

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

БУДЬКО ВАСИЛЬ ІВАНОВИЧ

УДК 621.311.41: 621.472

ДИСЕРТАЦІЯ

ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ВІТРУ
ДЛЯ ЗАРЯДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії

Технічні науки

Подається на здобуття наукового
ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Будько Василь Іванович.

Науковий консультант: Кудря Степан Олександрович, д.т.н., проф.,

чл.-кор. НАНУ

КИЇВ – 2019

АНОТАЦІЯ

Будько В.І. Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для зарядження електромобілів – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.08 – «Перетворювання відновлюваних видів енергії» Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» МОН України, Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ, 2019.

Мета дисертаційної роботи полягає в науково-технічному обґрунтуванні техніко-економічних параметрів при формуванні мереж зарядних станцій електромобілів з буферними акумуляторами енергії при використанні енергії сонячного випромінювання та вітру.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії сонячного випромінювання та вітру і її використання на зарядних станціях електромобілів.

Предметом дослідження є параметри мереж зарядних станцій з буферними акумуляторами енергії для електромобілів при використанні енергії сонячного випромінювання та вітру.

Дисертація присвячена вирішенню питань розширення можливостей використання енергії вітру та Сонця на території України для зарядження акумуляторних батарей електромобілів, а також виробництва водню для заправки баків електромобілів на воднево-кисневих паливних елементах. В роботі аналізується можливість реалізації зарядних станцій електромобілів з використанням вітроелектричних, фотоелектричних та комплексних вітро-сонячних енергоустановок для забезпечення електроенергією буферних акумуляторів зарядних станцій, від яких в подальшому реалізується заряд електромобілів. Використання зарядних станцій на території України дозволить розширити інфраструктуру мережі заправних станцій без необхідності підведення класичних ліній електропередачі та відсутності негативного впливу на екологію при роботі таких станцій.

Обґрунтовано умови створення мереж зарядних станцій електромобілів з використанням вітроелектричних та фотоелектричних установок, що визначаються довжиною пробігу електромобіля, енергозабезпеченістю станції від відновлюваних джерел, нормованим часом зарядження електромобіля, критичними часом очікування на виконання заявки по обслуговуванню та площею під встановлення енергогенеруючого устаткування.

Розроблено математичну модель зарядження електрохімічних акумуляторних батарей від вітроелектричних установок, що входять до складу зарядних станцій електромобілів, яка дозволяє враховувати вплив типу електрохімічної системи, власні потреби станції та забезпеченість енергією вітру для визначення енергоємності буферного акумулятора.

Запропоновано математичну модель процесу зарядження АБ на ЗСЕМ з використанням ФЕУ як первинних генераторів електроенергії. Проаналізовано можливість забезпечення енергією ЗСЕМ від ФЕБ з врахуванням розподілу інтенсивності сонячного випромінювання для м. Мелітополь Запорізької області, Україна, використавши при цьому реальні експериментальні дані вимірювання інтенсивності сонячної радіації для заданої місцевості.

Враховуючи прийняту щоденну потребу для заряду одного електромобіля в 137,82 кВт·год, а також показники інтенсивності сонячного випромінювання для доби з найменшим приходом сонячної енергії з використанням програмного середовища Matlab, встановлено, що потужність фотоелектричної станції для прийнятих умов має складати $P_{\text{ФЕС}} = 1264,2$ кВт. При цьому при встановленні такої потужності ФЕС в інші дні з більшим приходом сонячного випромінювання спостерігається виробіток надлишкової енергії, що вимагатиме вирішення питання її подальшого використання. У випадку відключення ФЕС по мірі повного зарядження буферної АБ виникатиме проблема неефективного використання генеруючого устаткування.

В цей же час, використовуючи показники інтенсивності сонячного випромінювання для доби з найбільшим приходом сонячної енергії встановлено, що потужність фотоелектричної станції для прийнятих умов має складати $P_{\text{ФЕС}} =$

21,44 кВт. При цьому, при встановленні такої потужності ФЕС в інші дні з меншим приходом сонячного випромінювання спостерігатиметься недозаряд буферної АБ і, відповідно, робота ЗСЕМ буде неефективною.

Аналіз експериментальних даних показників інтенсивності сонячного випромінювання та швидкості вітру як в межах року, так і в межах доби обґрунтовує застосування буферного акумулятора енергії в складі зарядних станцій електромобілів для балансування виробітку електричної енергії ВЕУ та ФЕУ з її споживанням при зарядженні електромобіля.

Розглянуто питання збільшення пробігу електротранспортного засобу з комбінованою системою живлення «акумуляторна батарея-фотоелектрична установка», розміщеною на електричному транспортному засобі з урахуванням підзаряду АБ від ФЕУ під час технологічних простоїв машини, коли відсутнє споживання енергії від акумуляторної батареї. Встановлено, що застосування фотобатареї на автономному транспортному засобі більш суттєво впливає на величину пробігу при умові відносного співставлення по вихідному струмі фотобатареї і зарядному струму базової АБ, тобто чим менша ємність останньої, тим більше проявляється ефект ФЕУ на величину пробігу електромобіля.

Розроблено математичну модель процесу зарядження електрохімічних акумуляторних батарей від комплексних вітро-сонячних енергоустановок, що входять до складу автономних зарядних станцій електромобілів з урахуванням вагових коефіцієнтів енергозабезпечення споживачів станції. Так, для умов місцевості м. Мелітополь Запорізької області ефективна робота ЗСЕМ з комплексним використанням енергії вітру та Сонця по зарядженню протягом року забезпечуватиметься при співвідношенні енергій ВЕУ та ФЕУ як 9:1.

Обґрунтовано параметри буферних акумуляторів енергії та енергетичного обладнання та устаткування відновлюваної енергетики в залежності від енергобалансових потреб автономної зарядної станції електромобілів, що дозволило проаналізувати фактори, які впливають на міжзарядний пробіг електромобілів, показують реальну величину даного показника в сторону зменшення, тобто в середньому практичний міжзарядний пробіг може

знижуватися на 20-50% в порівнянні з вказаним виробником ЕМ. З цієї причини на сучасному рівні розвитку автономних джерел живлення для зарядження тягових АБ ЕМ середня відстань між станціями «швидкої зарядки» на міжміських трасах не повинна перевищувати 75-80 км практично для всіх електромобілів, що мають серійне виробництво.

Вперше запропоновані математичні моделі процесів отримання водню на заправних станціях електромобілів на паливних елементах при використанні вітрових, сонячних та комплексних вітро-сонячних електроустановок як первинних генераторів електричної енергії, які дозволяють враховувати фактор використання водню паливними елементами, фактор витікання водню з ємностей при зберіганні та фактор витрати енергії на стиснення водню.

На основі даних швидкості вітру для м. Мелітополь з використанням математичної моделі виробництва водню на заправній ЗСЕМПА з ВЕУ проаналізовано виробіток протягом року, та встановлено, що в період з жовтня по квітень виробництво водню суттєво перевищує потребу з розрахунку на один ЕМПА, а з травня по вересень потреба перевищує виробіток, що необхідно враховувати при виборі акумулюючих ємностей водню високого тиску. Для заданих умов швидкості вітру протягом року та прийнятих затратах водню коефіцієнт запасу повинен становити 1,25, тоді як для зарядних станцій електромобілів – 1,67. Тобто при виробництві водню на ЗСЕМПА втрати енергії менші, ніж при заряді буферного акумулятору, що входить до складу ЗСЕМ. Однак, з точки зору економіки, термін окупності ЗСЕМПА на сьогоднішній день значно перевищує повернення затрат на реалізацію ЗСЕМ.

Проаналізовано економічні аспекти реалізації систем ЗСЕМ з використанням вітрових, сонячних та комплексних вітро-сонячних енергоустановок.

Ключові слова: вітроелектрична установка, фотоелектрична установка, акумуляторна батарея, електромобіль, автономна зарядна станція, відновлювані джерела енергії, паливний елемент.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бурдько В.І. Особливості зарядження акумуляторної батареї електромобілю від стаціонарної вітроелектричної станції / В.І. Бурдько // Відновлювана енергетика. – 2014. – №2. – С.16–19.
2. Бурдько В.І. Дослідження режимів паралельної роботи тягових джерел живлення екомобілю / В.І. Бурдько // Відновлювана енергетика. – 2014. – №4. – С.31–34.
3. Бурдько В.І. Автономні енерговузли на основі відновлюваних джерел енергії з різними системами акумуляування енергії / В.І. Бурдько // Відновлювана енергетика. – 2015. – №2. – С.21–25.
4. Бурдько В.І. Аналіз доцільності впровадження зарядних станцій електромобілів на основі відновлюваних джерел енергії в Україні / В.І. Бурдько // Відновлювана енергетика. – 2016. – №4. – С.32–41.
5. Бурдько В.І. Аналіз особливостей роботи та специфіки роботи зарядних режимів свинцево-кислотних та нікель-залізних акумуляторних батарей / В.І. Бурдько // Відновлювана енергетика. – 2017. – №1. – С.17–24.
6. Бурдько В.І. Аналіз особливостей роботи та специфіки роботи зарядних режимів нікель-металогідридних та літієвих акумуляторних батарей / В.І. Бурдько // Відновлювана енергетика. – 2017. – №2. – С.17–25.
7. Бурдько В.І. Розроблення математичної моделі роботи автономної зарядної станції електромобілів від вітроелектричних установок / В.І. Бурдько // Відновлювана енергетика. – 2017. – №3. – С.6–13.
8. Бурдько В.І. Застосування теорії черг для описання процесу заряду електромобілів на автономних заправочних станціях на основі відновлюваних джерел енергії / В.І. Бурдько // Відновлювана енергетика. – 2017. – №4. – С.27–32.
9. Бурдько В.І. Визначення енергоємності акумулятору водню при використанні вітроелектричних установок як первинних генераторів електроенергії в складі автономної заправної станції електромобілів на паливних елементах / В.І. Бурдько // East European Scientific Journal. – 2019 – №45, part 1. – С.21–27.

10. Мхитарян Н.М. Комплексное использование энергии возобновляемых источников / Н.М. Мхитарян, С.А. Кудря, Л.В. Яценко, Л.Я. Шинкаренко, М.Д. Ткаленко, В.И. Будько // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – №17. – С.14–22.

11. Будько В.І. Можливості використання відновлюваних джерел енергії на підприємствах агропромислової та харчової галузей України / В.І. Будько, Р.А. Климюк // Відновлювана енергетика. – 2013. – №4. – С.26–30.

12. Будько В.І. Концепція зарядження акумуляторної батареї електромобіля від фотоелектричної станції / В.І. Будько, С.О. Кудря, В.Б. Павлов // Відновлювана енергетика. – 2014. – №1. – С.14–21.

13. Головка В.М. Вплив параметрів системи орієнтації ротора з використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі" на статичні характеристики вітроустановки / В.М. Головка, В.П. Коханевич, М.О. Шихайлов, В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2016. – №1. – С.45–54.

14. Будько В.И. Современное состояние и развитие возобновляемой энергетики / В.И. Будько, С.А. Кудря, А.В. Пепелов, // Альтернативная энергетика и экология. – 2017. – №4-6. – С.130–141.

15. Павлов В.Б. Зарядження електромобілів від відновлюваних джерел / В.Б. Павлов, В.І. Будько // Технічна електродинаміка. – 2017. – №6. – С.32–35.

16. Будько В.І. Економічні аспекти реалізації автономних зарядних станцій електромобілів на основі фотоелектричних батарей / В.І. Будько, С. В. Войтко, О. О.Трофименко // Відновлювана енергетика. – 2018. – №1. – С.19–25.

17. Будько В.І. Економічні аспекти реалізації автономних зарядних станцій електромобілів на основі вітроелектричних установок / В.І. Будько, С.О. Кудря, С.В. Войтко, О.О.Трофименко // Відновлювана енергетика. – 2019. – №1. – С.45–50.

18. Павлов В.Б. Особливості роботи автономних зарядних станцій електромобілів з використанням вітроелектричних установок та буферних акумуляторів енергії / В.Б. Павлов, С.О. Кудря, В.І. Будько, В.М. Кириленко, В.Ю. Іванчук // Технічна електродинаміка. – 2019. – №4. – С. 70-76.

