузла «ТИТАН» в електричну мережу об'єкта вимагає суворого дотримання норм ПУЕ (Правил улаштування електроустановок) та ДБН. Оскільки обладнання належить до потужних споживачів, критично важливим є правильний вибір комутаційно-захисної апаратури та перерізу кабельних ліній.

Схема комутації Підключення здійснюється до трифазної мережі змінного струму напругою 380 В (0,4 кВ) за п'ятипровідною схемою (три фази, робочий нуль N, захисне заземлення PE).

Базовий набір для монтажу включає:

1. Силову кабельну лінію з мідними жилами (не підтримує горіння).
2. Комплекс захисту: автоматичний вимикач (АВ) у парі з пристроєм захисного відключення (ПЗВ), або комбінований диференційний автомат.
3. Надійний контур заземлення (опір не більше 4 Ом).

Вибір кабельної продукції Розрахунок перерізу струмопровідних жил базується на номінальних характеристиках нагрівача, наведених у технічній документації (Табл. 5.1).

номінал, що перевищує 73 А). Характеристика відключення: «С» (універсальна). Рекомендована модель: ВА47-100 3Р 80А (або аналоги від Schneider/Hager).

2. Пристрій захисного відключення (ПЗВ): Завдання: захист персоналу від ураження струмом та запобігання пожежам через витоки.

Умова вибору за струмом навантаження: $I_{ном.ПЗВ} \geq I_{ном.ав}$. Контакти ПЗВ повинні витримувати струм більший, ніж струм відсічки автомата. Номінал: 100 А (на сходінку вище за автомат 80 А). Диференційний струм витоку (Δn): 30 мА (згідно з ПУЕ п.7.1.79 для групових ліній). Кількість полюсів: 4 (3 фази + N). Рекомендована модель: ВД1-63 4Р 100А 30мА.

Обрана конфігурація (Кабель 5x16 мм², Автомат 80 А, ПЗВ 100 А/30 мА) забезпечує надійне живлення та повну електробезпеку вузла «ТИТАН» потужністю 44 кВт. Додатково рекомендується встановлення реле контролю напруги для захисту електроніки блоку керування.

5.3 Розрахунок захисного заземлення для електроустановки з індукційним нагрівом.

Метою розрахунку є визначення кількості вертикальних електродів (заземлювачів) та довжини горизонтальної смуги зв'язку, необхідних для забезпечення нормативного опору розтіканню струму $R \leq 4 \text{ Ом}$.

Вихідні дані для розрахунку:

Параметр	Позначення	Значення	Примітка
Необхідний опір заземлення	$R_{норм}$	4 Ом	ПУЕ 1.7.101 (для 380 В)
Тип ґрунту	-	Суглинок	Типовий для центру України
Питомий опір ґрунту (табличний)	ρ	100 Ом·м	Середнє значення
Кліматичний коефіцієнт	$K_{кл}$	1,5	Для II кліматичної зони
Вертикальні електроди:			
Матеріал	-	Кутник сталевий	50x50x5 мм
Довжина електрода	L_v	2,5 м	
Заглиблення від поверхні	h	0,7 м	
Горизонтальний заземлювач:			
Матеріал	-	Смуга сталева	40x4 мм

Хід розрахунку: 1. Визначення розрахункового питомого опору ґрунту $\rho_{роз}$:

Враховуємо сезонне промерзання/висихання ґрунту за допомогою кліматичного коефіцієнта:

$$\rho_{роз} = \rho \cdot \kappa_{КЛ} = 100 \cdot 1,5 = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

2. Розрахунок опору одного вертикального електрода ($R_{в.од}$):

Використовуємо формулу для стержньового заземлювача:

$$R_{в.од} = \frac{\rho_{роз}}{2\pi L_B} \left(\ln \frac{2L_B}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + L_B}{4t - L_B} \right)$$

Для спрощення інженерних розрахунків (кутника 50x50) можна використати наближену формулу:

$$R_{в.од} \approx 0,3 \cdot \rho_{роз} = 0,3 \cdot 150 = 45 \text{ Ом}$$

3. Визначення необхідної кількості електродів (n):

Приймаємо попередню кількість електродів без урахування горизонтальної смуги. Коефіцієнт використання (n_b) при розміщенні в ряд або контур приймаємо $\approx 0,65$.

$$n = \frac{R_{в.од}}{R_{норм} \cdot \eta_e} = \frac{45}{4 \cdot 0,65} = \frac{45}{2,6} \approx 17,3 \text{ шт}$$

Аналіз: Отримана кількість (18 штук) є надмірною для одного вузла. Це пов'язано з високою вимогою (4 Ом) для чистого суглинку. Для оптимізації використовуємо замкнений контур (довжиною близько 40-50 м) та врахуємо провідність горизонтальної смуги, що з'єднує електроди.

