

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання

«На правах рукопису»
УДК 621.311

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ В.А. Попов

« » _____ 20 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

спеціалізації Системи забезпечення споживачів електричною енергією

на тему: «Агрегування систем розосередженої генерації з централізованим акумулюванням електричної енергії»

Виконав (-ла): студент (-ка) VI курсу, групи ОЕ-81мп

Коротенко Ігор Вікторович _____ (прізвище, ім'я по батькові) _____ (підпис)

Науковий керівник д.т.н., проф. Денисюк С.П. _____ (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) _____ (підпис)

Консультант нормоконтроль ас. Прокопенко І.Д. _____ (назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) _____ (підпис)

Рецензент к.т.н., доцент Данілін О.В. _____ (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) _____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра електропостачання

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Системи забезпечення споживачів електричною енергією»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.А. Попов

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Коротенку Ігорю Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Агрегування систем розосередженої генерації з централізованим акумулюванням електричної енергії»

науковий керівник дисертації д.т.н., проф. Денисюк С.П.

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

затверджені наказом по університету від «04» листопада 2019 р. № 3814-с

2. Термін подання студентом дисертації 11 грудня 2019 року

3. Об'єкт дослідження: системи розосередженої генерації з централізованим акумулюванням електричної енергії

4. Предмет дослідження: технічний та економічний ефект від агрегування систем розосередженої генерації

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- Проаналізувати світові тенденції в галузі відновлюваної енергетики, дослідити наукові дослідження, що проводяться на території ЄС по

дослідженню інтелектуальних електроенергетичних систем;

- Провести аналіз розвитку ВДЕ на території України та визначити актуальність впровадження моделей агрегування локальних електроенергетичних систем з централізованим акумулюванням електричної енергії для електроенергетичного сектору України;

- Проаналізувати засоби для отримання та зберігання відновлюваної енергії, провести порівняльний аналіз програмного забезпечення для моделювання та проектування локальних електроенергетичних спільнот.

- Дослідити моделі агрегування електроенергетичних систем та визначити ефективність та актуальність їх використання на території України;

- Оцінити ефективність агрегування систем розосередженої генерації з централізованим акумулюванням електричної енергії за допомогою інформації відносно діючого об'єкта;

- Розробити стартап-проект за результатами дослідження.

6.Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація

7.Орієнтовний перелік публікацій:

Лило І.В., Гліба Д.М., Коротенко І.В., "Мультиагентні системи гнучкої генерації з централізованим акумулюванням електричної енергії" VI Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'19» - 2019. - с. 40-41.

Денисюк С.П., Коротенко І.В., Лило І.В., "Формування мережевої інфраструктури інтелектуальних електроенергетичних спільнот в Україні" Енергетика: економіка, техніка, екологія. – №2 - 2019.

Коротенко І.В. «Моделі агрегування локальних електроенергетичних систем» II Науково-технічна конференція магістрів ІЕЕ, присвячена пам'яті професора Василя Миколайовича Винославського 22 листопада 2019 року.

Коротенко І.В., Денисюк С.П., Лило І.В. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Алгоритм моделювання локальних електроенергетичних систем розосередженої генерації»

8.Консультанти розділів дисертації

Нормоконтроль

ас. Прокопенко І.Д.

9.Дата видачі завдання 31 травня 2019 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів МД	Примітка
1	Визначення мети, об'єкту магістерської дисертації	18.04.19-23.04.19	Вик.
2	Визначення попередньої структури дисертації	24.04.19-28.04.19	Вик.
3	Робота над першим розділом	30.10.19-10.11.19	Вик.
4	Робота над другим розділом	12.11.19-20.11.19	Вик.
5	Робота над третім розділом	22. 11.19-27.11.19	Вик.
6	Розробка стартап проекту	28. 11.19-30.11.19	Вик.
7	Оформлення дисертації	01. 12.19-02.12.19	Вик.
8	Оформлення реферату та презентації, проходження перевірки на плагіат та рецензування	02. 12.19-07.12.19	Вик.
9	Передзахист МД	10.12.19-14.12.19	Вик.
10	Захист дисертації	18.12.19-20.12.19	Вик.

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Структура і обсяг роботи. Магістерська дисертація на тему: «Агрегування систем розосередженої генерації з централізованим акумулюванням електричної енергії» складається із вступу, 4 розділів, висновків та переліку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 105 сторінки основного тексту, в тому числі 33 рисунків, 14 таблиці та 71 бібліографічних найменувань за переліком посилань.

Актуальність теми. Розвиток та модернізація енергетичної системи має на увазі зменшення кількості ліній високої та над високої напруги, що суттєво зменшує кількість втрат при передачі електричної енергії, та зменшує фінансові затрати на обслуговування ліній та обладнання. Подібна концепція побудови мережі базується на впровадженні локальних систем розосередженої генерації із застосуванням інтелектуальних електроенергетичних систем. Структура такої системи дозволяє встановлювати та додавати електростанції відновлюваних джерел електричної енергії майже у будь якій точці приєднання, що спонукає до збільшення кількості об'єктів відновлюваних джерел електричної енергії та спорудження нових гібридних електростанцій малої та середньої потужності.

Створення ефективних алгоритмів агрегування дозволить зменшити втрати при перетворенні та передачі електричної енергії та підвищить рівень комфорту кінцевого споживача. Агрегування систем розосередженої генерації з централізованим акумулюванням електричної енергії дозволить підвищити якісні та кількісні показники електричної енергії в локальних електроенергетичних системах.

Метою магістерської дисертації є оцінювання ефективності агрегування систем розосередженої генерації з централізованим акумулюванням електричної енергії.

Для досягнення зазначеної мети дослідження вирішувались наступні завдання:

- Проаналізувати світові тенденції в галузі відновлюваної енергетики, дослідити наукові дослідження, що проводяться на території ЄС по

дослідженню інтелектуальних електроенергетичних систем;

- Провести аналіз розвитку ВДЕ на території України та визначити актуальність впровадження моделей агрегування локальних електроенергетичних систем з централізованим акумулюванням електричної енергії для електроенергетичного сектору України;

- Проаналізувати засоби для отримання та зберігання відновлюваної енергії, провести порівняльний аналіз програмного забезпечення для моделювання та проектування локальних електроенергетичних спільнот.

- Дослідити моделі агрегування електроенергетичних систем та визначити ефективність та актуальність їх використання на території України;

- Оцінити ефективність агрегування систем розосередженої генерації з централізованим акумулюванням електричної енергії за допомогою інформації відносно діючого об'єкта;

- Розробити стартап-проект за результатами дослідження.

Об'єктом дослідження є системи розосередженої генерації з централізованим акумулюванням електричної енергії.

Предметом дослідження є технічний та економічний ефект від агрегування систем розосередженої генерації

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у дисертаційній роботі була використана низка як загальнонаукових, так і унікальних підходів та моделей агрегування.

Інформаційну базу дослідження склали дані отримані при реалізації та подальшому моніторингу реалізованих об'єктів компанії ТОВ «Д8». Дані стосовно споживання електричної енергії та кількості згенерованої електричної енергії від сонячних електростанцій котеджного містечка «Альпійка» надала компанія Sunny Portal.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробці нових методів агрегування та створення алгоритму агрегування, який дозволить ефективно керувати різноманітним обладнання створюючи гнучке споживання та генерацію електричної енергії.

Практичне значення роботи. Визначення ефективного алгоритму агрегування систем розосередженої генерації.

Апробація результатів роботи відбулася на II Науково-технічній конференції магістрів ІЕЕ, присвяченій пам'яті професора Василя Миколайовича Винославського 22 листопада 2019 року.

Публікації за тематикою досліджень: Основні положення дисертації було висвітлено та оприлюднено на трьох науково-технічних конференціях:

1. Лило І.В., Гліба Д.М., Коротенко І.В., "Мультиагентні системи гнучкої генерації з централізованим акумулюванням електричної енергії" VI Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'19» - 2019. - с. 40-41.

2. Денисюк С.П., Коротенко І.В., Лило І.В., "Формування мережевої інфраструктури інтелектуальних електроенергетичних спільнот в Україні" Енергетика: економіка, техніка, екологія. – №2 - 2019.

3. Коротенко І.В. «Моделі агрегування локальних електроенергетичних систем» II Науково-технічна конференція магістрів ІЕЕ, присвячена пам'яті професора Василя Миколайовича Винославського 22 листопада 2019 року.

Отримано акт впровадження та свідоцтво про реєстрацію авторського права на алгоритм моделювання локальних електроенергетичних систем розосередженої генерації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МОДЕЛІ АГРЕГУВАННЯ, ЛОКАЛЬНІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ, РОЗОСЕРЕДЖЕНА ГЕНЕРАЦІЯ, СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СПІЛЬНОТИ.

ABSTRACT

Structure and scope of work. Master's thesis on the topic: "Aggregation of systems of distributed generation with centralized accumulation of electricity" consists of an introduction, 4 sections, conclusions and a list of sources used. The total volume of work is 105 pages of body text, including 33 figures, 14 tables and 71 bibliographic titles by reference.

Actuality of theme. The development and modernization of the energy system means reducing the number of high and high voltage lines, which significantly reduces the amount of losses in the transmission of electricity, and reduces the financial costs of maintaining the lines and equipment. This concept of network construction is based on the implementation of local systems of distributed generation with the use of intelligent electricity systems. The structure of such a system allows the installation and installation of renewable energy plants at almost any point of connection, which leads to an increase in the number of renewable electricity facilities and the construction of new hybrid small and medium power plants.

Creating efficient aggregation algorithms will reduce losses in the conversion and transmission of electricity and increase the comfort level of the end consumer. Aggregation of distributed generation systems with centralized accumulation of electric energy will allow to increase qualitative and quantitative indicators of electric energy in local power systems.

The aim of the master's thesis is to evaluate the efficiency of aggregation of systems of distributed generation with centralized accumulation of electrical energy.

To achieve this goal, the following tasks were solved:

- To analyze the world trends in the field of renewable energy, to study the scientific researches conducted in the territory of the EU on the research of intelligent electric power systems;

- To conduct an analysis of the development of RES in the territory of Ukraine and to determine the relevance of the introduction of models of

aggregation of local electricity systems with centralized accumulation of electricity for the electricity sector of Ukraine;

- To analyze the means for obtaining and storing renewable energy, to carry out a comparative analysis of software for modeling and designing local power communities.

- Investigate the models of aggregation of electricity systems and determine the efficiency and relevance of their use in Ukraine;

- To evaluate the efficiency of aggregation of systems of distributed generation with centralized accumulation of electricity with the help of information concerning the active object;

- Develop a startup project based on the results of the study.

The object of the study is distributed generation systems with centralized accumulation of electricity.

The subject of the study is the technical and economic effect of the aggregation of distributed generation systems

Research methods. A number of general and unique approaches and models of aggregation were used in the dissertation to solve the problems.

The information base of the study was the data obtained during the implementation and subsequent monitoring of the realized objects of the company LLC D8. Sunny Portal provided data on electricity consumption and the amount of electricity generated from solar power plants in the cottage town of Alpijka.

The scientific novelty of the obtained results is the development of new methods of aggregation and the creation of an algorithm of aggregation, which will allow efficient management of various equipment, creating flexible consumption and generation of electricity.

The practical meaning of the work. Determination of efficient algorithm for aggregation of systems of dispersed generation.

The results of the work were tested at the II Scientific and Technical Conference of the Masters of IEE, dedicated to the memory of Professor Vasily Vinoslavsky November 22, 2019.

Research publications: The main provisions of the dissertation were covered and published at three scientific and technical conferences:

1. Lilo I.V, Gliba D.M, Korotenko I.V, "Multi-Agile Flexible Generation Systems with Centralized Electricity Accumulation" VI International Scientific-Technical and Educational-Methodological Conference "Energy Management: State and Prospects for Development - PEMS'19 '- 2019 - p. 40-41.

2. Denysyuk S.P, Korotenko I.V, Lilo I.V, "Formation of Network Infrastructure of Intelligent Electricity Communities in Ukraine" Energy: Economics, Technology, Ecology. - №2 - 2019.

3. Korotenko I.V "Models of aggregation of local power systems" II Scientific and Technical Conference of Masters of IEE, dedicated to the memory of Professor Vasily Vinoslavsky November 22, 2019.

The act of introduction and the certificate of registration of the copyright on the algorithm of modeling of local power systems of dispersed generation were received.

KEYWORDS: MODELS OF AGGREGATION, LOCAL ELECTRIC POWER SYSTEMS, DISTRIBUTED GENERATION, SYSTEMS OF ACCUMULATION OF ELECTRIC ENERGY, INTELLECTUAL ELECTRICITY COMMUNITIES.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	13
ВСТУП.....	14
1. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ДЛЯ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ	16
1.1. Світові тенденції розвитку відновлюваних джерел енергії.....	16
1.2. Аналіз Європейських досліджень по впровадженню локальних систем розосередженої генерації.....	21
1.3. Актуальність впровадження систем РГ для формування інтелектуальних електроенергетичних спільнот в Україні	25
1.4. Формування структурної моделі інтелектуального електроенергетичного середовища в Україні.....	31
1.5. Аналіз існуючих технічних засобів для отримання та зберігання відновлюваної електричної енергії.....	34
1.5.1. Типи та ключові параметри сонячних електростанцій	34
1.5.2. Геометрія сучасних напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів	37
1.5.3. Аналіз та класифікація інверторів для СЕС	42
1.6. Аналіз програмного забезпечення для моделювання локальних електроенергетичних систем на базі ІЕС.....	43
1.7. Висновки по розділу	48
2. МОДЕЛІ АГРЕГУВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ.....	49
2.1. Роль агрегатора у формуванні мережевої інфраструктури ІЕС	49
2.2. Функціонування АІС в електроенергетичній системі України	50
2.3. Моделі агрегування локальних електроенергетичних систем	55
2.3.1. Модель агрегування модульних АЕС	57
2.3.2. Модель агрегування ТЕЦ	65
2.3.3. Модель агрегування термостатичними навантаженнями.....	68
2.3.4. Модель агрегування систем накопичення електричної енергії	72
2.3.5. Модель агрегування систем розосередженої генерації.....	76

2.4. Висновки по розділу	79
3. ЕФЕКТИВНОСТЬ АГРЕГУВАННЯ ЛОКАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ЦЕНТРАЛІЗОВАНИМ АКУМУЛЮВАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	81
3.1. Опис локальної електроенергетичної системи з централізованим акумулюванням електричної енергії.....	81
3.2. Алгоритм агрегування систем РГ та ЛЕС	85
3.3. Визначення необхідної ємності накописувачів	88
3.4. Оцінка ефективності агрегування локальної електроенергетичної системи з централізованим акумулюванням електричної енергії.....	92
4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	96
4.1. Опис концепту ідеї проекту	96
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	99
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	100
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	102
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	103
4.6. Висновки по розділу	105
Висновки	105
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	107

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕС – атомна електрична станція

АКБ – акумуляторна батарея

АЛЕС – агрегатор локальних електроенергетичних систем

АС – активний споживач

БР – балансуєчий ринок електричної енергії

ВДЕ – відновлювані джерела електроенергії

ВДР – внутрішньодобовий ринок електричної енергії

ВЕС – вітроелектростанція

ГЕС – гідроелектростанція

ЄС – Європейський союз

ІЕС – інтелектуальна електроенергетична спільнота

ККД – коефіцієнт корисної дії

КМ – котеджне містечко

ЛЕС – локальна електроенергетична система

НЕЕ – накопичувач електричної енергії

ОВіК – опалення, вентиляція і кондиціонування

ОЕС України – об'єднана енергосистема України

ОСП – оператор системи передачі

ОСР – оператор системи розподілу

РГ – розосереджена генерація

РДН – ринок на добу наперед

СЕС – сонячна електростанція

САЕ – система акумулювання електричної енергії

ТЕЦ – теплоелектроцентрально

ВСТУП

У період стрімкого розвитку усіх систем, що оточують людину, виникає певна залежність від електричної енергії, яка є запорукою функціонування більшості пристроїв та обладнання. Електрична енергія виробляється централізовано, на електростанціях різних видів та потужності, які мають різні енергетичні показники. Електроенергія від великих електростанцій повинна потрапити до кінцевого споживача у необхідній кількості та відповідати зазначеним у договорі якісним показникам. Як наслідок при передачі відбуваються втрати великої кількості електричної енергії, що спонукає сучасну електроенергетику до вирішення цієї проблеми за рахунок розподілення виробництва електричної енергії.

Більшість розвинутих країн світу впроваджують та удосконалюють концепцію розподіленої генерації та споживання електричної енергії, що направлена на побудову енергосистеми, яка складається переважно з електростанцій малих та середніх потужностей, які будуть розташовані безпосередньо біля кінцевого споживача. Розвиток подібної енергетичної системи має на увазі зменшення кількості ліній високої та над високої напруги, що суттєво зменшує кількість втрат при передачі електричної енергії, та зменшує фінансові затрати на обслуговування ліній та обладнання.

Подібна концепція побудови мережі дозволяє користувачу самостійно здійснювати обслуговування та використання таких джерел електричної енергії, використовує всю отриману електричну енергію як йому необхідно, а надлишок продає у мережу для використання іншими споживачами. Структура такої системи дозволяє встановлювати та додавати електростанції відновлюваних джерел електричної енергії майже у будь якій точці приєднання, що спонукає до збільшення кількості об'єктів відновлюваних джерел електричної енергії (ВДЕ) та спорудження нових гібридних електростанцій малої та середньої потужності.

В Україні за 5 років завдяки державному стимулюванню розвитку ВДЕ суттєво збільшилась кількість «зеленої» генерації. Створення зелених

тарифів, що будуть діяти до 2030 року збільшило кількість об'єктів сонячних електростанцій (СЕС) приватних домогосподарств від декількох десятків пілотних проєктів до десятків тисяч уже встановлених приватних станцій, що генерують майже 300 МВт встановленої потужності. Станом на 30.06.2019 в Україні встановлено 11 888 приватних СЕС [1]. Загальна кількість введених в експлуатацію об'єктів відновлюваних джерел енергії наближається до 4 тис. МВт.

Важливим аргументом на користь ВДЕ виступає відсутність шкідливих викидів в атмосферу та відновлюваність. Збільшення кількості об'єктів ВДЕ також обумовлене заміною викопного палива, запаси якого з кожним роком зменшуються. Таким чином альтернативні джерела енергії зменшують залежність від необхідного, безперебійного постачання паливних ресурсів та забезпечують енергетичну безпеку та автономність.

Виробництво сонячної енергії за рахунок використання енергії вітру та сонця розвиваються дуже стрімко і постає питання в акумуляції електричної енергії, адже сонце світить обмежену кількість годин, а інтенсивність повітряних потоків може змінюватись та зникати взагалі. Сонячну активність легше спрогнозувати ніж вітер, тому СЕС займає найбільшу частку ВДЕ. Прогнозуючи сонячну активність протягом доби, можна виділити період коли сонце в зеніті, саме в такі години генерація СЕС досягає пікових значень і при великій кількості потужності, що генерується з'являється необхідність в акумуляції, або продажі надлишкової електроенергії. Розвиток акумуляторних систем обумовлений розвитку ВДЕ, адже самостійне забезпечення енергоресурсами та можливість їх акумуляування зменшує залежність від енергоресурсів.

Наявність декількох джерел, що генерують електричну енергію в електричній системі збільшує кількість варіантів забезпечення електроенергією та надає безперебійне постачання енергії. Конкуренція серед можливих постачальників електроенергії збільшується за рахунок зростання кількості генеруючих станцій, що в свою чергу призводить до

зменшення ціни на електроенергію. Таким чином кінцевий споживач, що не має власної генерації отримує якісну та не дорогу електричну енергію у майже необмеженій кількості.

Енергоефективність на сам перед залежить від структури енергетичної системи, від комбінації генеруючих систем (вітрова турбіна, сонячні панелі) та можливістю акумулювання електроенергії. Планування структури енергетичної системи є алгоритмічно складною задачею, а вибіркоче встановлення генеруючих потужностей, які мають можливість акумулювання суттєво ускладнює подібні задачі. Ефективність такого процесу залежить від наявності сучасних методів та інструментальних засобів, завдяки яким шляхом моделювання, ще на етапі проектування можливо врахувати безліч негативних факторів, які можуть з'явитися після початку експлуатації.

Визначення ефективності потребує проведення аналізу перспективи використання ВДЕ та централізованого акумулювання електричної енергії з використанням відновлюваних джерел електричної енергії шляхом дослідження складових структури гібридної системи енергозабезпечення кінцевого споживача.

1. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ДЛЯ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ

1.1. Світові тенденції розвитку відновлюваних джерел енергії

Використання паливних ресурсів та невідновлюваних джерел енергії стрімко скорочується через високі податки, збільшення кількості шкідливих викидів в атмосферу та зростання парникового ефекту, що спонукає до розвитку технологій, які дозволяють оптимально та ефективно виробляти та використовували енергетичні ресурси. Результати досліджень показують, що висока доля відновлюваних джерел енергії призводить до серйозних змін у кожному секторі енергосистем в цілому, у таблиці 1.1 представлено порівняння енергетичного балансу України, світу, ЄС та Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР).

Таблиця 1.1 – Основні показники енергетичних балансів світу, ОЕСР, ЄС та України в 2015 р.

Загальне постачання первинних енергоресурсів	Світ		ОЕСР		ЄС		Україна	
	тис. т н.е.	%	тис. т н.е.	%	тис. т н.е.	%	тис. т н.е.	%
Вугілля	3918491	28,6%	1012463	19,3%	268433	17,2%	35576	33,7%
Нафта	4349857	31,8%	2061714	39,1%	591918	37,8%	3043	2,9%
Нафтопродукти	-64557	-0,5%	-180603	-3,4%	-82930	-5,3%	7645	7,2%
Газ	2900579	21,2%	1343845	25,5%	342846	21,9%	33412	31,6%
Ядерна енергія	661353	4,8%	516273	9,8%	228456	14,6%	23191	21,9%
Гідроенергія	334945	2,4%	120471	2,3%	32248	2,1%	729	0,7%
Геотермальна, сонячна ті інші	181072	1,3%	98024	1,9%	40069	2,6%	134	0,1%
Біопаливо і відходи	1412908	10,3%	299787	5,7%	141641	9,1%	1934	1,8%
Електроенергія	2383	0,0%	395	0,0%	1333	0,1%	-725	-0,7%
Теплова енергія	2096	0,0%	899	0,0%	962	0,1%	745	0,7%
РАЗОМ	13699127	100%	5273268	100%	1564975	100%	105684	100%

За останні 10 років енергосистеми зробили значний скачок у розвитку технологій генерації, розподілення та передачі електричної енергії. Швидкий розвиток приватних станцій генерації електричної енергії відбувається за рахунок значних капіталовкладень у приватний сектор відновлюваних джерел енергії (Рис. 1.1), кількість яких зростає щорічно.

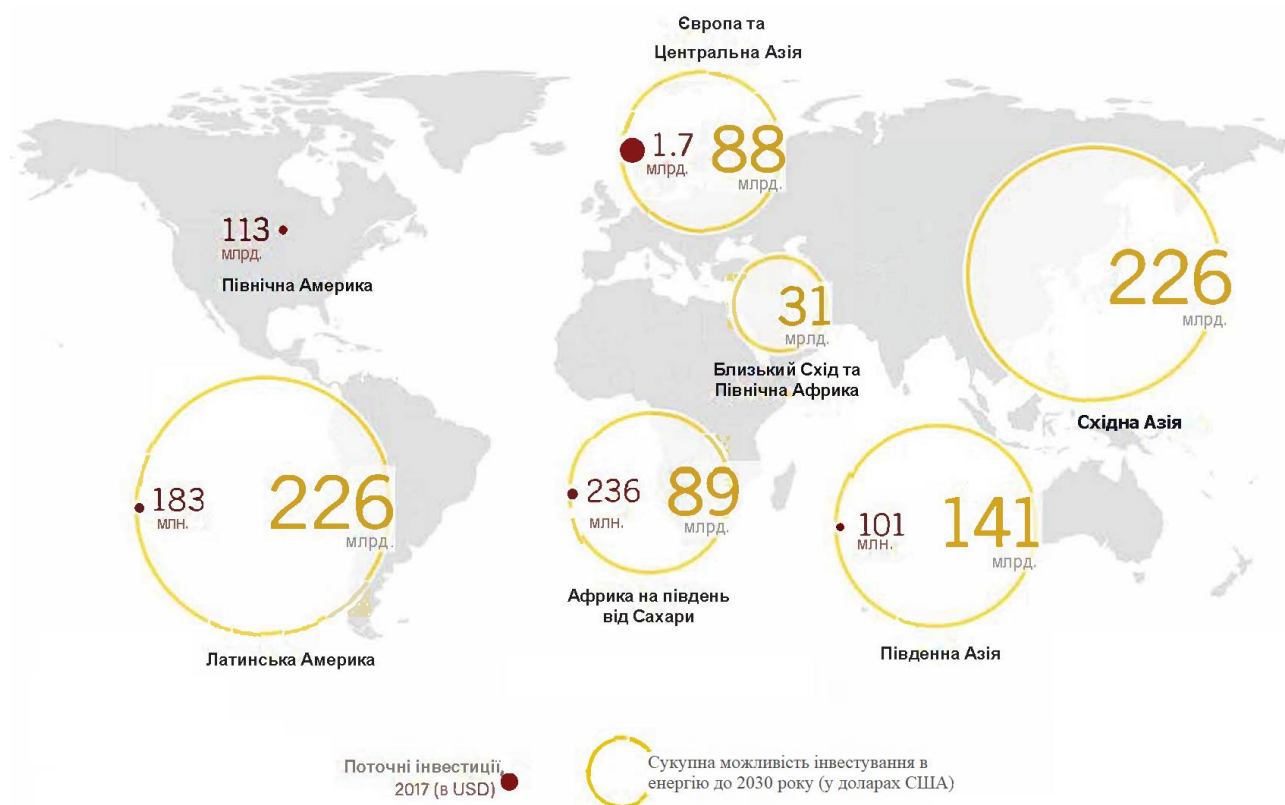


Рисунок 1.1 – Капіталовкладення у сектор приватних СЕС станом на 2017 рік

Збільшення капіталовкладень в наукові дослідження у секторі відновлюваних джерел енергії та реалізація пілотних проектів збільшується щорічно. За рахунок швидкого оновлення наукової бази технології які розробляють дозволяють максимально ефективно генерувати, передавати, розподіляти та використовувати отримані з їх допомогою енергоресурси.

Міста та муніципалітети також повинні заохочувати використання відновлюваних джерел енергії в їх вже побудованому середовищі, а також приймати ефективні централізовані районні системи, які дозволять використовувати відновлювані джерела енергії та зберігати тепло для використання пізніше, коли це необхідно. У будівельних та промислових секторах кількість теплових насосів збільшиться до понад 334 мільйонів, це

означає, що їх буде встановлено більш ніж у 16 разів більше, ніж ці високоефективні технології опалення, що діють сьогодні.

Електрифікація, автоматизація та підключення допоможуть зменшити втрати енергії, сприяти зміні поведінки у бік зменшення споживання енергії та допоможуть системам розосередженої генерації енергії збільшити їх проникнення з часом. Зокрема, у будівельному секторі енергоефективність є пріоритетним завданням для нових будівель, а також для модернізації існуючих запасів. Поєднання енергоефективності та поновлюваних джерел енергії дає велику кількість порівняно недорогих та енергоефективних рішень. До 2050 р. енергетичний сектор збільшиться майже удвічі і буде принципово трансформований завдяки додаванню понад 14 000 ГВт нових сонячних і вітрових потужностей. Сектору знадобиться більша гнучкість для задоволення добової та сезонної мінливості сонячної та вітрової енергії. Необхідні гнучкі заходи в широкому спектрі технологій та ринкових рішень [2]. Наприклад, взаємозв'язки між національними та регіональними мережами можуть допомогти збалансувати попит на електроенергію.

Інтелектуальні лічильники, які можуть забезпечити ціноутворення в режимі реального часу - тим самим сприяючи переведенню попиту на час, коли постачання електроенергії є вигідним - потрібно було б встановити у 80% житлових будинків, що призведе до збереження 9 ТВт-год.

Споживання електроенергії - 24% у 2016 році та 86% у 2050 році походить з поновлюваних джерел (Рис. 1.2). Збільшується кількість CSP, які відносяться до концентрованої сонячної енергії. До 2050 року сонячна енергетика з встановленою потужністю 8 500 ГВт, а вітер - 6 000 ГВт – що буде відповідати третині всієї світової генерації електроенергії від ВДЕ [3]. Споживання електроенергії у кінцевому секторі побутових споживачів зросте більш ніж удвічі порівняно з сьогоднішнім рівнем.

Поява нових технологій збільшує енергоефективність обладнання, а активна конкуренція на ринку енергоресурсів призводить до здешевлення електроенергії (Рис. 1.3). У більшості країн світу діють конкурентні моделі ринку електричної енергії, що дозволяє здешевити електричну енергію для

кінцевого споживача та підвищити якісні показники електроенергії. Країни у яких активно розвиваються ВДЕ створюють аукціони з відновлюваної енергії на яких протягом року продається близько 100 ГВт згенерованої електричної енергії.

Керування попитом (наприклад, у промисловості), яке може перенести навантаження на час пікового постачання електроенергії, інші форми зберігання електроенергії (наприклад, у будівлях для постачання електроенергії у вечірні години) та збільшення кількості інтелектуальних електроенергетичних мереж сприятимуть подальшій інтеграції змінних відновлюваних джерел енергії, тоді як ринкове ціноутворення в реальному часі дасть змогу оцінити вартість виробленої електроенергії в різний час.

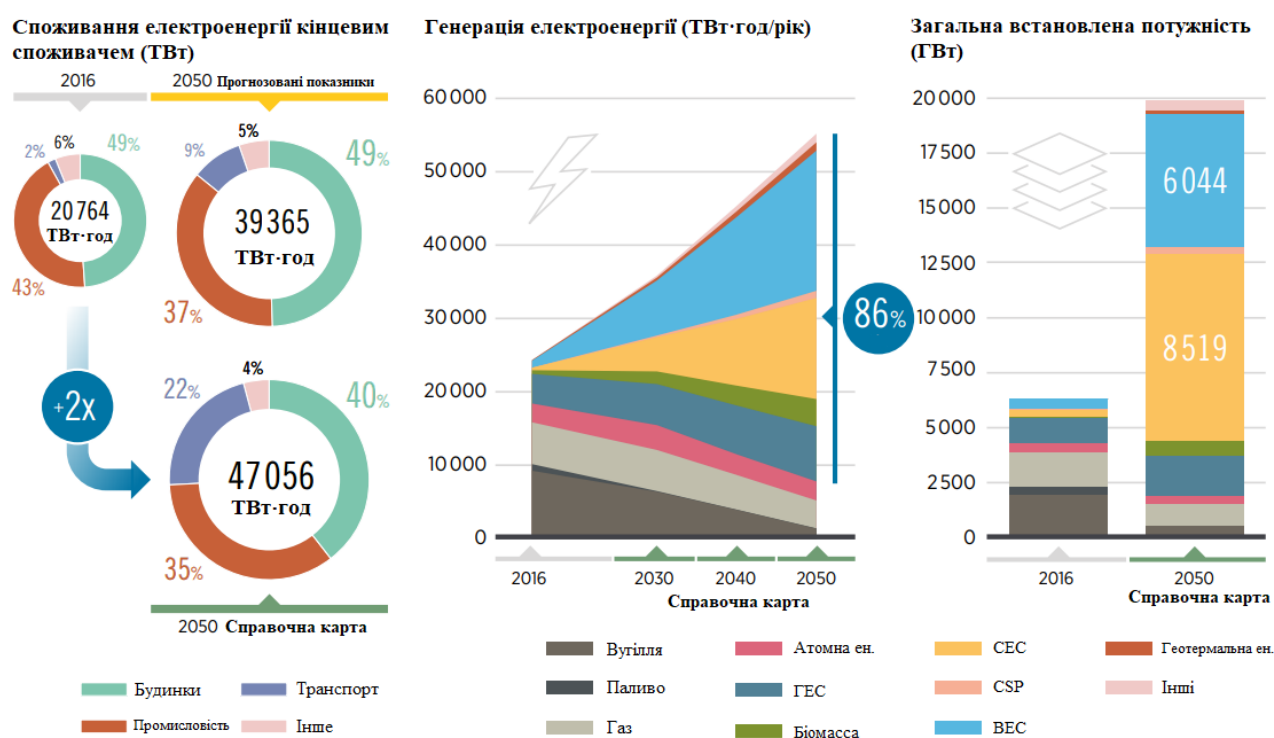


Рисунок 1.2 – Прогнозоване збільшення частки ВДЕ 2016-2050 роки

Нові регуляторні рамки повинні дозволяти новим учасникам ринку електроенергії еволюціонувати в нові електроенергетичні спільноти, змінюючи ролі комунальних підприємств, професійних споживачів та кінцевих споживачів. Розвиток електроенергетичної системи дозволяє збільшити гнучкість з боку пропозиції, що стає можливим завдяки зберіганню, мережевим з'єднанням, новим правилам ринку та експлуатації. Однак попит також має важливу роль. Тому дуже важливо створення інтелектуальної системи, що буде

в реальному часі моделювати та розподіляти електроенергетичні ресурси. Створення подібних систем ключова задача для провідних університетів та лабораторій світу.