19. Ткаленко Д.А. Зависимость перенапряжения катодного выделения водорода на металлах от их свободной поверхности энергии и ψ -фактора / Д.А. Ткаленко, С.А.Кудря, М.Д. Ткаленко, Ю.П. Вишневская, В.И. Будько // Відновлювана енергетика. – 2012. – №4. – С.28–31.

20. Патент на корисну модель №129991 Україна, МПК F03D9/00 H02j7/00. Пристрій для зарядження акумуляторних батарей / В.Б. Павлов, В.М. Головка, В.П. Коханевич, М.О. Шихайлов, В.Є. Павленко, В.І. Будько.; заявник та правовласник Інститут відновлюваної енергетики НАН України, – №u201804673 ; заявл. 27.04.18 ; опубл. 26.11.18 ; Бюл. №22.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

21. Будько В.І. Комплексне використання ВДЕ в складі зарядних станцій акумуляторних батарей електромобілів / В.І. Будько // XV Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Київ, 2014.– С.112–114.

22. Будько В.І. Методи заряду електромобілів від відновлюваних джерел енергії / В.І. Будько, В.Б. Павлов // Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана та воднева енергетика - 2018», – 2018 р.– Київ, – С. 54 – 59.

23. Sydorenko K. Flying of the UAV by the solar energy / K. Sydorenko, V. Budko // 2-nd International Conference "Methods and Systems of Navigation and Motion Control", 09.10.2012., p.159-160.

ABSTRACT

Budko V. I. Utilizing Solar and Wind Power to Charge Electric Vehicles. – Manuscript Rights.

Doctoral Thesis in Specialty 05.14.08 “Renewable Energy Transformation” National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Institute for Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv, 2019.

The thesis goal provides a research approach in substantiating both scientific and technical parameters in order to form up the network of charging stations for electric vehicles with buffer batteries given solar radiation and wind energy use.

The target of study focuses on transformation processes in terms of converting solar radiation and wind energy with its further use as energy source at charging stations for electric vehicles.

The network parameters of charging station with buffer energy batteries to feed electric vehicles given both solar and wind energies are in the main focus of this thesis, and its subject, accordingly.

The Doctoral thesis is focused on expanding opportunities to utilize both wind and solar energy potential in Ukraine to charge electric vehicles, as well as the produce hydrogen to fuel electric vehicles tanks running on hydrogen-and-oxygen fuel cells. The thesis analyzes implementation possibilities to build up charging stations using wind, PV and hybrid wind-solar power plants for electricity generation and further charging buffer batteries, and as a result, at the end charging electric vehicles. It should be noted, that autonomous charging stations operation in Ukraine will allow widening the network infrastructure for filling stations without connecting to conventional power transmission lines and producing less negative environmental impact.

This scientific abstract justifies the conditions to construct charging stations that utilize wind and PV energies. These conditions are determined by electric vehicle mileage, RES fed power supply capacities, standard charging time, critical waiting time to meet service request and total power generating equipment installation area.

There was made a mathematical description of the electrochemical batteries being charged by wind power plants, which are an integral part of charging stations. This allows accounting for the electrochemical system impact, filling station needs for wind energy to finally identify buffer battery intensity. The thesis offers charging process description and using PVs as primary energy source. An option to provide PV energy to charging station taking into account solar radiation intensity in Melitopil town (Zaporizhzhia oblast) was analyzed. Analyses were made based on real field experimental measurement data of solar radiation intensity in target location.

If we accept 137.82 kWh as a daily demand to get one electric vehicle charged, as well as minimum solar radiation intensity indicators, the applied Matlab software calculates the PV plant capacity equal to 1264.2 kW. However, given the same PV plant capacity during other days with a higher solar radiation intensity, a surplus electricity will be produced, and this will require its further utilization. In case of PV plant shutdown upon full buffer battery charge, there will occur a problem of inefficient generating equipment use.

At the same time, using solar intensity indicators for the day with the largest solar energy inflow shows that PV plant capacity will be equal 21.44 kW. And, as a result, having this capacity during less sunny days the buffer accumulation battery will get charged less and the charging station will operate inefficiently.

Analyzing field data on solar radiation intensity and wind speed for both a year and a day pattern positively justifies the use of a buffer battery within charging stations network. This is done to balance wind electricity generation of electric vehicles (by wind turbines and PVs and its consumption by electric vehicles).

There were discussed issues of increasing the vehicle mileage, whereas the vehicle is equipped with a hybrid power supply system “accumulation battery – PV” and being installed in the electric vehicle, and taking into account charging process accumulation battery from PV battery during technological downtimes, when no energy from the accumulation battery is consumed. It was proved that a PV battery installed on a stand-alone vehicle had a more significant effect on the mileage, provided the relative comparison of the PV battery output current and the base

accumulation battery charging current. In other words, the lower the capacity of the base battery is, the greater the PV effect on the electric vehicle mileage is.

A mathematical description was designed for the charging process for electrochemical accumulators fed from hybrid wind-solar power plants being the part of charging stations for electric vehicles, taking into account the weight coefficients of power supply to station consumers. Thus, within Melitopil terrain conditions, the efficient operation of the filling station with wind and solar energy hybrid use the charging energy will be provided at Wind turbine and PV at 9:1 ratio during the year.

The parameters of buffer accumulation battery, power equipment and renewable power facilities were substantiated depending on energy demand for a filling station. Moreover, this helped analyzing factors influencing the mileage between charging stations and showing real value of the given indicator towards its decrease. That means, that actual mileage between charging stations can decrease by 20-50% in average and comparing to the data specified by the electric vehicle manufacturer. This is actually the reason, why the distance between charging stations for “fast charging” on intercity routes should not exceed 75-80 km for almost all mass production electric vehicles, given the current level of autonomous power supplies development to charge traction accumulation batteries for electro mechanic vehicles.

For the first time ever, there were suggested mathematical descriptions for hydrogen filling stations systems for electric vehicles running on fuel cells and fed by wind, solar energy and hybrid wind-solar electric installations as primary electricity generators. As a result, this fact allows considering the factor of hydrogen use by fuel cells, the factor of hydrogen leakage from the tanks during storage and the factor of energy consumption for hydrogen compression.

The applied in the thesis mathematical model for hydrogen generation analyzes annual electricity generation at charging stations (with wind electricity accounted) based on wind speed data in the town of Melipopol. The analysis demonstrates the following: in October-April period hydrogen generation sufficiently exceeds the need per one electrical vehicle running on fuel cell, while in May-September time span the

need exceeds electricity generation rates. And that is the main factor to be considered when selecting storage capacities for high pressured hydrogen.

For the given wind speed conditions per year as well as accepted hydrogen consumption rates, the storage factor should amount to 1.25, whereas for electric vehicle charging stations – 1.67. In other words, the energy loss in hydrogen production at charging stations for electric vehicles is less than in cases with buffer battery charge as part of a charging station. However, in economic terms the payback period for charging stations to fill electric vehicles running on fuel cells is now greater than returning costs to build such a station.

The economic aspects of charging stations implementation for electro mechanic vehicles fed by wind, solar and hybrid wind-solar power plants were analyzed in the thesis.

Key words: wind power plant, photovoltaic plant, accumulation battery, electric vehicle, autonomous charging station, renewable energy sources, fuel cell.

ЗМІСТ

| | стор. |
|---|-------|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ..... | 18 |
| ВСТУП..... | 29 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ З МЕТОЮ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ. | 27 |
| 1.1. Актуальність використання відновлюваних джерел енергії як необхідної складової розвитку систем електроживлення електромобілів..... | 27 |
| 1.2. Аналіз використання відновлюваних джерел енергії та електротранспорту..... | 33 |
| 1.3. Особливості роботи електрохімічних акумуляторів різних типів..... | 40 |
| 1.3.1. Особливості роботи свинцево-кислотних акумуляторних батарей..... | 40 |
| 1.3.2. Особливості роботи лужних нікель-залізних акумуляторних батарей..... | 48 |
| 1.3.3. Особливості роботи нікель-металогідридних акумуляторних батарей..... | 54 |
| 1.3.4. Особливості роботи літій-іонних акумуляторних батарей..... | 59 |
| 1.4. Особливості роботи суперконденсаторів..... | 69 |
| 1.5. Вимоги до реалізації процесу заряду тягових акумуляторних батарей різних електротранспортних засобів..... | 73 |
| 1.6. Існуючий досвід впровадження зарядних станцій електромобілів на основі відновлюваних джерел енергії..... | 75 |
| 1.7. Аналіз можливостей використання водню як акумулятора та енергоносія, отриманого за рахунок відновлюваних джерел енергії для заправки електромобілів на паливних елементах..... | 83 |

| | |
|--|-----|
| 1.8. Висновки до розділу..... | 88 |
| РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ ОПИСАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАРЯДЖЕННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ НА ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЯХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ТА БУФЕРНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ..... | 90 |
| 2.1. Умови створення мереж автономних зарядних станцій електромобілів з використання відновлюваних джерел енергії... | 90 |
| 2.2. Існуючі підходи до математичного моделювання роботи вітроелектричних установок..... | 95 |
| 2.3. Розроблення математичної моделі процесу зарядження аккумуляторних батарей на зарядних станціях електромобілів з використанням вітроелектричних установок..... | 100 |
| 2.4. Моделювання забезпечення енергією автономної зарядної станції електромобілів від вітроелектричної установки з врахуванням розподілу швидкостей вітру для заданої місцевості..... | 105 |
| 2.5. Визначення енергоємності буферного акумулятору автономної зарядної станції електромобілів з використанням вітроелектричних установок..... | 110 |
| 2.6. Особливості зарядження акумуляторної батареї електромобіля від стаціонарної вітроелектричної станції..... | 116 |
| 2.7. Застосування теорії масового обслуговування для описання імовірнісних параметрів процесу заряду електромобілів від відновлюваних джерел енергії..... | 122 |
| 2.8. Висновки до розділу..... | 131 |
| РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ ОПИСАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАРЯДЖЕННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ НА ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЯХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ТА БУФЕРНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ..... | 133 |
| 3.1. Існуючі теоретичні підходи до математичного описання | |

| | |
|--|------------|
| процесу перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну фотоелектричними установками..... | 133 |
| 3.2. Аналіз впливу кліматометеорологічних умов на роботу автономних зарядних станцій електромобілів з використанням фотоелектричних установок..... | 139 |
| 3.3. Математичний опис системи автономної зарядної станції електромобілів з фотоелектричними установками..... | 144 |
| 3.4. Визначення потужності фотоелектричної системи автономної зарядної станції електромобілів для гарантованого заряду буферного акумулятору..... | 146 |
| 3.5. Концепція зарядження акумуляторної батареї електромобілю від фотоелектричної станції..... | 148 |
| 3.6. Дослідження режимів паралельної роботи тягових джерел живлення гібридного електромобіля..... | 159 |
| 3.7. Висновки до розділу..... | 167 |
| РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ ОПИСАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАРЯДЖЕННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ НА ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЯХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З КОМПЛЕКСНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ТА БУФЕРНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ..... | 169 |
| 4.1. Аспекти комплексного використання відновлюваних джерел енергії для зарядження електромобілів..... | 169 |
| 4.2. Існуючі підходи до комплексного використання відновлюваних джерел енергії | 173 |
| 4.3. Математичне описання процесу зарядження акумуляторних батарей на зарядних станціях електромобілів при комплексному використанні енергії сонячного випромінювання та вітру..... | 186 |
| 4.4. Забезпечення енергією зарядної станції електромобілів на основі комплексного використання фотоелектричних та | |

| | |
|---|------------|
| вітроелектричних установок з урахуванням кліматометеорологічних умов місцевості..... | 187 |
| 4.5. Зарядження електромобілів від відновлюваних джерел енергії..... | 196 |
| 4.6. Аналіз факторів, що впливають на зниження енергоємності тягової акумуляторної батареї та міжзарядного пробігу електромобілів..... | 203 |
| 4.7. Методика організації автономних зарядних станцій електромобілів з використанням відновлюваних джерел енергії. | 210 |
| 4.8. Висновки до розділу..... | 212 |
| РОЗДІЛ 5. ОПИСАННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ НА ЗАПРАВНИХ СТАНЦІЯХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ВІТРУ..... | 215 |
| 5.1. Використання енергії відновлюваних джерел для виробництва водню як універсального енергоносія..... | 215 |
| 5.2. Особливості реалізації заправних станцій електромобілів на паливних елементах з використанням вітроелектричних та фотоелектричних установок як первинних генераторів електроенергії..... | 221 |
| 5.3. Математичне описання процесу виробництва водню на заправних станцій електромобілів на паливних елементах з використанням відновлюваних джерел енергії..... | 227 |
| 5.4. Визначення енергоємності акумулятору водню та буферного електрохімічного акумулятору на автономній зарядній станції електромобілів на паливних елементах..... | 233 |
| 5.5. Висновки до розділу..... | 240 |
| РОЗДІЛ 6. ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ..... | 242 |