4. Уточнений розрахунок з урахуванням горизонтальної смуги:

Припустимо, ми монтуємо контур у вигляді прямокутника навколо будівлі або лінії. Прийmemo установку 10 вертикальних електродів кроком 3 метри. Довжина з'єднувальної смуги $L_T = 30$ м.

Опір горизонтальної смуги (R_T):

$$R_T = \frac{\rho_{роз}}{2\pi L_T} \cdot \ln \frac{2L_T^2}{h \cdot b} = \frac{150}{2 \cdot 3,14 \cdot 30} \cdot \ln \frac{2 \cdot 30^2}{0,04 \cdot 0,7} \approx 3,5 \text{ Ом}$$

Загальний опір заземлюючого пристрою ($R_{заз}$) з 10 електродів та смуги:

$$R_{заз} = \frac{1}{\frac{n_e \cdot n}{R_{в.од}} + \frac{n_e}{R_T}}$$

де $\eta_\epsilon = 0,62$, $\eta_z = 0,35$ (коефіцієнти екранування).

$$R_{\text{заг}} = \frac{1}{\frac{0,62 \cdot 10}{45} + \frac{0,35}{6,5}} = \frac{1}{0,137 + 0,053} = \frac{1}{0,19} \approx 5,26 \text{ Ом}$$

Коригування: Отримане значення $5,26 \text{ Ом} > 4 \text{ Ом}$.

Щоб досягти 4 Ом , необхідно:

1. Збільшити кількість електродів до 14 шт.
2. Або використати природні заземлювачі (арматуру залізобетонного фундаменту будівлі), що дозволяється ПУЕ (п. 1.7.109). При приєднанні до фундаменту опір штучного заземлювача різко впаде до норми.

Для забезпечення опору $R \leq 4 \text{ Ом}$ для вузла «ТИТАН-44» приймаємо комбіновану систему заземлення:

1. Штучний заземлювач: Контур із 10 вертикальних електродів (кутник $50 \times 50 \times 5 \text{ мм}$, $L=2,5 \text{ м}$). З'єднаних сталеву смугою $40 \times 4 \text{ мм}$ (довжина траншеї 30 м).
2. Природний заземлювач: Обов'язкове приєднання контуру до арматури фундаменту будівлі (шляхом зварювання).

Це рішення гарантує досягнення опору заземлення в межах $2-3 \text{ Ом}$, що повністю задовольняє вимоги ПУЕ та паспорту індукційного обладнання, забезпечуючи стабільну роботу електроніки та безпеку персоналу. Всі з'єднання виконуються зварюванням. Місця зварювання покриваються бітумною мастикою для захисту від корозії.

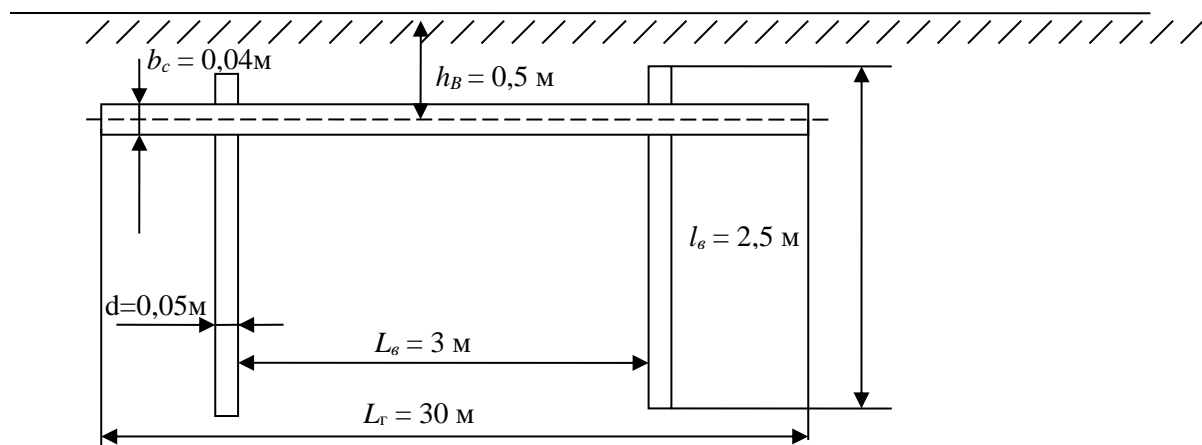


Рисунок 5.2- Схема прокладки заземлення

6. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено науково-прикладне завдання щодо підвищення ефективності систем теплозабезпечення будівель шляхом впровадження електротеплоакумуляційних технологій на базі індукційного нагріву. На основі проведених теоретичних, технічних та економічних досліджень, зроблено наступні висновки:

Зміна парадигми теплопостачання. Аналіз сучасного стану енергетики України (станом на 2025 рік) свідчить про докорінну зміну ролі електроопалення. Внаслідок руйнування значної частини інфраструктури централізованого теплопостачання (ТЕЦ), електричний обігрів трансформувався з допоміжного засобу в ключовий елемент децентралізації та енергетичної безпеки. Доведено, що впровадження індивідуальних систем є технічно можливим та необхідним для забезпечення життєдіяльності будівель.

Криза маневрової генерації та роль акумуляції. Встановлено, що Об'єднана енергосистема (ОЕС) України функціонує в умовах критичного дефіциту маневрових потужностей (ТЕС, ГЕС). Історична проблема "нічних провалів" перетворилася на стратегічну можливість: нічний надлишок базової генерації АЕС є єдиним стабільним ресурсом. Використання електротеплоакумуляційного (ЕТА) обігріву визначено як безальтернативний метод балансування, що дозволяє замінити втрачену маневрову генерацію керованим споживанням.

Теоретичне обґрунтування індукційного методу. На основі аналізу фізичних процесів у феромагнітних матеріалах доведено переваги індукційного нагріву. Використання втрат на гістерезис та вихрові струми як джерела корисної теплової потужності забезпечує високий ККД (~98%) та, на відміну від резистивних методів, гарантує стабільність параметрів протягом тривалого (понад 30 років) терміну експлуатації без ефекту "старіння" нагрівача.

Розробка вузла «ТИТАН». Запропоновано інноваційне технічне рішення — автоматизований вузол індукційного нагріву «ТИТАН» з інтегрованою системою теплоакумуляції. Це комплексне рішення дозволяє скоротити терміни

проектування та монтажу, забезпечуючи повну автономність об'єкта. Вузол функціонує як активний «споживач-регулятор», споживаючи електроенергію виключно в нічній зоні (23:00–07:00) та забезпечуючи тепловіддачу протягом доби.

Вплив на електричні мережі. Моделювання роботи вузла «ТИТАН» у мережі 10/0,4 кВ підтвердило його позитивний вплив на режими електропостачання. Впровадження системи дозволило зменшити нерівномірність добового графіка: коефіцієнт заповнення графіка навантаження зріс з 0,66 до 0,83. Це знижує втрати в мережах та вивільняє пропускну здатність у пікові години.

Стартап-аналіз та економіка 2025 року. Проведений фінансово-економічний аналіз в умовах тарифів 2025 року (4,32 грн/кВт·год) показав зміщення акцентів. Хоча пряма вартість електроопалення стала вищою за газове, проект залишається доцільним завдяки енергетичній автономності та використанню нічного коефіцієнта 0,5. Розроблена маркетингова стратегія позиціонує продукт не як "найдешевший", а як "найнадійніший" (гарантія тепла при відключеннях), що є вирішальним фактором для споживачів в умовах воєнного часу.

Впровадження розробленої системи індукційного електротеплоакумуляційного обігріву є технічно обґрунтованим, соціально значущим та стратегічно необхідним кроком для адаптації житлово-комунального сектору України до кризових умов функціонування енергосистеми.

7. ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings. // Official Journal, 4.1.2003, pp. 65-70 (Директива 2002/91/EC по энергетической эффективности зданий, перевод см. АВОК, № 1,2003.)
2. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. // Відомості Міністерства палива та енергетики України, Інформ.-аналіт.бюлетень МПЕ. Спецвипуск. - К.: МПЕ, 2006,-114 с.
3. Енергоощадна технологія електротеплоаккумуляційного обігріву в житлово-комунальному та аграрно-промисловому комплексах України. Відповідальний редактор к. т. н. Д. Й. Розинський - К: Видавництво Купріянова О.О. - 2007. - 272 с.
4. Стафийчук В.Г., Меженный С.Я. Вопросы электроснабжения села с учетом электрообогрева жилых домов. // Энергетика и электрификация. - 1992. - № 1. -С. 21-22.
5. Меженный С.Я., Стафийчук В.Г., Тисленко В.В., Удод Е.И. Концепция развития сельской электроэнергетики Украины. // Энергетика и электрификация. - 1993. -№ 1.-С. 31-34.
6. Стафийчук В.Г., Ревуцкий С.С. Нормативное обеспечение расчетов электрических сетей при использовании электроэнергии для отопления жилья. // Электрические сети и системы. - 2003. - № 2. - С. 49-52.
7. Симонов А.А. Бытовое электрическое отопление с аккумулярованием тепла - важнейший фактор эффективного использования электроэнергии //Энергетика и электрификация. - 1992. - № 1. - с. 26-30.
8. Юрчук В. Ф. Електроопалення сільських будинків, як засіб соціальної перебудови села. // Энергетика и электрификация. - 1992. -№ I. - С. 25-26.
9. Теплогенератор и устройство для нагрева жидкостей. // Потапов Ю.С. Патент РФ № 2045715 С1, опубл. 10.10.95 г., Бюллетень № 28.
10. Устройство для нагревания жидкостей и теплогенератор, который