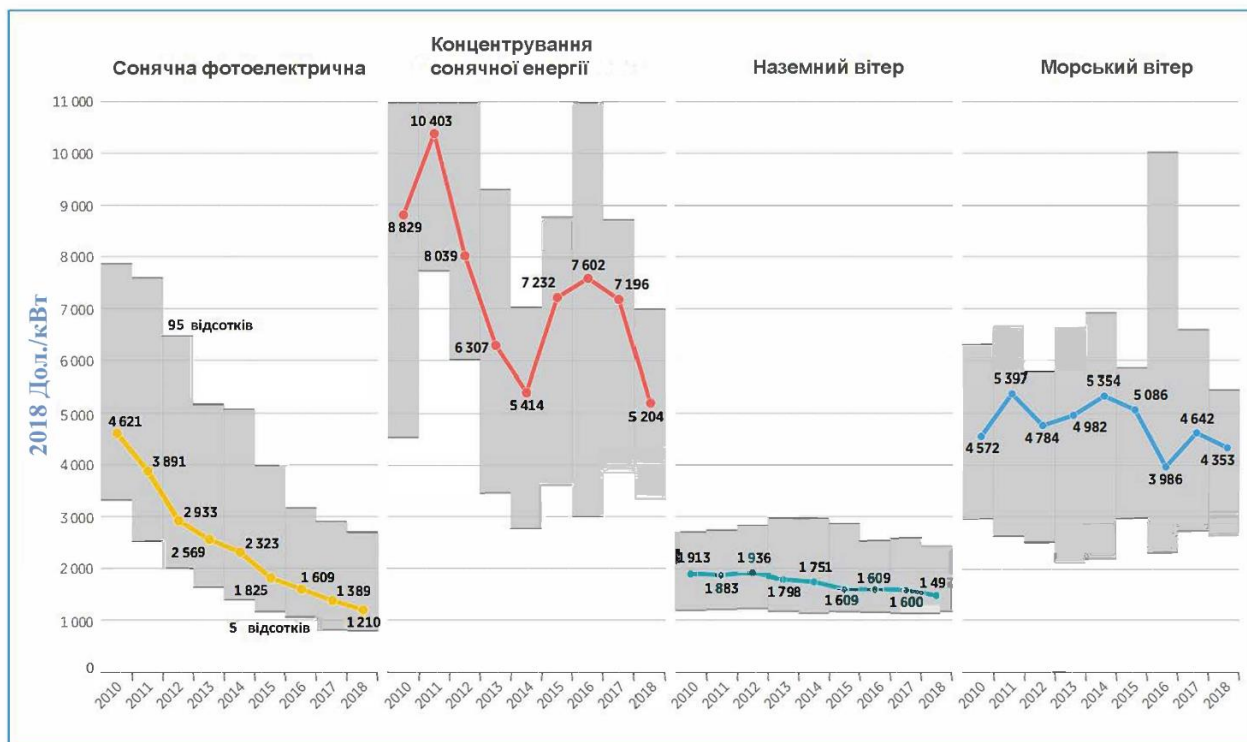


Рисунок 1.3 – Зміна вартості 1 кВт електроенергії 2010-2018

Швидкий розвиток сектору відновлюваних джерел енергії призвів до появи безлічі нових професій та надав майже 11 мільйонів робочих місць [4]. Професійний рівень персоналу щорічно зростає адже значні капіталовкладення у сектор ВДЕ дозволяють сформувати конкурентні заробітні плати для інженерів, що проектують, моделюють, будують та обслуговують як промислові так і приватні СЕС.

1.2. Аналіз Європейських досліджень по впровадженню локальних систем розосередженої генерації

Більшість розвинутих країн світу впроваджують та удосконалюють концепцію розосередженої генерації (РГ) та споживання електричної енергії, така концепція направлена на побудову енергосистеми, яка складається переважно з електростанцій малих та середніх потужностей, які будуть розташовані безпосередньо біля кінцевого споживача [5]. Розвиток

енергетичної системи передбачає зменшення кількості ліній високої та над високої напруги, що суттєво зменшує обсяги втрат при передачі електричної енергії, зменшуються фінансові затрати на обслуговування ліній та обладнання. Європейські країни, проводячи фінансування провідних університетів щороку запускають велику кількість довгострокових проектів (Рис. 1.4), головними пріоритетами яких є; дослідження моніторингу електроенергетичної системи з різними масштабами (територіальними, часовими), інтелектуальних електроенергетичних систем (ІЕС), систем РГ, керування локальними електроенергетичними системами (ЛІЕС) та автономних систем керування (нейронні мережі).



Рисунок 1.4 – Європейські проекти та стартапи в галузях моніторингу, керування та впровадження ІЕС в електроенергетичній галузі

Ключовими цілями таких досліджень виступають [6-7]:

- підвищення гнучкості електроенергетичних систем (розширення можливостей кінцевого споживача, забезпечення оптимізації потоків електричної енергії в реальному часі на глобальному та місцевому рівнях);

- підвищення надійності (розробка технологій для розосередженого контролю та керування мережею в реальному часі);
- підвищення доступності (усунення комерційних та регулювальних бар'єрів для активного попиту та повної інтеграції РГ та ВДЕ);
- впровадження економічної складової (забезпечення вигідної участі для усіх учасників ринку, забезпечення активного попиту на РГ та ВДЕ).

Фінансування дослідницької роботи за рахунок приватних інвесторів та виділення державних коштів (Рис. 1.5) на програми та дослідження впливають на розвиток електроенергетичних секторів Європейських країн [8]. Збільшення технологічної бази сприяє підвищенню комфорту кінцевого споживача за рахунок введення нових технологій ключовими показниками яких є підвищена енергоефективність, надійність та економічна доцільність. Дослідницька робота збільшує науково-технічну базу, сприяє появі нових інвестиційних програм та загальному підвищенню рівня комфорту кожного кінцевого споживача.

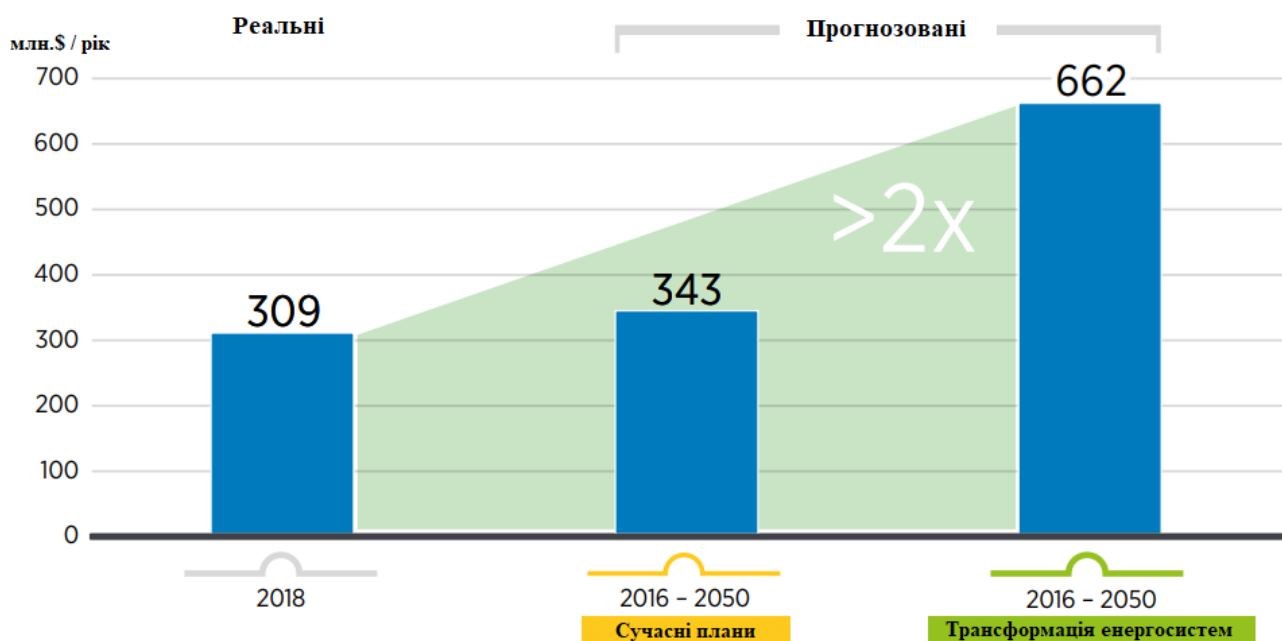


Рисунок 1.5 – Інвестиції у дослідження систем розосередженої генерації та ВДЕ

Проведення досліджень та впровадження систем РГ у діючі електроенергетичні системи проводиться в декілька етапів:

Перший етап – ґрунтується на пристосуванні систем РГ до електроенергетичної системи на локальних рівнях без значної зміни

конфігурації мережі. Більшість Європейських країн пройшли даний етап до 2015 року. Україна на даний момент знаходиться на цьому етапі, плануючи з 2020 року перехід до 2 етапу впровадження систем РГ керуючись досвідом країн ЄС.

Другий етап – створення повноцінної децентралізованих електроенергетичних мереж на локальному рівні, які повноцінно працюють разом з основною енергосистемою. Більшість Європейських країн перебувають на даному етапі, збільшуючи частку згенерованої електроенергії від систем РГ. На даному етапі розвитку системи РГ стають рівноправними учасниками електроенергетичної системи та забезпечують повноцінне живлення електроенергією кінцевого споживача. Впровадження інтелектуальних електроенергетичних систем (ІЕС) супроводжується становленням нового ринку електричної енергії з конкурентною моделлю. За рахунок переобладнання електроенергетичного сектора забезпечується надійність та підвищується енергоефективність електроенергетичного сектора. Кінцевий споживач отримує якісну електроенергію за доступною ціною, функціонал енергосистеми підвищується.

Третій етап – передбачає створення дисперсної електроенергетичної системи, в якій більшість електричної енергії виробляється системами РГ, що збільшує долю ВДЕ та призводить до зменшення шкідливих викидів в атмосферу. Станом на 2019 рік країни Європи, Німеччина, Норвегія та Великобританія, а також такі провідні країни як США, Японія, Китай та ОАЕ планують до 2025 року перейти до реалізації 3 етапу.

Результати досліджень та швидкий розвиток інтелектуальних систем збільшує матеріальну базу та дозволяє ефективно використовувати ресурси кожного споживача. Використання прикладу вже реалізованих проєктів та досліджень надає змогу швидко та максимально ефективно структурувати та реформувати електроенергетичний сектор України, використовуючи технології Європейських країн та залучаючи інвестиції в електроенергетичний сектор країни.

1.3. Актуальність впровадження систем РГ для формування інтелектуальних електроенергетичних спільнот в Україні

Глобальний розвиток інтелектуальних технологій в енергетичних секторах країн світу довів свою ефективність та необхідність в контексті модернізації існуючих енергетичних об'єднань та введення нових ІЕС на різних енергетичних рівнях [9]. Енергетичний сектор України потребує використання систем, ключовими показниками яких є швидке інтегрування та максимальна енергоефективність відносно встановленої вартості. Технічна та моральна зношеність електричного обладнання на підстанціях, втрати при передачі і багато інших чинників призводять до значних фінансових втрат [10]. Ефективність енергетичного сектору України знаходиться на дуже низькому рівні (Рис. 1.6), що призводить до збільшення економічних затрат на втрати електроенергії при генерації та передачі. Енергетичний баланс України показує (Рис. 1.7), що при перетворенні та передачі електроенергії втрачається близько 25% енергії, а значить з кожної гривні яку кінцевий споживач платить за спожиту електроенергію 0,25 грн. це плата за втрати самої електромережі [11].

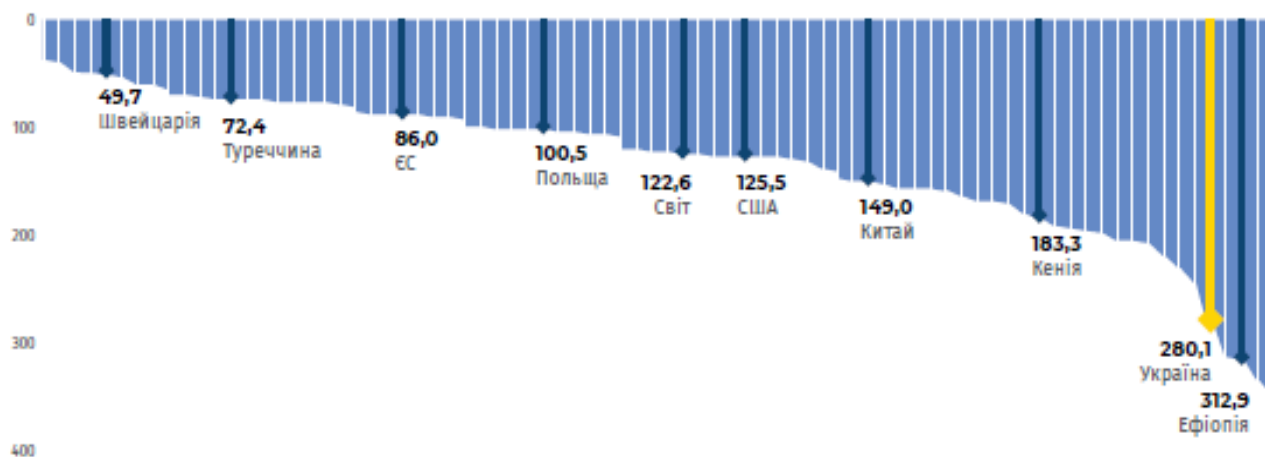


Рисунок 1.6 – Показник енергоефективності країн Світу станом на 2018 рік

Необхідність у переобладнанні підстанцій та створення нових ліній з закладанням двостороннього зв'язку (силового та інформаційного) в найближчому майбутньому надасть можливість до побудови ІЕС з підвищеною енергоефективністю. Будівництво нових мереж, підстанцій, модернізація та автоматизація приватних підприємств відбувається за рахунок економічної зацікавленості приватних осіб. Недостатність економічного

стимулювання для впровадження нових Smart технологій в ЛЕС суттєво уповільнює технічний розвиток об'єднаної енергетичної системи України (ОЕС України) в цілому.

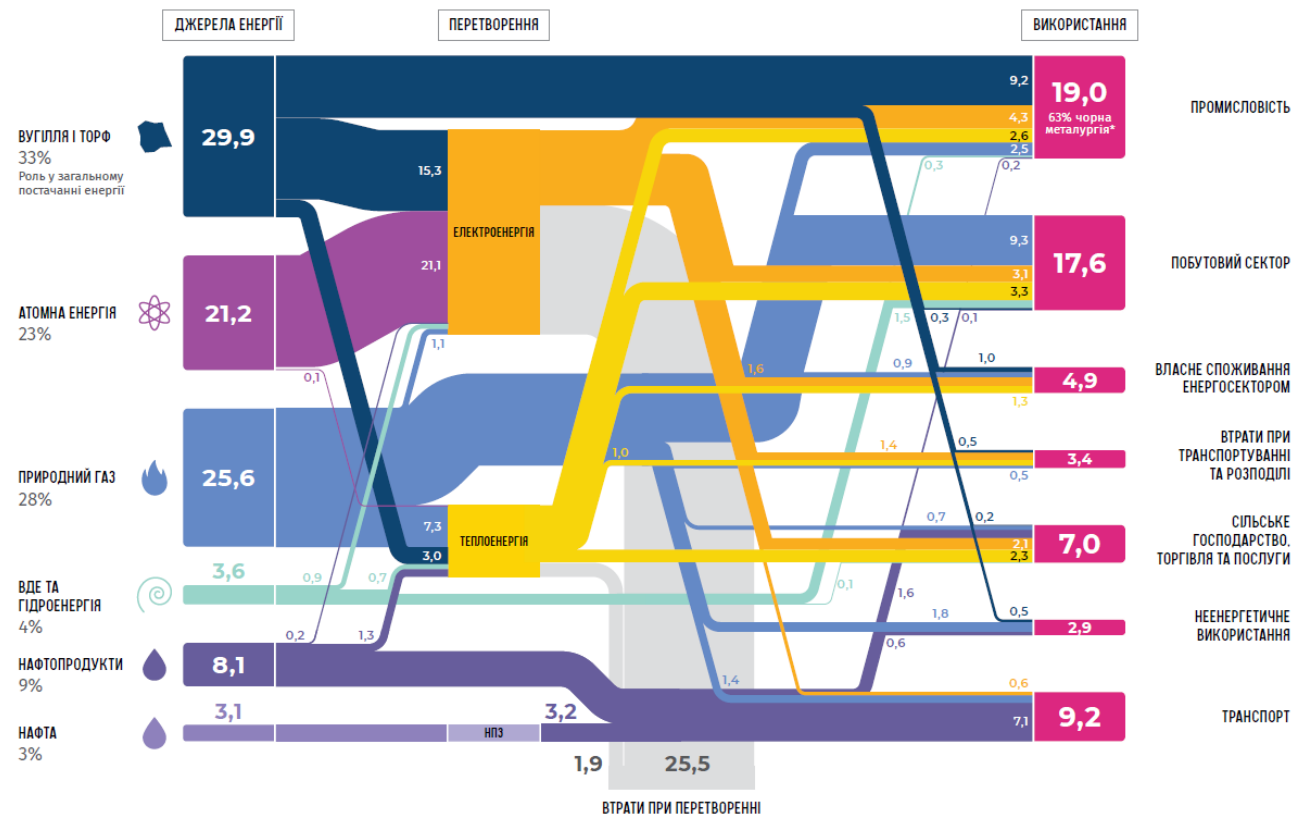


Рисунок 1.7 – Енергетичний баланс України: промисловість – основний споживач

В Україні завдяки державному стимулюванню розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) суттєво зросли обсяги «зеленої» генерації. Впровадження «зелених» тарифів, що будуть діяти до 2030 року [12]. За увесь 2018 рік встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики, що працюють за «зеленим» тарифом з урахуванням сонячних електростанцій (СЕС) приватних домогосподарств склала 848 МВт (загальна встановлено потужність 2247 МВт). Загальний обсяг введених в експлуатацію об'єктів відновлюваних джерел енергії станом на 1 півріччя 2019 року склало 3634 МВт від загального обсягу встановлених потужностей ОЕС України. Об'єкти на базі фотоелектричних установок складають 2640 МВт (73%) від загального обсягу ВДЕ, встановлених на території України. Серед них 276 МВт припадає на 11888 приватних домогосподарств [13]. За 1 півріччя 2019 року встановлена потужність ВДЕ

зросла більше, ніж за увесь 2018 рік на 14 МВт. Галузь є вкрай привабливою для надходження нових та покращення вже існуючих інвестиційних програм зі сторони країн-партнерів, що дозволило за декілька років збільшити кількість генерації від ВДЕ за 10 років більше ніж в 100 разів та сприяло розвитку ВДЕ в енергетичному секторі України.

Основною метою впровадження ІЕС на локальних рівнях, систем гнучкої генерації та агрегаторів локальних електроенергетичних систем (АЛЕС) є суттєве покращення рівня життя людей, які використовують дані системи, однак якісне і нове обладнання коштує значних фінансових вкладів, що суттєво перешкоджає інсталяції подібних систем в енергетичному секторі України.

Концепція побудови ІЕС дозволяє користувачу самостійно (онлайн) здійснювати обслуговування та використання локальних джерел електричної енергії. Збільшення кількості ЛЕС дозволяє розширити межі керування електроенергетичною системою за допомогою впровадження операторів керування / агрегаторів. Кінцевий споживач використовує всю отриману електричну енергію як йому необхідно, а надлишок продає у мережу для використання іншими споживачами, або акумулює для продажі в пікове споживання чи власного резервного користування.

У контексті розвитку Інтелектуальної Електроенергетичної Спільноти (ІЕС) - потреба в інтелектуальних підходах до керування та координації технологій різного спектру для перетворення та передачі електричної енергії добре відома [14]. Сьогодні в Україні проблему впровадження систем Smart Grid на рівні ОЕС України вже вирішується залученням системи Smart Metering [15] (інтелектуальний облік використаної та згенерованої в мережу електричної енергії) та широким розповсюдженням різного роду інтелектуальних датчиків та систем моніторингу з вбудованими алгоритмами керування. Однак необхідно створити актуальні методи для роботи зі складними мережами, визначивши певні проектні та експлуатаційні рішення для систем, які матимуть широкий спектр функцій та велику кількість часових масштабів [16].

Впровадження Smart Grid призводить до суттєвого покращення рівня життя людей, які використовують дані системи, але якісне і нове обладнання коштує значних фінансових вкладів, що суттєво перешкоджає інсталяції подібних систем в енергетичному секторі України. Впровадження системи РГ дозволить зменшити оперативні затрати на передачу електроенергії та дозволить скоротити залежність України від паливних ресурсів (Рис. 1.8).

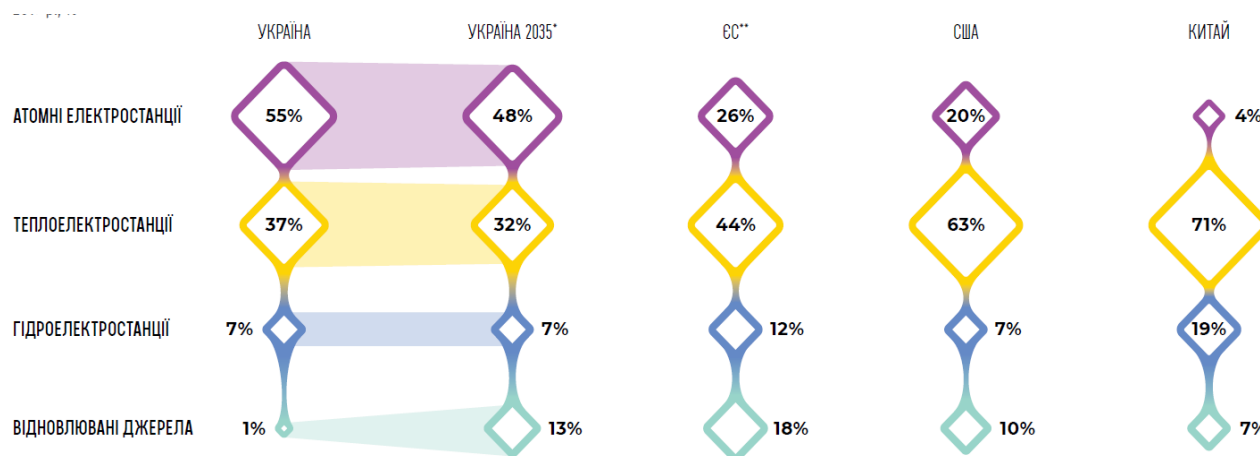


Рисунок 1.8 – Прогнозоване збільшення частки ВДЕ в Україні до 2035 р.

Стратегії розвитку енергетичної галузі України на найближчі десятиліття направлена на скорочення кількості генерації від атомних та теплових електростанцій за рахунок збільшення частки генерації від ВДЕ. Актуальність переходу до ВДЕ також обумовлена енергетичною залежністю України від паливних ресурсів. Необхідність альтернативи у енергетичному секторі спонукає до збільшення кількості реалізації пілотних проектів з декількох десятків до декількох сотень за останні 5 років.

Впровадження великої кількості нових об'єктів ВДЕ сприяє розвитку технологій, обраний напрямок, за яким Україна прямує за світовими тенденціями [17] сприяє стрімкому здешевленню нових технологій за рахунок конкуренції на ринку України. Вартість об'єктів ВДЕ розраховується шляхом використання показника LCOE [18], який за останні 6 років для електроенергетичного сектору України зменшився щонайменше в 2 рази (Рис. 1.9). Розрахунок показника LCOE проводиться за такою формулою:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n ((I_t + O\&M_t + F_t + T_t) / (1+r)^t)}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

де: LCOE – приведена собівартість електроенергії, усереднена протягом періоду n ;

I_t - інвестиційні витрати у цьому році;

$O\&M_t$ - операційні витрати та витрати на технічне обслуговування у році n ;

F_t - витрати на паливну складову у році n ;

T_t - податкові платежі у році n ;

E_t - генерація електроенергії у році n ;

r - ставка дисконтування;

n - тривалість проекту;

З точки зору розвитку всієї енергосистеми, виділяють декілька ключових цілей. Окремі цілі мають різні масштаби розвитку енергосистеми, але в цілому вони направлені на покращення якісних та кількісних характеристик електроенергії для побутового споживача, деякі з ключових цілей:

- мінімізувати фінансові операційні витрати для всіх учасників (мешканців будинків, уряду, користувачів електромобілів, власників активів, тощо);
- мінімізувати загальний вплив системи на навколишнє середовище;
- максимізувати проникнення поновлюваних джерел енергії;
- підвищення рівня комфорту кінцевого споживача.

Ці цілі можуть бути взаємовиключними, але всі вони вимагають координаційного підходу до їх вирішення. Впровадження системи управління полягає в тому, щоб оптимально координувати різні енергетичні активи в

регіоні, керуючи окремими компонентами, щоб задовольнити більш широкі системні обмеження, а також звести до мінімуму екологічні та економічні наслідки.

Складна особливість енергетичного сектора на рівні керування в його масштабі, з великою кількістю зацікавлених сторін, які мають різні цілі та стратегії розвитку. Розгляд кожного сектору незалежно від інших може привести до порушення системних обмежень вищого рівня [19]. Крім того, навіть якщо всі компоненти і системні обмеження обробляються в рамках єдиної централізованої структури керування енергосистемою, різні цілі можуть привести до суперечливих запитів. Наприклад, скорочення власного споживання у генератора, може привести до погіршення роботи системи.

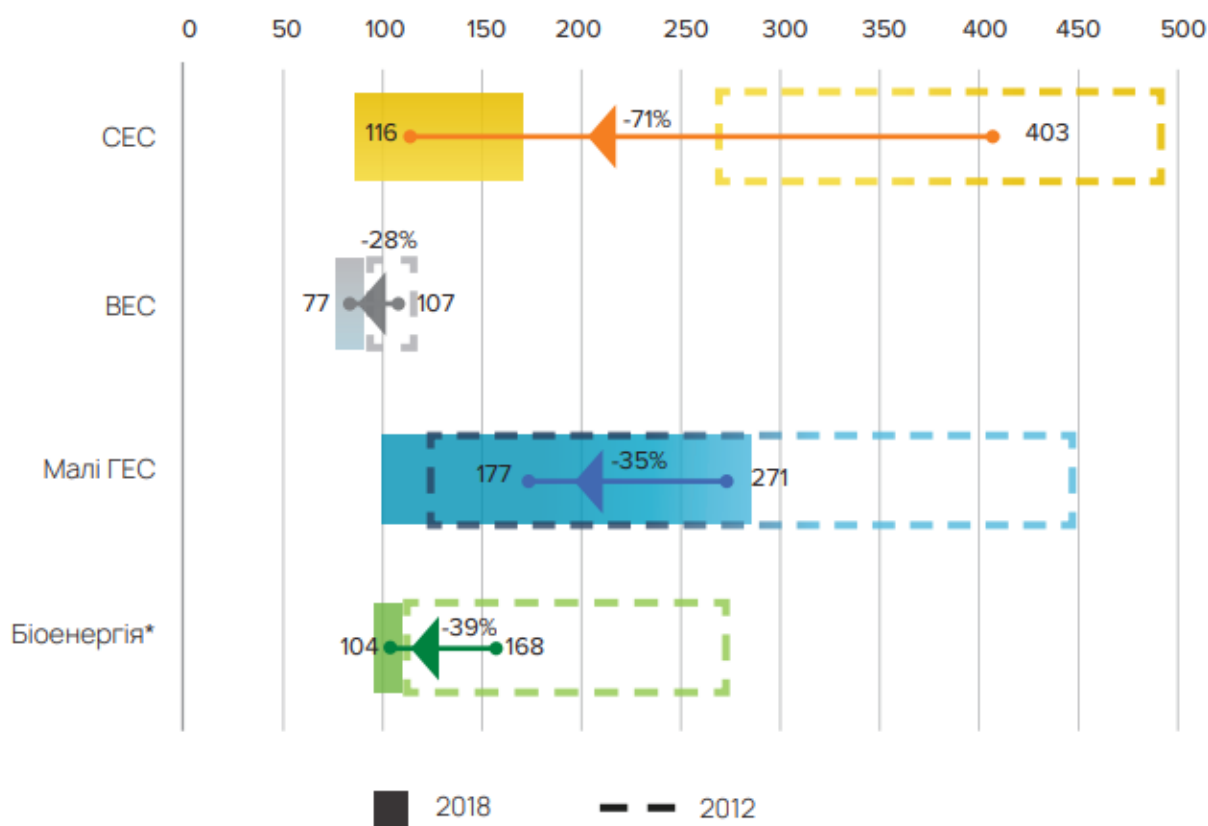


Рисунок 1.9 – Діаграма зміни LCOE в Україні для основних ВДЕ 2012 - 18 роки

Проектування та функціонування Smart систем в Україні є необхідним, адже нерегульоване збільшенням кількості об'єктів РГ в цілому негативно впливає на енергетичний сектор. Впровадження Smart мереж дозволить локалізувати певні ділянки та рівні системи для можливості місцевого регулювання шляхом введення оператора, який буде взаємодіяти між

зацікавленими споживачами та ОЕС України. Перехід до місцевого регулювання та локалізації системи дозволить скоротити кількість проміжних ланок (розподілу та постачання), що зумовить підвищення надійності та стійкості системи в цілому. Локалізація окремих ланок енергетичного сектору спонукає до появи різного виду «активних» споживачів та операторів інтелектуальних електроенергетичних систем.

1.4. Формування структурної моделі інтелектуального електроенергетичного середовища в Україні

Концепція ІЕС припускає активну роль споживача електричної енергії [20], коли він стає, з одного боку, активним суб'єктом розробки й прийняття рішень по розвитку й функціонуванню енергосистеми (як власної, так і колективної), а з іншого боку об'єктом керування, що забезпечує реалізацію ключових вимог. Зацікавлені споживачі діляться на три основні рівні: споживач (consumer) [21], «активний» споживач (prosumer) та професійний споживач з можливістю накопичування електроенергії (prosumage) [22]. Розподіл «активних» споживачів (АС) дозволяє побудувати модель інтелектуального енергетичного середовища (Рис. 1.10), з урахуванням можливостей взаємодії АС з ОЕС України та оператором, ключовими функціями якого є оперативне керування локальними електроенергетичними системами [23], координація дій інтелектуальних спільнот та інформаційна, правова підтримка активних споживачів підпорядкованого регіону.

Споживач (consumer) електричної енергії виступає зацікавленим суб'єктом ринку електричної енергії, ключовим стимулюванням його діяльності на ринку електричної енергії є зацікавленість у енергоефективному використанні електричної енергії [24]. Після переходу до нового ринку електричної енергії споживач буде зацікавлений у отриманні інформації від постачальника про зміни на ринку електричної енергії, адже зміни на ринку електричної енергії в подальшому будуть відображатись у ціні на електричну енергію та її якісних показниках. Створення конкурентної моделі на ринку електричної енергії надасть можливість для споживача самому обирати

постачальника, що в свою чергу призведе до отримання певної вигоди: зменшення споживання, зменшення вартості на електричну енергію, можливість впливати на вартість електричної енергії, покращення якісних характеристик електричної енергії та підвищення надійності.

Зі свого боку, prosumer у певні інтервали часу виступає як звичайний покупець електроенергії, але можливість генерувати електричну енергію надає йому можливість впливати на стан енергосистеми та ціни на ринку електричної енергії [25]. Розвиток АС обумовлений можливостями зменшення втрат електричної енергії та збільшення колективного прибутку. Об'єднання АС дозволяє локалізувати певні об'єкти енергетичної системи, що в свою чергу надасть більше можливостей по управлінню енергосистемою в цілому. Фінансова зацікавленість АС дозволить створити певні об'єднання на базі нових технологій в енергетичному секторі, що обумовить розвиток електроенергетичної системи за рахунок впровадження ІЕС.