| | |
|---|-----|
| 6.1. Економічні аспекти реалізації зарядних станцій електромобілів на основі фотоелектричних батарей..... | 242 |
| 6.2. Економічні аспекти реалізації зарядних станцій електромобілів на основі вітроелектричних установок..... | 248 |
| 6.3. Економічні аспекти реалізації зарядних станцій електромобілів на основі систем комплексного використання відновлюваних джерел енергії..... | 253 |
| 6.4. Сценарії розвитку зарядних станцій електромобілів на основі відновлюваних джерел енергії..... | 258 |
| 6.5. Висновки до розділу..... | 263 |
| ВИСНОВКИ..... | 265 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 268 |
| ДОДАТКИ..... | 285 |
| ДОДАТОК А Основні публікації за темою дисертації..... | 285 |
| ДОДАТОК Б. Технічні характеристики комерційних електромобілів..... | 288 |
| ДОДАТОК В. Технічні показники електромобілів..... | 293 |
| ДОДАТОК Г. Технічні показники комерційних електромобілів на паливних елементах..... | 295 |
| ДОДАТОК І. Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження..... | 296 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

| | |
|------------|---|
| АБ | – акумуляторна батарея; |
| АСЕ | – автономна система електроживлення; |
| ВАХ | – вольт-амперна характеристика; |
| ВДЕ | – відновлювані джерела енергії; |
| ВЕУ | – вітроелектрична установка; |
| ВЕС | – вітроелектрична станція; |
| ККД | – коефіцієнт корисної дії; |
| ФЕБ | – фотоелектрична батарея; |
| ФЕС | – фотоелектрична станція; |
| СН | – стабілізатор напруги; |
| СУ | – система управління; |
| АД | – асинхронний двигун; |
| ДПС | – двигун постійного струму; |
| ДВЗ | – двигун внутрішнього згоряння; |
| ШП | – широтно-імпульсний перетворювач; |
| АІ | – автономний інвертор; |
| Smart Grid | – інтелектуальні мережі; |
| ЗСЕМ | – зарядна станція електромобілів; |
| ЗСЕПМА | – зарядна станція електромобілів на паливних елементах; |
| ТАБ | – тягова акумуляторна батарея; |
| СКАБ | – свинцево-кислотна акумуляторна батарея; |
| НЗАБ | – нікель-залізна акумуляторна батарея; |
| ТМО | – теорія масового обслуговування. |

ВСТУП

Актуальність теми. Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Україні з кожним роком стає більш вираженим та суттєвим фактом заміщення традиційних викопних енергоресурсів. При цьому базовим напрямком розвитку відновлюваної енергетики вважається будівництво мережевих електричних станцій на основі відновлюваних джерел енергії з метою продажу виробленої електроенергії за «зеленим тарифом». Даний напрямок успішно розвивається за рахунок державного стимулювання, однак є обмеженим як з технічної точки зору (через обмеження об'єднаної енергосистеми України з підключення нестабільних джерел електроенергії), так і з часового обмеження, яке визначається законом до 2030 року, коли «зелений тариф» має зрівнятись зі звичайним тарифом на реалізацію електроенергії, що в свою чергу зменшить економічну привабливість об'єктів відновлюваної енергетики.

Окрім традиційних напрямків застосування енергії відновлюваних джерел, які розвиваються в Україні, актуальним є залучення відновлюваної енергетики до енергоживлення електротранспорту. Раціональним напрямком в даному ракурсі слід вбачати розвиток зарядних та заправних станцій електромобілів, які як первинний генератор електроенергії використовують енергоустановки, що перетворюють енергію відновлюваного джерела в електричну енергію. Реалізація зарядних станцій з використанням енергії сонячного випромінювання та вітру вимагає вирішення ряду питань, пов'язаних з встановленням технічних умов зарядних станцій даного типу, математичного описання процесів перетворення та акумулювання енергії з врахуванням специфіки процесу зарядження електромобіля та аналізу економічної доцільності впровадження таких станцій в Україні, що вимагає проведення нових пошукових робіт. Крім того, для розвитку ринку електротранспорту важливими є не тільки техніко-економічні умови реалізації зарядних станцій, але й умови формування мереж зарядних станцій, що пояснюється обмеженою відстанню пробігу електромобіля. Ринок електромобілів слід вважати новим для України, оскільки він знаходиться

на етапі інтенсивного розвитку, посідаючи провідні позиції за темпами нарощування в Європі та світі, що веде за собою вимогу розвитку мереж зарядних станцій електромобілів різних типів.

Питання використання відновлюваних джерел енергії для зарядження акумуляторних батарей, в тому числі і електромобілів, досліджували ряд українських науковців: С.О. Кудря, В.Б. Павлов, В.В. Каплун, В.О. Новський, П.Ф. Васько, П.Д. Лежнюк, С.В. Войтко, а також закордонні науковці: Ісмаїлов Ф.О. (Ф.О. Исмаилов), Лі Вонг (Li Wong), Ньян Лін Аунг (Nyan Linn Aung), групи науковців на чолі з Д. Расоломampionона (D. Rasolomampionona), Дж. Р. Чандра Моулі (G. R. Chandra Mouli) та ін. Крім того, ряд як вітчизняних, так і закордонних науковців займалися вивченням питань виробництва водню для заправки електромобілів на паливних елементах за допомогою відновлюваних джерел енергії, це такі вчені як: Ткаленко Д.А., Солонін Ю.М., Максвелл А. Мур (Maxwell A. Moore), групи науковців на чолі з Мануелем Гьотцем (Manuel Götz), Ф. З. Аулі (F.Z.Aouali), Ф. Дж. Піно Луцена (F.J. Pino Lucena) та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження, що подані в роботі, проводилися на кафедрі відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та в Інституті відновлюваної енергетики НАН України за пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки України в рамках виконання науково-дослідних робіт: «Комплексні системи енергозабезпечення автономних об'єктів на базі використання відновлюваних джерел енергії» (номер державної реєстрації ДР №0117U004325), «Підвищення ефективності системи теплозабезпечення адміністративної будівлі за рахунок використання місцевих відновлюваних джерел енергії» (номер державної реєстрації ДР №0115U002408), «Підвищення ефективності режимів паралельної роботи тягових джерел живлення екомобіля з урахуванням інтенсивності сонячної радіації та параметрів біодизеля» (номер державної реєстрації ДР №0113U001641), «Оптимізація режимів експлуатації гібридного екомобілю на базі фотоелектричних батарей та біодизельного палива» (номер державної

реєстрації ДР №0111U002500), «Розробити схемо-технічні рішення модернізації існуючих та перспективних гібридних систем електро- та теплопостачання з використанням відновлюваних джерел енергії» (номер державної реєстрації ДР №0117U000703).

У виконанні цих робіт здобувач брав безпосередньо участь як відповідальний виконавець, так і виконавець окремих розділів звітів.

Мета і завдання дослідження.

Полягає в науково-технічному обґрунтуванні техніко-економічних параметрів при формуванні мереж зарядних станцій електромобілів з буферними акумуляторами енергії при використанні енергії сонячного випромінювання та вітру.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- аналіз існуючих підходів до формування мереж зарядних станцій електромобілів з використанням енергії вітру та сонячного випромінювання;
- розроблення математичної моделі процесу зарядження електрохімічних акумуляторних батарей від вітроелектричних установок, що входять до складу зарядних станцій електромобілів;
- розроблення математичної моделі процесу зарядження електрохімічних акумуляторних батарей від фотоелектричних установок, що входять до складу зарядних станцій електромобілів;
- розроблення математичної моделі процесу зарядження електрохімічних акумуляторних батарей від комплексних вітро-сонячних енергоустановок, що входять до складу зарядних станцій електромобілів;
- моделювання процесів забезпечення енергією зарядних станцій електромобілів від відновлюваних джерел з урахуванням реальних даних кліматометеорологічних умов та оцінка адекватності запропонованих моделей;
- обґрунтування раціональних параметрів буферних акумуляторів енергії та енергетичного обладнання та устаткування відновлюваної енергетики в залежності від енергобалансових потреб зарядної станції електромобілів;

- аналіз видів застосування водневих технологій акумулювання енергії відновлюваних джерел з подальшим застосування водню для заправки електромобілів на основі паливних елементів;

- визначення техніко-економічних аспектів реалізації зарядних станцій електромобілів з використанням буферних акумуляторів енергії при застосуванні відновлюваних джерел енергії як первинних енергоносіїв.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення енергії сонячного випромінювання та вітру і її використання на зарядних станціях електромобілів.

Предмет дослідження – параметри мереж зарядних станцій з буферними акумуляторами енергії для електромобілів при використанні енергії сонячного випромінювання та вітру.

Методи дослідження. Наукові положення, висновки та рекомендації, що сформульовані в дисертації, базуються на результатах експериментальних досліджень, теоретичних і практичних положеннях про перетворення енергії відновлюваних джерел в електричну та її акумулювання в електрохімічних та водневих акумуляторах, положеннях системного аналізу, статистичного аналізу в середовищі Microsoft Office Excel, математичних методів моделювання енергетичних процесів в програмному середовищі Matlab.

Наукова новизна одержаних автором результатів:

1. Вперше обґрунтовано техніко-економічні умови реалізації мереж зарядних станцій електромобілів з використанням енергії сонячного випромінювання та вітру на території України, що дає можливість проектування та побудови таких станцій.

2. Вперше розроблено математичну модель процесу зарядження буферної акумуляторної батареї зарядної станції та тягових акумуляторів електромобілів при використанні енергії сонячного випромінювання та вітру, що дало можливість узгодити співвідношення енергетичних параметрів зарядних станцій та джерел енергії.

3. Вперше отримані залежності впливу типу електрохімічної системи акумуляторної батареї на енергоємність буферного накопичувача, що дозволяє встановити енергетичні показники зарядної станції електромобілів.

4. Набула подальшого розвитку математична модель процесу зарядження електрохімічних акумуляторних батарей для електроживлення електромобілів, яка враховує випадковий характер її залишкової ємності, що дало можливість визначити вплив на енергоємність буферного накопичувача зарядної станції.

5. Вперше запропоновані математичні моделі процесу виробництва водню на заправних станціях електромобілів на паливних елементах при використанні енергії сонячного випромінювання та вітру, які дозволяють узгодити енергетичний баланс між виробленням та споживанням електричної енергії на станції.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено алгоритм розрахунку енергоємності буферного накопичувача електричної енергії зарядної станції електромобілів, що дозволяє реалізовувати гарантоване зарядження заданої кількості електромобілів при виборі генеруючого устаткування з урахуванням специфіки надходження енергії сонячного випромінювання та вітру.

2. Запропоновані схемні рішення реалізації зарядних станцій електромобілів, в яких як первинний генератор електричної енергії використані фотоелектричні та вітроелектричні енергоустановки.

3. Розроблено методику визначення відстані між зарядними станціями при формуванні мережі, що враховує фактори впливу на міжзарядний пробіг електромобілів і показує реальну величину даного показника.

4. Розроблені схемні рішення реалізації водневих заправних станцій електромобілів на паливних елементах, де як первинні генератори електричної енергії виступають фотоелектричні та вітроелектричні енергоустановки.

5. Результати роботи впроваджені в Інституті електродинаміки НАН України та Інституті відновлюваної енергетики НАН України, що підтверджується відповідними актами впровадження. Отримані результати

використовуються в навчальному процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі Відновлюваних джерел енергії при підготовці фахівців за освітньо-професійною та освітньо-науковою програмами «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії», а також на приватних підприємствах ТОВ «Атмосфера-Технології природи» та KB Energy.