используется в нем. // Потапов Ю.С. и друг. Патент України № 7205 А, опубл. 30.06.95 г. Бюллетень № 2.

11. Національна енергетична компанія «Укренерго». https://ua.energy/uchasnikam_rinku/
12. Меженный С.Я., Ревуцкий С.С., Стафийчук В.Г. Учет электрических нагрузок отопления и горячего водоснабжения при проектировании сельских электрических сетей 0,36-110 кВ. //Энергетика и электрификация. - 1991. - № 4.
14. Симонов А.А. Бытовое электрическое отопление с аккумулярованием тепла - важнейший фактор эффективного использования электроэнергии //Энергетика и электрификация. - 1992. - № 1. - с. 26-30.
15. Пшеничников В. М. Использование электроэнергии для отопления. // Энергосбережение. - 2004. - № 2. - С. 68-72.
- 16.115. С.В. Овчаров, Р.В. Телюта, А.В. Буряк. Розробка технічного засобу перетворення електричної енергії в теплову на принципі «котушка в сталі». Збірник наукових праць КНТУ /Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація/ – Вип. 25. Ч 2. Кіровоград: КНТУ, 2012. С. 114 – 121.
17. Расчет котла отопления частного дома — онлайн калькулятор мощности котла (<https://kermi-fko.ru/raschety/raschet-kotla-otopleniya.aspx>)
18. Державні будівельні норми України В.2.6-31:2006
19. Індукційний електронагрівач "ЕДІСОН" http://zstm.ru/katalog/induction_equipement/heating/edison/#reshaemue-zadchi-edison
20. Вузол нагріву «ТИТАН» http://zstm.ru/katalog/induction_equipement/heating/titan/#elemnti-oborudovaniya-titan
21. <https://prom.ua/ua/p32716974-teploakumulyatory-akkumulyatsionnye-emkosti.html>
22. Обв'язка електрокотла опалення, розрахунок потужності, принцип роботи, пристрій, схема. <https://akak7.ru/obvyazka-elektrokotla-otopleniya-raschet-moshhnosti-princip-raboty-ustrojstvo-sxema.html>

23. Як встановити котел з теплоаккумулятором і системою безпеки - Обв'язка теплоаккумулятора: схеми, пояснення, принцип роботи.
<https://termopaneli59.ru/kot/kak-ustanovit-kotel-s-teploakkumulyatorom-i-sistemoj-bezopasnosti-obvyazka-teploakkumulyatora-sxemy-poyasneniya-princip-raboty.html#i-37>
24. Розроблення стартап-проекту: «Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей»/За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ: НТУУ «КПІ» 2016. – 28 с.
25. <https://kresc.com.ua/person-tariffs.html>
26. https://uhbdp.org/images/uhbdp/pdf/library_sabo/odynyci_kilkosti_teploty_ta_potuzhnosti.pdf
27. <https://index.minfin.com.ua/tariff/gas/>
28. <https://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/486E117B34CF13EEC2257BCE0041B995>
29. <https://www.naftogaz.com/files/Information/Naftogaz-gaz-prices-ne-PSO-August-2020.pdf>
30. <http://kr-rada.gov.ua/zagalna-informatsiya/kp-teploenergetik-ogoloshennya/>
31. https://bankchart.com.ua/spravochniki/indikatory_rynka/tarify_na_kholodnu_vodu/26
32. <https://krmisto.gov.ua/ua/tarifs/bycapital/water.html>
33. <https://prom.ua/ua/Drova?sort=-price&a228=7399>
34. <https://prom.ua/ua/Toplivnye-pellety>
35. <https://prom.ua/ua/Ugol>
36. НПАОП 0.00-1.08-94. «Правила будови і безпечної експлуатації парових та водогрійних котлів»
37. СНиП II-35-76 «Котельні установки».
38. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. – К.: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с
39. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С, Сторожук В. М. та ін. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / За ред. канд. техн. наук, доцента В. Ц. Жидецького. - Львів, Афіша, 2000 - 352 с.