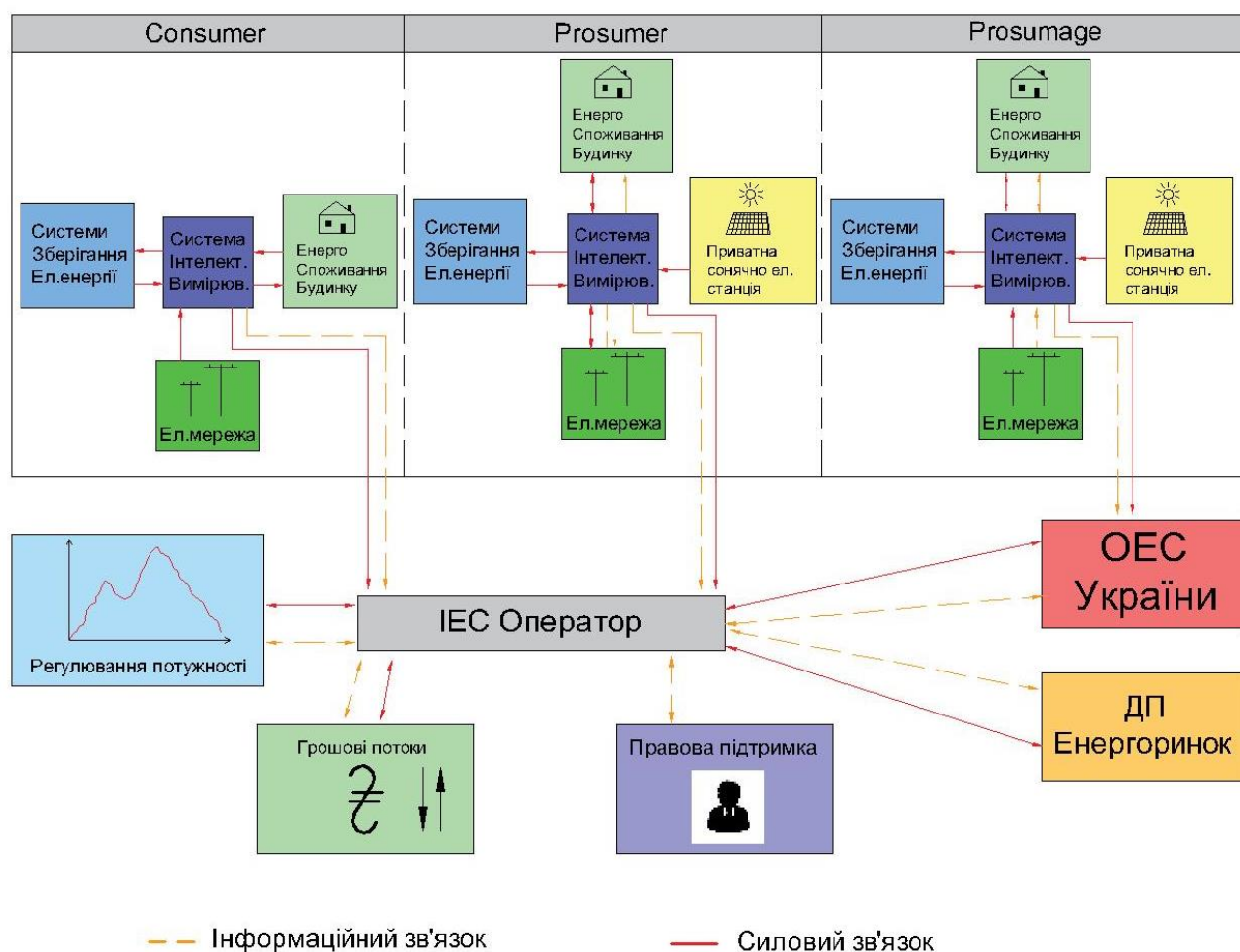


Рисунок 1.10 - Структурна модель ІЕС

Найбільшими перевагами наділений prosumage, «активний» споживач з можливістю акумулювати електричну енергію. Можливість регулювати власне споживання, генерацію та акумулювання дозволяє АС оперативно реагувати щодо змін на ринку електричної енергії. Слід зазначити, що АС спроможний впливати на ринок електричної енергії через систематичні дії [26]. Отримання найбільшої економічної вигоди спонукає до збільшення кількості АС не тільки в кількісному а й у якісному еквіваленті.

В Україні права, обов'язки та відповідальність споживачів електричної енергії визначаються законами України "Про електроенергетику", "Про захист прав споживачів", кодексом електричних мереж, кодексом комерційного обліку, правилами користування електричною енергією (які включають правила користування електричною енергією для побутових споживачів) та іншими нормативно-правовими актами [27]. Відповідно до цих законів можна оперувати наступними визначеннями при описі різновидів споживачів електричної енергії: споживач, захищений споживач, малий побутовий споживач, побутовий споживач, побутовий споживач та кваліфікований споживач.

Для кваліфікованого споживача діє ряд правил та обмежень відповідно до законодавства України. Кваліфікований споживач має право купувати електричну енергію для власного споживання на ринку двосторонніх договорів за умови, що він набув статусу учасника ринку та став стороною, відповідальною за баланс [27]. Кваліфікований споживач не має права здійснювати перепродаж електричної енергії іншим учасникам ринку. Брати участь у балансуванні мають право кваліфіковані споживачі, що відповідають вимогам правил ринку електричної енергії щодо участі у балансуванні.

На енергоринку України здійснює свою діяльність споживач з керованим навантаженням – це споживач який змінює графік свого споживання відповідно до вимог (потреб) ринку. Споживач з керованим навантаженням функціонує на ринку допоміжних послуг та на балансуєчому ринку (БР). На балансуєчому ринку він знаходиться в групі трейдерського резерву і виводиться з мережі в

складі третинного резерву для забезпечення якості електричної енергії та підтримки частотного режиму мережі.

Введення нових споживачів на новоствореному конкурентному ринку електричної енергії України збільшить кількість важелів впливу на енергетичний баланс України. Можливість керувати графіком споживання збільшить балансуючі резерви та дозволить покращити якість електричної енергії, яку отримує кінцевий споживач та підвищить енергоефективність системи в цілому.

1.5. Аналіз існуючих технічних засобів для отримання та зберігання відновлюваної електричної енергії

1.5.1. Типи та ключові параметри сонячних електростанцій

Забезпечення власних потреб в електричній енергії за рахунок відновлюваних та екологічно чистих джерел енергії стає дуже популярним. Рациональне та ефективне використання природних ресурсів дозволяє уникнути забруднення навколишнього середовища, створити власну автономну систему та суттєво зменшити фінансові затрати на електричну енергію.

Приватні сонячні електростанції з кожним роком набувають великої популярності за рахунок великих тарифів на електричну енергію, що в середньому серед країн Європи складає 3 грн/кВт [28]. В Україні встановлення приватних СЕС стимулюється «зеленими» тарифами (до 2020р. ставка складатиме [29] більше 4 гривень за кВт) на електричну енергію від альтернативних джерел енергії. Стимулювання за рахунок впровадження зелених тарифів допомогло за 5 років збільшити генерацію від альтернативних джерел енергії до 4000 МВт та сприяло становленню енергетичної незалежності країни. Сонячні електростанції в залежності від способу використання поділяються на три типи (Рис. 1.11). Надійність фотоелектричних станцій також відрізняється, як і енергонезалежність (Табл. 1.2).

Автономні фотоелектричні станції забезпечують повну автономність та дозволяють в повному обсязі покривати власні потреби від електричної енергії

не використовуючи мережеву електричну енергію. Власник автономної електростанції повністю не залежить від мережі за рахунок ефективного використання встановленого обладнання.

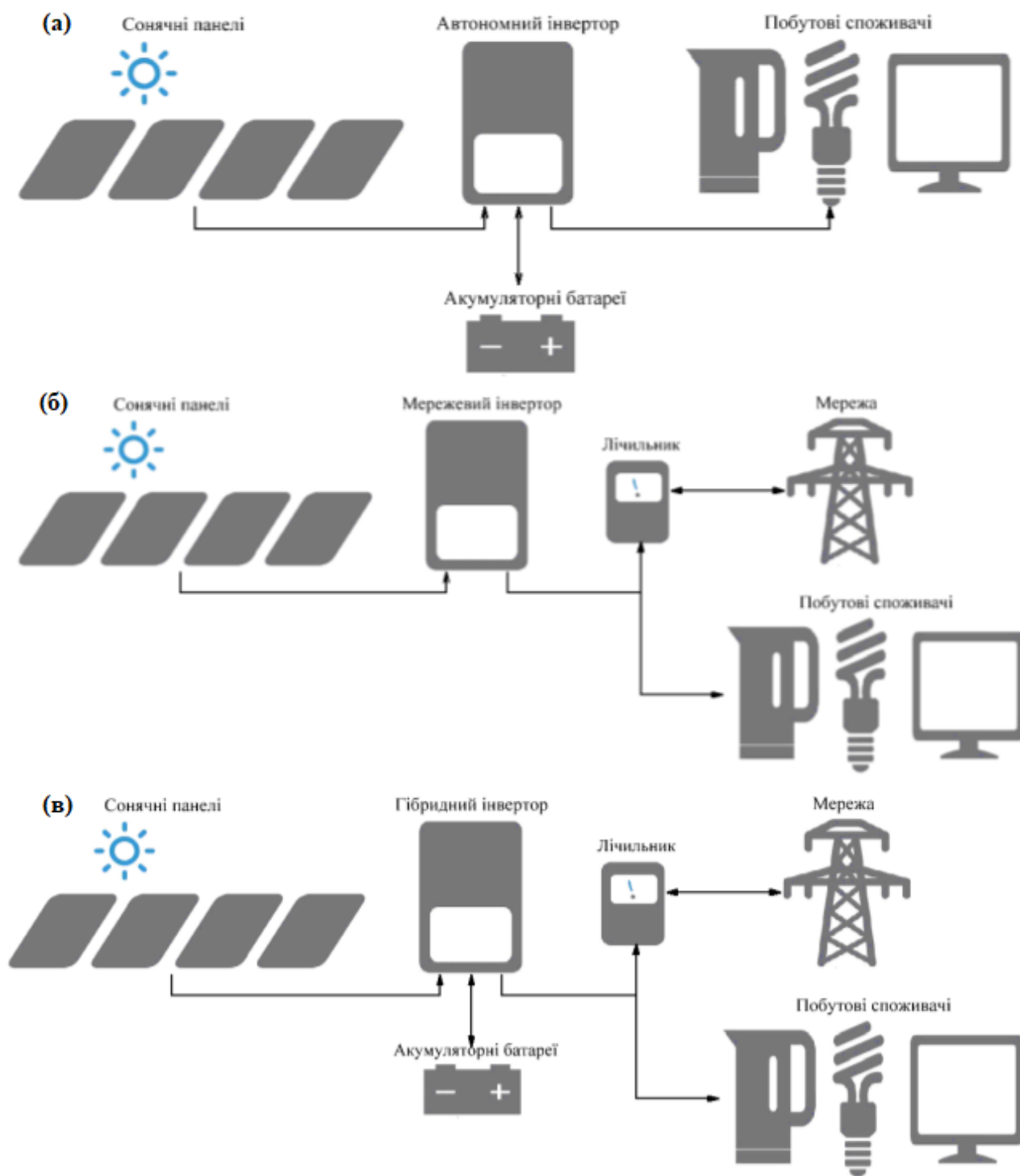


Рисунок 1.11 – Принципові схеми фотоелектричних станцій

Автономні електростанції не підтримують паралельну роботу з мережею, а забезпечують потреби споживача за рахунок акумуляування та генерації електричної енергії. Електрична енергія, яку генерує автономна електрична

станція в денний період часу, коли сонце найбільш активне використовується на власні потреби, а надлишок акумулюється за рахунок використання акумуляторних систем.

Мережеві фотоелектричні електростанції набули найбільшої популярності на території України, адже вони найбільш дешеві за рахунок меншої кількості необхідного обладнання та забезпечують надійну роботу електричних приладів споживача. Електроенергія, яку генерує мережева електростанція в реальному часі використовується на наявні власні потреби.

При необхідній потужності електростанція даного типу може повністю покривати власні потреби в електроенергії, надлишкову електричну енергію станція продає в мережу для подальшого її використання іншими споживачами. В нічний період, або час коли генерації станції не вистачає для власних потреб споживача він починає використовувати електроенергію з мережі.

Гібридна фотоелектрична станція більшість часу працює, як основне джерело живлення для споживача та забезпечення повного заряду акумуляторної системи, надлишкова електроенергія продається в мережу по зеленому тарифу. Електростанція такого типу дозволяє споживачу мати два джерела живлення, що підвищує рівень енергетичної безпеки споживача. Вночі електростанція гібридного типу покриває споживання за рахунок накопиченої в акумуляторній системі енергії.

Таблиця 1.2 – Порівняння різних типів сонячних електростанцій

Тип станції	Автономна	Мережева	Гібридна
Енергонезалежність	Так	Ні	Так
Можливість аварійного відключення	Ні	Так	Ні
Можливість продавати надлишок ел.	Ні	Так	Так
Початкові капіталовкладення	Високі	Низькі	Середні
Термін окупності, років	20-25	5-8	10-15

Конфігурація обладнання фотоелектричної станції залежить від власних потреб та необхідності споживача. Слід зазначити, що забезпечення повної

автономності від електричної мережі потребує доволі великих капіталовкладень за малий термін часу і накопичення електричної потужності за рахунок ступінчатого збільшення кількості панелей та обладнання не можливе.

Терміни окупності електростанції суттєво відрізняються за рахунок великої кількості обладнання в автономній станції та мінімальною кількістю обладнання у мережевої станції.

Електростанції різних типів мають недоліки та переваги, конфігурація електричної станції залежить від фінансових можливостей та власних вподобань споживача за умови доступної для встановлення панелей площі.

1.5.2. Геометрія сучасних напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів

Сьогодні в усьому світі повсюди активно розробляються фотоелектричні перетворювачі на основі напівпровідникових елементів для ультрафіолетової області спектру, ці перетворювачі широко використовуються в таких галузях, як;

- екологія (моніторинг розміру діри в озоновому шарі), біотехнології (синтез вітамінів та мікроелементів);
- медицина (фізіотерапія, автотрансфузія крові, профілактичне лікування катаральної хвороби);
- енергетика (генерація електричної енергії). Джерелом енергії для сонячного випромінювання;

Напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі відрізняються високою ефективністю, низькою масою та невеликими розмірами, що дозволяє ефективно зберігати та інтегрувати виявлений заряд [30]. Ультрафіолетова фото електроніка виникла в 1960-х роках, яка базувалася на кремнієвих пристроях (Рис. 1.12), оскільки кремній вже вироблявся на комерційному рівні і демонстрував хороші показники як матеріал для сонячних батарей.

Сонячні панелі на основі кремнію мали доволі просту архітектуру, але значним недоліком даного матеріалу є його висока вартість, що негативно

позначилося на розвитку фотоелектричних панелей. Випробування проведені на кремнієвих елементах привили до виникнення великої кількості напівпровідникових елементів на кремнієвій основі (Табл. 1.3), які мали ККД до 30%, що являється теоретично максимальним для кремнієвих напівпровідникових елементів.

Різноманітність напівпровідникових кремнієвих елементів обумовлена на сам перед значним збільшенням фінансування дослідницької діяльності в області сонячної енергетики. Спроба знайти альтернативне вирішення проблеми дефіциту паливних ресурсів призвела до щорічного зростання кількості встановлених сонячних панелей.

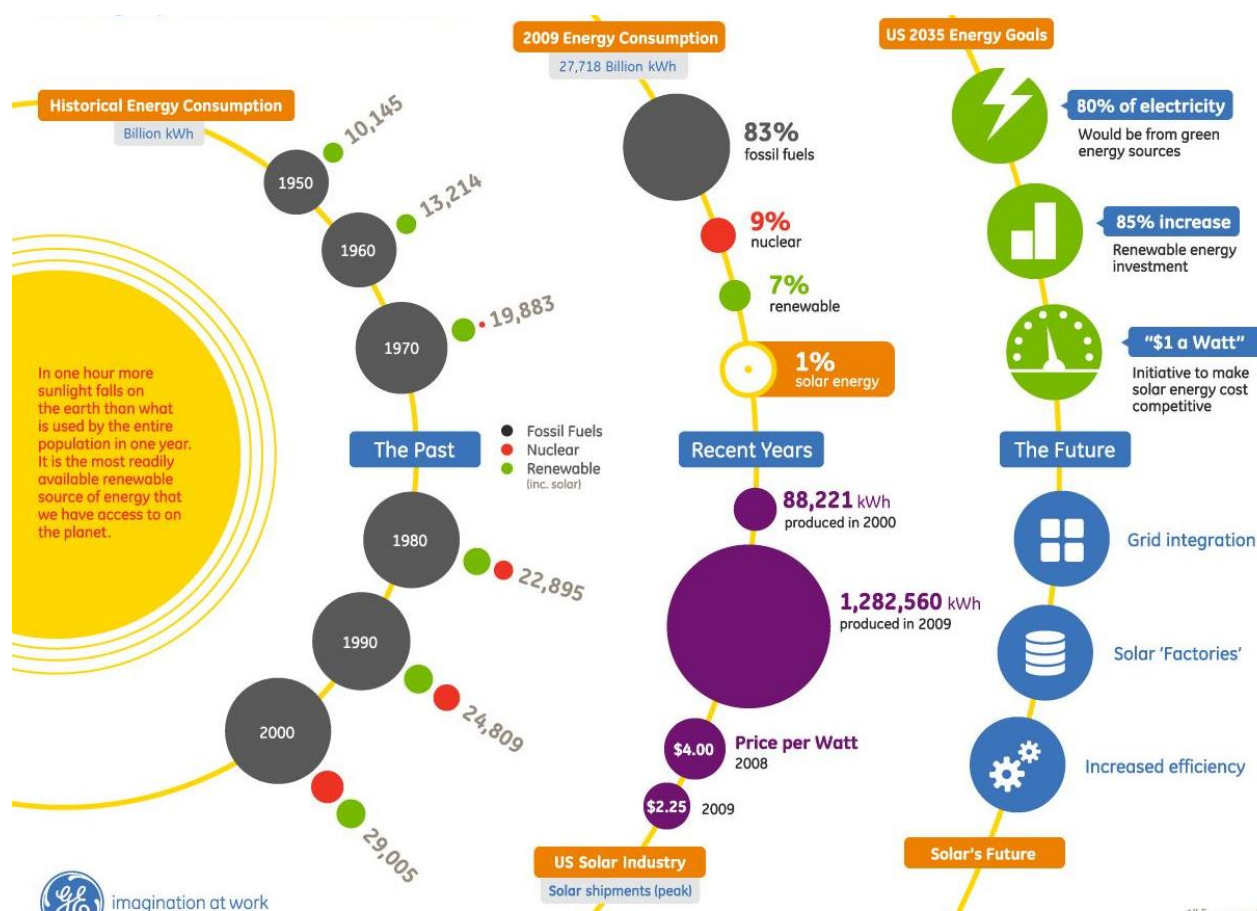


Рисунок 1.12 – Розвиток сонячної енергетики

Розвиток сонячних електростанцій (СЕС), спроби застосування на різних територіях Землі та в космосі дали змогу дослідити та проаналізувати їх ефективність. Тому в наш час ринок на 80% заповнений панелями [31], у яких такий показник як «ціна-ефективність» випереджає інші моделі, тому найбільшу долю ринку займають кристалічні та аморфні кремнієві панелі.

Таблиця 1.3 – Значення коефіцієнтів фотоелектричного перетворення кремнієвих напівпровідників.

Індекс	Тип	Коефіцієнт фотоелектричного перетворення, %
Кремнієві		
Si	Кристалічні	24,7
Si	Полікристалічні	20,3
Si	Тонко плівкова передача	16,6
Si	Тонко плівковий су модуль	10,4
III - V		
GaAs	Кристалічний	25,1
GaAs	Тонко плівковий	24,5
GaAs	Полікристалічний	18,2
InP	Кристалічний	21,9
Тонкі плівки селікогенідів		
CIGS	Фотоелемент	19,9
CIGS	Су модуль	16,6
CdTe	Фотоелемент	16,5
Аморфний / Нано кристалічний кремній		
Si	Аморфний	9,5
Si	Нано кристалічний	10,1
Фотохімічні		
На базі органічних барвників		10,4
На базі о.б. (су модульні)		7,9
Органічні		
Органічні полімери		5,15
Багатошарові		
GaInP/GaAs/Ge		32,0
GaInP/GaAs		30,3
GaAs/CIS (тонко плівкові)		25,8
a-Si/mc-Si (тонкий су модуль)		11,7

Монокристалічні панелі виробляються з найчистішого кремнію, тому ціна на панелі є найвищою серед представлених. Висока вартість виробництва обумовлена складністю орієнтації всіх кристалів кремнію в одному напрямку. Використання таких фізичних властивостей дозволяє досягти максимального ККД, за умови перпендикулярного падіння сонячних променів на поверхню панелей, тому для отримання максимальної ефективності необхідно додатково встановити трекову систему.

Серед переваг монокристалічних панелей слід виділити їх великий термін служби та малі габарити при великій ефективності. Недоліками виступають велика вартість та чутливість до забруднення. Монокристалічні панелі потребують значних капіталовкладень, тому термін окупності СЕС на монокристалічних панелях максимально великий, що суттєво зменшує економічну привабливість даного типу панелей.

Полікристалічні панелі виготовляються з кремнію, чистота якого значно менша ніж чистота кремнію для аналогічних монокристалічних панелей. Різностороння направленість кристалів кремнію дозволяє отримати максимальний ККД при розсіяному освітленні - 12-18%. ККД таких панелей нижче ніж у монокристалічних панелей, але при пахмурній погоді ситуація змінюється на користь полікристалічних панелей. Панелі з полікристалічного кремнію не потребують встановлення трекових систем, тому для їх розміщення найчастіше використовують дахи будинків та приватних підприємств. Серед переваг також слід виділити малу вартість, доволі великий час експлуатації та можливість встановлення на даху будинку. Недоліками таких панелей є знижений ККД (12 – 18%) та збільшені габаритні розміри.

Сонячні панелі з аморфного кремнію виготовляються принципово іншим методом. Для виготовлення панелей з аморфного кремнію використовується не сам кремній, а його гідрид, гарячі пари якого осідають на спеціальну підкладку. В результаті використання такої технології кристали кремнію не утворюються, що суттєво зменшує вартість панелей з аморфного кремнію. На даний час існує три покоління панелей на основі аморфного кремнію, якщо панелі першого покоління мали ефективність 4-5%, то панелі третього покоління досягли ефективності 12%. Досягти таких характеристик дозволила фізико-хімічна структура аморфного кремнію, яка дозволяє поглинати максимально багато фотонів слабого розсіювання світла. Переваг у панелей на базі аморфного кремнію безліч, до них можна віднести універсальність при використанні, стабільна робота, простота та надійність конструкції, можливість виготовляти

гнучкі панелі. До недоліків можна віднести лише потребу у великій площі для встановлення СЕС великої потужності та малий термін служби.

Характеристики та показники ефективності панелей з аморфного кремнію, полі та монокристалу відрізняються (Рис. 1.13) при різному освітленні, тому застосування окремо взятого типу панелей визначається умовами експлуатації СЕС, навколишнім середовищем та територіальним розташуванням станції. Вибір матеріалу панелей залежить від призначення, розміщення та конфігурації станції.

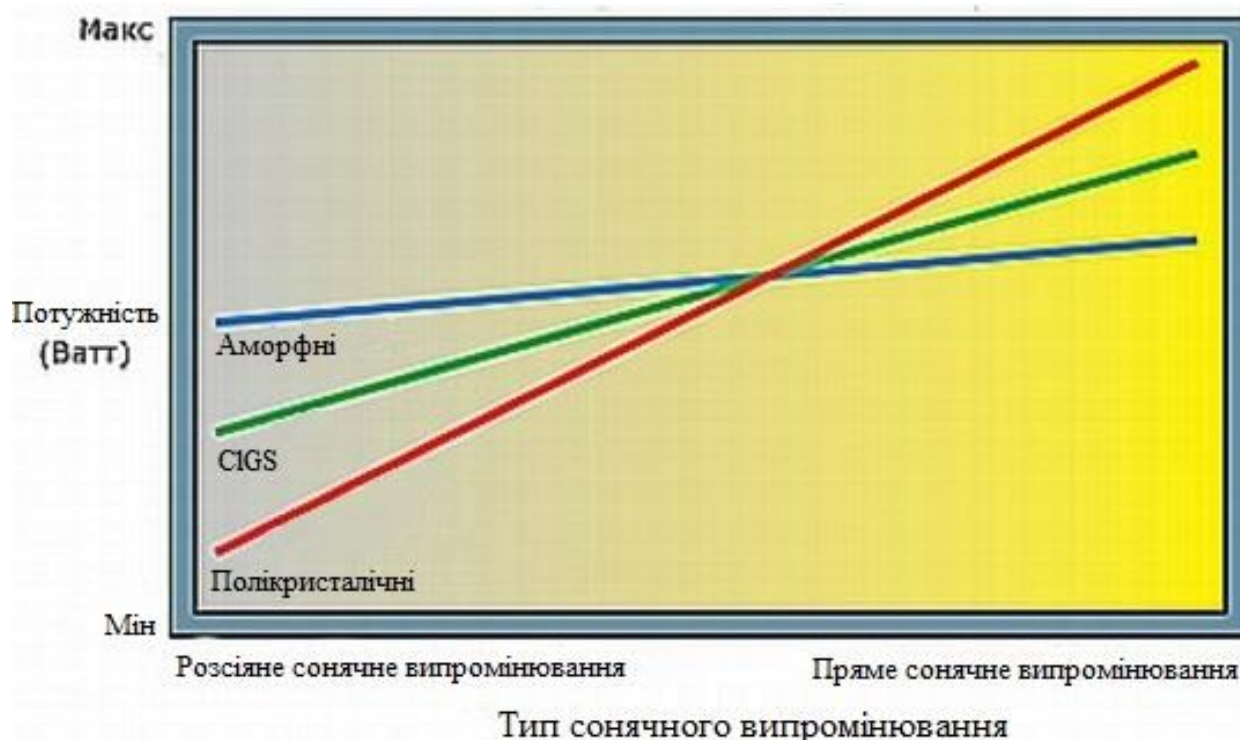


Рисунок 1.13 – Порівняння ефективності елементів на кремнієвій основі

На території України найбільшої популярності набрали панелі з полікристалічного кремнію, саме такі панелі використовують при будівництві промислових СЕС на десятки МВт. Приватний сектор також у більшості віддає перевагу полікристалічним панелям, але 15% ринку приватного сектору припадає на монокристалічні панелі. Панелі з аморфного кремнію використання на території України майже не знайшли через малий термін служби даного типу панелей. Аналіз ефективності використання окремо взятого типу панелей відбивається ще на етапі моделювання та проектування

станції, адже навіть невеликі відхилення ефективності при довгостроковій експлуатації можуть призвести до суттєвих фінансових втрат в майбутньому.

1.5.3. Аналіз та класифікація інверторів для СЕС

Сонячна енергія стає одним з найбільш популярних джерел енергії, на сьогодні велика кількість побутових, промислових та комерційних приладів використовують сонячну енергію в якості джерела живлення. Енергія, що генерується завдяки сонячному випромінюванню є ключовим джерелом для скорочення шкідливих викидів в атмосферу. Можливість використовувати сонячну енергію створює велику кількість варіантів ефективного впровадження енергоефективних та екологічно чистих механізмів та пристроїв, що звільняють людину від електричної залежності.

Ключовим елементом сонячної станції виступає інвертор, головним завданням якого є перетворення постійного струму, що надходить від фотоелектричних панелей в змінний струм, який використовує споживач. Існує три типи інверторів;

Автономний інвертор підключається безпосередньо до панелей та акумуляторних систем, його головна задача це конвертування електричної енергії в придатну по характеристикам для споживача. Інвертори автономного виконання не контактують з електричною мережею, вони мають малий діапазон потужності та обмежений функціонал (Табл. 1.4). Автономні інвертори виробляють на потужності до 8 кВт, адже такої потужності достатньо для автономної електростанції спроектованої з урахуванням всіх особливостей обладнання у будинку та технологічних характеристик встановленого обладнання самої СЕС.

Мережевий інвертор підключається до поля фотоелектричних панелей та безпосередньо до електричної мережі. Інвертори такого типу найбільш поширені на теренах України, адже саме такі інвертори використовуються для мережевих електростанцій приватного та промислового використання за «зеленим» тарифом. Діапазон потужностей таких інверторів може досягати 1000 кВт.

Таблиця 1.4 – Порівняння функцій інверторів різного типу.

Модель інвертора	Можливість підмішувати потужність від мережі (пріоритет сонячні панелі)	Додавання потужності інвертора до мережевої	Можливість підключення мережевого інвертора на вхід	Регулювання частоти на виході в залежності від $U_{акб}$	Режим переключення АКБ-мережа (залежить від рівня АКБ.)
Studer Xtender	+	+	+	+	+
SMA Sunny	+	+	+	+	+
Conext SW I	+	+	-	-	+
Інвертори с можливістю перемикавання мережа - АКБ					
Victron Quattro	-	+	+	+	+
Prosolar	-	-	-	-	+

Гібридний інвертор має найбільший функціонал серед всіх типів інверторів, але його ціна найвища серед перелічених інверторів. Інвертори гібридного типу використовують як енергію, що генерується фотоелектричними моделями, так і енергію електричної мережі, але схематично перевага віддається постійному струму від фото модулів. Гібридний інвертор має безліч переваг: забезпечує безперебійне живлення для споживача, збільшення обмеження потужності від електричної мережі, можливість створювати «енергетичний буфер».

1.6. Аналіз програмного забезпечення для моделювання локальних електроенергетичних систем на базі ІЕС

Збільшення кількості ІЕС спричиняє збільшення надходження цифрової інформації, яка описує процеси генерації, розподілу та передачі електричної енергії. Отримані дані можливо в подальшому використовувати для побудови нових мереж з урахування вже існуючих обмежень. Багато країн докладають великих зусиль для пошуку збільшеного проникнення систем РГ в електроенергетичні системи. Враховуючи невизначеність та складність у прогнозуванні генерації від систем РГ створено безліч методів оцінки та різноманітне програмне забезпечення (Табл. 1.5), що дозволяє моделювати та проектувати електроенергетичні системи різних масштабів [32].

Таблиця 1.5 – Аналіз програмного забезпечення для моделювання ЛЕС

		Найменування ПЗ для моделювання гібридних систем ВДЕ в різних географічних районах																							
		EnergyPLAN	WILMAR	INFORSE	PERSEUS	SimREN	Invert	EMPS	IKARUS	NEMS	ProdRisk	WASP	EnergyPRO	HOMER PRO	MARCAL/TIMES	ETEM	MODEST	PV Syst	DEECO	Matlab/Simulink	RETScreen	REMix	LEAP	H2RES	SOMES
Географічний масштаб	Глобальний / Національний	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Ч	Ч	Г	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч
	Регіональний / Державний	Г	Г	Г	Ч	Г	Г	Ч	Г	Ч	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Ч	Г	Ч	Ч
	Місцевий / Віддалені райони	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Ч
	Спільнота / Будинок	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Г	Ч	Ч	Ч	Г	Ч	Ч	Г	Ч	Ч	Ч	Г
Можливості програмного забезпечення	Безкоштовне користування	Г	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Ч	Ч	Ч	Г	Ч	Г	Ч	Г	Ч	Г	Г	Г	Ч	Ч	Ч
	Симуляція системи	Г	Г	Ч	Г	Г	Г	Ч	Ч	Ч	Г	Г	Г	Г	Ч	Г	Г	Г	Г	Г	Ч	Г	Г	Г	Г
	Балансування системи	Ч	Ч	Г	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Ч	Ч	Ч
	Операційна оптимізація	Г	Г	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Ч	Ч	Г	Ч	Г	Г	Ч	Г	Г	Г	Г	Г	Ч	Ч	Ч	Г	Ч
	Економічна оптимізація	Г	Ч	Г	Г	Ч	Г	Г	Ч	Ч	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Ч	Г	Г
	Наявність Укр. інтерфейсу	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч
	Завантаження власних даних	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Г	Ч	Г	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Ч
	Підказки при моделюванні	Ч	Ч	Г	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Ч	Ч
Галузі енергетики	Банк. фінансування за звітом	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Ч	Ч	Ч	Ч
	Енергетичний сектор	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г
	Тепловий сектор	Г	Ч	Г	Г	Г	Г	Ч	Г	Г	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г
	Транспортний сектор	Г	Ч	Г	Ч	Ч	Ч	Ч	Г	Г	Г	Ч	Ч	Ч	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Ч	Г	Ч	Ч

Слід зазначити, що програмне забезпечення EnergyPLAN, HOMER PRO, SMA Sunny Design, RETScreen та PVSyst є у відкритому доступі з можливістю безкоштовного використання, що суттєво здешевлює процес моделювання та оцінки систем. Також слід виділити програмне забезпечення HOMER Pro та RETScreen воно надає можливість використовувати результати розрахунків для отримання банківського фінансування проекту, що є надзвичай ваговою перевагою. Серед розглянути програм є такі, що не мають українського інтерфейсу, що створює перешкоди для використання. Актуальним на даний час є створення виключно українського програмного забезпечення з урахуванням нормативно-правової бази та дотриманням національних стандартів з можливістю отримання довгострокового кредитування для енергоефективних та економічно доцільних проектів.