6. Результати теоретичних і експериментальних досліджень та розрахунків використані при виконанні науково-дослідних робіт за темами: «Комплексні системи енергозабезпечення автономних об'єктів на базі використання енергії вітру та сонячної енергії» (номер державної реєстрації ДР №0117U004325), 2017 – 2019 роки, де здобувачем розроблена математична модель реалізації автономної системи електроживлення з буферним акумулятором енергії та з комплексним використанням енергії сонячного випромінювання та енергії вітру; «Підвищення ефективності системи теплозабезпечення адміністративної будівлі за рахунок використання місцевих відновлюваних джерел енергії» (номер державної реєстрації ДР №0115U002408), 2015 – 2016 роки, де здобувачем запропонований алгоритм визначення надходження енергії сонячного випромінювання для заданої місцевості, що дозволило більш раціонально вибирати генеруюче устаткування; «Підвищення ефективності режимів паралельної роботи тягових джерел живлення екомобіля з урахуванням інтенсивності сонячної радіації та параметрів біодизеля» (номер державної реєстрації ДР №0113U001641), 2013 – 2014 роки, де здобувачем встановлені умови ефективної роботи двох тягових джерел живлення екомобіля, що враховують кліматометеорологічні показники місцевості та якісні показники біодизельного палива; «Оптимізація режимів експлуатації гібридного екомобіля на базі фотоелектричних батарей та біодизельного палива» (номер державної реєстрації ДР №0111U002500) 2011 – 2012 роки, де здобувачем отримана оптимізаційна модель вибору енергоємності тягового акумулятору екомобіля з урахуванням інтенсивності надходження сонячного випромінювання.

Особистий внесок автора. Всі результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. Роботи [1-12] написані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: в [13] – формулювання мета та завдань досліджень, аналіз секторів агропромислової та харчової галузей України на предмет використання відновлюваних джерел енергії; в [14] – проведений аналіз та показано переваги комплексного застосування декількох відновлюваних джерел енергії з обов’язковим акумулюванням; в [15] – запропонована концепція зарядження акумуляторної батареї електромобіля від фотоелектричної станції; в [16] – проаналізовано вплив параметрів системи орієнтації ротора на статичні характеристики вітроустановки; в [17] – проаналізований сучасний стан розвитку відновлюваної енергетики в Україні та світі, відмічені тенденції розвитку та вплив на енергетику країни в цілому; в [18] – розроблено схеми реалізації зарядних станцій електромобілів з комплексним використанням вітро-сонячних електроустановок та встановлені переваги застосування буферного акумулятора; в [19] – проаналізовано динаміку вартості фотоелектричного обладнання та літєвих акумуляторних батарей та встановлені можливі терміни окупності автономних зарядних станцій електромобілів з використанням фотоенергоустановок; в [20] – проаналізовано динаміку вартості вітроелектричних установок та встановлені можливі терміни окупності автономних зарядних станцій електромобілів з їх використання; [21] – запропоновано алгоритм розрахунку ємності буферних акумуляторних батарей, що входять до складу автономних зарядних станцій електромобілів з використанням вітроелектричних установок; [22-23] – аналіз металів різних типів для їх застосування в якості катодного матеріалу для отримання водню як ефективного акумулятора та енергоносія; [24-25] – аналіз струмоутворюючих процесів у воднево-кисневих паливних елементах, що застосовуються на електромобілях; [26] – аналіз аналогів розробленого пристрою для зарядження акумуляторних батарей; [27] – розрахунок системи фотоелектроживлення літального апарату; [28] – встановлені співвідношення потужностей

вітроелектричних та фотоелектричних установок для реалізації різних методів зарядження електромобілів; [29] – схеми вітроводневих систем з варіантами застосування водню; [30] – умови ефективного застосування енергії вітру та сонячного випромінювання для опріснення води; [31] – аналіз впливу розподіленої генерації з використанням відновлюваних джерел на якість енергоживлення споживачів.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідались і підтримані на XIV-XX Міжнародних науково-практичних конференціях «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 2013-2019 рр.), науково-практичній конференції «Відновлювана та воднева енергетика» (м. Київ, 2018 р.), XII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики" (м. Київ, 2018 р.) та на спільному розширеному засіданні кафедри відновлюваних джерел енергії з темою доповіді «Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для зарядження електромобілів» (Київ, «КПІ ім. Ігоря Сікорського» 2019 р.).

Публікації результатів наукових досліджень. Основні положення дисертації та результати досліджень опубліковані в 31 науковій праці, у тому числі: 22 статті у наукових фахових виданнях (з них 2 статті у виданнях України, які включено до міжнародної наукометричної бази Scopus та 3 – наукові статті в закордонних наукових журналах), 1 патент України на корисну модель, 8 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 302 сторінки, у тому числі 271 сторінка основного тексту, 119 рисунків, 10 таблиць, 5 додатків і переліку використаних джерел (173 найменування).

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ З МЕТОЮ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

1.1. Актуальність використання відновлюваних джерел енергії, як необхідної складової розвитку систем електроживлення електромобілів

Сталий розвиток людства, з точки зору енергетики, можливий за умов надійного забезпечення енергетичних потреб промисловості і населення країн. Важливою глобальною проблемою нашого століття є забезпечення енергією, що пояснюється практичним використанням технологій, які є недостатньо ефективними і не можуть задовольнити зростаючий попит. Згідно даних Організації Об'єднаних Націй близько 1,6 млрд. чоловік мають обмежений доступ до електрозабезпечення, та 2,4 млрд. чоловік – до сучасних видів палив для побутових потреб, наприклад, приготування їжі та обігрівання житла [32]. Постійне зростання обсягів споживання паливно-енергетичних ресурсів з однієї сторони призводить до вичерпання існуючих запасів з іншої. Використання існуючих технологій перетворення енергії традиційного викопного палива в інші види енергій (електричну, теплову, механічну та ін.) призводить до інтенсивного забруднення навколишнього середовища, збільшуючи цим самим антропогенний вплив на природу.

Енергія, яка використовується в промисловості, сільському господарстві, побуті, на транспорті та в інших сферах діяльності людини, відноситься, головним чином, до електричної і теплової, при цьому найбільш зручною для транспортування, розподілення та використання споживачами є перша. Електрична енергія з високим коефіцієнтом корисної дії перетворюється в

механічну, теплову, світлову та інших види енергій, а пристрої, які її використовують, прості в керуванні.

Відомо [33], що на місцевих (локальних) електричних мережах в Україні досить часто відбуваються аварійні ситуації, а це в свою чергу не дозволяє забезпечувати споживачів якісним та надійним електроживленням. Ненадійне постачання електричної енергії кінцевих споживачів підтверджується високим коефіцієнтом дефектності мереж, який в Україні становить 13%, а також експлуатацією ліній електропередачі, модернізація яких відбувається значно повільніше, ніж старіння [33]. Часті аварійні ситуації з електричними мережами стали буденним і звичним явищем. І коли у великих містах дана проблеми вирішується відносно швидко, невеликі містечка та селища можуть бути заручниками даної обставини тривалий час (рис. 1.1).

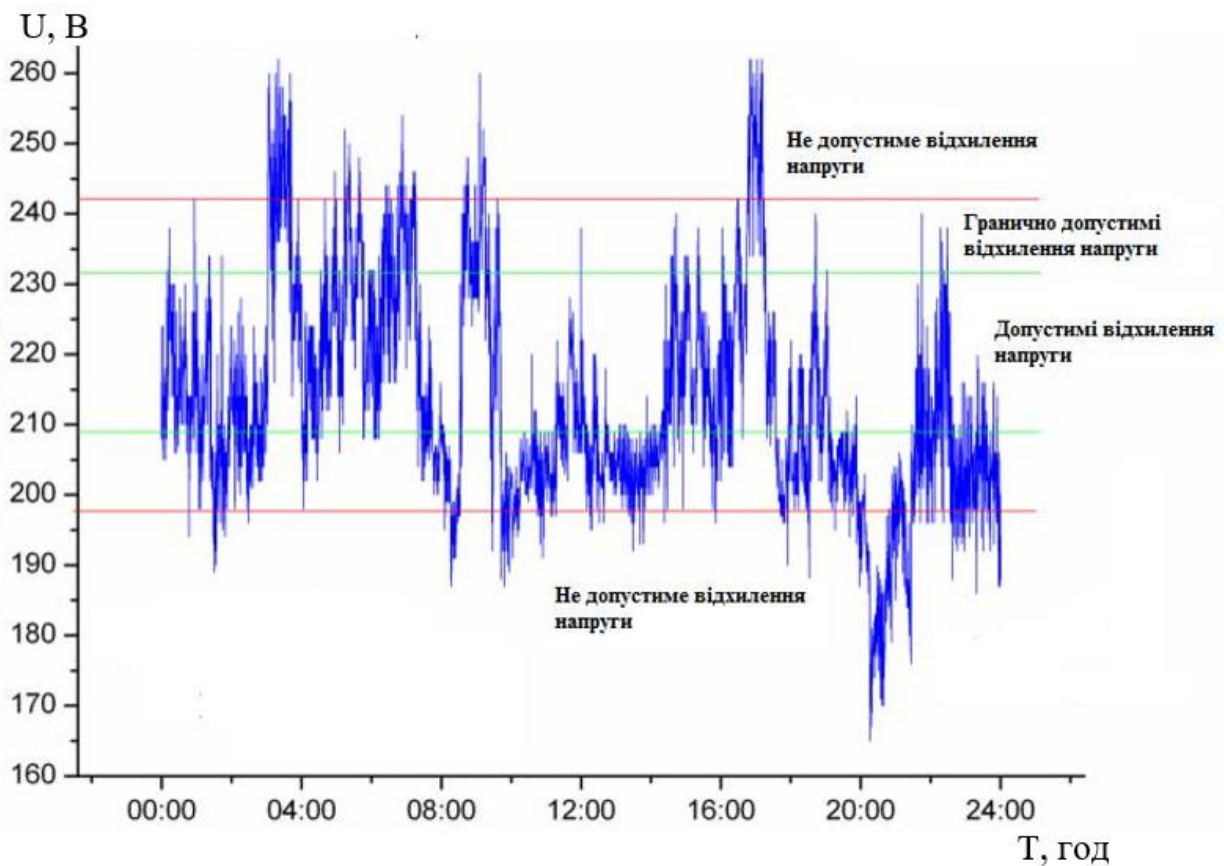


Рис. 1.1. Коливання напруги в електричній мережі в невеликих містах та селищах.

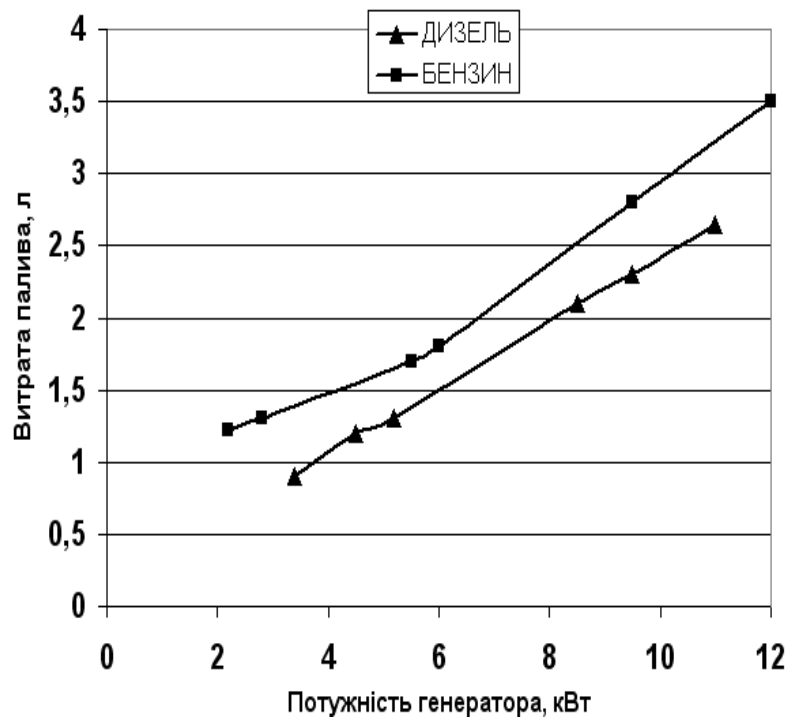
Незадовільний технічний стан ліній електропередачі призводить до масових відключень споживачів, нестабільності частоти, спотворення синусоїдальної форми напруги внаслідок відхилення напруги від установлених меж (перевищенням верхнього 242 В і нижнього 198 В діапазону напруги [34]), імпульсних перешкод амплітудою в одиниці кіловольт. В кращому випадку всі ці фактори призводять до вимикання електроспоживачів, а в гіршому – до виходу їх з ладу.

Окрім фактів неякісного електроживлення споживачів від центральних електромереж на території України існує також фактор відсутності сполучення з мережами споживчих об'єктів через ряд причин, серед яких значне віддалення від централізованих електромереж, висока вартість прокладання лінії і в підсумку проекту підключення та інші. До таких споживачів відносяться державні та цивільні установи, розміщені в гірських місцевостях, прикордонні та розміщені вздовж морського берегу військові об'єкти, державні та приватні господарства, розміщені на значній відстані від центральних електромереж, а також приватні та дачні господарства, що не мають сполучення з електричними мережами.

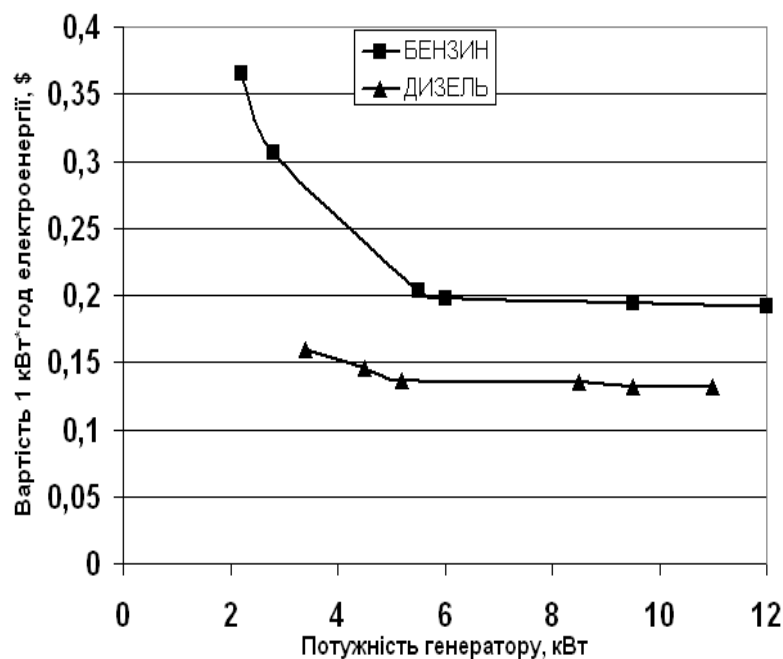
Неякісне енергоживлення одних споживачів від централізованих електромереж з однієї сторони та значна віддаленість інших споживачів від центральної електромережі з іншої змушують їх шукати нові шляхи виробітку електричної енергії на місцях, в тому числі і за рахунок використання відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії.

Найбільш розповсюдженими автономними джерелами електричної енергії для розглянутих вище споживачів є системи на основі дизельних та бензинових генераторів. Вони прості у використанні та надійні в роботі. Однак, існує ряд недоліків, які обмежують попит на такі установки. В результаті аналізу встановлено, що в процесі вироблення електричної енергії вони використовують дорогі дизельне паливо або бензин, що призводить до високої вартості отриманої електроенергії (рис. 1.2, а). Аналіз приведених на рис. 1.2,б кривих показує, що зменшення одиничної потужності дизельного та бензинового генераторів

приводить до значного здорожчання отриманої електроенергії, тоді як на практиці найбільшою популярністю у споживачів користуються автономні системи електроживлення потужністю до 10 кВт.



а)



б)

Рис. 1.2. Техніко-економічні характеристики бензинових та дизельних електрогенераторів: а – за витратою палива; б – за вартістю отриманої електроенергії.

При існуючих на сьогоднішній день тарифах на електроенергію в межах від 0,03-0,07 \$/кВт·год в залежності від обсягів споживання, навіть за умови їх підвищення, як показано на рис.1.2 [35], вартість енергії, отриманої від дизельних генераторів, буде в 2-4 рази, а для бензинових в 3-11 разів вищою, в залежності від одиничної потужності генераторної установки. Навіть постійне зростання вартості електроенергії в межах прийнятих Національною комісією регулювання електроенергетики та комунальних послуг (рис. 1.3.) не робить електроживлення від дизельних та бензинових генераторів більш економічно вигідним.

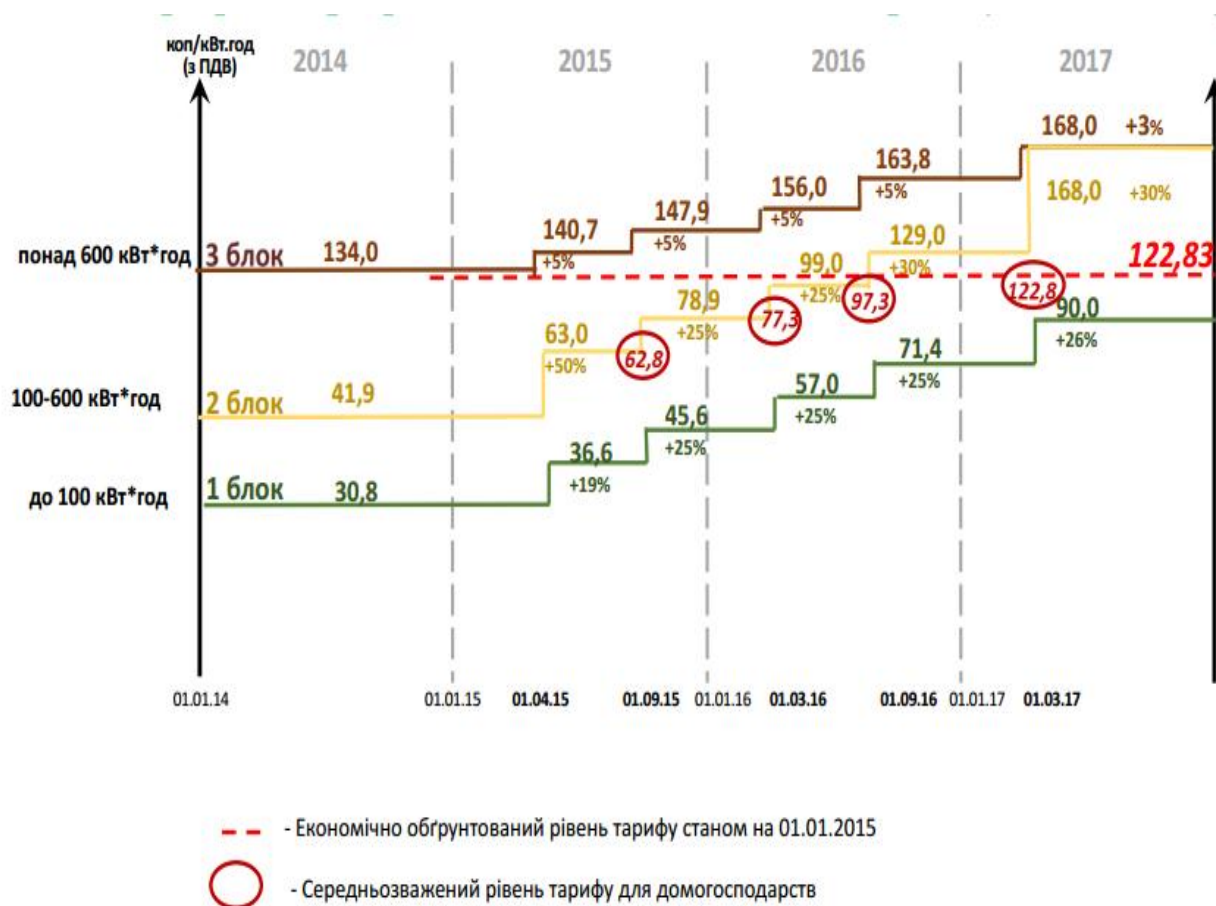


Рис. 1.3. Графік тарифів на електроенергію для домогосподарств у 2015-2017 роках [35].

Окрім економічних обмежень, на сьогоднішній день дуже гостро стоїть питання екологічності енергетичного устаткування. Як відомо, робота дизельних та бензинових генераторів сама по собі досить гучна, а в результаті згорання

дизельного пального та бензину в атмосферу виділяються токсичні компоненти та канцерогени, що негативно впливають на здоров'я людей та погіршують екологічну ситуацію навколишнього середовища.

Поруч з традиційними системами автономного енергоживлення на основі бензинових та дизельних генераторів протягом останніх 10-15 років почали набувати популярності системи, які використовують місцеві відновлювані джерела енергії для задоволення потреб споживачів. І якщо в розвинених країнах світу масове використання таких систем розпочалось ще в минулому столітті, то в Україні інтерес до них у споживачів почав з'являтися після значного підйому тарифів на електричну енергію та прийняття Закону України про «зелений тариф» [36], в якому закріплене фінансове стимулювання виробників електричної енергії, що використовують відновлювані джерела енергії.

Використання систем на основі відновлюваних джерел для електрозабезпечення автономних об'єктів в Україні має досить давню історію. Однак найбільший практичний досвід був досягнутий, при виконанні науково-дослідних та конструкторських робіт під керівництвом ректора, на той час, «Київського політехнічного інституту» Денисенка Г. І., в результаті яких було досліджено енергосистему на основі ВДЕ на створеному науково-дослідному полігоні «Десна» та доведено доцільність комплексного використання ВДЕ в енергосистемах різного типу.

Питання підвищення ефективності роботи та комплексного використання ВДЕ досліджено в роботах Г. І. Денисенка, С. О. Кудрі, В. Ф. Рєзцова, П. Д. Лежнюка, В. В. Каплуна, В. М. Головка, П. Ф. Васька, Е. А. Бекірова, О. І. Яковлева, М.П. Кузнєцова [37-51] та ін.

Необхідною умовою розвитку та широкого впровадження систем на основі відновлюваних джерел енергії є підвищення ефективності роботи установок даного типу шляхом збільшення ефективності перетворення енергії відновлюваних джерел, участь систем даного типу в регулюванні графіку навантаження енергосистеми, а також підвищення ефективності передачі енергії

споживачам шляхом удосконалення існуючих систем акумулювання, перетворення та стабілізації параметрів енергії.

Враховуючи прийнятий «Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року» [52], а також перспективи впровадження технологій «Smart Grid» у національну електричну мережу та необхідність розвитку зарядних станцій електромобілів, в тому числі і на основі ВДЕ, постає питання про створення єдиних підходів до правильного вибору генеруючого та акумулюючого устаткування як класичних, так і комплексних систем електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії з урахуванням енергетичного потенціалу місцевих відновлюваних джерел, режимів роботи обладнання при умові відсутності негативного впливу на роботу централізованої енергосистеми. Це, в свою чергу, вимагає проведення пошукових робіт з дослідження режимів роботи устаткування на основі ВДЕ для зарядження акумуляторів енергії в складі комплексних енерговузлів з метою встановлення ефективних методів зарядження з урахуванням факторів: випадковості виробітку енергії вітро- та фотоелектричними установками, оптимального співвідношення ємності акумуляторної батареї, потреб споживача, потужності відновлюваного джерела, економічно обґрунтованого вирішення питання поєднання потужностей різних відновлюваних джерел в комплексних системах з акумуляторними батареями.

1.2. Сучасний стан використання відновлюваних джерел енергії та електротранспорту

Використання енергії відновлюваних джерел в даний час є одним із пріоритетних напрямів розвитку світової енергетики. Основною перевагою відновлюваних джерел енергії є їх невичерпність та екологічна чистота, що сприяє поліпшенню екологічного стану і не призводить до зміни енергетичного балансу на планеті [38]. Більшість проектів відновлюваної електрогенерації, що реалізуються в Україні, підключаються до централізованої мережі для

передачі електроенергії споживачам. Однак згідно [53] відновлювані джерела енергії мають різноплановий вплив на роботу електричних мереж, який змінюється в залежності від потужності, типу, місця розташування та топології мережі. Крім того, відзначається загострення проблеми забезпечення стійкості за напругою при підключенні ВДЕ до електричних мереж. Станом на сьогоднішній день дане питання залишається не вирішеним.