Для отриманні актуального прогнозу доцільно використовувати декілька програм, а отримані висновки та результати розрахунків систематизувати для отримання найкращого рішення. Однак використання приведеного програмного забезпечення не можна використовувати, як остаточний критерій для побудови власної електричної системи. Тому доцільно розробити власне програмне забезпечення та алгоритм, щодо побудови таких систем.

Нормативно-технічна база для впровадження локальних електроенергетичних систем розосередженої генерації на основі технологій Smart Grid

При встановленні конкурентної моделі на ринку електроенергії постачальник, який використовує інтелектуальні мережі, буде отримувати чітку інформацію з потрібними часовими масштабами щодо споживання окремо взятого споживача [33]. Побудова статистичних графіків споживання в реальному часі дозволить зрозуміти потреби, які необхідно задовольнити, а при конкурентній моделі буде спонукати постачальника до більш чіткого аналізу, для збільшення кількості споживачів (Рис. 1.14).

Обробка даних, які в реальному часі та у великій кількості буде отримувати оператор від АС необхідно обробляти, перетворювати в

інформацію та статистичні дані, на основі яких проводити розрахунки для оперативного керування інтелектуальною системою вимагає великої кількості обчислювальної потужності [34]. Забезпечення регуляторної бази відбувається за рахунок створення стандартів, дії яких розділяються в залежності від напрямків обробки даних.

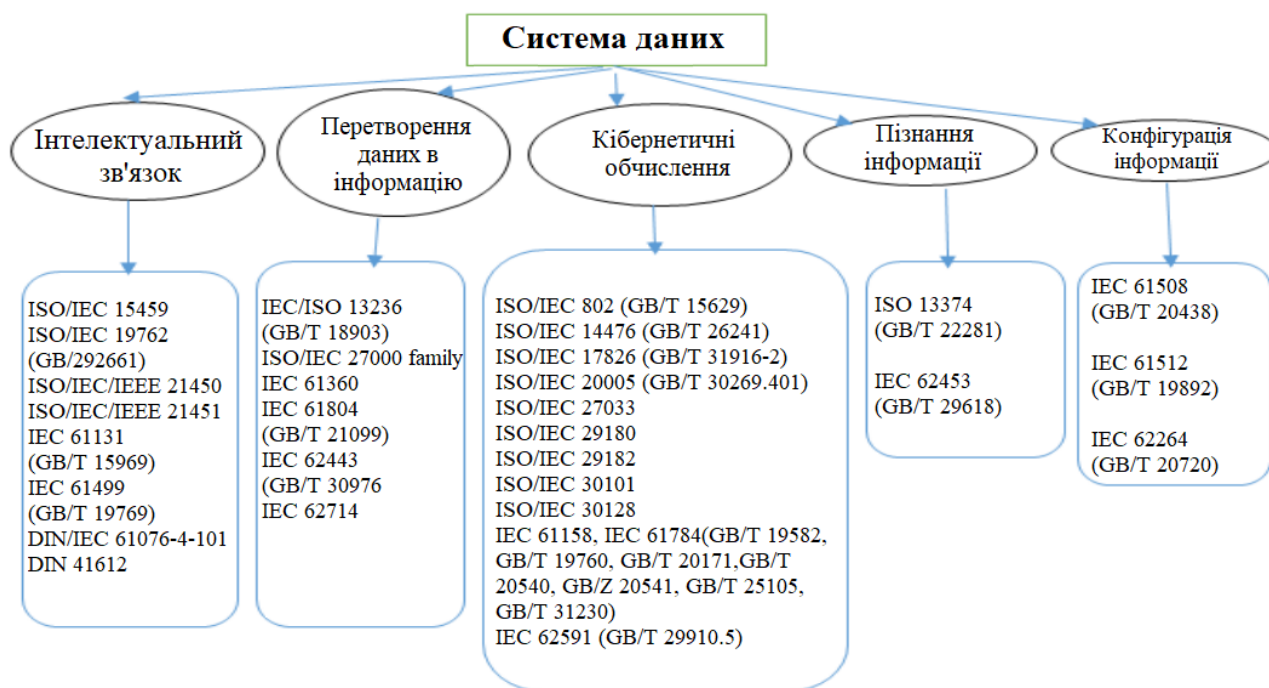


Рисунок 1.14 - Стандарти обробки інформації

Європейські компанії спільно з провідними інститутами стандартизують оперативне керування інтелектуальними системами [35]. Інтелектуальними системами розділяються в залежності від масштабів та складності, що дозволяє структурувати інформаційні потоки. Слід виділити комплекс стандартів IEEE 1547, який містить ряд документів, присвячених різним аспектам забезпечення взаємодії та зв'язності між розподіленими ресурсами, інтегрованими до складу енергетичних систем, і складається з таких частин:

- IEEE 1547.1 – стандарт загальної процедури відповідності випробувань приєднання розподілених джерел енергії до енергосистеми;
- IEEE 1547.2 – визначає деталізовані вказівки приєднання на паралельну роботу;
- IEEE 1547.3 – вимоги по обміну інформацією, моніторингу та контролю розподілених джерел енергії;

- IEEE 1547.4 – вимоги до обладнання та його експлуатації у відокремлених локальних енергосистемах з розподіленими джерелами енергії;
- IEEE 1547.5 – призначений для розподілених джерел енергії потужністю вище 10 МВА;
- IEEE 1547.6 – практичні аспекти підключення розподілених джерел енергії до розподільчих мереж;
- IEEE 1547.7 – керівництво по визначенню впливу малої генерації на енергосистему;
- IEEE 1547.8 – методичні рекомендації щодо впровадження IEEE 1547

З точки зору розподільних мереж високий рівень впровадження локальних енергетичних мереж, таких як системи акумулявання, електромобілі та регульовані пристрої змінили традиційну концепцію енергетичної системи та призвели до ускладнення розподільчих мереж. Зміни у енергетичній системі призводять до збільшення вимог що до надійності ОЕС України.

Розробка нових стандартів та законів для регулювання як окремих локальних мереж так і більш високих електроенергетичних рівнів вкрай необхідна. У період становлення нового ринку електричної енергії необхідно розробляти та впроваджувати нові стандарти [36], що будуть регулювати діяльність кожного з суб'єктів електроенергетичної системи в не залежності від масштабу.

Створення нормативно-правової бази допоможе стандартизувати велику кількість обладнання, що використовується в інтелектуальних електроенергетичних системах, програмне забезпечення на основі якого будуються системи інтелектуального керування вузлами електроенергетичних систем як локальних так і магістральних вузлів.

Стандартизація дозволяє в подальшому прискорити впровадження, установку та ввід в експлуатацію нових об'єктів електроенергетичних систем на базі інтелектуальних електроенергетичних систем. Досвід провідних країн

Європи показує, що стандартизація суттєво прискорює виконання нових проектів у енергетичному секторі та допомагає підвищити якість та надійність обладнання, що встановлюється.

1.7. Висновки по розділу

1. Стрімкі темпи розвитку ВДЕ та інтелектуальних електроенергетичних технологій призводить до підвищення енергоефективності енергетичного сектору. Розвиток технологій призводить до здешевлення обладнання, що застосовується у секторі ВДЕ за рахунок великої конкуренції. Значні капіталовкладення у дослідження енергетичного сектору супроводжуються реалізацією великої кількості проектів, які націлені на розвиток енергетики. Стрімкий розвиток інтелектуальних технологій сприяв появі нових професій та забезпечив мільйони трудових місць для інженерів.

2. Енергетичний сектор України потребує модернізації та впровадження нових, енергоефективних технологій. Енергетичний баланс показує, що при передачі та перетворенні електричної енергії 25% - це втрати. Впровадження інтелектуальних електроенергетичних систем на локальному рівні дозволить зменшити втрати при перетворенні та передачі, збільшить гнучкість ОЕС України.

3. Різноманітність програмного забезпечення для моделювання та проектування енергетичних систем різних масштабів дозволяє швидко модернізувати електроенергетичні системи враховуючи максимальне число чинників, що можуть негативно впливати на ефективність нових мереж.

4. Розробка програмного забезпечення, що буде враховувати особливості Українського енергетичного сектору, яке буде уніфіковане та доступне українським компаніям прискорить модернізацію електроенергетичного сектору. Для ефективної роботи програмного забезпечення необхідно створити велику кількість алгоритмічних рішень, які будуть доступними та ефективними.

2. МОДЕЛІ АГРЕГУВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

2.1. Роль агрегатора у формуванні мережевої інфраструктури ІЕС

Впровадження ІЕС дозволяє суттєво підвищити гнучкість локальної системи, найголовнішого з показників більшості сучасних енергетичних ресурсів. Повне використання можливостей системи сприяє ефективному використанню наявних функціональних рішень. Більшість сучасних електроенергетичних систем збільшують кількісні та якісні показники користуючись гнучкістю систем РГ [37]. Підключення РГ на рівні розподілу дає можливість надавати додаткові послуги для оператора системи розподілу (ОСР) та оператора системи передачі (ОСП). Ефективне використання гнучкості систем розосередженої генерації (СРГ) потребує розробки схем координації між ОСР та ОСП, необхідне створення нової ринкової архітектури з можливістю приймати заявки та пропозиції від СРГ. Оскільки гнучкість від кожної окремо взятої СРГ буде мізерною необхідне створення АЛС, головна роль якого полягає у тому, щоб згрупувати максимальну кількість СРГ та представляючи їх інтереси на ринку «на добу наперед» (РДН) та внутрішньодобовому ринку (ВДР) електричної енергії шляхом формування комплексних пропозицій ціна-кількість (Рис. 2.1).

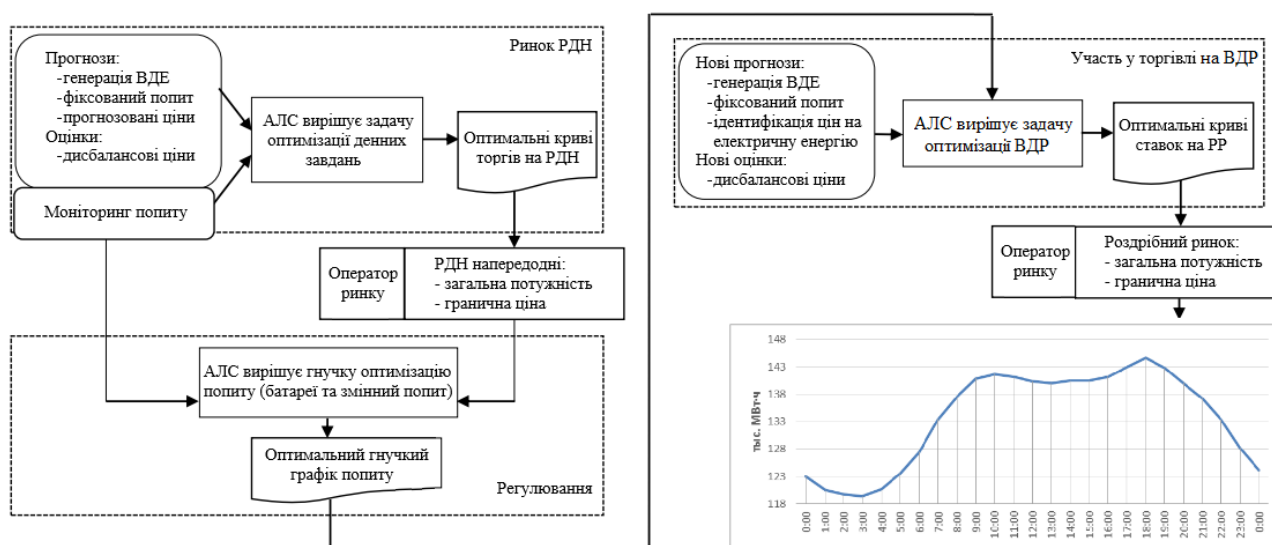


Рисунок 2.1 – Участь АЛС в ринках РДН та ВДР

Агрегатор використовує математичні моделі СРГ, які відображають фізичну та динамічну поведінку ресурсів Рг. Збільшення кількості СРГ, які матимуть невелику гнучкість системи, дозволить АЛС зменшити кількість інформації, що буде надходити на ринки електричної енергії. Головними задачами АЛС є вирішення двох основних проблем пов'язаних з невизначеністю на РДН та ВДР: обсяги потужності та гранична ціна на дану потужність. Крім того АЛС повинен вирішити дві додаткові проблеми оптимізації, які дозволять йому запланувати гнучкий попит на РДН. При вирішенні перелічених вище проблем АЛС повинен враховувати безліч обмежень, які призведуть до зміни попиту: генерація ВДЕ, дисбаланс енергії, акумулювання електричної енергії. Ключовим обмеженням виступає генерація від ВДЕ, адже мінливість подібних систем та нерівномірність генерації суттєво ускладнює вирішення задач оптимізації. Зважаючи на специфіку окремих СРГ, для їх агрегування використовують різні підходи: фізичний та гібридний [38]. *Фізичний підхід до агрегування* застосовується у тому випадку, коли АЛС знайомий фізичними характеристиками, графіком генерації кожного окремого пристрою, який він агрегує, може спрогнозувати профіль навантаження даної системи та спрогнозувати максимальну кількість витрат. *Гібридний підхід до агрегування* представляє собою структурну модель створену за допомогою віртуальних пристроїв з уже закладеними обмеженнями. Групування окремо взятих СРГ відбувається за рахунок додавання всіх індивідуальних пропозицій, спрощуючи процес агрегації да дезагрегації.

2.2. Функціонування АЛС в електроенергетичній системі України

Для координації та оперативного керування активними споживачами та їх об'єднаннями, на ринку створюються оператори *інтелектуальних електроенергетичних спільнот (Оператор ІЕС / АЛС)*. Оператори ІЕС виступатимуть посередниками між локальними системами та енергосистемою (рис. 2.2). Фінансове стимулювання оператора ІЕС дозволить ввести конкуренцію на ринку операторів, що в свою чергу, призведе до підвищення якості послуг та підвищить рівень комфорту кінцевого споживача [39].

Стимулювання за рахунок фінансових відрахувань та конкуренція серед операторів буде сприяти покращенню якості надаваних послуг, якості обслуговування та підвищить рівень інформування кінцевого споживача.

Швидкі та надійні канали двостороннього зв'язку можуть бути реалізовані за рахунок стандартизації та правової підтримки. Оператор ІЕС повинен надавати програмну платформу для взаємодії, як з внутрішніми об'єктами енергетичної системи, так і зовнішніми (оптовий ринок електричної енергії).

Основні функції оператора:

- створити базовий функціональний інтерфейс; моніторинг, служба повідомлень та звітів;
- надати та пояснити функції фінансових розрахунків; розрахунок розрахункової ціни, налаштування цінових діапазонів, прогнозування ціни-пропозиції на оптовому ринку електричної енергії;
- функції керування та диспетчеризації; алгоритм диспетчеризації направлений на відповідність графіку.

Для структуризації електроенергетичної мережі Оператор ІЕС/агрегатор може розглядається, як глобальний контролер та посередник між кінцевим споживачем та енергосистемою:

$$wE_{\text{оператор}}(h) = \sum_{i=1}^N E_i(h), \quad (1)$$

$$wE_{\text{оператор}}(h) = \alpha \sum_{i=1}^N (wP_i(h) \times E_i(h)) / \sum_{i=1}^N E_i(h), \quad (2)$$

- де кількісний блок $wE_{\text{агрегатор}}(h)$ представлений у вигляді суми кількісних пакетів Microgrids (MGs);

αi – вартість витрат для MG;

$E_i(h)$ – кількість електричної енергії від MGs за одиницю часу;

$wP_i(h)$ – ціна на електричну енергію від MGs за одиницю часу.

Системи MG є основними гравцями на ринках роздрібної торгівлі електричної енергії. Вони, як правило повинні бути з'єднані з шиною базової розподільної мережі. Учасники ринку можуть бути різних типів і масштабів, наприклад комерційні MG, або житлові MG. Ми розглядаємо загальну вартісну функцію MG як:

$$C_i(E_i) = [a_i(E_t)^{1+b_i} / (1 + b_i)] + c_i \quad (3)$$

- де a_i – швидкість збільшення собівартості;

b_i – зміна витрат (функція витрат виконується в квадратичній формі, $b_i = 1$);

c_i – фіксована вартість.

Системи акумулювання енергії, обладнана інтелектуальними технологіями, може поглинати майже будь який надлишок від генераторів. Стан заряду системи акумулювання енергії потребує уваги під час процесу зарядки / розрядки, що забезпечується системами моніторингу. Функція моніторингу стану заряду в часовому інтервалі h може бути описана як:

$$E_i^{ESS}(h) = E_i^{ESS}(h - 1) + \eta_i P_i^{ESS}(h) \Delta h \quad (4)$$

$$E_i^{ESS}(h) = E_i^{ESS}(h - 1) + P_i^{ESS}(h) / \eta_d \Delta h \quad (5)$$

- де рівняння (5) описує режим зарядки системи акумулювання електричної енергії у часовому проміжку h , коли потужність заряду $P_i^{ESS}(h)$ додатна;

- рівняння (6) описує систему акумулювання електричної енергії у часовому проміжку h , коли потужність $P_i^{ESS}(h)$ від'ємна.

Надлишок електричної енергії використовується для повного заряду системи акумулювання. Електрична енергія, що знаходиться у системах акумулювання використовується для задоволення потреб на роздрібному ринку електричної енергії та місцевого попиту, коли генерація електричної енергії нижча за попит. Якщо електричної енергії від систем місцевої генерації чи

систем акумулювання недостатньо, РЕС оператор може купувати електричну енергію у комунальної компанії на БР електричної енергії.

Збільшення кількості MG_i призводить до появи нових учасників на оптовому ринку електричної енергії та підвищенню асортименту торгової кількості та якості:

$$0 \leq E_i(h) \leq E_i^{generation}(h) - (1 - \omega_i)E_i^{load}(h) \quad (6)$$

Права частина рівняння представляє надлишок електричної енергії від MG_i , для торгівлі на оптовому ринку електричної енергії, ω_i – швидкість проникнення керованого навантаження в MG_i . На практиці ω_i регулюється так, щоб при запиті на попит відповідати операції кількості на оптовому ринку електричної енергії. Загальний дохід $MG_i (R_i^{total})$ визначається, як сума доходів, як на оптовому ринку електричної енергії $\omega R_i(h)$, так і на БР за проміжок часу $h (R_{i,j}(h))$:

$$R_i^{total} = \sum_{h=1}^H R_{i,j}(h) + \sum_{h=1}^H \omega R_i(h) \quad (7)$$

Однак на сьогодні для роботи і керування РЕС все ще не вистачає досконалих методів оцінки комфорту користувачів і досліджень по споживанню відновлюваної енергії, що серйозно ускладнить подальший розвиток РЕС. Також малої популярності набуло інформування та правова підтримка «активних» споживачів.

Проведення ефективного та оперативного керування вимагає додатково вивчити вплив рівня комфорту користувача [40], споживання відновлюваної енергії та інших факторів на оптимальну роботу. Чітке розуміння потреб споживачі дозволить проектувати енергетичні системи, які будуть у повному обсязі задовольняти потреби учасників ринку електричної енергії [41]. Стимулювання учасників ринку за рахунок певних надбавок допоможе створити живу конкуренцію яка стане основою розвитку Інтелектуальних електроенергетичних спільнот в Україні.

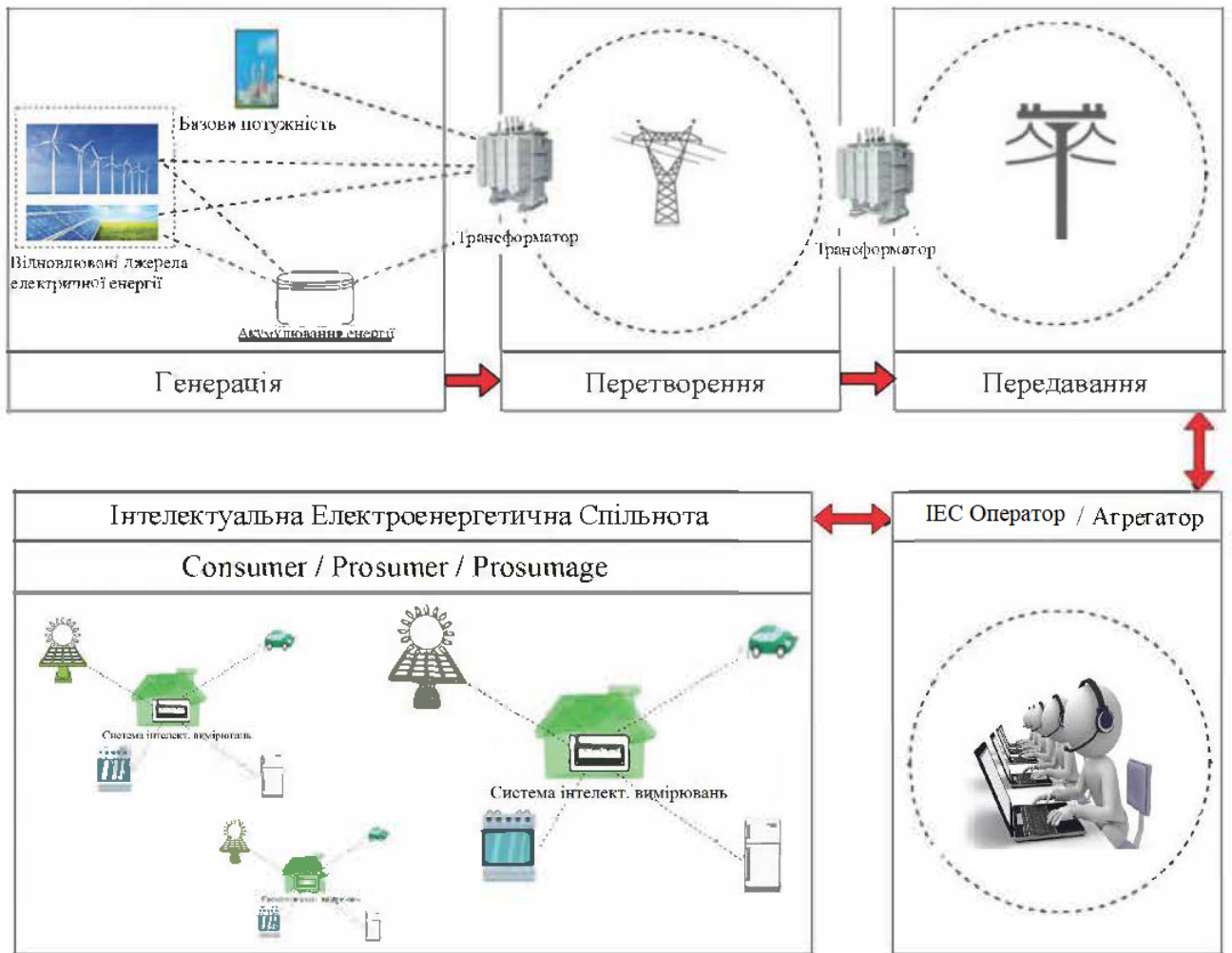


Рисунок 2.2 - Становлення оператора ІЕС / АЛС в енергетичній системі України

Інтеграція систем Energy Smart Community (ESC) в Україні на даний момент є дуже важливим, адже воно дає можливості для розвитку Smart City (Розумне місто). У контексті розвитку Smart Grid потреба в інтелектуальних підходах до керування і координації різноманітного спектра технологій постачання та перетворення зі збільшення попиту добре відома [42].

Широкомасштабне поширення інтелектуальних пристроїв моніторингу в поєднанні з впровадженням вбудованих алгоритмів обчислювального інтелекту може допомогти вирішити багато технічних проблем, пов'язаних з впровадженням інтелектуальних електроенергетичних систем [43]. Проте, бар'єри все ще існують, оскільки необхідні відповідні методи для роботи зі складними мережами учасників (часто з конкуруючими цілями) при визначенні

проектних і експлуатаційних рішень для систем з широким спектром функцій і часових масштабів.

2.3. Моделі агрегування локальних електроенергетичних систем

Агрегування ЛЕС не можливе без створення структурної моделі з чітко визначеним функціоналом кожного з учасників. Розробка моделей агрегування супроводжується створенням архітектури ринку з можливістю використовувати переваги АЛС в повній мірі. Формування нової архітектури ринку супроводжується появою нових додаткових послуг та суттєвому росту конкуренції на роздрібному ринку електричної енергії [44]. Різноманітність підходів до агрегування дозволяє вибрати оптимальну модель, яка буде мати власні параметри та змінні фізичні одиниці, які наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Моделі агрегування

Об'єкти агрегування (моделі)	Підхід до агрегування
Агрегування навантаження модульних АЕС	Гібридний
Агрегування ТЕЦ	Фізичний
Агрегування термостатичного навантаження (ТН)	Фізичний
Агрегування накопичувачів електричної енергії (НЕЕ)	Фізичний
Агрегування систем РГ	Фізичний

Агрегування навантаження АЕС описує модель за якою відбувається агрегування атомних реакторів малої потужності [45]. Атомні станції мають фіксований профіль навантаження але використання модульних блоків малої потужності дозволяє забезпечити живлення ЛЕС, що суттєво підвищить гнучкість системи. Після запуску атомного модуля не можливо зупинити його роботу чи перервати на деякий час, але гнучкість системи можна досягти шляхом зміни запланованого профілю навантаження на альтернативний, фіксований профіль. На ринок подається одинична пропозиція, а вартість

активації більш гнучкої ставки визначається АЛС, як вартість активації альтернативного профілю навантаження з вирахуванням вартості активації запланованого профілю.

Агрегування ТЕЦ забезпечується фізичним підходом агрегування. Модель передбачає формування ступінчатої обмеженої Q-ставки потужності з урахуванням можливих обмежень, таких як максимальне підвищення та зменшення потужності кожної окремо взятої ТЕЦ та обмеження рівня загальної згенерованої потужності.

Агрегування термостатичних навантажень передбачує агрегування систем кондиціонування повітря, теплових насосів, водонагрівачів, електричних нагрівачів, тощо. Для агрегування окремих пристроїв ця модель використовує фізичний (знизу вгору) та обґрунтований підхід до агрегації. Модель передбачає ринкові Q-ставки навантаження, що обмежується, або ступінчаті Q_t -ставки на ринку електричної енергії з цільовим обмеженням чи без цього.

Агрегування систем акумулювання електричної енергії описує модель агрегування статичних та мобільних акумуляторів. Для агрегування застосовується фізичний підхід (знизу вгору), щоб сформувані Q-ставку з U-подібним етапом, оскільки накопичення електричної енергії забезпечує двосторонню гнучкість електроенергетичної системи.

Агрегування систем РГ передбачає агрегування систем ВДЕ (вітрогенератори, фотоелектричні панелі) та мало масштабні гідроелектростанції (ГЕС), а також обмеження навантаження (зменшення навантаження без будь-якого відшкодування). Гнучкість одного уніфікованого пристрою агрегується за допомогою фізичного підходу (знизу вгору) і пропонується ринку у вигляді ступінчатої обмеженої Q-ставки. Агрегування декількох точок генерації відбувається шляхом представлення ставки на ринку, що представляє сумарну потужність станцій з урахуванням втрат при передачі електричної енергії та втрат, які обов'язково будуть при перетворенні електричної енергії.

2.3.1. Модель агрегування модульних АЕС

Набір різних профілів навантаження може бути використаний для представлення споживаної електричної енергії установкою, яка має різні режими роботи при виконанні одного і того ж завдання. Наприклад, промислова піч може мати режим швидкого горіння та режим повільного горіння [46]. Кожен режим роботи призводить до альтернативного профілю споживання електроенергії. Якщо вони обидва прийнятні для кінцевого споживача, АЛЕС може використовувати цей вибір для забезпечення гнучкості. Замість того, щоб ініціювати профіль, пов'язаний з типовим режимом роботи, може бути ініційована одна з доступних альтернатив. Наприклад, агрегатор може прийняти рішення про початок швидкого горіння, коли системний оператор вимагає збільшення споживання електроенергії.

Альтернативні режими роботи не повинні бути повністю еквівалентними; існує компроміс між споживанням енергії та різним рівнем якості чи комфорту, що впливає із завдання, пов'язаного з навантаженням. Різні витрати кількісно оцінюють актуальність однієї програми проти іншої. Кожен з альтернативних режимів роботи буде представлений власною кривою профілю потужності та витратами.

Слід зазначити, що для обробки змінних навантажень як особливого випадку, альтернативи атомного навантаження дозволяється мати різні стартові часи (час запуску). В залежності від встановленого профілю навантаження загальне споживання енергії буде різним. Альтернативні профілі потужності можуть мати різні форми, як це показано на рисунку 2.3 – 2.4.

Можна спостерігати, що існує багато можливих профілів навантаження для конкретно взятого споживача, які задовольняють однакові енергетичні обмеження. Альтернативні обмеження виникають, коли для живлення установки чи процесу необхідно надати обмежену кількість енергії. Також було показано приклад альтернативних, гнучких профілів навантаження, які виступають як альтернативні та відображають створення певної кількості гнучкості.