Проте наявність великого вітроенергетичного потенціалу в 60 млрд. кВт·год (15 млн.т.н.е.) та фотоелектричного потенціалу в 5,7 млрд. кВт·год (1,4 млн.т.н.е.) [54] змушує шукати нові шляхи залучення відновлюваної енергетики до загального енергобалансу країни з метою скорочення споживання імпортованих енергоносіїв та покращення екологічної ситуації. Зважаючи на це, актуальним є розширення варіантів застосування автономних систем електроживлення на основі ВДЕ без підключення до ОЕС.

Важливим, з точки зору розвитку світового ринку, є ринок електромобілів. Зокрема, в 2018 році загальносвітовий показник продажу склав 1,98 млн. одиниць [55]. Лідуючими в цьому напрямку країнами виступили Китай та Японія. В Європі відзначилися майже дворазовим збільшенням ринку екологічного транспорту.

Такі швидкі темпи приросту ставлять актуальне питання будівництва зарядних станцій електромобілів. Робота таких зарядних станцій від централізованих мереж в нічний час сприятливо впливатиме на графік навантаження енергосистеми, однак в пікові періоди (з 8⁰⁰ по 11⁰⁰ та з 17⁰⁰ по 21⁰⁰ години доби) збільшить гостропікове споживання, що негативно відобразиться на роботі мережі в цілому.

Одним з варіантів розширення застосування ВДЕ (в ракурсі збільшення кількості зарядних станцій електромобілів) є використання в якості джерела живлення автономних зарядних станцій електромобілів вітроелектричних, фотоелектричних чи комплексних вітро-сонячних енергоустановок. При цьому, впровадження зарядних станцій на основі ВДЕ не впливатиме на центральну електромережу (як відмічалось вище), підвищить показник використання

енергетичного потенцілу відновлюваних джерел та покращить екологічну ситуацію місцевості, де рухаються електричні транспортні засоби.

Станом на сьогоднішній день робота таких зарядних станцій на основі ВДЕ вивчена в неповній мірі, що пояснюється відсутністю єдиних підходів до визначення умов реалізації станцій даного типу, режимів роботи відновлюваного джерела енергії в залежності від ємності тягових акумуляторних батарей електромобілів та методу зарядження АБ при врахуванні випадкового характеру виробітку, впливу надходження енергії вітру та сонячного випромінювання на вибір буферних акумуляторів станції та ін., що в свою чергу вимагає проведення пошукових робіт з вирішення даних завдань.

На сьогоднішній день є велика кількість промислових акумуляторів енергії різних типів (рис.1.4), що можуть застосовуватись в електротранспорті. Однак визначальними факторами їх застосування для конкретного виду електромобілів є питомі енергетичні показники. Згідно приведеної діаграми, найбільші перспективи залучення до технології електромобільності мають літєві та літій-іонні АБ, а також паливні елементи, особливо на основі водню. Розвитку цих напрямків сьогодні приділяється багато науково-дослідних та пошукових робіт.

Згідно аналізу сучасних літературних даних розвитку світового ринку відновлюваної енергетики (рис.1.5) [57] та електротранспорту і зарядних станцій до нього (рис.1.6) [55] встановлено, що він стабільно зростає, тобто відновлювана енергетика в енергетичній сфері так само, як і електротранспорт в транспортній галузі відіграють все більшу роль і за прогнозами експертів дана картина тільки підсилуватиметься.

Зокрема, сумарна встановлена потужність всіх об'єктів відновлюваної енергетики в світі на кінець 2018 року склала 2350 ГВт [57], тоді як приріст електромобілів (рис.1.6,а) на кінець 2018 року склав близько 5,12 мільйони одиниць (електричних та гібридних), а кількість зарядних станцій (повільного та швидкого заряду) досягла 5,22 млн (рис.1.6,б) [55]. Слід відмітити, що промисловий розвиток станцій швидкого зарядження розпочався не так давно, а саме з 2013 року, коли ринкова кількість електромобілів перевищила

півмільйона одиниць і постало питання їх швидкого зарядження не тільки в містах, а й на дорогах міжнародного значення, автобанах, магістралях і т.д.

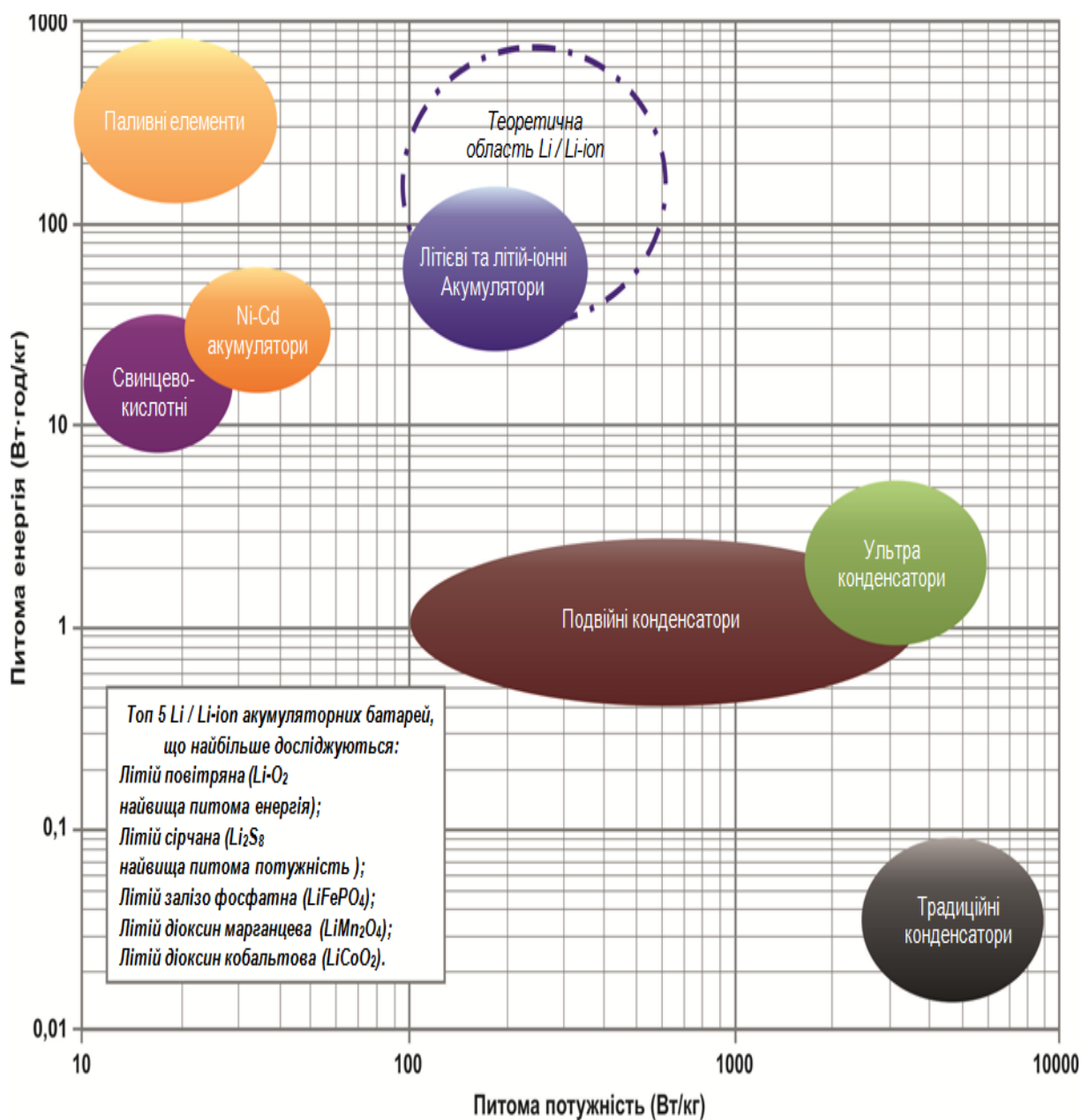


Рис. 1.4. Области застосування різних акумуляторів енергії в залежності від їх показників питомої енергії та питомої потужності згідно даних Логістичного агентства оборони Сполучених Штатів [56].

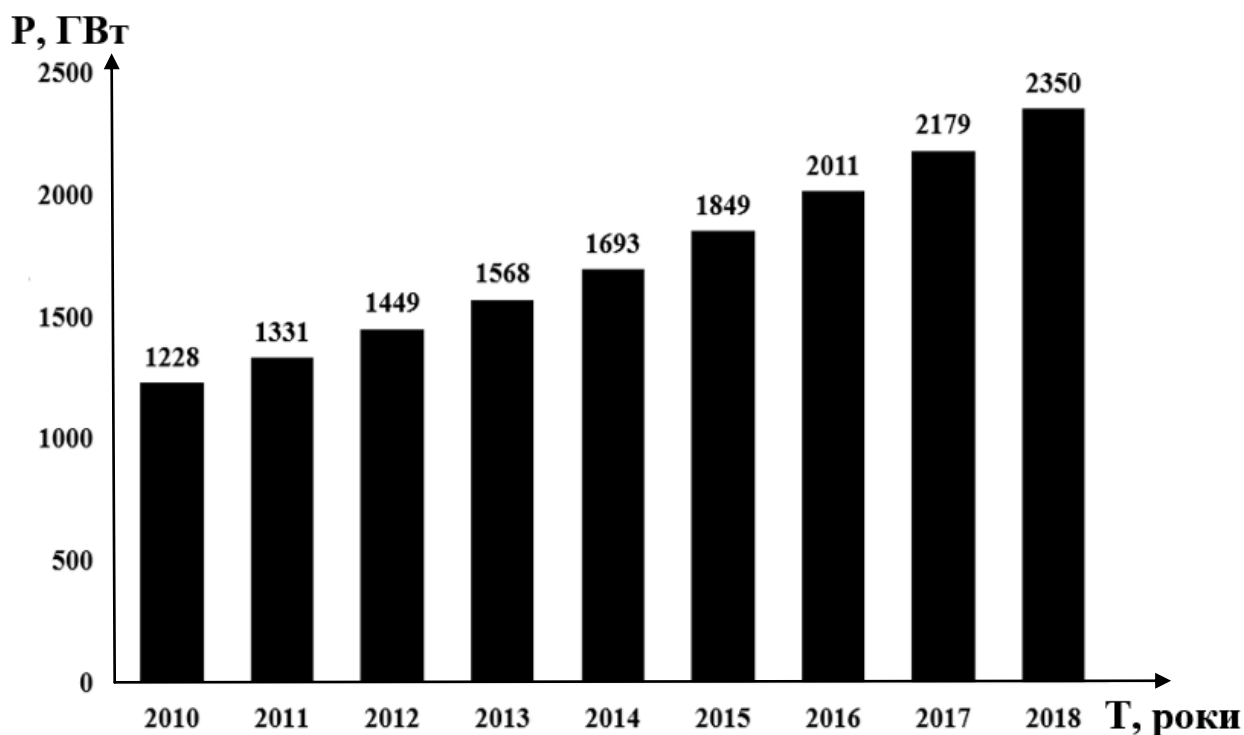
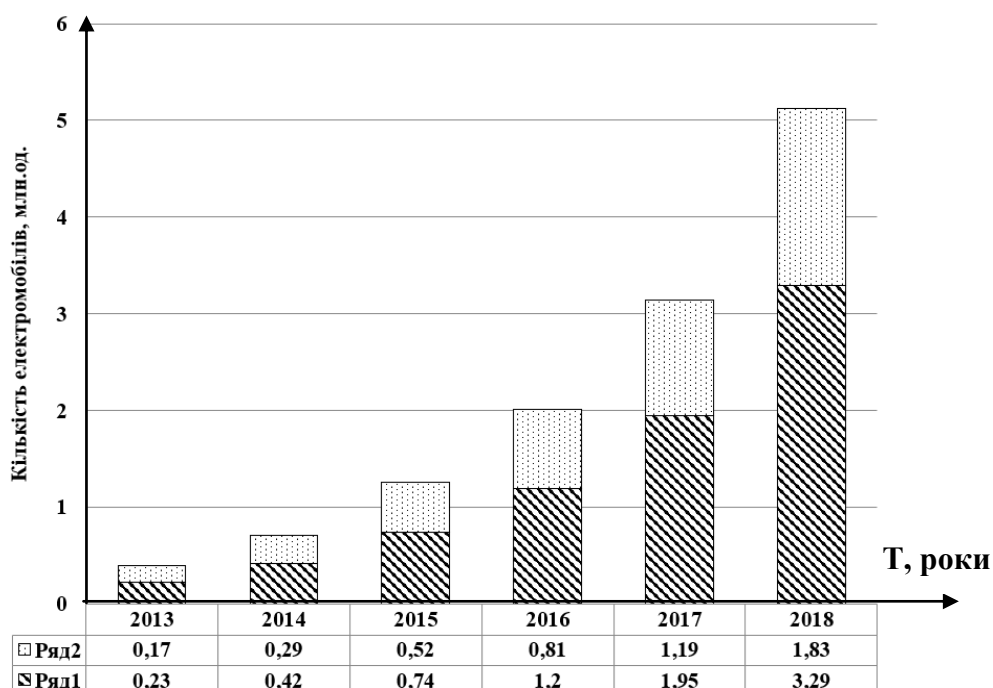


Рис. 1.5. Загальносвітова динаміка приросту сумарної встановленої об'єктів відновлюваної енергетики з 2010р. по 2018р.

Розвиток відновлюваної енергетики та електротранспорту в Україні має схожий характер в порівнянні із загальносвітовою тенденцією, однак початок їх розвитку відбувся дещо пізніше, що пояснюється економічною та суспільно-політичною ситуацією в країні. Тим не менш, на кінець 2018 року сумарна встановлена потужність всіх об'єктів відновлюваної енергетики в Україні згідно [58] склала 2117 МВт (рис.1.7).

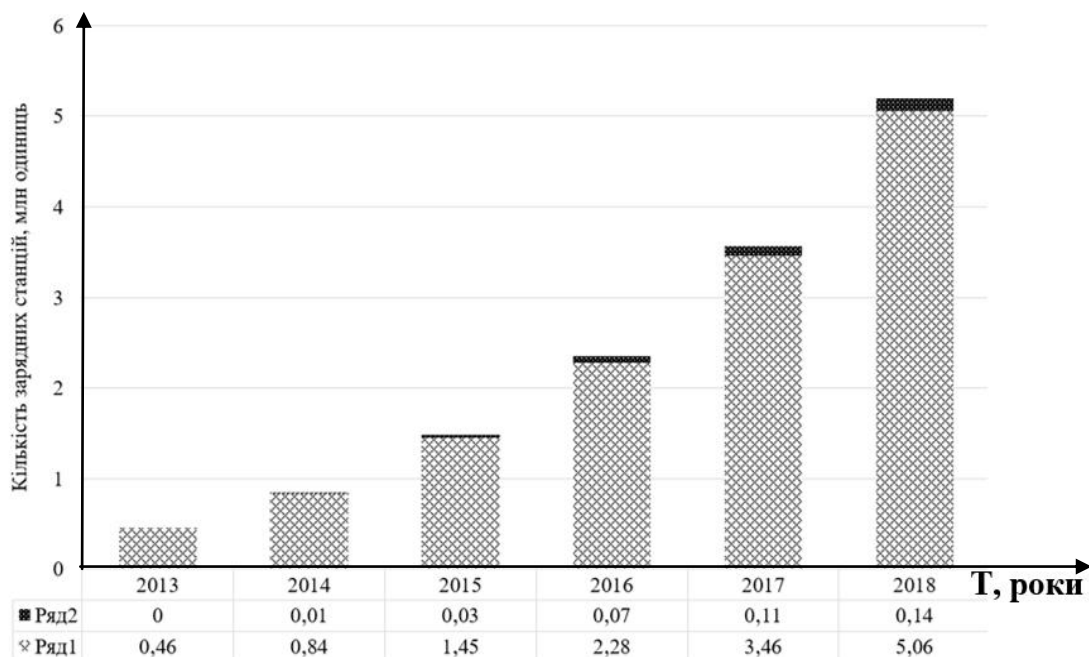
Динаміку розвитку ринку електромобілів складно проаналізувати, оскільки відсутні офіційні дані з 2010 року, однак згідно [4] за 2014 рік в Україну було ввезено 95 електромобілів, в 2015 році – 731, в 2016 року – 1709, в 2017 року – 4406, в 2018 року – 9706 одиниць (рис. 1.8). Такий приріст пояснюється прийнятим Законом «Про внесення змін до Закону «Про митний тариф України» щодо ввізного мита на електромобілі». Закон України № 822-VIII, який був підтриманий Верховною Радою 25 листопада 2015 року, встановлює нульову ставку ввізного мита на автомобілі, оснащені електродвигуном.



а

Ряд 1 – електромобілі з електроприводом (BEV);

Ряд 2 - гібридні з електроприводом та ДВЗ (PHEV).



б

Ряд 1 – класичні зарядні станції (повільний заряд);

Ряд 2 – станції прискореного заряду (швидкий заряд).

Рис. 1.6. Динаміка приросту: а) - електромобілів в світі з 2010р. по 2018р.;

б) - зарядних станцій в світі з 2013р. по 2018р.

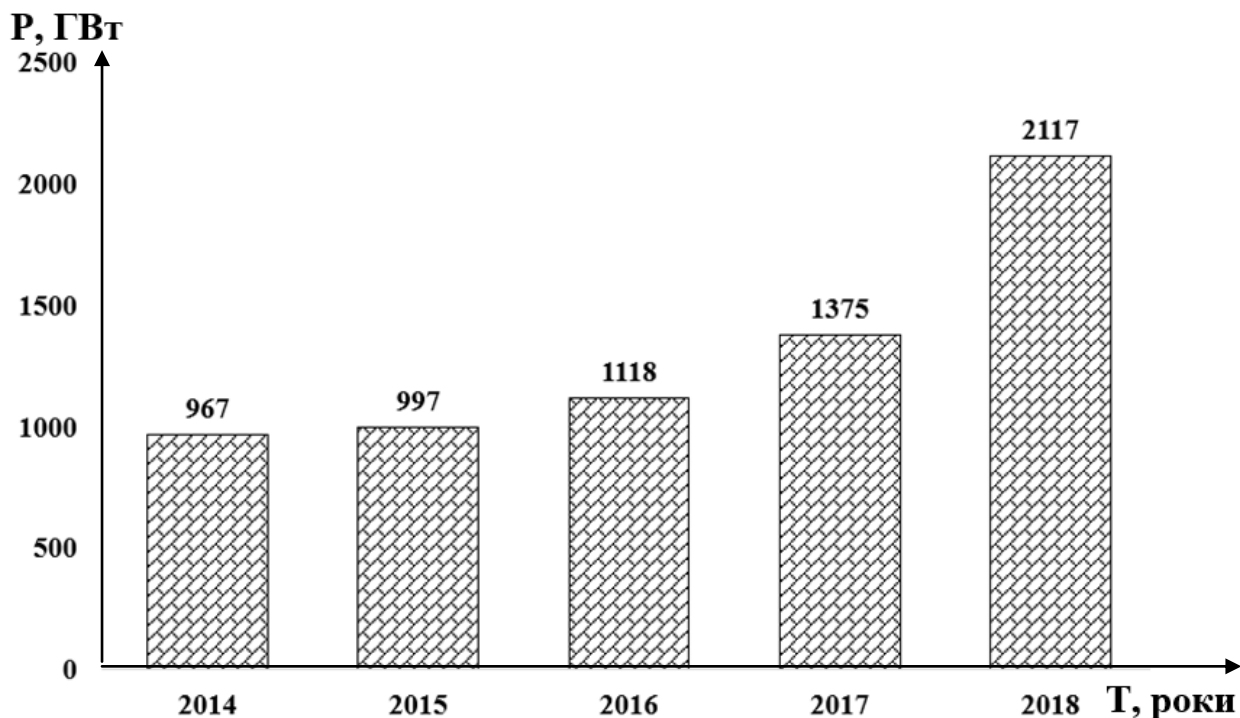


Рис. 1.7. Динаміка приросту сумарної встановленої потужності об'єктів відновлюваної енергетики з 2014р. по 2018р. в Україні (без урахування АР Крим та зони ООС).

Враховуючи швидкі темпи приросту об'єктів відновлюваної енергетики з однієї сторони та не менш стрімкий розвиток приросту електромобілів з іншої, на сьогоднішній день стає актуальним питання розвитку інфраструктури зарядних станцій, які зможуть заряджати акумуляторні батареї від установок на основі відновлюваних джерел енергії як класичними, так і новими методами «швидкого» заряду [59].

Темпи розвитку ринку електромобілів залежать від рівня розвитку акумуляторних батарей, які є базовим компонентом електромобіля. В залежності від типу електрохімічної системи та її енергоємності визначаються технічні характеристики електромобілів.

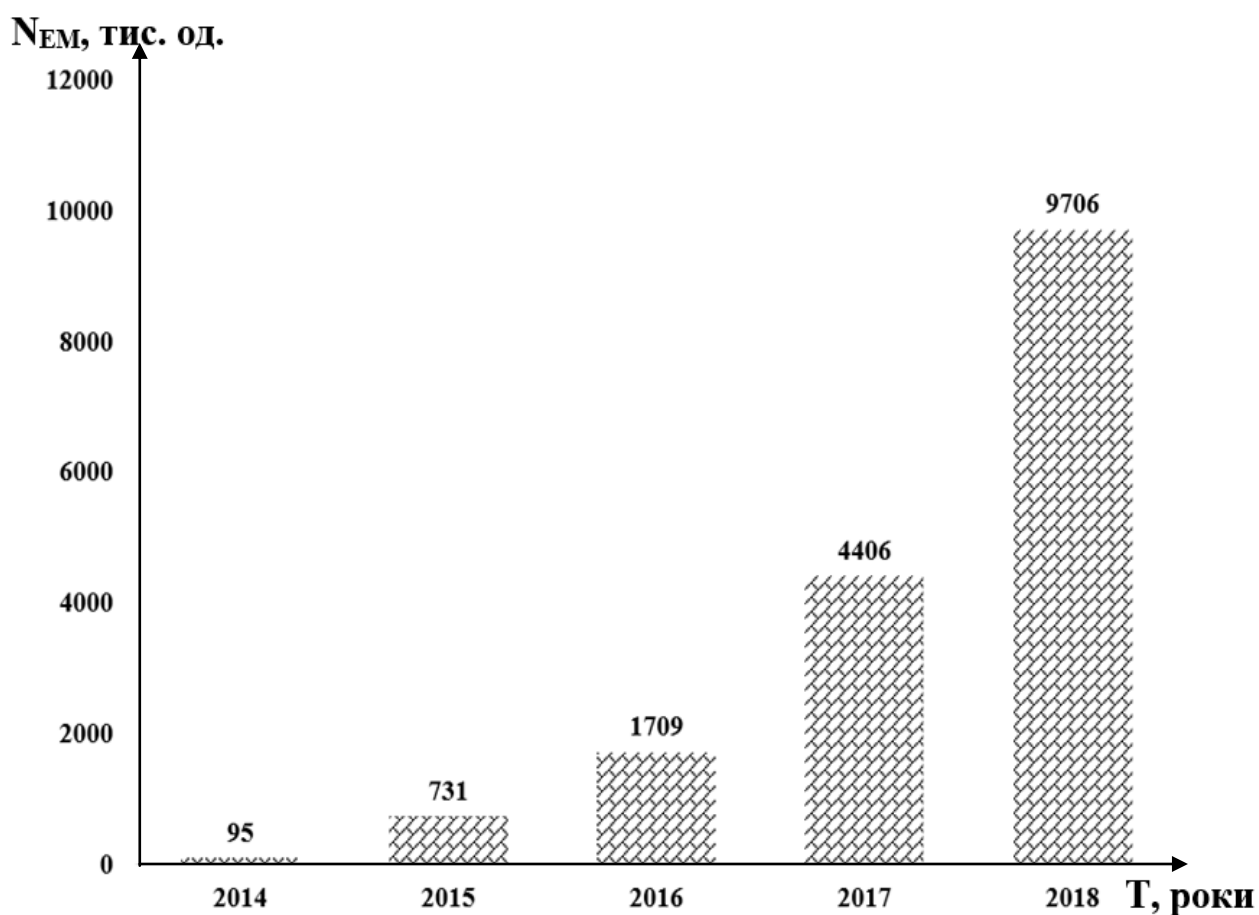


Рис. 1.8. Динаміка приросту електромобілів в Україні з 2014р. по 2018р.