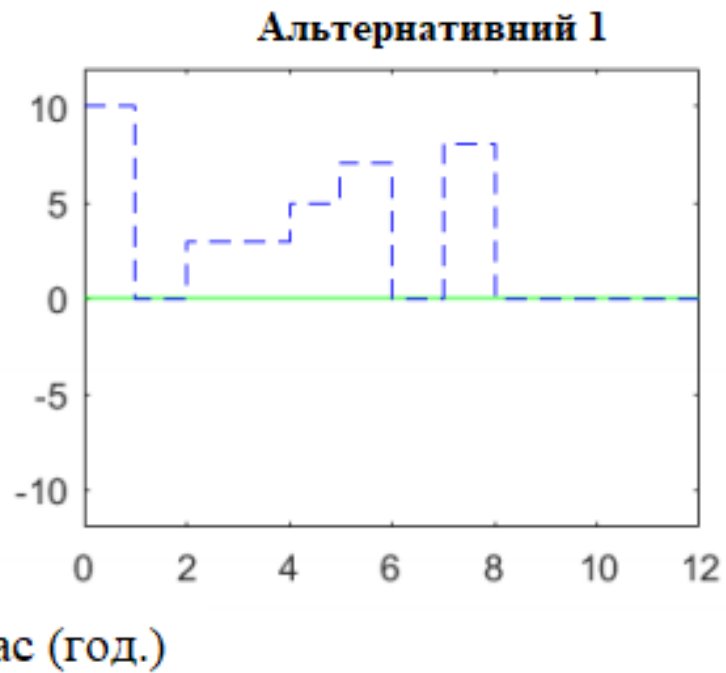
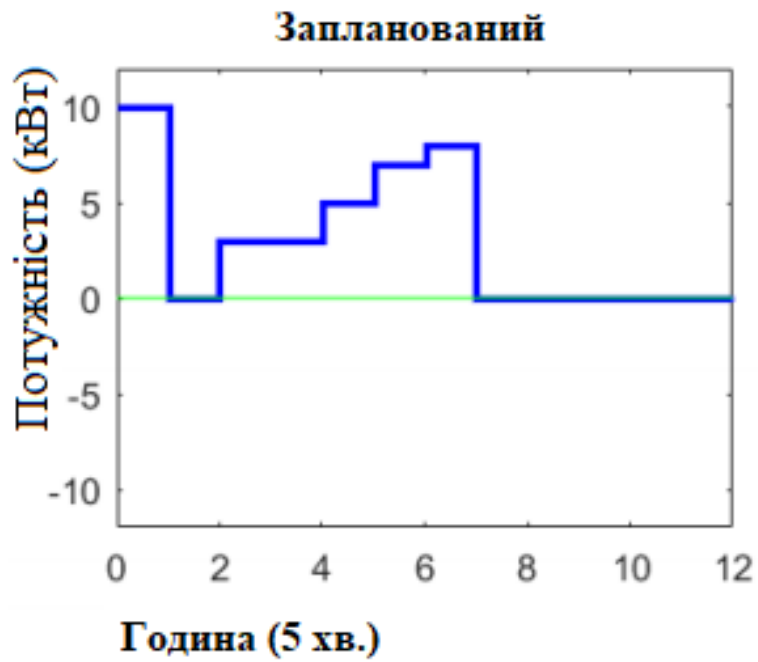
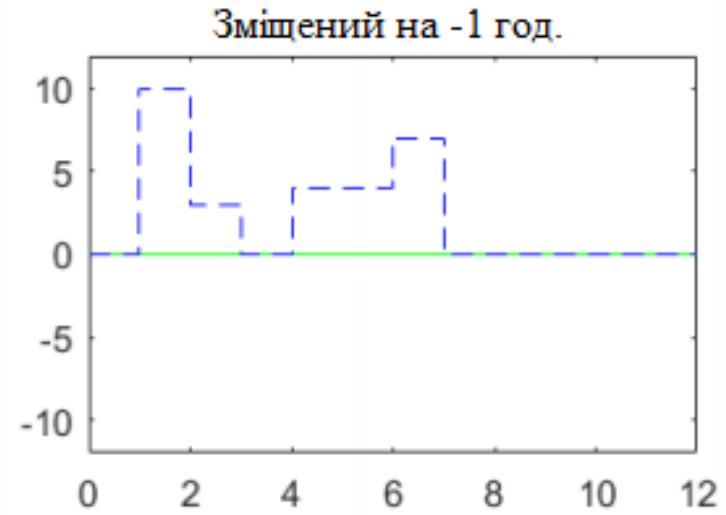
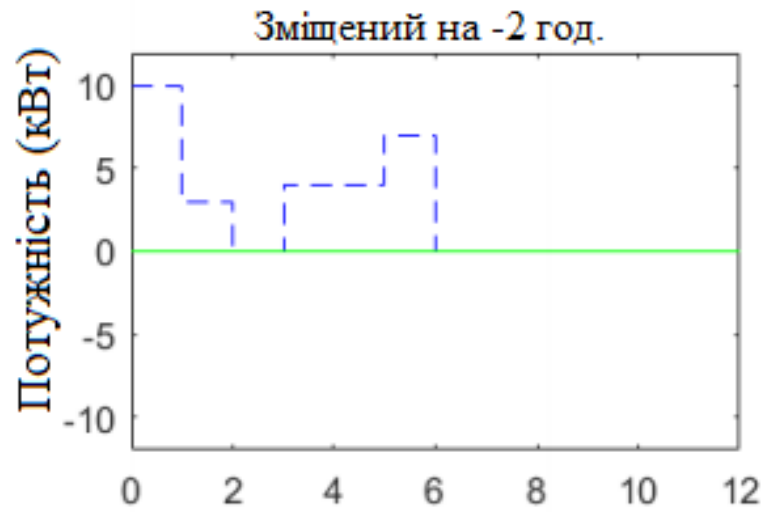


Рисунок 2.3 – Приклад зміни профілів навантаження в часовому інтервалі частина 1

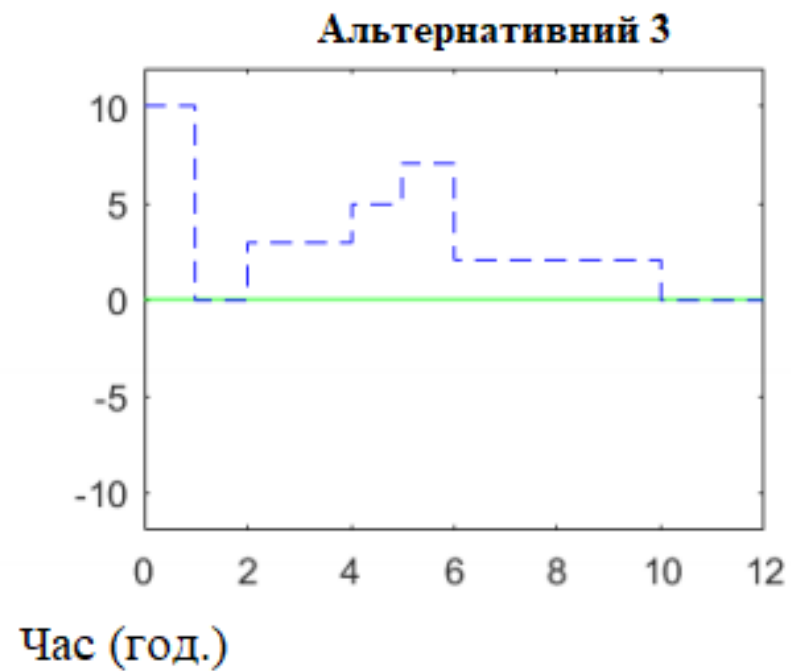
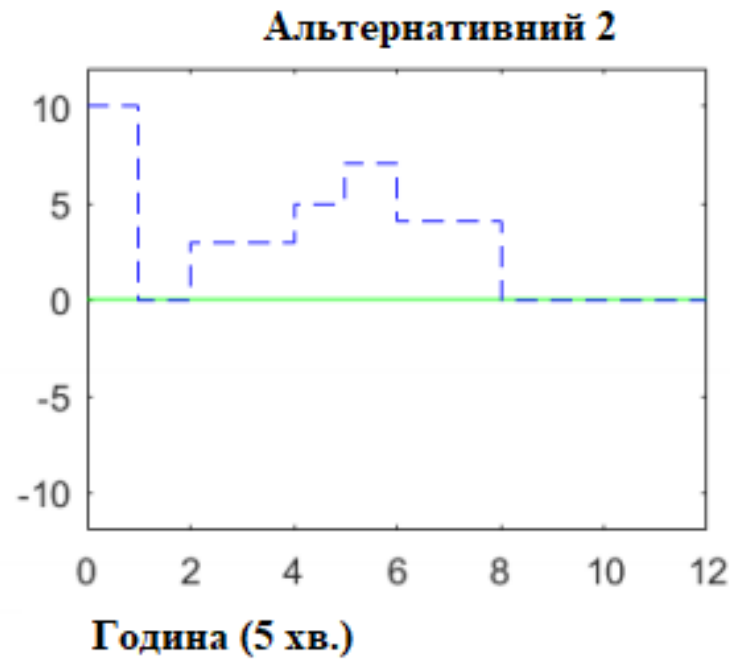
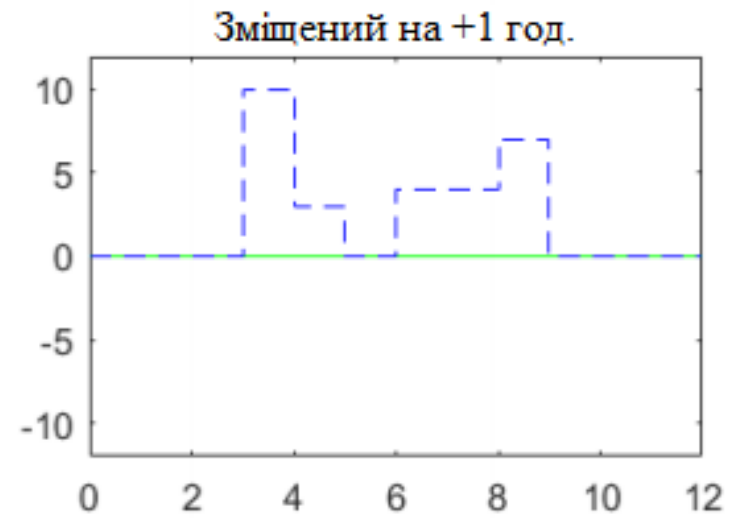
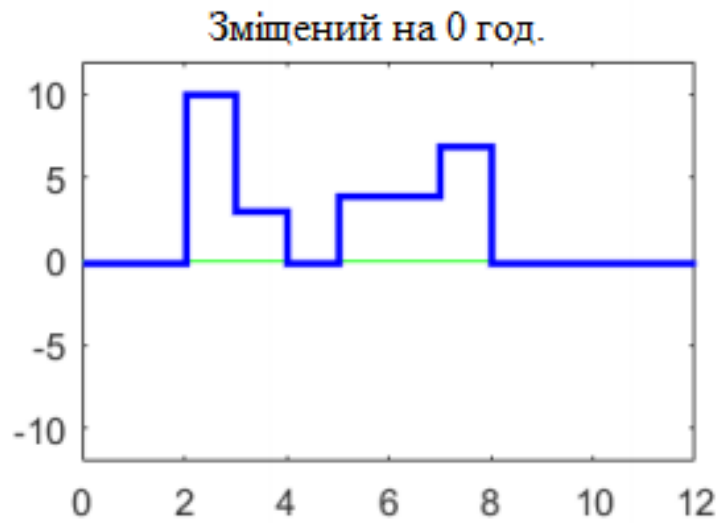


Рисунок 2.4 – Приклад зміни профілів навантаження в часовому інтервалі частина 2

Розглядаючи агрегування модульних АЕС слід зазначити, що гнучкість, запропонована атомними навантаженнями може бути сформована у більш необхідний (альтернативний) та гнучкий профіль. Різні навантаження та зсуви часу призводять до різних втрат з різними кількісними показниками. Втрати можна вважати відносними або абсолютними, в залежності від випадку. Порівнюючи втрати окремо взятого профілю навантаження (Рис. 2.5) можна вибрати альтернативний профіль з мінімальною кількістю втрат електричної енергії під час процесу передачі та перетворення, який буде обов'язково проведени.

Відхилення від розкладу одного навантаження створює новий профіль гнучкості з багатьма коливаннями. Запланована зміна процесів та роботи обладнання дозволяють АЛС поєднувати індивідуальну гнучкість так, щоб можна було запропонувати для ринку найбільш відповідну ставку. На запропонований профіль можуть впливати оцінка майбутніх цін або обмеження ставок. Всі навантаження, які не будуть активовані у відведений проміжок часу, можуть брати участь у наступних пропозиціях, доки в кінцевому підсумку навантаження не перейде до запланованого профілю. Використання альтернативних профілів навантаження актуальне лише у випадках коли вигода від зміни профілю буде вищою від вигоди при застосуванні стандартного профілю навантаження.

Витрати на навантаження та гнучкість дискретні та спеціальні [47], це дозволяє представити їх очікуваними профілями потужності протягом вхідної години, а кожен годину представити 12-ттю часовими інтервалами, припускаючи, що використовується п'ятихвилинна дискретизація:

$$P^{i,j}[t] = [p_0^{i,j}, \dots, p_{11}^{i,j}] \quad (8)$$

де: i - індекс навантаження;

j - обраний альтернативний профіль;

t - наступна година, що містить 12 п'ятихвилинних інтервалів.

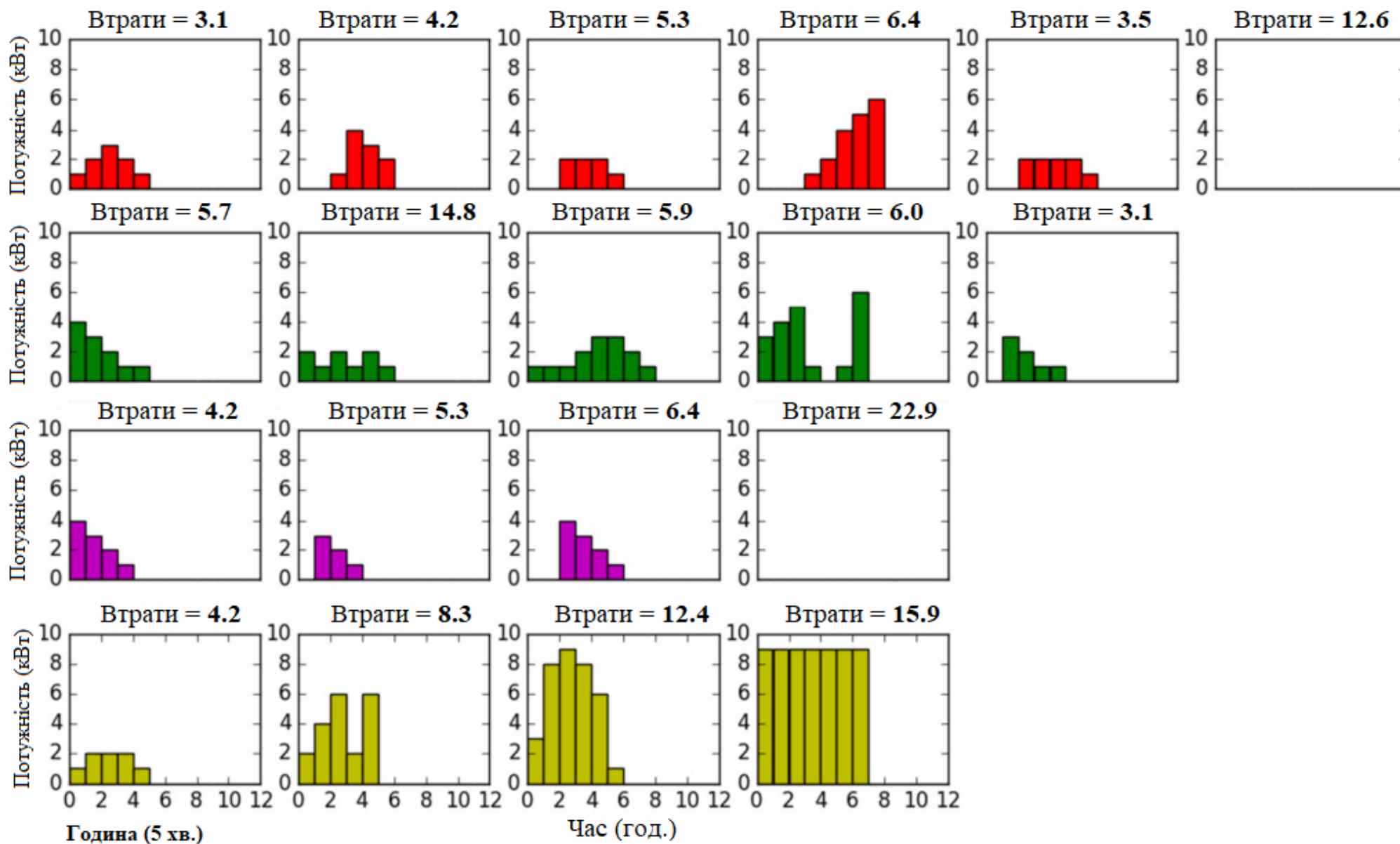


Рисунок 2.5 – Втрати різних гнучких, альтернативних профілів агрегованих атомних навантажень

Сукупна ставка формується шляхом вирішення проблеми оптимізації, використовуючи IP електро-приймача (наявний інформаційний зв'язок). Основний енергетичний профіль задається як вихідний. Зазвичай це результат вибору режимів, програм роботи з найменшими операційними витратами \hat{C} , або дотриманні більш енергоефективної стратегії на РДН. Аналіз формування ставок починається з базового профілю потужності та його базової вартості:

$$\hat{P}[t] = \sum_i P_t^{i,J_i} \quad (9)$$

$$\hat{C} = \sum_i C^{i,J_i} \quad (10)$$

Зміна запланованої програми визначається індикатором, приймаючи значення 1 для запланованої програми ($s_i^{j_{new}} = 1$), та 0, для інших програм ($s_i^j = 0$), $j \neq j_{new}$.

Оскільки кожне атомне навантаження має бути віднесене до однієї з можливих його альтернатив можливо обчислити звільнену гнучкість як функцію нового вибору:

$$P_{new}[t] = \sum_i P_t^{i,J_{new}(i)} = \sum_{i,j} P_t^{i,J} \cdot s_i^j \quad (11)$$

Профіль гнучкості, який слід запропонувати, як альтернативний задається вектором:

$$\Delta P_{flex}[t] = \hat{P}[t] - P_{new}[t] \quad (12)$$

Кількість може бути позитивною, коли агрегатор повертає невикористану енергію в мережу, і негативною, коли необхідно більше енергії ніж при базовому розподілі.

Однією з можливих проблем оптимізації, яка моделює формування ставок, з якими стикається агрегатор альтернативних навантажень, є наступна:

$$\max \Delta P_{flex}[0] \quad (13)$$

$$\sum_j s_t^j = 1, \text{ для всіх } i \text{ навантажень} \quad (14)$$

$$\|\Delta P_{flex}[t]\| < \varepsilon, \text{ для всіх } t > 0 \quad (15)$$

$$s_i^j = \{0,1\}, \text{ для } i \text{ навантажень та альтернативних } j \text{ навантажень} \quad (16)$$

Формула (13) пояснює, що агрегатор вважає максимізацією позитивного піку в перший інтервал часу. Рівняння (14) гарантує, що для кожного навантаження необхідно вибрати один альтернативний профіль, з відповідною йому вартістю. Рівняння (15) являє собою просту схему управління залишком потужності, в якій агрегатор буде шукати ставки, які обмежують ефект відскоку вартості обмеженням напередодні на РДН.

Ця проблема оптимізації може бути уточнена пізніше, коли буде відомо більше інформації про те, яким ставкам надають перевагу покупці. Агрегатор буде шукати найкращі пропозиції, які зможе зробити, для отримання найбільшого прибутку. Зміна обраної альтернативи призведе до втрат, які можна об'єднати як:

$$C_{flex} = \sum_{i,j} s_i^j \cdot C_i^j \quad (17)$$

Згодом C_{flex} можна порівняти з \hat{C} , яка є базовою вартістю для базового профілю навантаження, щоб сформувати ціни для ставок на РДН. Загалом вартість надання сукупної гнучкості на ринку буде залежати від формату торгів на РДН та ВДР. Агрегатор має на меті створити корисні ставки гнучкості, навіть коли на ринках підтримуються найпростіші пропозиції. Якщо агрегатор не має певного способу спостереження за ринком з боку інтересів та необхідності покупця, він може лише здогадуватись, який профіль навантаження та за якою ціною необхідно запропонувати покупцю. Альтернативою є використання та створення найскладніших типів пропозицій, для збільшення кількості альтернативних пропозицій на РДН та ВДР (Рис. 2.6).

Агрегатор несе відповідальність за зарахування та кваліфікацію відповідних споживачів, вимірювання їх відповіді на запитувану зміну

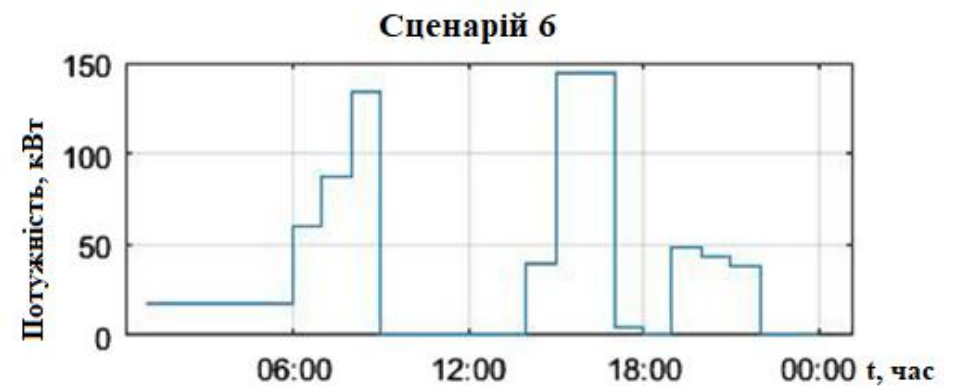
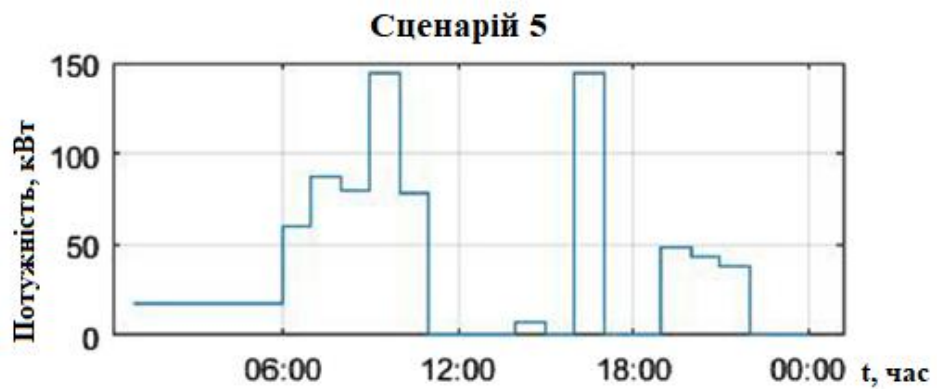
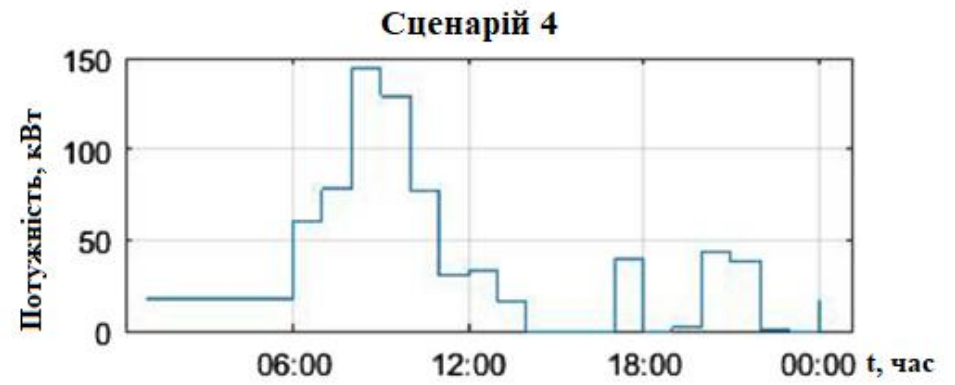
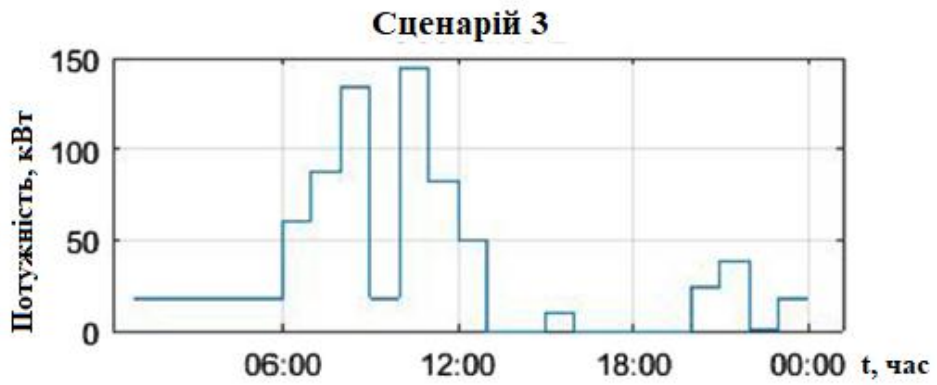
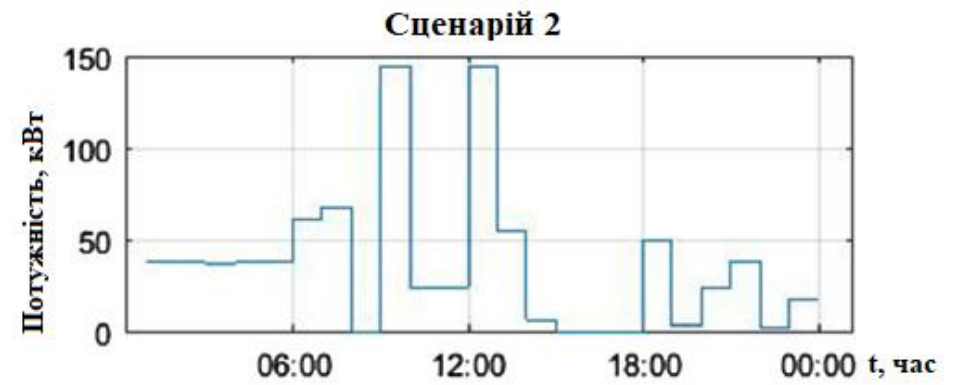
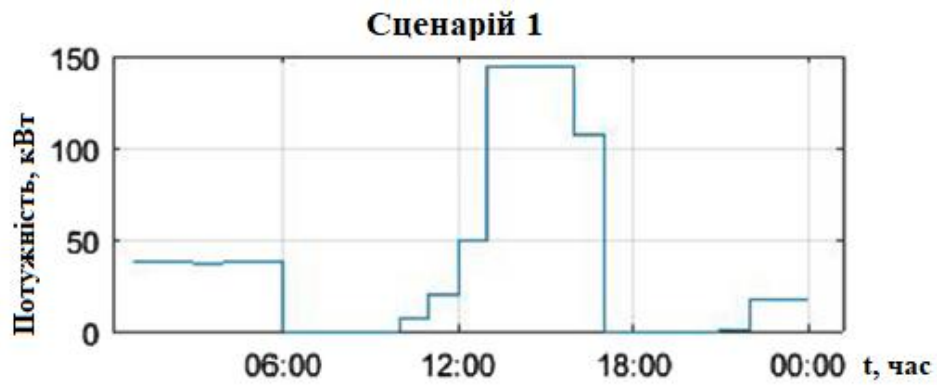


Рисунок 2.6 – Альтернативні сценарії потужності створені агрегатором протягом дня

розкладу, подання заявок на об'єднану енергію на РДН та впровадження різних видів схем, які дозволяють клієнтам побічно брати участь та отримувати прибуток від енергетичних ринків. Саме тому при розробці стратегічних рішень по впровадженню нової моделі агрегування необхідно брати до уваги максимальне число факторів впливу.

Як і у будь-якої компанії, метою агрегатора є прибуткова діяльність. Плануючи ставки на РДН та ВДР, агрегатор вирішує власну проблему, плануючи навантаження своїх учасників найбільш ефективним способом та формуючи оптимальний графік участі [48]. Агрегатор, як людина, що приймає рішення, повинен знайти вигідну політику, коли запропонувати свою об'єднану гнучкість (тобто зараз чи пізніше) та за якою ціною. Прибуток агрегатора складається з доходу, який він отримує від своїх пропозицій щодо гнучкості, за вирахуванням витрат, понесених при випаданні учасників із запланованого профілю. Агрегатор максимально зацікавлений у підвищенні енергоефективності кожного, окремого, локального вузла електроенергетичної системи та внутрішніх систем кінцевих споживачів. Встановлення конкурентної моделі призведе до створення нових моделей агрегування із застосуванням нового або удосконаленого програмного забезпечення, що буде враховувати максимальну кількість персональних маркерів.

2.3.2. Модель агрегування ТЕЦ

Енергію, що виробляють ТЕЦ можна розділити на два типи: тепла та електрична (Рис. 2.7). Модель агрегування, яку буде використовувати АЛС повинна оцінити яку кількість енергії необхідно згенерувати в конкретний момент часу. Для підвищення гнучкості системи, що побудована на основі ТЕЦ необхідно моделювати систему акумулювання тепла [49]. Підхід до моделювання (знизу вгору) передбачає, що агрегатору відомі всі параметри кожної ТЕЦ, яку він агрегує. Знаючи характеристики ТЕЦ, агрегатор може розрахувати та змоделювати гнучкість та граничну ціну, що дозволить оцінити необхідність регулювання профілю навантаження. ТЕЦ має одне горіння, за рахунок якого виробляється два типи енергії: електрична, яка надходить в

електромережу та теплова, яка надходить в накопичувач тепла, щоб бути використаною при необхідності теплової енергії.

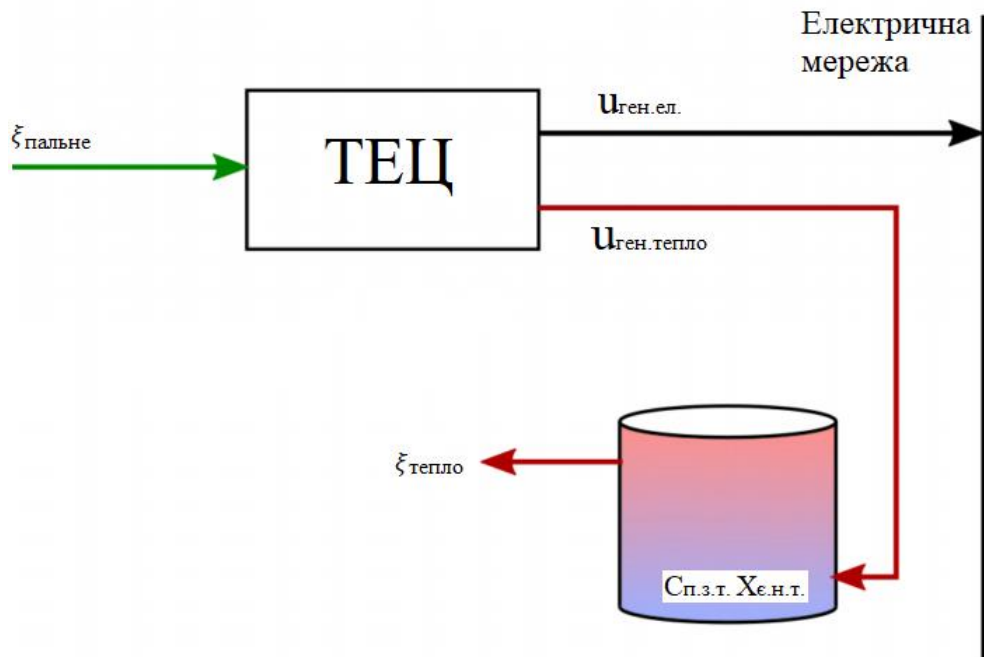


Рисунок 2.7 – Процес генерації енергії ТЕЦ

Кількість енергії, що зберігається у накопичувачі теплової енергії обмежена мінімальним (C_T^{\min}), та максимальним (C_T^{\max}) значенням обумовленим параметрами накопичувача.

$$C_T^{\min} \leq C_{\text{п.з.т.}} \cdot X_{\text{ен.т.}} \leq C_T^{\max} \quad (18)$$

Вартість усієї гнучкості, яку може створити ТЕЦ поділяється на [50]:

- вартість дискомфорту кінцевого споживача (споживач міг отримати теплову енергію, але він скоротив витрати, щоб отримати грошову винагороду за зменшення споживання теплової енергії);
- витрати на паливо (залежать від кількості паливних ресурсів регіону та ціни на паливні ресурси, що використовує ТЕЦ);
- витрати на викиди CO₂ (обумовлені сталим розвитком країни);
- витрати на запуск та вимкнення (залежать від типу ТЕЦ) [51];

Стратегія роботи визначає, скільки електроенергії чи палива має бути введено в систему відповідно до потреб; який об'єкт слід закрити для забезпечення ефективної роботи всієї системи. Завдяки визначеній конфігурації

та відповідно до стратегії роботи, відповідні розміри та оптимізація можуть змусити систему працювати оптимально. Важливу роль відіграє номінальна потужність ТЕЦ, адже ще на етапі розробки концепції агрегування номінальна потужність відіграватиме велику роль. Номінальна потужність ТЕЦ може досягати десятків МВт, тому враховувати дану інформацію при агрегуванні вузла в який входить дана станція вкрай необхідно. Також вели увагу при агрегуванні ТЕЦ приділяють обладнанню, що буде використовувати енергію, яку виробляє ТЕЦ. Зазвичай це класичні двигуни, але розвиток технологій сприяє поширенню великої кількості агрегатів та обладнання, що при певних режимах роботи можуть негативно впливати на мережу та спричиняти відхилення параметрів мережі. Враховуючи особливості обладнання, яке буде жити станція та вище перелічені фактори необхідно математично виразити рівняння, що описують генерацію електричної енергії та рівняння, що описують генерацію теплової енергії.

Параметри, що беруть участь у моделюванні;

$\xi_{п,t}$ – кількість пального, що надходить до ТЕЦ за проміжок часу t ;

$u_{ген.ел.t}$ – кількість згенерованої електроенергії за проміжок часу t ;

$u_{ген.тепло.t}$ – кількість виробленої теплової енергії за проміжок часу t ;

$\xi_{тепло}$ – потреба у тепловій енергії в конкретний момент часу;

$\eta_{заг.еф.}$ – загальна ефективність ТЕЦ;

$\eta_{ел.еф.}$ – ефективність електричної енергії;

$\eta_{тепло еф.}$ – ефективність теплової енергії;

$x_{е.н.т.t}$ – стан ємності накопичувача тепла в конкретний момент часу t ;

$C_{п.з.т.}$ – витрати на акумулювання теплової енергії;

$v_{тепло,t}$ – втрати в накопичувачі теплової енергії за проміжок часу t ;

Використовуючи перелічені параметри можна записати рівняння, що описують генерацію електричної та теплової енергії в реальному часі;

$$u_{\text{ген.ел.t}} = \eta_{\text{ел.эф.}} \cdot \xi_{\text{п,t}} - W_{\text{СНР,t}} \quad (19)$$

$$u_{\text{ген.тепло.t}} = \eta_{\text{тепло.эф.}} \cdot \xi_{\text{п,t}} \quad (20)$$

$$\eta_{\text{заг.эф.}} = u_{\text{ген.ел.t}} \cdot u_{\text{ген.тепло.t}} < 1 \quad (21)$$

де: $W_{\text{СНР,t}}$ – зменшення рівня генерації ТЕЦ не пов'язане з гнучкістю.

Опис попиту на теплову енергію вимагає оцінки станку накопичувача теплової енергії в реальному часі, беручи до уваги втрати енергії, що відбуваються в накопичувачі та попит на теплову енергію:

$$C_{\text{п.з.т.}} \cdot x_{\text{є.н.т.t+1}} = C_{\text{п.з.т.}} \cdot x_{\text{є.н.т.t}} + (u_{\text{ген.тепло.t}} - \xi_{\text{п,t}} - v_{\text{тепло,t}}) \Delta t \quad (22)$$

$$v_{\text{тепло,t+1}} = v_{\text{тепло,втр.}} \cdot x_{\text{є.н.т.t}} \quad (23)$$

$$C_{\text{т}}^{\text{мін}} \leq C_{\text{п.з.т.}} \cdot x_{\text{є.н.т.t}} \leq C_{\text{т}}^{\text{макс}} \quad (24)$$

де: Δt – тривалість часу (одного кроку);

$v_{\text{тепло,втр.}}$ – втрати при накопиченні тепла, пропорційні рівню накопичення тепла.

Користуючись формульним представленням обчислення вартості електричної та теплової енергії можна розрахувати вартість гнучкості знаючи кількість палива, що була затрачена на генерацію електричної енергії. Беручи до уваги максимальну кількість факторів впливу та використання програмного забезпечення допоможуть спрогнозувати кількісні показники, що будуть представлені у вигляді пропозиції на РДН та ВДР.

Актуальність застосування моделі агрегування ТЕЦ обумовлена стратегіями сталого розвитку більшості розвинутих країн, направлених на зменшення кількості викидів CO₂ та підвищенням енергоефективності енергетичного сектора.

2.3.3. Модель агрегування термостатичними навантаженнями

Прикладами систем термостатичного навантаження є системи кондиціонування повітря, теплові насоси та водонагрівачі різних типів. Системи, що підвищують комфорт кінцевих споживачів набрали велику

популярність протягом останніх десятиліть. Сучасні будинки не можна уявити без системи кондиціонування та водонагрівачів. Тенденції по збільшенню енергоефективності сприяють збільшенню ефективності переліченого обладнання та підвищенню його КПД до максимально можливого значення.

Управління термостатичними керованими навантаженнями (ТКН) вимагає розробки універсального підходу до резервування електричної енергії та реагування на попит в реальному часі [52]. Для агрегування термостатичних навантажень необхідно створити просту та ефективну модель, що в реальному часі буде розраховувати гнучкість системи беручи до уваги режими роботи кожного окремо взятого обладнання.

Модель агрегування термостатичних навантажень описує споживання електричної енергії пристроями ТКН, використовуючи фізичне відображення їх температурного процесу. Теплові моделі описують зміну температури в часі як функцію фізичних характеристик системи та її оточення (теплоємності, коефіцієнти теплопередачі, коефіцієнти теплових втрат). Режим споживання електроенергії, необхідної нагрівальному чи охолоджувальному елементу визначається величиною енергії, необхідної для досягнення певної заданої температури відносно температури, що є в конкретний момент часу.

Гнучкість ТКН характеризується трьома основними поняттями:

1. Базовий профіль потужності: агрегований профіль потужності, коли сигнали управління не надсилаються до ТКН (не використовуються протоколи).

2. Профіль гнучкості потужності: різниця між профілем потужності базової лінії та профілем потужності при подачі керуючих сигналів на ТКН. Гнучкість пропонується агрегатором на ринку.

3. Профіль потужності відскоку: різниця між базовим профілем потужності та профілем потужності після подання керуючих сигналів. Потужність відскоку виробляється як побічний ефект активації гнучкості.

Профіль потужності базової лінії обчислюється шляхом агрегування індивідуальних профілів потужності базової лінії кожного ТКН, що

відповідають встановленим значенням температури базової лінії. Ці базові значення температури необхідні в моделях гнучкості, оскільки гнучкість потужності кожного ТKN отримується шляхом відхилення його температури від базової заданої точки. Температурні базові лінії зазвичай вважаються статичними значеннями або діапазонами, що відповідають встановленим кінцевими споживачами параметрами комфорту, але у випадках, коли агрегатор також використовує гнучкість на інших енергетичних ринках (РДН, ВДР) [53], ці показники температури будуть трохи відрізняється від комфортної температури і залежить від часу доби. Можливий підхід до оцінки базової лінії може базуватися на алгоритмі оптимізації, який визначає оптимальне планування ТKN як функцію від прогнозованих цін на ВДН.

Загальну теплову модель можна розглядати як аналогічну електричній схемі (Рис. 2.8), де опір представлено у якості коефіцієнта теплопередачі, ємність представлено як ємність теплових, а нагрів та охолодження представлені як джерела струму [54].

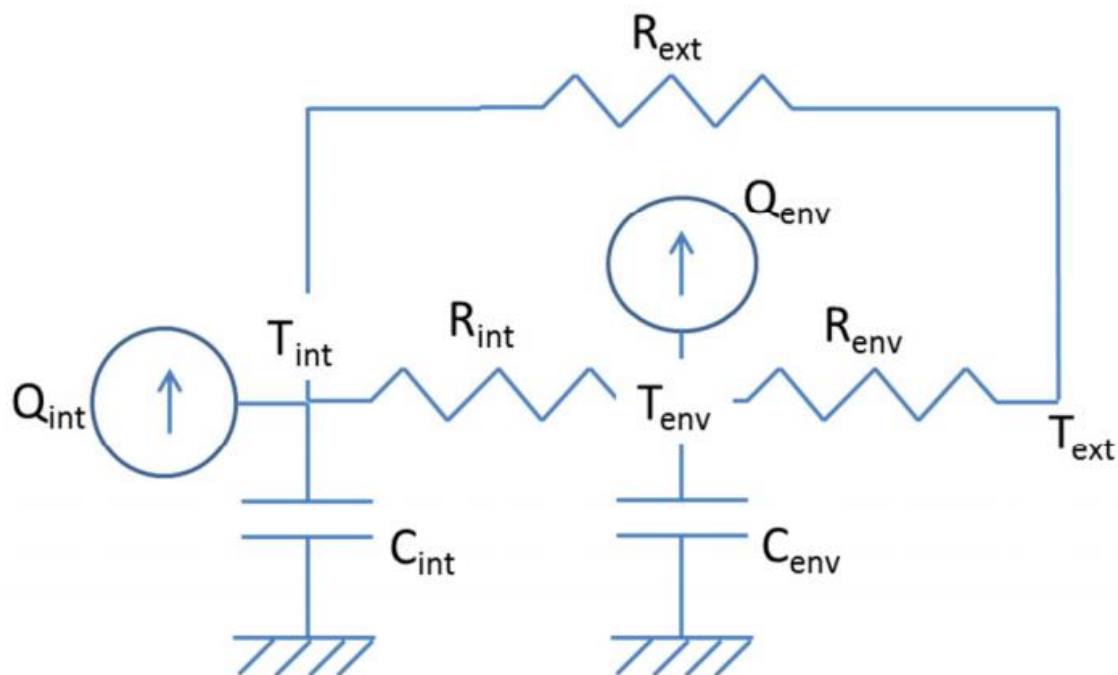


Рисунок 2.8 – Принципова модель теплового процесу

Параметри, що беруть участь у моделюванні;

C_{int} – об'єм внутрішньої маси теплоємності;

C_{env} – об'єм конвертованої маси теплоємності;

R_{int} – коефіцієнт теплопередачі (внутрішня маса та оболонка);

R_{env} – коефіцієнт теплопередачі (маса оболонки та зовн. середов.);

R_{ext} – коефіцієнт теплопередачі (внутрішня маса та зовн. середов.);

Q_{int} – внутрішнє тепло/охолодження;

Q_{env} – тепло/охолодження, що надходить;

T_{int} - внутрішня температура маси теплоємності;

T_{env} - температура оболонки теплоємності;

T_{ext} - температура зовнішнього середовища.

Рівняння, що описують еволюцію температури подаються у вигляді двох з'єднаних диференціальних рівнянь;

$$C_{int} \frac{dT_{int}}{dT} = Q_{int} + \frac{1}{R_{int}} (T_{env} - T_{int}) + \frac{1}{R_{ext}} (T_{ext} - T_{int}) \quad (25)$$

$$C_{env} \frac{dT_{env}}{dT} = Q_{env} + \frac{1}{R_{int}} (T_{int} - T_{env}) + \frac{1}{R_{env}} (T_{ext} - T_{env}) \quad (26)$$

Внутрішнє надходження від нагрівання/охолодження Q_{int} являє собою суму енергії, що було вироблено всередині оболонки системи. Система кондиціонування відстежує тепло, що було вироблене людиною під час перебування в будівлі, тепло пристроїв, що нагріваються під час роботи та тепло самої системи ОВіК (опалення, вентиляція і кондиціонування). Що стосується водонагрівачів то температурний процес там описаний тепловими втратами при протіканні води та витіканням нагрітої води з водонагрівача. Найбільше споживання відбувається під час виробництві енергії нагріву чи охолодження.

$$Q_{int} = Q_{gains} + \eta P_{elec} \quad (27)$$

де: Q_{gains} - внутрішня теплова енергія;

η - коефіцієнт перетворення електричної енергії в теплову;

P_{elec} - енергія нагріву/охолодження, що надходить.

Коефіцієнт перетворення електричної енергії в теплову η різний для кожного окремо взятого пристрою опалення та охолодження.

Описані вище рівняння можуть бути дискретизовані за методом Ейлера [55], в результаті чого отримують два лінійних рівняння, що описують зміну внутрішньої температури та температури оболонки між етапом i та тимчасовим кроком $i+1$;

$$C_{int}(T_{int}^{i+1} - T_{int}^i) = \left[Q_{gains}^i + \eta P_{elec}^i + \frac{1}{R_{int}}(T_{env}^i - T_{int}^i) + \frac{1}{R_{ext}}(T_{ext}^i - T_{int}^i) \right] \Delta t \quad (28)$$

$$C_{env}(T_{env}^{i+1} - T_{env}^i) = \left[Q_{env}^i + \frac{1}{R_{int}}(T_{int}^i - T_{env}^i) + \frac{1}{R_{ext}}(T_{ext}^i - T_{env}^i) \right] \Delta t \quad (29)$$

Знаючи початковий стан внутрішньої температури та температури оболонки, можна розрахувати електричну потужність, необхідну для отримання певної внутрішньої температури. Бажана внутрішня температура – це фактично задана температура ТКН(T_{sp}). Отже, встановивши $T_{int}^{i+1} = T_{sp}$, можна визначити кількість споживаної електроенергії (P_{elec}^i) установкою.

Модель агрегування ТКН вимагає застосування двосторонніх протоколів зв'язку та обробки великої кількості даних в реальному часі. Однотипність принципу роботи обладнання дозволяє створити програмне забезпечення, що буде ефективно прогнозувати кількість гнучкості та дозволить не лише зменшити витрати на електричну та теплову енергію а й дозволить заощадити кінцевому споживачу на обслуговуванні встановленого обладнання.

2.3.4. Модель агрегування систем накопичення електричної енергії

Збільшення кількості електромобілей та розвиток альтернативної генерації сприяє поширенню систем акумулювання електричної енергії (CAE). Стохастичність альтернативних джерел електричної енергії спонукає до використання CAE, адже пікова генерація не завжди співпадає із споживанням. Раптові сильні потоки вітру чи сильна сонячна активність призводять до скачку

рівня генерації, до якого не підготовлений споживач. Використання САЕ дозволяє акумулювати надлишкову енергію у пік генерації та використовувати її під час пікового споживання. Конкурентна модель ринку електричної енергії передбачає продаж електричної енергії у пікові години споживання по значно вищій ціні, тому САЕ мають широкі перспективи розвитку.

Використання систем акумулювання різної ємкості та стаціонарних АКБ має значний потенціал, що надасть допомогу електромережі та зменшить провали добового графіка споживання [56]. Однак слід зазначити, що використання одиничних пристроїв накопичення не може бути представлено на ринку електроенергії через наступні причини;

1. необхідна мінімальна торгова потужність індивідуального сховища [57];
2. участь індивідуальних сховищ необґрунтовано збільшить кількість суб'єктів ринку, що збільшить складність управління ринками електроенергії.

Система акумулювання може виконувати роль генератора або споживача, взаємодіючи з мережею в залежності від необхідності та стану сховища. Взаємодія САЕ з електричною мережею може бути реалізована за допомогою одностороннього або двостороннього силового та інформаційного зв'язку з мережею. Односторонній зв'язок може забезпечити малу гнучкість системи та малі прибутки при реалізації електричної енергії [58]. Двосторонній зв'язок забезпечує більшу гнучкість системи, але зменшує термін служби акумуляторних батарей [59]. Тому розглядаються моделі за якими власники САЕ зможуть компенсувати втрачену користь від своєї систем акумулювання за рахунок підвищення плати за зберігання електричної енергії чи шляхом продажу електричної енергії у найбільш вигідний час [60].

Модель агрегування САЕ є нелінійною задачею, оскільки ефективність зарядки та розряду залежить від потужності заряду та розряду системи акумулювання. Беручи до уваги невизначеність ринкової кон'юнктури слід застосовувати стохастичний підхід для оптимального вирішення проблеми

проведення торгів агрегатором. Однак вирішити нелінійну стохастичну модель розрахунків складно через наступні причини;

1. оптимальне рішення не може бути гарантовано правильним (при нелінійній моделі);
2. збільшується складність обчислення зі збільшенням кількості сценаріїв (геометрична прогресія).

Головна задача агрегатора полягає у максимізації прибутку як свого так і власника САЕ. Оптимальну стратегію для агрегатора САЕ, що бере участь у торгівлі електричною енергією на БР електричної енергії можна представити у такій формі;

$$\text{Maximize } \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left[\begin{aligned} & ((\lambda_t - RC_t) p_{k,t}^{Bdch} \Delta t - c \frac{P_{k,t}^{Bdch}}{\eta_k^{dch}} \Delta t - \left| \frac{\mu_k}{100} \right| \frac{C_k^{cap}}{E_k^{max}} p_{k,t}^{Bdch} \Delta t) \\ & - ((\lambda_t + RC_t) p_{k,t}^{Bch} \Delta t - c \eta_k^{ch} p_{k,t}^{Bch} \Delta t + \left| \frac{\mu_k}{100} \right| \frac{C_k^{cap}}{E_k^{max}} p_{k,t}^{Bch} \Delta t) \end{aligned} \right] \quad (30)$$

де: k - індекс САЕ, $k = 1, \dots, K$;

t - період планування, $t = 1, \dots, T$;

m - індекс для циклів планування, $m = 1, \dots, M$;

Обмеження балансу САЕ можна моделювати як;

$$\begin{aligned} SoC_{k,t}^B = SoC_{k,t-1}^B + & \left[p_{k,t}^{ch} \cdot \Delta t \cdot \eta_k^{ch} - \frac{P_{k,t}^{dch}}{\eta_k^{dch}} \Delta t + p_{k,t}^{Bch} \cdot \Delta t \cdot \eta_k^{ch} - \frac{P_{k,t}^{Bdch}}{\eta_k^{dch}} \Delta t \right] A_{k,t} \\ & - D_k \cdot \Delta t \cdot \eta_k^{dr} (1 - A_{k,t}) \end{aligned} \quad (31)$$

Пояснення формульних значень винесено в Додаток А.

Слід зазначити, що вказані вище рівняння дозволяють моделювати як стаціонарні так і мобільні сховища електричної енергії (акумуляторні установки, що використовує міський та приватний транспорт).

Рівень зберігання та накопичення електричної енергії обмежений мінімальним та максимальним значенням ємності;

$$y_k^{\min} \cdot E_k^{\max} \leq SoC_{k,t}^B \leq y_k^{\max} \cdot E_k^{\max} \quad (32)$$

Обмеження (33) та (34) визначають рівень гнучкості заряду/розряду, виходячи з максимальної потужності заряду/розряду;

$$A_{k,t} \cdot P_k^{\min dch} \leq p_{k,t}^{Bdch} \leq (P_k^{\max dch} - P_{k,t}^{dch} + p_k^{ch}) A_{k,t} \quad (33)$$

$$A_{k,t} \cdot P_k^{\min ch} \leq p_{k,t}^{Bch} \leq (P_k^{\max ch} - P_{k,t}^{ch} + p_k^{dch}) A_{k,t} \quad (34)$$

Обмеження (35) та (36) обмежують швидкість розряду та заряджання сховища електричної енергії між будь-якими двома наступними годинами;

$$-R_k^{\max RDdch} \leq (p_{k,t}^{dch} + p_{k,t}^{Bdch}) - (p_{k,t-1}^{dch} + p_{k,t-1}^{Bdch}) \leq R_k^{\max RUdch} \quad (35)$$

$$-R_k^{\max RDch} \leq (p_{k,t}^{ch} + p_{k,t}^{Bch}) - (p_{k,t-1}^{ch} + p_{k,t-1}^{Bch}) \leq R_k^{\max RUch} \quad (36)$$

Для агрегації блоків САЕ використовується загальна модель, яка дозволяє об'єднувати різні типи технологій САЕ. Для деяких технологій САЕ обмеження швидкості руху може бути менш важливим.

Кінцеві рівняння сукупної потужності заряду/розряду будуть мати вигляд;

$$\sum_{k=1}^K p_{k,t}^{Bdch} = AP_t \quad (37)$$

$$\sum_{k=1}^K p_{k,t}^{Bch} = AP_t \quad (38)$$

Описана модель агрегування передбачає моделювання роботи великої кількості локальних систем акумулювання в реальному часі із застосування спеціального програмного забезпечення. Агрегатор може формувати сукупні пропозиції на ВДР та РНД збільшуючи таким чином пропозицію на купівлю та продаж електричної енергії. Дії агрегатора дозволяють підвищити ефективність електроенергетичної мережі та скоротити кількість втрат при перетворенні та передачі електричної енергії на великі відстані, що призведе до зменшення

економічних витрат та дозволить використати звільнені кошти для модернізації електроенергетичного сектору України.

2.3.5. Модель агрегування систем розосередженої генерації

Розвиток відновлюваних джерел електричної енергії дозволив збільшити кількість генерації екологічно чистої енергії. Поширення стратегії декарбонізації призвело до розвитку та збільшення кількості джерел альтернативної енергії. Головним мінусом альтернативних джерел енергії є їх стохастичність, що не дозволяє на даний час будувати точні прогнози та розраховувати на стабільну генерацію від ВДЕ.

У контексті проектів агрегування систем РГ необхідно розуміти, що обсяг заявок, поданих від СЕС та ВЕС на рівень генерації повинен відповідати наявному потенціалу генерації в даний момент часу. Швидкість вітру і сонячне випромінювання з часом змінюються і їх можна передбачити лише певною мірою. Генерація СЕС забезпечує можливість повного або часткового зменшення регулювання за рахунок зменшення обсягу введеної електроенергії. Пониження регулювання також використовується для вітроенергетики. Генератори вітрових турбін із системами з фіксованим кроком повинні бути повністю вимкнені шляхом гальмування та відкриття вимикача, тобто включення / вимикання. Контролюючи крок лопатей вітротурбіни, потужність можна частково зменшити, хоча деякі джерела вказують на те, що це значно збільшує зношеність.

Існує кілька тестових проектів [61], які вивчають можливість використання енергії вітру для підвищення регулювання. У часовому горизонті проекту, розумно припустити, що енергію вітру можна використовувати як для регулювання вгору, так і вниз. Можна зробити висновок, що:

- Генерація ВЕС та СЕС може забезпечити повну або часткову потужність регулювання вниз відповідно до наявного потенціалу генерації в даний момент.

- Залежно від технології, вітрогенератори та фотоелектричні панелі можуть знизити свою потужність і таким чином, надавати послуги з обмеження.

Потужність, що генерується одним генератором g на етапі часу, позначена як $P_{g,t}^{in}$ перетворюється генератором в фактичну вихідну потужність $P_{g,t}^{out}$, яка ніколи не може перевищувати максимальну вихідну потужність P_g^{\max} (або припливна потужність у часі). Робочий інтервал $O_{g,t}$ визначається як інтервал, у якому фактична потужність $P_{g,t}^{out}$ повинна бути в межах фізичних обмежень. Хоча очікується, що базова потужність $P_{g,t}^{base}$ зазвичай буде знаходитись у робочому інтервалі, також можуть бути випадки, коли це не відповідає дійсності, наприклад, якщо потужність вітру значно нижча, ніж було передбачено при поданні пропозиції на РДН. Ситуації, що можуть виникнути для генератора (Рис. 2.9) можуть відрізнятися, але будуть обмежувати:

а) Випадок, коли приплив більший за максимальний вихід генератора. Операційний інтервал тоді $O_{g,t} = [0, P_g^{\max}]$, а основна лінія лежить в середині нього.

б) Випадок, коли базова лінія нижча за приплив, а потужність припливу та базової лінії є нижчою за максимальний вихід. Тоді робочий інтервал виражається як $O_{g,t} = [0, P_{g,t}^{in}]$, а потужність базової лінії всередині робочого інтервалу.

в) Випадок, коли потужність припливу нижче базової лінії, тому робочий інтервал становить $O_{g,t} = [0, P_{g,t}^{in}]$. У цьому випадку базова лінія знаходиться поза межами робочого інтервалу.

Модель агрегування систем РГ обчислює вартість гнучкості генератора порівнюючи профілі генерації, розраховуючи економічну складову, що забезпечує заробіток агрегатора. Зважаючи на стохастичність РГ агрегатор

повинен закласти в розрахунки певний енергетичний буфер, який має бути перекритий при недостатній генерації.

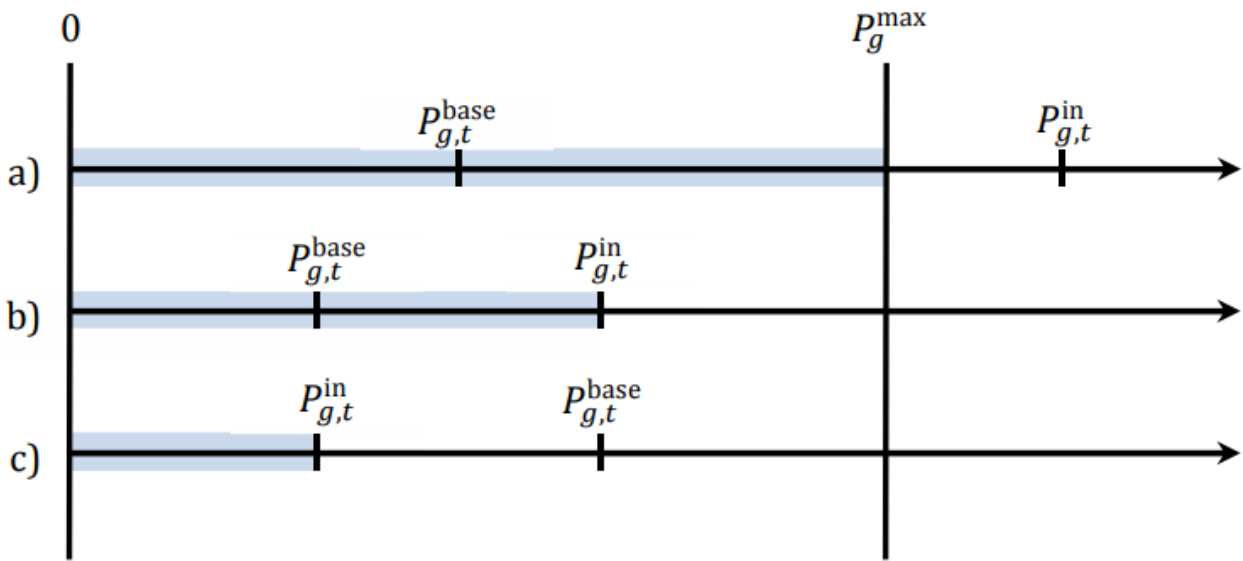


Рисунок 2.9 – Можливі комбінації росту базової лінії та прибутку

Слід зазначити, що дохід генератора буде складатися з доходу, що отримує генератор за рахунок субсидій плюс дохід від покриття власних потреб. Але генератор також має враховувати втрати на експлуатацію та обслуговування обладнання, а також старіння обладнання та амортизацію. Таким чином прибуток генератора буде визначатись як:

$$\pi_{g,t}^{base} = (\lambda_t^{el} + \lambda_{g,t}^{sub} - \lambda_{g,t}^{O\&M}) P_{g,t}^{base} \cdot \Delta t. \quad (39)$$

Передбачається, що дохід від продажу електричної енергії залишається майже стабільним за рахунок використання необхідних тарифів. Агрегатор також може стимулювати генератора фінансово за збільшення гнучкості, що допоможе вирівняти графік споживання. Таким чином прибуток від продажу електричної енергії на БР буде розрахований як:

$$\pi_{g,t}^{flex} = (\lambda_t^{el} \cdot P_{g,t}^{base} + (\lambda_{g,t}^{sub} - \lambda_{g,t}^{O\&M})(P_{g,t}^{base} + P_{g,t}^{flex}) + \lambda_{g,t}^{flex} \cdot P_{g,t}^{flex}) \Delta t. \quad (40)$$

Згідно з умовами обмежуючи кількості згенерованої електричної енергії для приватних генераторів та фіксованої ціни $C_{g,t}^{flex}$ - це ціна, яка очікується на торгах на балансуєчому ринку (Рис. 2.10), вона виражається як:

$$c_{g,t}^{flex} \geq (\lambda_{g,t}^{O\&M} - \lambda_{g,t}^{sub}) \pm (P_{g,t}^{flex}). \quad (41)$$

Показник гнучкості генератора знаходиться в інтервалі $[P_{g,t}^{flex,-}, P_{g,t}^{flex,+}]$.

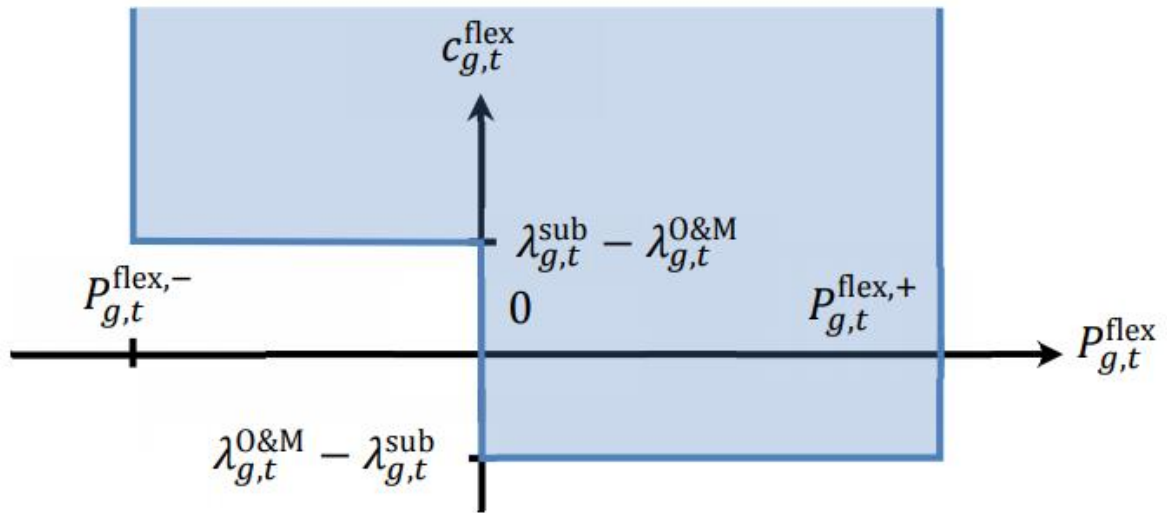


Рисунок 2.10 – Крива ставок для генератора, що продає електричну енергію

Прибуток генератора знаходиться у верхній частині кривої, він також може бути негативним та залежати від того, чи є субсидії на продаж електричної енергії, що генерується та поточної ціни на електричну енергію за споживання. Витрати на експлуатацію та обслуговування також враховуються при визначенні прибутковості від агрегування.

Модель агрегування систем РГ передбачає обробку великої кількості інформації в реальному часі, тому її застосування буде максимально ефективним у локальних електроенергетичних системах, що мають обмежену кількість генераторів та споживачів. Використання подібної моделі для агрегування систем обласного та державного рівня є дуже складною задачею для виконання якої необхідно проводити додаткові дослідження та створювати індивідуальне програмне забезпечення.

2.4. Висновки по розділу

1. У розділі було проаналізовано функціонування агрегатора в електроенергетичній системі та визначено основні моделі агрегування в залежності від типу електричної станції. В результаті проведення аналізу було

визначено функціонал агрегатора та сформовано ключові завдання, вирішення яких є пріоритетним для агрегатора.

2. Було визначено що моделі агрегування описані у розділі використовують базові принципи декомпозиції, а застосування запропонованих моделей агрегування вимагає наявності двостороннього інформаційного та силового зв'язку. Перевагами описаних моделей є забезпечення достатньої гнучкості та забезпечення індивідуального підходу до генератора в умовах локальної електроенергетичної системи.

3. Аналіз моделей агрегування дозволить створити ефективну модель агрегування ЛЕС з централізованим акумулюванням електричної енергії, яка буде враховувати особливості електроенергетичної системи України. Врахування ключових факторів дозволить створити гнучкі та ефективні алгоритми агрегування ЛЕС.

3. ЕФЕКТИВНОСТЬ АГРЕГУВАННЯ ЛОКАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ЦЕНТРАЛІЗОВАНИМ АКУМУЛЮВАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

3.1. Опис локальної електроенергетичної системи з централізованим акумулюванням електричної енергії

Потенціал використання систем акумулювання електричної енергії для підтримки надійної роботи локальних електроенергетичних мереж щорічно зростає [62]. Використання САЕ дозволяє підвищити надійність енергозабезпечення кінцевого споживача та підвищує енергоефективність будівлі. Розширення можливостей та способів застосування акумуляторних систем дозволяє підвищити гнучкість електроенергетичної системи та зменшити кількість втрат при передачі електричної енергії.

Використання акумулюючих потужностей в локальних електроенергетичних системах дозволяє зменшити втрати при передачі електричної енергії та підвищити якісні показники електричної енергії. Кінцевий споживач зацікавлений у встановленні САЕ, адже це підвищує його енергетичну незалежність та дає змогу заробляти на різниці вартості електричної енергії. Ефективність використання САЕ досягається шляхом представлення споживача на ринку електричної енергії. Для локальних електроенергетичних мереж припускається створення локальних ринків електричної енергії [63].

Збільшення кількості систем РГ призводить до негативної роботи електроенергетичної системи за рахунок нерівномірності генерації та стохастичності систем РГ. Застосування САЕ дозволяє на локальних рівнях забезпечити рівномірність споживання, що призводить до збільшення гнучкості системи та надійності електропостачання.

Для демонстрації спільної роботи систем РГ та САЕ пропонується використовувати локальну електроенергетичну мережу представлену на рисунку 3.1.

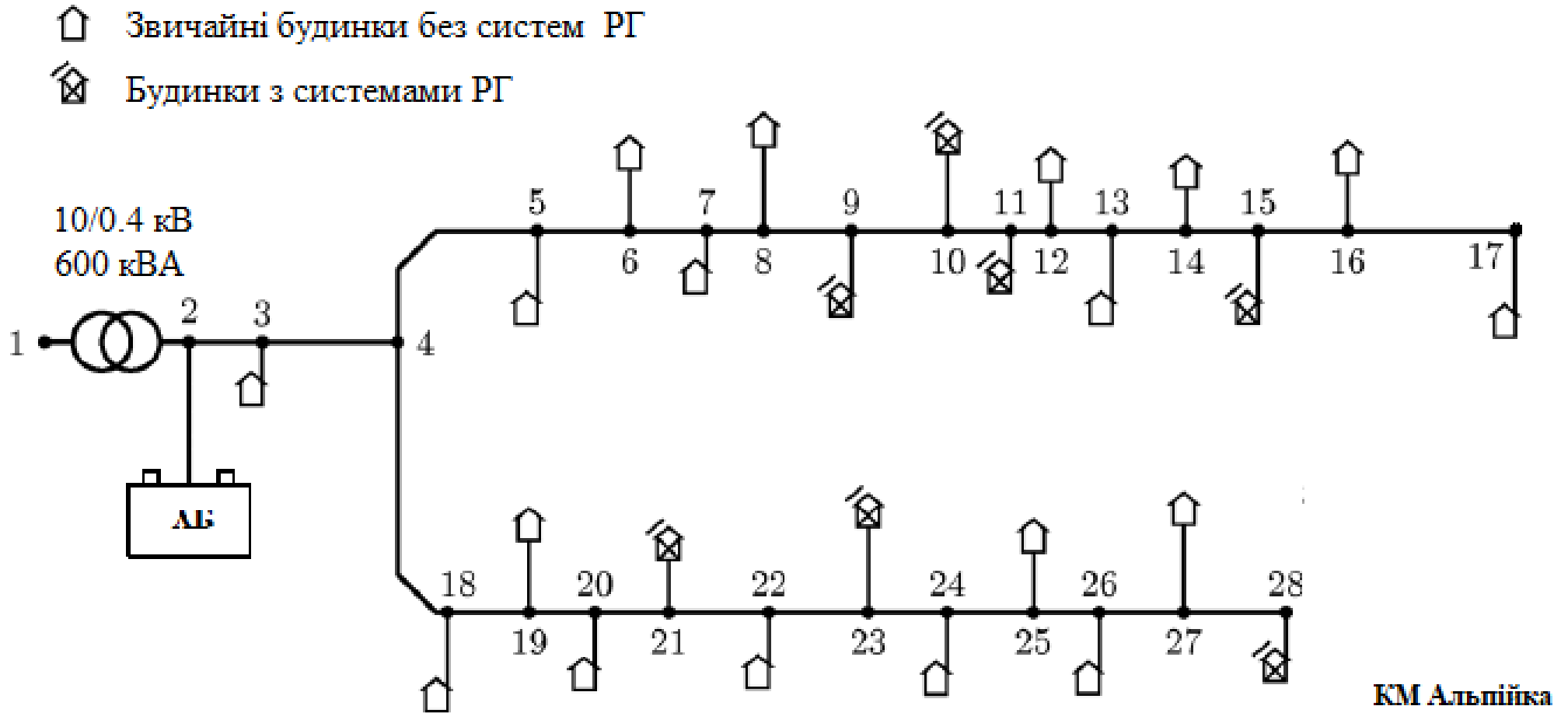


Рисунок 3.1 – Принципова схема локальної електроенергетичної системи КМ «Альпійка» з встановленими системами РГ

Запропонована локальна мережа використовує напругу 220/380 В, має декілька встановлених систем РГ та централізовану САЕ.

Проведення розрахунків та отримання максимально приближених даних вимагає створення наближеної моделі об'єкта моделювання (КМ Альпійка), принципова модель мережі зображено на рисунку 3.2.

Побудова моделей ЛЕС проводиться за рахунок використання ключових принципів макро моделювання. Поставлені задачі реалізуються за допомогою попереднього роздроблення (декомпозиції) моделі системи енергозабезпечення з подальшим спрощенням (редукцією) її ключових частин. При проектуванні моделей ЛЕС необхідно передбачити синхронне вирішення безлічі завдань;

- створення детальної моделі всієї системи (шини, лінії електропередачі, трансформатори, інвертори, джерела розосередженої генерації);

- проведення аналізу потужності (зниження та підвищення напруги, зниження та підвищення частоти, тощо);

- зібрання, зберігання та аналіз даних отриманих від: споживача, підстанцій, оператора системи;

- урахування специфіки роботи джерел розосередженої генерації.

За допомогою проведення декомпозиції можливо провести поділ на незалежні підструктури [64] та провести об'єднання окремих систем. Агрегування надає можливість поєднати окремі малопотужні системи (системи розосередженої генерації) приватних домогосподарств з урахуванням економіко-правових аспектів відносно учасників ринку електричної енергії.

Використання програмного забезпечення дозволяє максимально ефективно провести моделювання станції розосередженої генерації, з отриманням найбільш ефективних результатів. Велика кількість факторів впливають на результат, тому необхідно розробляти та впроваджувати алгоритми моделювання, які враховують особливості місцевої мережі,

дозволяючи покращити якісні та кількісні показники електроенергетичної системи в цілому.

При моделюванні ефективності проведення агрегування для створеного об'єкта будуть прийняті актуальні на 2019 рік техніко-економічні показники, що допоможе зрозуміти ефективність впровадження подібних систем в ОЕС України. На кожному з окремих об'єктів моделювання (будинку) буде встановлено систему енергетичного менеджменту, яка вимірює споживання електричної енергії в реальному часі за допомогою встановленого блоку управління [65]. Встановлені додатково трансформатори струму допоможуть відстежувати споживання по кожній з фаз будинку [66].

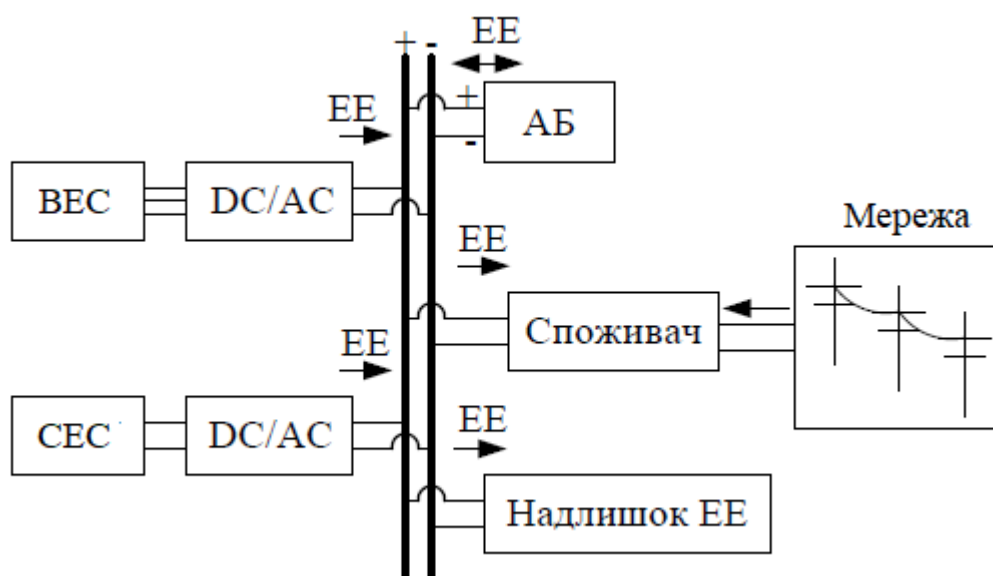


Рисунок 3.2 – Схема підключення систем РГ до ЛЕС

Споживачі, що знаходяться в будинках, електричне обладнання розділене за величиною споживаної потужності та має задану систему пріоритетів живлення. Система пріоритетів живлення допоможе АЛЕС змінювати режими роботи обладнання виходячи з необхідності ЛЕС та попиту на електричну енергію на БР електричної енергії. Управління об'єктом моделювання буде виконувати персональний вузол керування (Рис. 3.3), що буде знаходитись в електричній шафі будинку.

Для повноцінного управління та досягнення максимальної енергоефективності та прибутку від агрегування необхідне встановлення

інформаційного зв'язку між системою моніторингу та агрегатором, а також між електричною мережею та агрегатором.

У приведеній схемі підключення задіяні комутаційні апарати та перемикачі, які знаходяться у вузлі комутації та використовуються для керування електроенергетичними процесами будинку. Агрегатор використовує інформаційний зв'язок для отримання інформації та створення комфортних умов для кінцевого споживача.

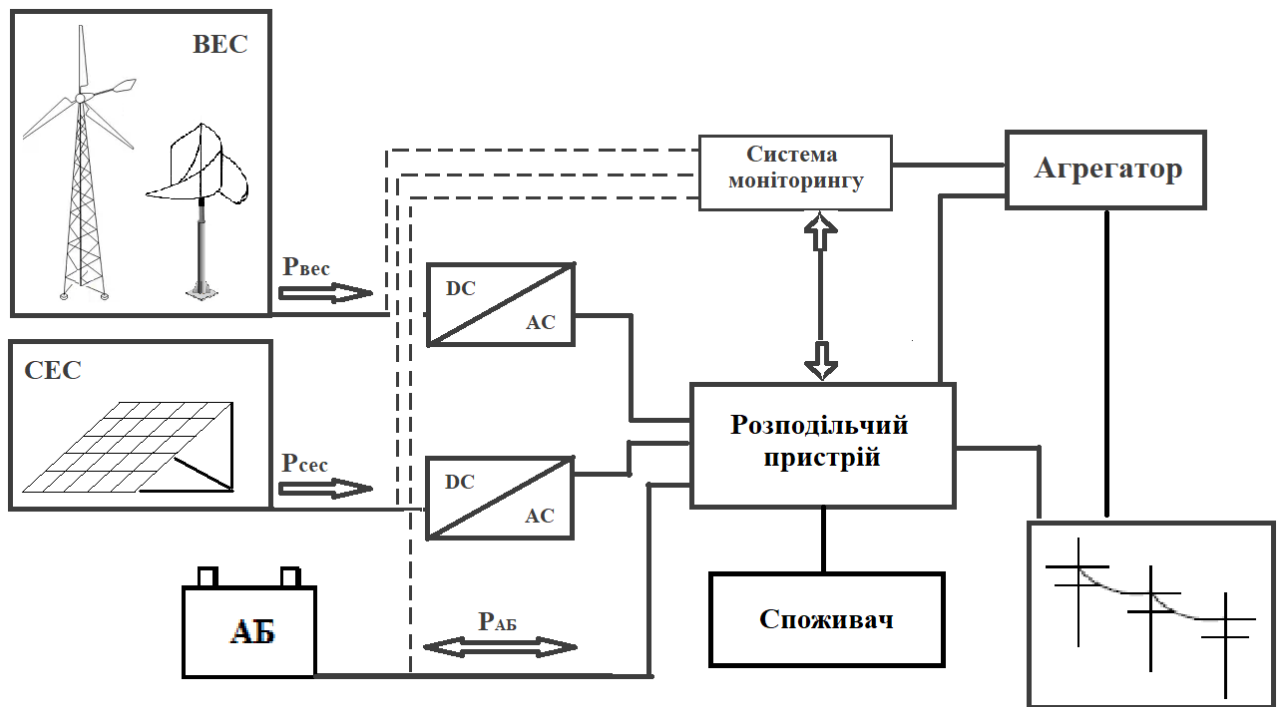


Рисунок 3.3 – Принципова схема підключення систем РГ до ЛЕС

Керування подібними системами може виконувати як сам споживач, жертвуючи можливістю отримати винагороду за продаж електричної енергії, так і агрегатор, який буде використовувати алгоритми для створення гнучкості, за яку він отримає прибуток. Моделювання подібної мережі дозволить дослідити ефективність агрегування та можливість застосування алгоритмічного керування в ЛЕС.

3.2. Алгоритм агрегування систем РГ та ЛЕС

Моделювання локальної системи передбачає живлення споживача за рахунок трьох джерел живлення: електрична мережа, згенерована електрична

енергія системами РГ та АБ. В залежності від необхідності та алгоритму, що буде встановлений АЛЕС буде відбуватися зміна джерела живлення.

Будинки, що маю встановлені системи РГ в певний час будуть мати надлишок електричної енергії, яка буде передаватися в мережу ЛЕС та використовуватися іншими споживачами, надлишок електричної енергії йде на заряд АБ (при необхідності) та згідно Закону України «Про електроенергетику» [67], буде продаватися за «зеленим» тарифом.

Система моніторингу відстежує кількість згенерованої електричної енергії та споживання, передає дані агрегатору, який проводить співставлення отриманих даних та керуючись попитом на електричну енергію приймає рішення для ефективного використання ресурсів ЛЕС (Рис.3.4).

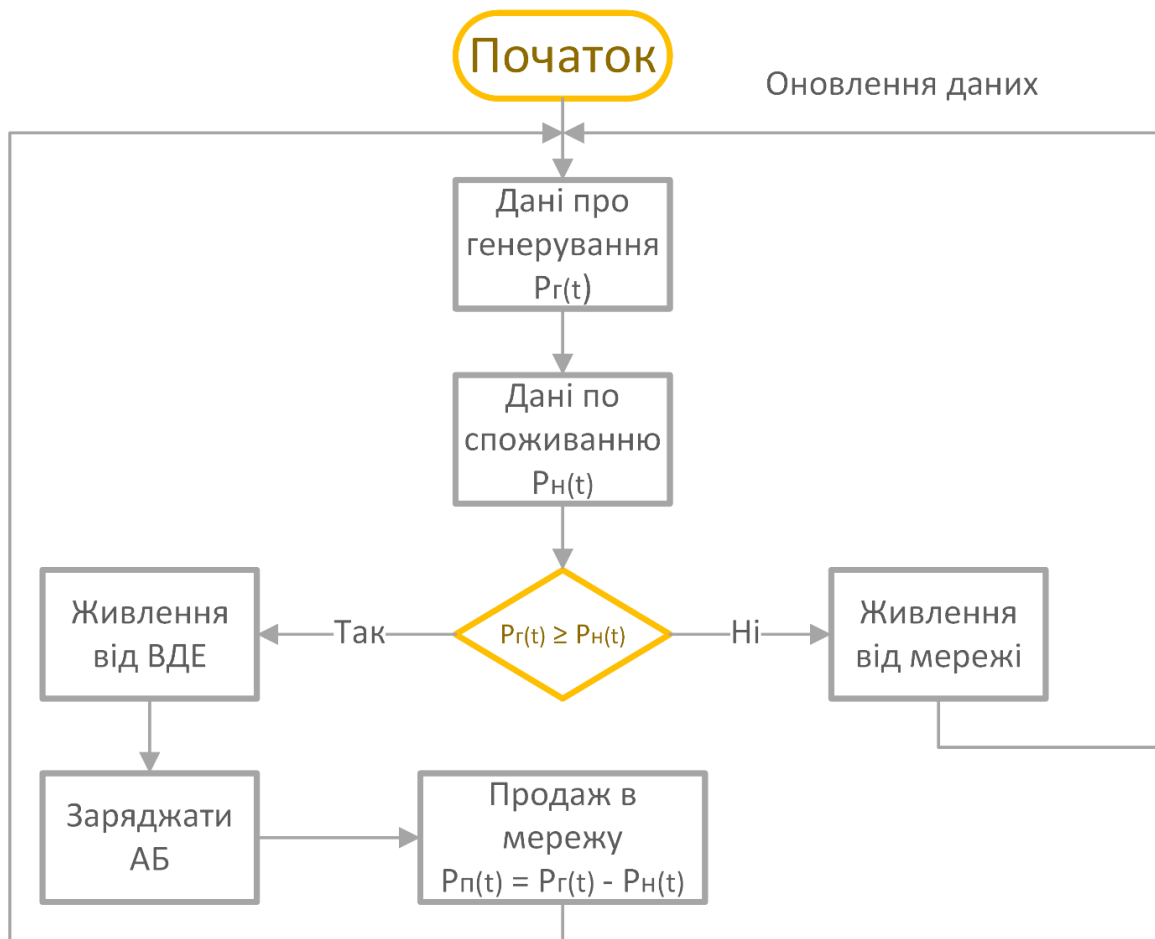


Рисунок 3.4 – Алгоритм визначення надлишку електроенергії

Початкові дані для проведення розрахунків будуть залежати від безлічі факторів, але оновлення інформації згідно заданим інтервалам та залучення статистичних даних допоможуть агрегатору розрахувати кількість гнучкості,

яку він може продати в мережу. Для отримання збільшеного прибутку алгоритм розширюється шляхом залучення додаткової інформації. Агрегатору необхідно володіти максимальною кількістю інформації щодо встановленого обладнання та його режимів роботи.

Визначити та класифікувати обладнання можливо за рахунок отримання даних від системи моніторингу. Велика кількість обладнання має певні режими роботи за якими можна класифікувати обладнання, або хоча би сформувавши алгоритм його роботи та визначити коефіцієнт використання даного обладнання [68].

Створюючи базу статистичних даних АЛЕС може створювати точні прогнози, щодо необхідної електричної енергії протягом декількох майбутніх годин. Зміна режиму роботи обладнання дозволяє розширити алгоритм керування (Рис. 3.5).

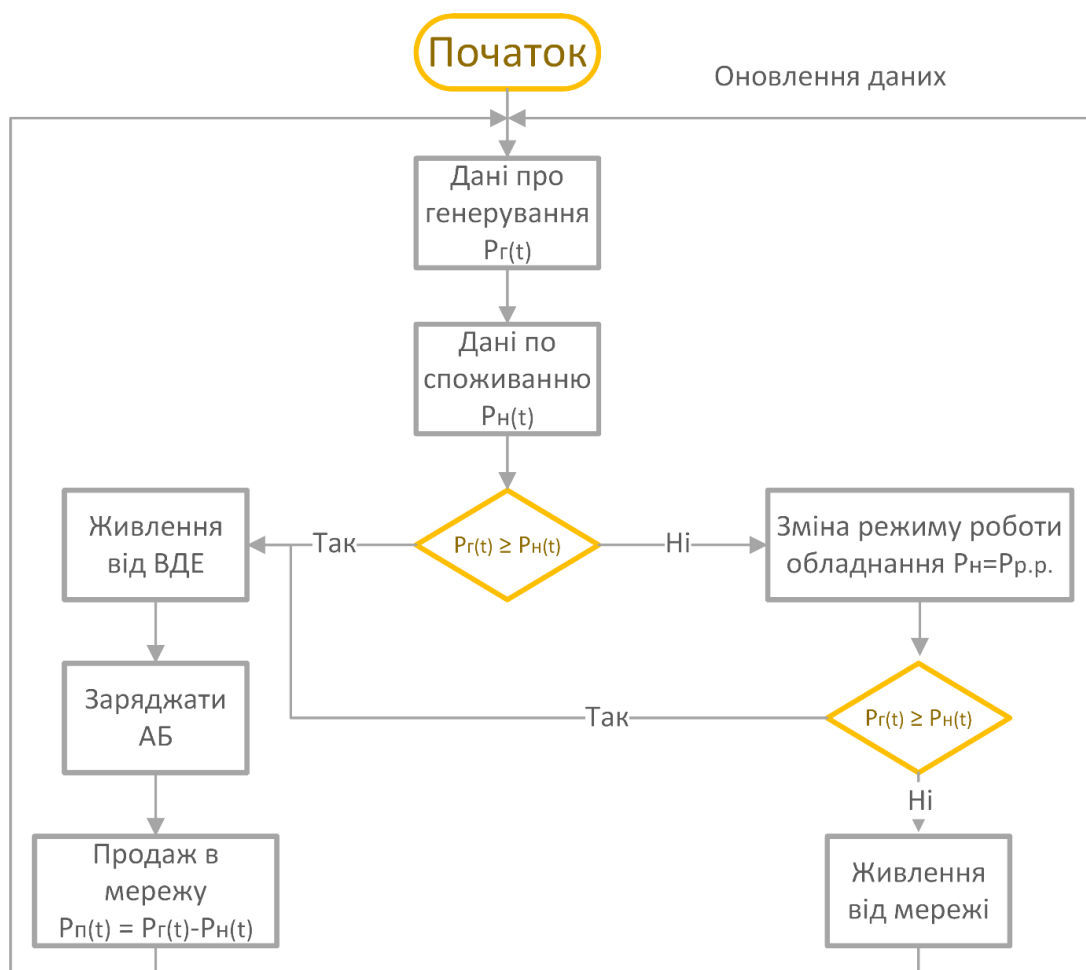


Рисунок 3.5 – Розширений алгоритм визначення надлишку електроенергії

Розрахунок ефективності системи залежить від тарифної сітки, яка встановлена на території України [69]:

1. У неопалювальний сезон (1.05 – 30.09):

– якщо місячний обсяг споживання ЕЕ не перевищує 100 кВт·год, то тариф на ЕЕ встановлюється в розмірі 0,90 грн. за кВт·год;

– якщо місячний обсяг споживання ЕЕ перевищує 100 кВт·год, то тариф на ЕЕ встановлюється в розмірі 1,68 грн. за кВт·год.

2. В опалювальний сезон (1.10 – 30.04):

– якщо місячний обсяг споживання ЕЕ не перевищує 3000 кВт·год, то тариф на ЕЕ встановлюється в розмірі 0,90 грн. за кВт·год;

– якщо місячний обсяг споживання ЕЕ перевищує 3000 кВт·год, то тариф на ЕЕ встановлюється в розмірі 1,68 грн. за кВт·год.

Користуючись наведеними алгоритмами АЛЕС виконує агрегування розраховуючи кількість необхідної потужності та кількість необхідної гнучкості для мережі беручи до уваги можливі альтернативні профілі споживання. Сформовані алгоритми можна розширити за рахунок врахування факторів, що будуть впливати на рівень генерації та рівень споживання. Вирішення оптимізаційних задач – головні завдання агрегатора, які .

3.3. Визначення необхідної ємності накописувачів

Метою даного дослідження є пошук оптимальних параметрів ЛЕС, шляхом проведення математичного моделювання та комп'ютерного дослідження. Для отримання коректних даних необхідно задати максимально приближені дані, що описують споживання всіх кінцевих споживачів ЛЕС.

Котеджне містечко має власну трансформаторну підстанцію (ТП), від якої містечко отримує живлення, яке являється основним джерелом живлення. Графік споживання електричної енергії однієї з ліній КМ представлений на рисунку 3.6 та 3.7. Дані було надано компанією Sunny Portal, яка буде проводити монтаж СЕС на дахах будинків КМ.

КМ "Альпійка" 2017-2018 р.

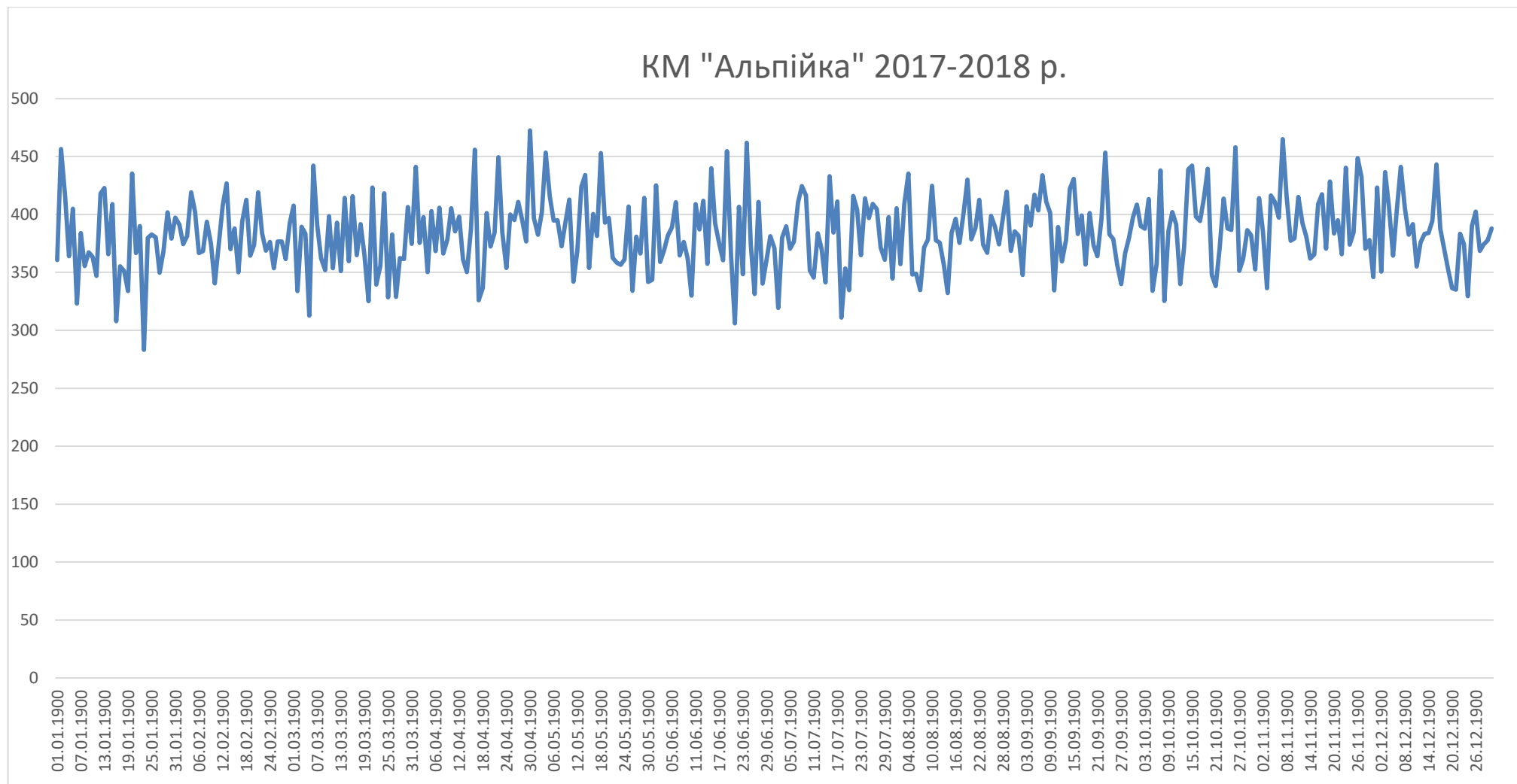


Рисунок 3.6 – Графік споживання електричної енергії КМ «Альпійка» за 01.01.2017 – 01.01.2018

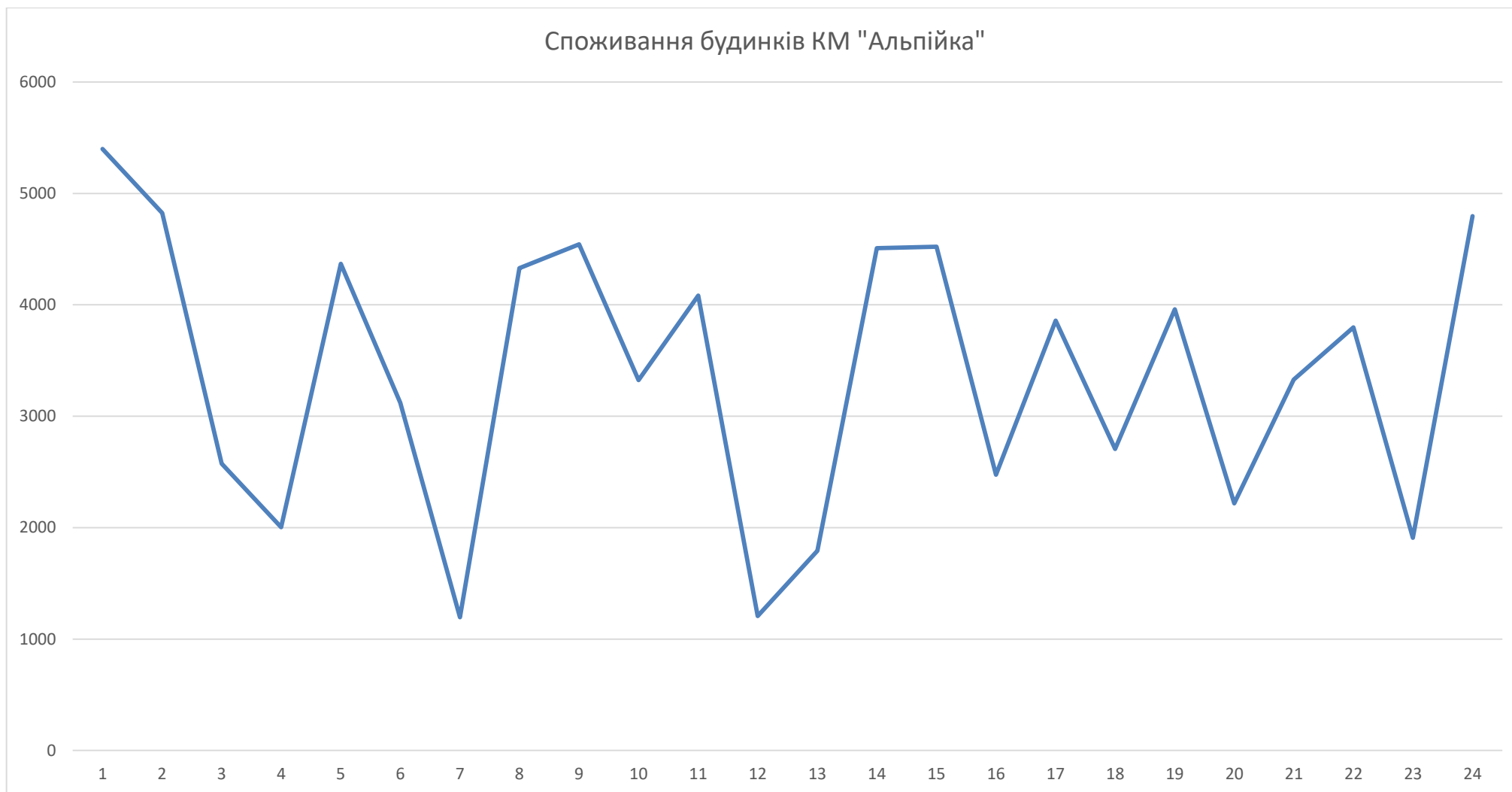


Рисунок 3.7 – Графік споживання електричної енергії за 2018 рік

На початковому етапі аналізу об'єкта агрегування необхідно виявити наступні характеристики мережі, що проектується та моделюється:

- типи генеруючого та трансформуючого обладнання з їх параметрами;
- дані по споживанню електричної енергії;
- дані по генерації електричної енергії.

На основі отриманих даних можна спрогнозувати необхідну кількість акумулювання електричної енергії, що дозволить створити максимально ефективний енергетичний буфер для живлення лінії на декілька годин.

У будинках КМ встановлене різноманітне обладнання, тому для повноцінної оцінки, моделювання та прогнозування ефективності агрегування вимагає створення бази даних, яка допоможе в подальшому чітко аналізувати та прогнозувати споживання електричної енергії.

Спрощена математична модель для оптимізації можна виразити у наступному вигляді:

$$\sum X_{сес} \cdot P_{сес} + \sum X_{вес} \cdot P_{вес} + \sum X_{са} \cdot P_{са} + X_{мер} \cdot P_{мер} = B + \sum b \quad (42)$$

де X – кількість акумулюючого чи генеруючого обладнання однакової номінальної потужності;

P – потужність, яку може надати обладнання в конкретній момент часу, відповідно до отриманих результатів при попередньому моделюванні;

B – споживання електроенергетичної спільноти у конкретний момент часу згідно результатам попереднього моделювання;

B – страти електричної енергії в мережі під час перетворення та передавання електричної енергії;

$сес$ – параметри, що стосуються сонячних електростанцій;

$са$ – параметри, що стосуються систем акумулювання електричної енергії.

Рівняння, яким можна описати забезпечення локальної електроенергетичної спільноти умови повної автономності буде мати вигляд:

$$\sum X_{сес} \cdot P_{сес} + \sum X_{са} \cdot P_{са} + X_{мер} \cdot P_{мер} = B + \sum b \quad (43)$$

Використання СА дозволяє виконувати одразу дві задачі: зміщати пікі споживання до піків генерації та компенсувати відхилення генерації та споживання від прогнозованих.

У випадку коли комбінація від ВДЕ та електроенергія, що видається від СА використовується для того, щоб споживачі отримували необхідну кількість електричної енергії необхідно забезпечити повну істинність рівняння:

$$\sum X_{сес} \cdot P_{сес} + \sum X_{са} \cdot P_{са} \geq B + \sum b - X_{мер} \cdot P_{мер} \quad (44)$$

Обмеженнями оптимізаційної задачі будуть виступати кількість накопиченої енергії та мінімальний рівень заряду в СА, обмеження по зміні потужності активних споживачів [70], наявність об'єму енергії для покупки або продажу на енергоринку, максимальна пропускна здатність лінії, максимальний рівень потужності обладнання.

В залежності від використання та необхідної кількості акумулювання необхідно вибрати оптимальний об'єм накопичувача. Дослідивши графіки споживання та генерації можливо вибрати декілька типів СА, використання яких відповідає технічним умовам локальної мережі.

3.4. Оцінка ефективності агрегування локальної електроенергетичної системи з централізованим акумулюванням електричної енергії

Дослідження ефективності агрегування складна математична задача з великою кількістю змінних, проведення точно дослідження потребує використання спеціального програмного комплексу, що буде проводити розрахунки. Результат агрегування локальної системи протягом одного дня представлено на рисунку 3.8.

Моделювання локальної системи з великою кількістю змінних вимагає .

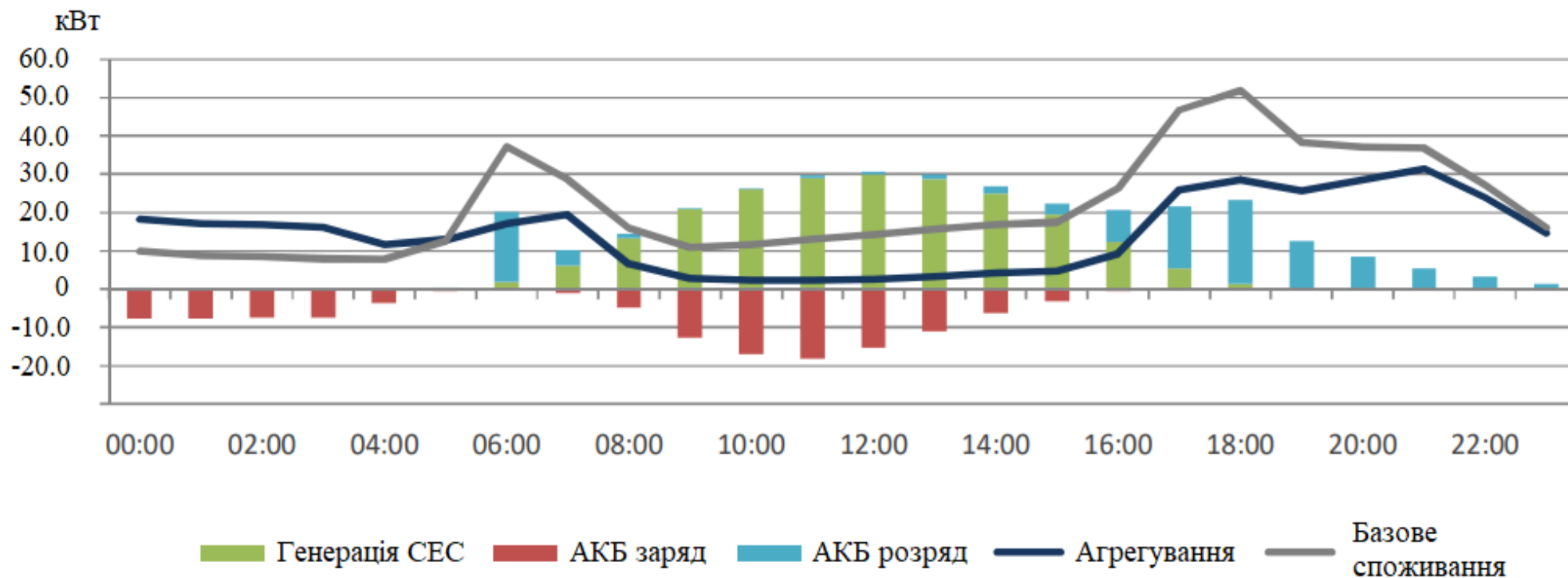


Рисунок 3.8 – Узагальнюючий графік за результатами агрегування ЛЕС

створення точної математичної моделі та застосування потужного обладнання для проведення точних розрахунків.

Слід зазначити, що системи агрегування локальних електроенергетичних систем вимагає не тільки підключення двостороннього інформаційного зв'язку, а і створення окремої мережі за допомогою унікального програмного коду. Компанії, що займаються впровадженням подібних систем створюють персональне програмне забезпечення, що дозволяє уникнути неполадок при обміні та обробкою інформації, скоротити кількість програмних помилок під час експлуатації подібної системи. Використання подібного програмного забезпечення дозволяє налаштувати алгоритмічне вирішення відповідно до потреб та технічних вимог організації чи компанії, яка буде використовувати програмне забезпечення.

Графік представлений вище показує, що агрегування локальних електроенергетичних спільнот з централізованим акумулюванням електричної енергії дозволяє згладити графік навантаження. Використання акумуляторних систем, керування споживанням та ефективного використання згенерованої електричної енергії дозволяє збільшити гнучкість електроенергетичної системи та підвищити якісні та кількісні показники локальних електроенергетичних систем.

Використання алгоритмічного вирішення по агрегуванню локальних систем дозволить збільшити кількість зацікавлених споживачів, адже в перспективі використання подібних систем дозволить заробляти кінцевому споживачеві не лише за згенеровану кількість електричної енергії, а й за створення гнучкості системи та підвищення енергоефективності.

Результат моделювання середньостатистичного дня показав, що агрегування локальних систем є перспективним напрямком керування не тільки локальних електроенергетичних систем, а й цілих енергосистем окремих регіонів. Складнощі, які будуть при впровадженні алгоритмічних рішень для масштабних систем засновуються у збільшенні кількості інформації, яку необхідно отримати та проаналізувати, що в свою чергу вимагає створення

окремих центрів де буде встановлене обладнання, яке буде проводити агрегування.

Висновки

1. Дослідження локальної електроенергетичної системи, яка була представлена (КМ «Альпійка») дозволило зрозуміти приближені технологічні обмеження та технічні умови якими буде супроводжуватися проведення агрегування. Розуміння технічних обмежень дуже важливий елемент побудови системи і створення алгоритмічного рішення для проведення агрегування.

2. Проведення моделювання допомогло сформуванню основні обмеження та зрозуміти масштабність подібних систем. Виконання агрегування локальних систем вимагає створення універсальних та уніфікованих алгоритмічних рішень, що дозволять розрахувати кількість гнучкості, яку може надати система в реальному часі в інтервалі 1-5 хвилин.

3. Моделювання роботи локальної системи на прикладі одного середньостатистичного дня дозволило сформуванню базові алгоритмічні вирішення та застосувати їх на практиці. Отримані результати показують, що агрегування локальних систем розосередженої генерації з централізованим акумулюванням електричної енергії дозволяє згладити профіль споживання, збільшити гнучкість системи та суттєво підвищити якісні та кількісні показники електроенергетичної системи.

4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1. Опис концепту ідеї проекту

Ідея проекту полягає у створенні спеціального модуля із програмним забезпеченням, який дозволить створити систему моніторингу. Модуль SM-D8 допоможе в простій і візуальній формі контролювати споживання електричної енергії, води, газу, тепла, аналізувати температуру, вологість, тиск, освітленість в приміщенні та на вулиці, рівень CO₂ та рівень рН (Рис.4.1). Використання даного модуля передбачає створення графіків споживання в реальному часі, які зможуть використовувати як оператори так і кінцевий споживач.

Опис ідеї стартап-проекту, що розкриває повноцінне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких буде проводитись пошук потенційних клієнтів вказаний у таблиці 4.1 [71].

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення модуля для моніторингу споживання енергоресурсів та умов навколишнього середовища	1. Моніторинг споживання енергоресурсів.	- отримання візуальних та числових показників в реальному часі.
	1. Використання даних для агрегування енергетичної системи.	- підвищення гнучкості системи.
	2. Створення бази статистичних даних для моделювання та розрахунку майбутніх об'єктів.	- прогнозування споживання; - база даних для моделювання

Кінцевий споживач отримає широкий спектр показників у вигляді графіків з поясненням кожної величини. Компанії, що встановлюють

Принципова схема підключення модуля SM-D8

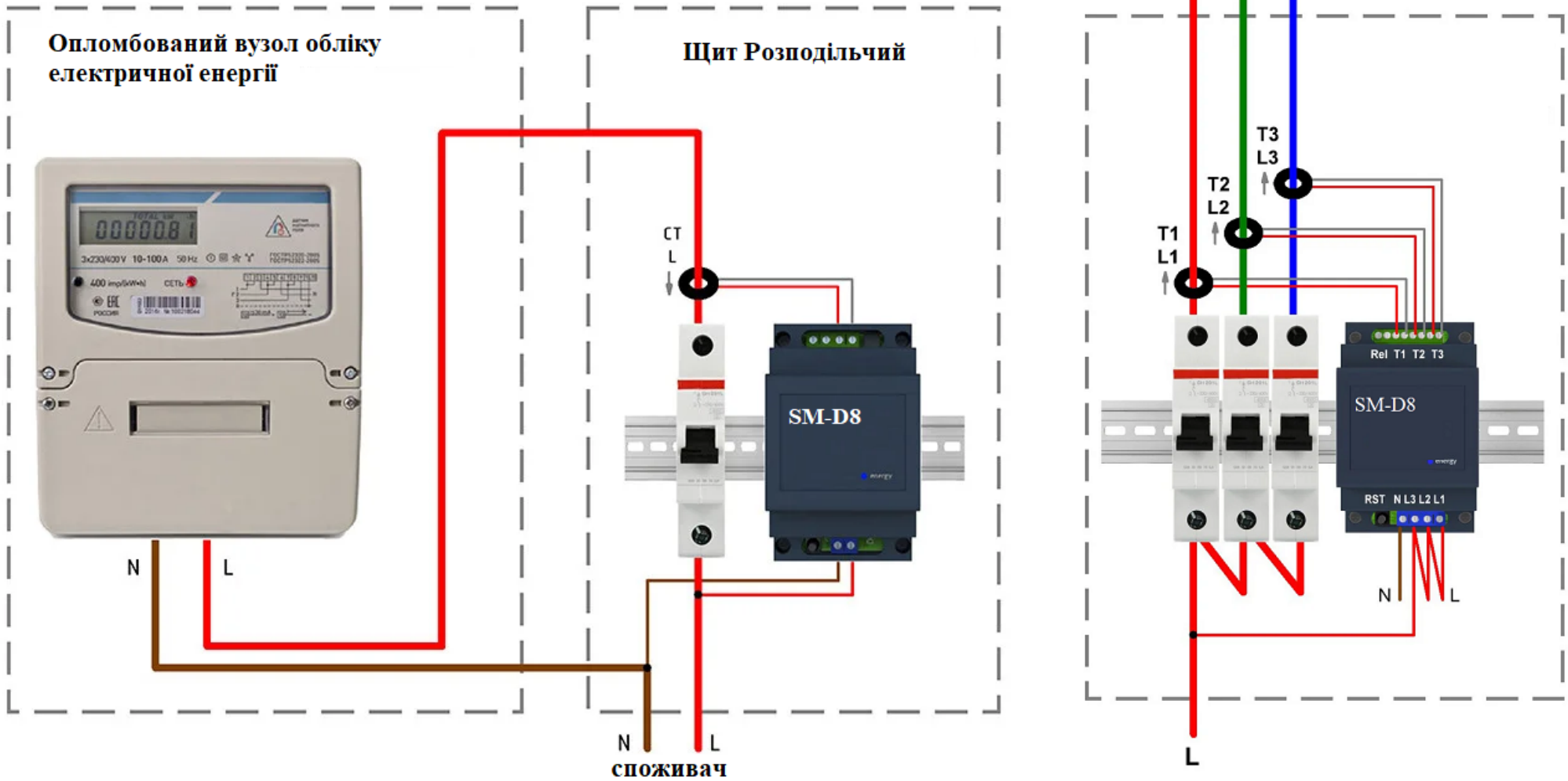


Рисунок 4.1 – Принципова схема підключення модуля SM-D8 для проведення вимірювання

лічильники можуть використовувати даний продукт для моніторингу, аналізу, прогнозування та створення статистичної бази для подальшого використання при моделюванні мереж, створення нових систем та модернізацію вже існуючих. Конкуренція на ринку смарт технологій доволі суттєва, але модуль націлений на покупців сусідніх країн, тому продукт повинен бути націлений на потреби потенційних покупців з України, Польщі, Білорусії. Порівняння з аналогами та визначення сильних та слабких сторін проводиться у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкуrentів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		SM- D8	Panasonic KW1M	Schneider PM5000			
1.	К-сть фаз 1-3	+	+	+		+	
2.	Встановлення на дін-рейку	+	+	-			+
3.	Наявність дісплею	-	+	+	+		
4.	Візуалізація графіків	+	+	-		+	
5.	Імпульсний вхід	+	-	+		+	
6.	Моніторинг ВДЕ	+	-	-			+
7.	Моніторинг температури	+	+	+		-	
8.	База даних	+	-	-			+

Провівши порівняння модуля з аналогічними пристроями можна зробити висновок, що модуль є конкурентоспроможним, але розвиток технологій

призводить до створення нових модулів, що можуть створити активну конкуренцію описаному стартап-проекту.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології, за допомогою якої можливо реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технології здійснення ідеї проекту передбачає аналіз складових, що зображені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1.	Розробка веб-інтерфейсу	Мова програмування JavaScript	Наявна	Доступна
2.	Облік електричної енергії	Трансформатори струму та напруги	Наявна	Доступна
3.	Підключення інших датчиків	Імпульсний вхід	Наявна	Доступна
4.	Управління навантаженням дистанційно	Релейний блок	Наявна	Доступна

Розвиток технологій на час створення стартап-проекту дозволяє реалізувати задуманий функціонал у повному обсязі та дозволить створити конкурентоспроможний продукт. Важливим є використання якісних компонентів, але слід враховувати, що якісні елементи можуть призвести до суттєвого удорожчання продукту.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей модуля, які можуть бути використані під час ринкового впровадження проекту передбачає ретельний аналіз переваг, що дозволить уникнути проблем пов'язаних з реалізацією проекту. Аналіз ринку дозволить спланувати напрямки розвитку проекту з урахування можливих змін ринкового середовища та потреб потенційних клієнтів. У таблиці 4.4 проведено аналіз загроз, що зможуть вплинути на реалізацію проекту, а у таблиці 4.5 описано фактори можливостей, що дозволять розширити купівельну базу.

Таблиця 4.4 – Фактори загроз

№ п/п	Фактори	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Створення аналогічного продукту за меншу ціну.	- зниження ціни - розширення функціоналу
2.	Складне економічне становище в країні	Брак коштів для реалізації продукту, зменшення купівельної спроможності.	- зниження ціни - перехід на ринок Європи
3.	Недостатня технологічна база	Відсутність створення певних компонентів продукту	- замовлення компонентів у іншій країні - перенесення виробництва

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу - матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities), SWOT-аналіз продемонстрований у таблиці 4.5. Даний аналіз допоможе зрозуміти переваги продукту та створити стратегії розвитку.

Таблиця 4.5 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактори	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Розвиток програмного забезпечення	Створення і оновлення функцій, розширення функціоналу	Реклама продукту Вихід на нові ринки
2.	Створення статистичної бази	Створення бази даних для досліджень та моделювання	Реклама продукту Перехід на нові ринки

Таблиця 4.6 – SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - постійна он-лайн підтримка програмного забезпечення; - постійне інформування користувача; - використання для управління мережею. 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - вимагає постійного доступу до інтернету (якщо не інтегрований в систему будинку); - мала популярність серед людей похилого віку.
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> - розвиток програмного забезпечення; - збільшення функціоналу; - вихід на ринок Європи. 	<p>Заходи:</p> <ul style="list-style-type: none"> - складне економічне становище в країні; - конкуренцію складають компанії з великими фінансовими та дослідницькими можливостями.

Проведення SWOT-аналізу допомогло зрозуміти сильні сторони продукту та можливості його розвитку, що дозволить розробити стратегію націлену на більшу кількість покупців. Аналіз слабких сторін та загроз дозволить в

майбутньому уникнути складнощів та зменшенню кількості покупців, що призведе до стабільного розвитку продукту та компанії в цілому.

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів. Вибір цільових груп потенційних споживачів проведений у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтований попит в мережах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота в сегменті
1.	Компанії, що виробляють електричну енергію	Повна готовність	Високий	Середня	Просто
2.	Компанії, що займаються автоматизацією приміщень	Повна готовність	Високий	Висока	Просто
3.	Інвестори	Повна готовність	Високий	Слабка	Просто
4.	Державні органи	Часткова готовність	Середній	Помірна	Складно

Після проведення аналізу було визначено цільову групу, на яку буде орієнтована компанія: компанії, що займаються автоматизацією приміщень та компанії, що займаються виробленням та передаванням електричної енергії.

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Визначення ключових переваг концепції потенційно товару показано у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентом
1.	Надійність та захищеність	Індивідуальний доступ до власного кабінету	Індивідуальний доступ
2.	Повнота даних	Повний аналіз даних по об'єкту	Повнота даних
3.	Технічна підтримка та оновлення програмного забезпечення	Створення і оновлення функцій, розширення можливостей, оновлення програмного забезпечення	Враховання індивідуальних побажань клієнтів, можливість редагування персонального інтерфейсу користувачем, можливість контролювати оновлення програмного забезпечення.

Для вироблення чіткого та переконливого уявлення про продукт компанія повинна створити концепцію розвитку та маркетингової комунікації з потенційними покупцями. Концепція маркетингової комунікації, яка буде застосовуватися для заохочення нових покупців та розширення ринку збуту продукту представлена у таблиці 4.9.

Окрему увагу при розробці концепції маркетингу приділено широкій популярності та проникності соціальних мереж у повсякденне життя кожної

людини. Залучення купівлі товару зі сторони компаній буде проводитись за рахунок персональних презентацій обладнання та наданням демонстраційних зразків.

Таблиця 4.8 – Концепція маркетингової комунікації

№ п/п	Цільові групи	Канали комунікацій, цільових клієнтів	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного повідомлення
1.	Компанії, які виробляють електричну енергію	Інтернет Надання демонстраційних зразків	Надійність, повнота інформації, доступність	Зацікавити клієнта	Зручність, надійність, достовірність
2.	Компанії, які займаються автоматизацією приміщень	Інтернет Надання демонстраційних зразків, обслуговування	Надійність, повнота інформації, доступність	Зацікавити клієнта	Зручність, надійність, достовірність
3.	Інвестори	Інтернет	Надійність, повнота інформації, доступність	Зацікавити клієнта	Зручність, надійність, достовірність
4.	Державні органи влади	Інтернет	Надійність, повнота інформації, доступність	Зацікавити клієнта	Зручність, надійність, достовірність

4.6. Висновки по розділу

1. Розроблений стартап-проект, головна ідея якого полягає у створенні модуля, який за рахунок програмного забезпечення буде проводити моніторинг споживання різних енергетичних ресурсів.

2. Дослідження дозволило визначити, що найбільший попит на продукт буде серед компаній, що займаються автоматизацією приміщень та компаній, що займаються виробленням електричної енергії.

3. За результатами дослідження виявлено, що регулярна технічна підтримка, оновлення програмного забезпечення та розширення функціоналу споживача дозволить зменшити вплив конкуренції, збільшити кількість покупців на території України, Польщі та Білорусі та вийти на ринки Європи.

Висновки

1. У першому розділі дисертаційній роботі було проаналізовано досвід Європейських країн в реалізації проектів по впровадженню локальних систем розосередженої генерації з централізованим акумулюванням електричної енергії та інтелектуальних електроенергетичних технологій. Визначено, що провідні Європейські університети та компанії впроваджують ЛЕС за рахунок державного та приватного фінансування. Необхідність проведення впровадження нового обладнання обґрунтовується збільшенням якісних показників всієї електроенергетичної системи в цілому, за рахунок впровадження локальних інтелектуальних систем.

2. Аналіз мережевої інфраструктури України показує, що впровадження локальних систем розосередженої генерації із застосування інтелектуальних технологій дозволить збільшити енергоефективність системи та суттєво зменшити втрати електричної енергії при перетворенні та передачі. Впровадження інтелектуальних систем дозволить суттєво підвищити рівень комфорту кінцевого споживача та дозволить залучити споживача до фінансування в ІЕС.

3. Було виявлено, що формування розвиненої мережевої інфраструктури вимагає впровадження АЛЕС, для координації та оперативного

керування ІЕС. В Україні стрімко розвиваються відновлювані джерела енергії, які можна використовувати для створення ефективних ІЕС, які на локальних рівнях дозволять зменшити кількість втрат при передачі та перетворенні електричної енергії.

4. У другому розділі було визначено, що моделі агрегування, які описано використовують базові принципи декомпозиції, а застосування запропонованих моделей агрегування вимагає наявності двостороннього інформаційного та силового зв'язку. Перевагами описаних моделей є створення достатньої гнучкості системи та забезпечення індивідуального підходу до генератора в умовах локальної електроенергетичної системи.

5. Аналіз моделей агрегування дозволив створити ефективну модель агрегування ЛЕС з централізованим акумулюванням електричної енергії, яка буде враховувати особливості електроенергетичної системи України. Врахування ключових факторів дозволить створити гнучкі та ефективні алгоритми агрегування ЛЕС.

6. Моделювання проведеного агрегування дозволило отримати уявлення про алгоритмічне вирішення, яке буде використовувати агрегатор для створення гнучкості системи та оцінити отримані показники. В результаті моделювання було виявлено, що агрегування локальних систем з централізованим акумулюванням електричної енергії технологічно складний процес, що вимагає застосування потужного обладнання та створення персональної мережі інформаційного зв'язку.

7. Розроблений стартап-проект дозволить прискорити створення систем агрегування, адже його функціонал дозволить забезпечити отримання великої кількості інформації від кінцевого споживача. Модуль забезпечить моніторинг споживання електричної енергії та інших ресурсів з однохвилинним оновленням інформації, що дозволить створити статистичну базу, яка буде оновлюватись та використовуватись для досліджень та моделювання нових електроенергетичних систем.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електронний ресурс: <https://ua-energy.org/uk/posts/v-ukraini-pratsiuiemaizhe-12-tys-domashnikh-ses>
2. Міжнародне агентство з відновлюваної енергії (IRENA) «Глобальна енергетична трансформація: дорожня карта до 2050 року (видання 2019 року)», ISBN 978-92-9260-121-8.
3. Sustainable Development Goal 7 (SDG7) "Tracking SDG7: The Energy Progress Report 2019" International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
4. Міжнародне агентство з відновлюваної енергії (IRENA) «Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2019», ISBN 978-92-9260-134-8
5. Електронний ресурс: <https://www.innogrid2020.eu/projects/>
6. Електронний ресурс: <https://edream-h2020.eu/demand-response-tools/#objectives>
7. Електронний ресурс: <https://www.etip-snet.eu/energy-transition/concept/>
8. International Renewable Energy Agency (IRENA) «Transforming the energy system and holding the line on rising global temperatures», ISBN 978-92-9260-149-2
9. Edward O'Dwyer, Indranil Pan, Salvador Acha, Nilay Shah «Smart energy systems for sustainable smart cities: Current developments, trends and future directions» Applied Energy Volume 237, 1 March 2019, Pages 581-597.
10. ДП «НЕК «Укренерго» Науково-технічний центр електроенергетики «План розвитку системи передачі Укренерго 2019 – 2028 роки», Київ – 2017, 51с.
11. Довідник «Енергетика України 2018», підготувало контент-маркетингове агентство Top Lead за підтримки Американської торговельної палати в Україні та партнерів: юридичної фірми AEQUO Law Firm, аудиторської компанії Baker Tilly, компанії ДТЕК.
12. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» Розділ 2, стаття 9.

13. Електронний ресурс: <https://ua-energy.org/uk/posts/v-ukraini-pratsiuiemaizhe-12-tys-domashnikh-ses>
14. Peter Boait, J. Richard Snape, Robin Morris, Jo Hamilton and Sarah Darby «The Practice and Potential of Renewable Energy Localisation: Results from a UK Field Trial» *Sustainability* 2019, 11(1), 215.
15. ДП «НЕК «Укренерго» Науково-технічний центр електроенергетики «Аналіз зарубіжної практики впровадження сучасних автоматизованих систем обліку електроенергії», Київ – 06/2014, 78с.
16. Cihan Gercek and Angèle Reinders «Smart Appliances for Efficient Integration of Solar Energy: A Dutch Case Study of a Residential Smart Grid Pilot» *Appl. Sci.* 2019, 9(3), 581.
17. Михайленко Олексій, Ткачук Тарас, Свідерська Аліна, Аналітичний огляд «LCOE відновлюваних джерел енергії в Україні» підготовлено за підтримки Представництва Фонду ім. Гайнріха Бьоля в Україні.
18. Т. О. Курбатова, «Методичні підходи до оцінювання вартості електроенергії з відновлювальних джерел енергії» *Mechanism of Economic Regulation*, 2016, No 1
19. Thomas Bauwens «Analyzing the determinants of the size of investments by community renewable energy members: Findings and policy implications from Flanders» *Energy Policy* Volume 129, June 2019, P. 841-852.
20. M.L. Tuballa, M.L. Abundo «A review of the development of Smart Grid technologies» of *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59 (2016) 710–725.
21. Денисюк С.П. Особливості формування активного споживача в сучасних електромережах С.П. Денисюк, Т.М. Базюк // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. –2014. – № 3. – С. 75–79. – ISSN 1997-9274.
22. Schill, Wolf-Peter; Zerrahn, Alexander; Kunz, Friedrich; Kemfert, Claudia «Decentralized solar prosumage with battery storage: System orientation required» *DIW Economic Bulletin* Vol. 7, Iss. 12/13, pp. 141-151, Berlin 2017.
23. Kyrylenko O.V. Suchasni tendencii pobudovu ta keruvannya rezshimamu electroenergetuchnih merezsh / O.V. Kyrylenko, S.P. Denysuik //

Energy saving. Power engineering. Energy audit. – 2014. – № 9. – Spec. issue P. 2: Power electronics and energy efficiency. – pp. 82 – 94.

24. Sally P. Caird & Stephen H. Hallett «Towards evaluation design for smart city development, Journal» of Urban Design Volume 23 May 2018, Pages 188-209.

25. Sebastian P. Rosado, Shafiuzzaman K Khadem, «Development of Community Grid: Review of Technical Issues and Challenges» Volume: 55 , Issue: 2 , March-April 2019.

26. P. Sokolovskyi, R. Sharma, 2019 "Estimation of PV systems power production efficiency in the dense urban development condition" Енергетика: економіка, технології, екологія. 2018. № 4. - ISSN 2308-7382.

27. Закон України «Про засади функціонування ринку електричної енергії України» Розділ 2, ст. 14.

28. Електронний ресурс: <http://www.nerc.gov.ua/?id=19526>

29. Електронний ресурс: <http://www.nerc.gov.ua/?id=39687>

30. Електронний ресурс: <https://soviet-ingenera.com/eco-energy/sun/vidy-solnechnyx-batarej.html>

31. Blank, Gol'dberg "Semiconductor Photoelectric Converters for the Ultraviolet Region of the Spectrum" Vol. 37, No. 9, 2003, pp. 999 - 1030. Translated from Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov, Vol. 37, No. 9, 2003, pp. 1025–1055.

32. Ma W, Xue X, Liu G, Techno-economic evaluation for hybrid renewable energy system: Application and merits, Energy (2018).

33. Mousa Marzband, Fatemeh Azarnejadian, Mehdi Savaghebi, Josep M. Guerrero "View All AuthorsAn Optimal Energy Management System for Islanded Microgrids Based on Multiperiod Artificial Bee Colony Combined With Markov Chain" IEEE Systems Journal (Volume: 11 , Issue: 3 , Sept. 2017).

34. Ahmadi, A., Cherifi, C., Cheutet, V., & Ouzrout, Y. (2017). A review of CPS 5 components architecture for manufacturing based on standards. 2017 11th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA). 2017.

35. ДП «НЕК «УКРЕНЕРГО» Науково-проектний центр розвитку ОЕС України «Стан і перспективи розвитку технологій «інтелектуальних» електромереж, управління попитом та систем режимного управління в умовах розвитку поновлюваних джерел енергії»», Київ 2018, 122с.

36. Лужнюк П.Д., Комар В.О., Кравчук С.В. «Балансування електроенергії в електричній мережі (локальній електричній системі) з відновлюваними джерелами енергії. Енергоринок, платні послуги», Вісник Вінницького національного технічного університету (ВНТУ). ВІСНИК НТУ "ХПІ" № 45 (1321).

37. Marco Badami, Gabriele Fambri «Optimising energy flows and synergies between energy networks» Energy (2019), <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.007>

38. Stig Odegaard Ottesen, Asgeir Tomasgard, Stein-Erik Fleten «Multi market bidding strategies for demand side flexibility aggregators in electricity markets» CenSES working paper 5/2016, ISBN: 978-82-93198-17-8.

39. О.В. Кириленко, С.П. Денисюк, С.Є. Танкевич, Т. М. Базюк «Інформаційне та нормативне забезпечення організації мультиагентного керування електроенергетичної системи із активним споживачем» Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2016. № 1. С. 29–34.

40. Weixian Li, Thillainathan Logenthiran, Van-Tung Phan and Wai Lok Woo “Housing development building management system (hdbms) for optimized electricity bills,” Transactions on Environment and Electrical Engineering, vol. 2, no. 2, pp. 64–71, 2017.

41. Haris Doukas, Vangelis Marinakis, John Tsapelas and Sgouris Sgouridis «Intelligent Energy Management Within the Smart Cities: An EU-GCC Cooperation Opportunity» Smart Cities in the Gulf pp 123-147 Volume 30 October 2018.

42. Thomas Bauwens, Patrick Devine-Wrightb «An empirical study of community energy participation and attitudes to renewable energy» Energy Policy Volume 118, July 2018, Pages 612-625.

43. Gagangeet Singh Aujla, Sahil Garg, Shalini Batra, Neeraj Kumar, Pilsun You, Vishal Sharma, DRopS: A Demand Response Optimization Scheme in SDN-enabled Smart Energy Ecosystem, *Information Sciences* (2018).
44. Впровадження нової моделі ринку електричної енергії в Україні «Про ринок електричної енергії» (№2019) Електронний ресурс: <https://www.slideshare.net/JuliaLoboda1/ss-78449094>
45. А. А. Саркисов «Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики»: Т. 2 — М. : Академ-Принт, 2015. — 387 с. : ил. — ISBN 978-5-906324-04-7.
46. Шкирмонтов А.П. "Изменение отношения тока электрода к напряжению при совершенствовании конструкции ферросплавных электропечей" МЦИИ ОМЕГА САЙНС Оренбург 2017 с.129-132.
47. Ana Soares, Alvaro Gomes, Carlos Henggeler Antunes "Categorization of residential electricity consumption as a basis for the assessment of the impacts of demand response actions" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 30, February 2014, Pages 490-503. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.019>
48. M. Parvania, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Shahidehpour, "Optimal Demand Response Aggregation in Wholesale Electricity Markets," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1957-1965, Dec. 2013.
49. W. Zhang, K. Kalsi, J. Fuller, M. Elizondo and D. Chassin "Aggregate model for heterogeneous thermostatically controlled loads with demand response" 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, 2012, pp. 1-8.
50. M. Liu, Y. Shi, and F. Fang, "Combined cooling, heating and power systems: A survey," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 35, pp. 1–22, Jul. 2014.
51. G. Papaefthymiou, K. Grave, and K. Dragoon, "Flexibility options in electricity systems," 2014.
52. Lin Zhao, Wei Zhang, He Hao, and Karan Kalsi «A Geometric Approach to Aggregate Flexibility Modeling of Thermostatically Controlled Loads», *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume: 32 , Issue: 6 , Nov. 2017.
53. Sen Li, Wei Zhang, Jianming Lian, Karanjit Kalsi «Market-Based Coordination of Thermostatically Controlled Loads Part I: A Mechanism Design

Formulation», IEEE Transactions on Power Systems Volume: 31 , Issue: 2 , March 2016.

54. Peder Bacher, Henrik Madsen «Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings», Energy and Buildings Volume 43, Issue 7, July 2011, Pages 1511-1522

55. Кириченко О.С. «Дискретизація безперервних систем автоматичного керування за методом Ейлера» Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 2013. – Вип. 1

56. M. A. Ortega-Vazquez, F. Bouffard, and V. Silva, “Electric vehicle aggregator/system operator coordination for charging scheduling and services procurement,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1806–1815, Nov. 2013.

57. Andrew Levitt, “Comparing RTO Market Framework Rules in DER Context,” Aug. 2016.Електронний ресурс:
<http://www.pjm.com/~media/committees-groups/committees/mrc/20160824-special/20160824-item-02-der-rto-benchmarking.ashx>

58. I. Momber, A. Siddiqui, T. G. San Roman, and L. Söder, “Risk averse scheduling by a PEV aggregator under uncertainty,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 2, pp. 882–891, Mar. 2015.

59. M. R. Sarker, Y. Dvorkin, and M. A. Ortega-Vazquez, “Optimal participation of an electric vehicle aggregator in day-ahead energy and reserve markets,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 5, pp. 3506– 3515, Nov. 2016.

60. M. A. Ortega-Vazquez, “Optimal scheduling of electric vehicle charging and vehicle-to-grid services at household level including battery degradation and price uncertainty,” IET Gener., Transm., Distrib., vol. 8, no. 6, pp. 1007– 1016, Jan. 2014.

61. M. Juelsgaard, J. Bendtsen, and R. Wisniewski, "Utilization of Wind Turbines for Upregulation of Power Grids," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 7, pp. 2851-2863, Jul. 2013.

62. Лисенко О. В., Мельник О. А., Нестерчук Д. М. "Оцінка показників комбінованої локальної енергосистеми з накопиченням енергії" Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України"; Вип. 203 (С. 34-38).

63. Дешко В.І., Замулко В.І., Карпенко Д.С., Оцінка ефективності функціонування локального ринку теплової енергії. Проблеми загальної енергетики 3(50), 2017, с 41-49.

64. Gerrit Bode, Thomas Schreiber, Marc Baranski, Dirk Müller «A time series clustering approach for Building Automation and Control Systems» Applied Energy Volume 238, 15 March 2019, Pages 1337-1345.

65. Електронний ресурс: <https://www.crestron.com/en-US/Products/Lighting-Environment/Integrated-Lighting-Systems/Power-Metering/GLS-EM-MCU>

66. Електронний ресурс: <https://www.crestron.com/Products/Lighting-Environment/Integrated-Lighting-Systems/Power-Metering/GLS-EM-CT-200A>

67. Закон України про електроенергетику – Верховна рада України, Законодавство [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/main/575/97-%D0%B2%D1%80>.

68. Unamuno, E., & Barrena, J. A. (2015). Hybrid ac/dc microgrids—Part II: Review and classification of control strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52, 1123–1134. doi:10.1016/j.rser.2015.07.186

69. Постанова НКРЕКП – Про встановлення тарифів на електроенергію, що відпускається населенню [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0231-15>.

70. Бурикін Б. Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems: монографія / Б. Бурикін, П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко. – Вінниця: Вінницький національний технічний університет, 2018. – 123 с. – (ІРВЦ ВНТУ).

71. Розроблення стартап-проекту: Методологічні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. Ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28с.