1.3. Особливості застосування електрохімічних акумуляторів різних типів

1.3.1. Особливості застосування свинцево-кислотних акумуляторних батарей

Як відомо, реалізація ефективного електромобіля стала можлива після винайдення надійного акумулятора, який міг би легко заряджатись та мав хороші енергетичні показники. Завдяки відкриттю Планте в 1859 році свинцево-кислотного акумулятора, з подальшим удосконаленням завдяки роботам К.Форе, в 1881 році було отримано перший працездатний електрохімічний акумулятор,

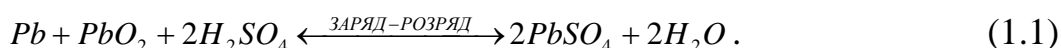
завдяки появі якого з середини 80-х років XIX століття електромобілі вступили в еру свого розвитку.

Фердинанд Порше у квітні 1900 року на виставці в Парижі представив електромобіль Löhner-Porsche з свинцево-кислотою акумуляторною батареєю (СКАБ) ємністю 300 *A·год* та напругою 80 *B*, якої було достатньо на 100 *км* пробігу. Не дивлячись на таку давню історію, даний тип акумуляторних батарей і сьогодні використовується виробниками електромобілів в якості джерела живлення. Це пояснюється в першу чергу найменшою вартістю даних акумуляторів за 1 *A·год* ємності, високою питомою потужністю та надійністю в роботі.

Не дивлячись на широке практичне застосування та постійно зростаючу динаміку літєвих акумуляторних батарей на електротранспорті, все ще найбільше використовують свинцево-кислотні АБ, зокрема на електричних транспортних засобах, задіяних в житлово-комунальній, виробничій, медичній та соціальній сферах.

Стандартне значення ЕРС однієї гальванічної пари даної електрохімічної системи (згідно рівняння Нернста) становить 2,041 *B* (зазвичай приймають 2 *B*), але для збільшення напруги їх набирають в акумуляторну батарею (АБ) напругою 6 *B* та 12 *B*. У випадку використання даних АБ як джерела електроживлення електромобіля вони набираються в блоки з напругою 24 *B*, 48 *B*, 96 *B*, 120 *B* і більше.

Основний струмоутворюючий процес згідно загальноприйнятої теорії подвійної сульфатації в свинцево-кислотних акумуляторах виглядає наступним чином:



Аналіз рівняння (1.1) показує, що під час розрядження акумулятора даної електрохімічної системи відбувається зменшення концентрації кислоти (H_2SO_4) в розчині електроліту та зростання концентрації розчинника (H_2O) та сульфату свинцю ($PbSO_4$), це призводить до погіршення електропровідності електроліту та

зниження напруги в акумуляторі і підтверджується наступною залежністю (рис. 1.9) [60]:

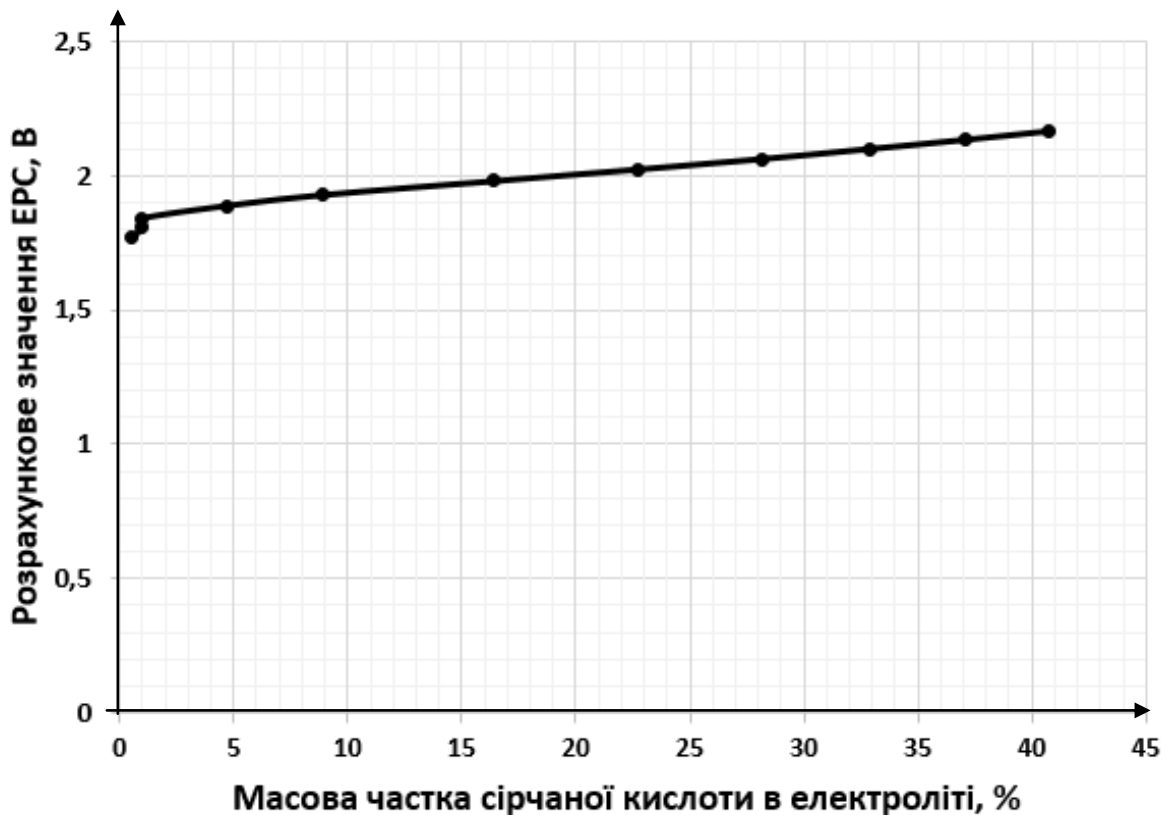


Рис. 1.9. Зміна електрорушійної сили (ЕРС) свинцево-кислотного акумулятора в залежності від концентрації сірчаної кислоти (H_2SO_4) в розчині електроліту.

Ємність СКАБ залежить від струму розряду (I_p). Зокрема, як показано на рис. 1.10, збільшення розрядного струму до $2,4C_n$ призводить до зменшення ємності, яку ми можемо отримати при струмі $0,1C_n$, що добре описується розповсюдженим рівнянням Пейкерта [60]:

$$C(i) = \frac{A}{i^n}, \quad (1.2)$$

де: $C(i)$ – ємність акумулятора для конкретного струму розряду i (А), A та n – емпіричні константи.

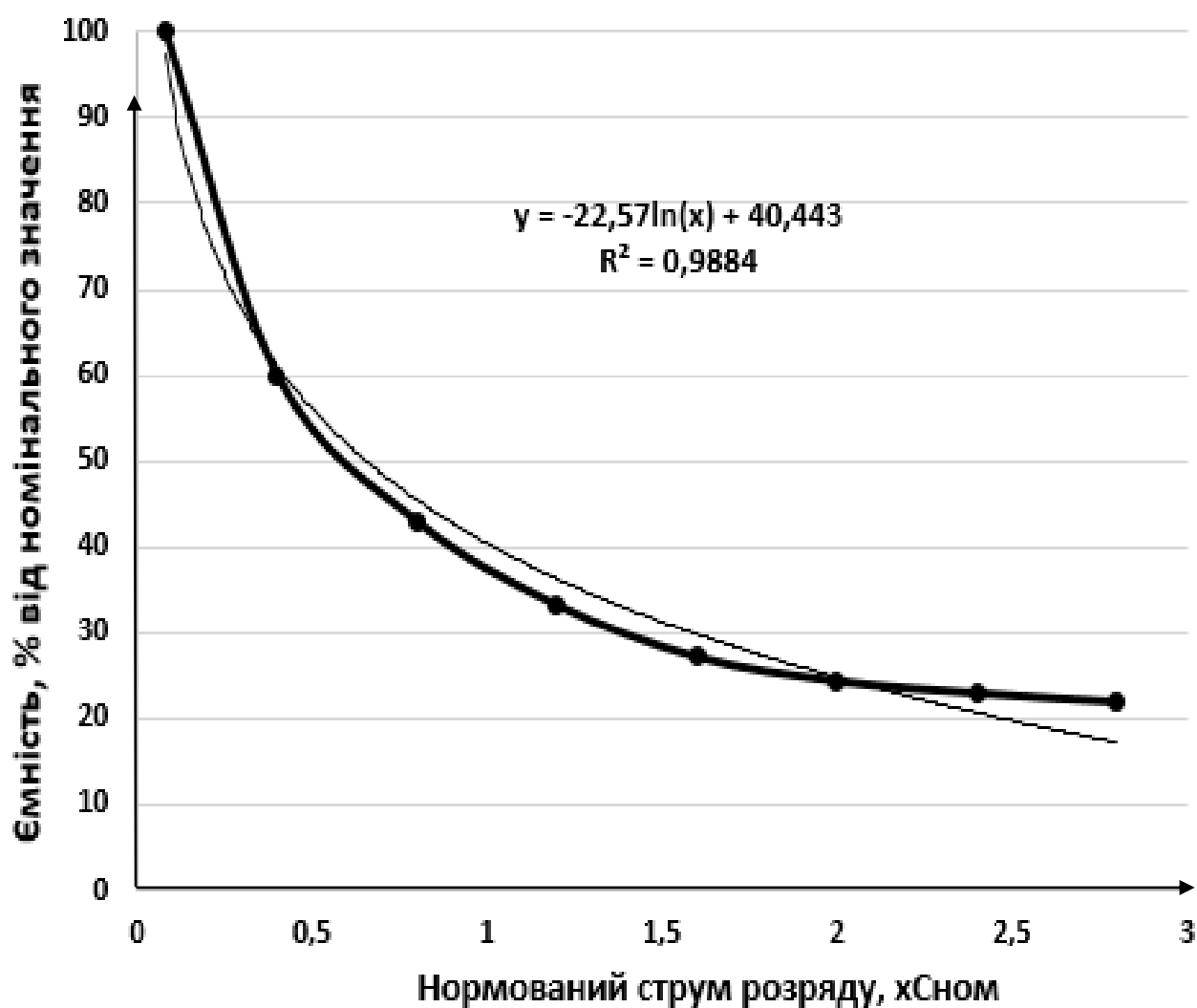


Рис. 1.10. Залежність ємності свинцево-кислотного акумулятора від нормованого струму розряду.

Однак дана залежність добре описує залежність ємності АБ від нормованого струму розряду при середніх режимах, а при великих та малих швидкостях дає найбільші похибки. Зважаючи на це, використавши програмне середовище Microsoft Excel, побудовано лінію тренда, яка дозволяє встановити наближену залежність $C_n = f(I)$ з коефіцієнтом кореляції 0,9884. В результаті аналізу отримано логарифмічну залежність у вигляді наступного рівняння:

$$C(i) = -22,57 \ln(i) + 40,443. \quad (1.3)$$

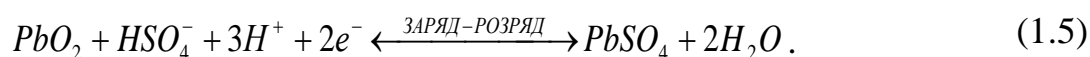
Це необхідно враховувати при використанні даного типу акумуляторів як джерела живлення електромобілів в різних режимах руху транспортного засобу і відповідно навантаження АБ.

Залежність ємності СКАБ акумулятора від температури описується за відомою залежністю:

$$C_{t_1} = \frac{C_{t_2}}{1 + \alpha(t_2 - t_1)}, \quad (1.4)$$

де: α – температурний коефіцієнт ємності.

Робота катоду в СК акумуляторі описується наступним рівнянням:



Значення стандартного електродного потенціалу (E^0) залежить від кристалічної модифікації діоксиду свинцю і при стандартних умовах (25 °C, 760 мм.рт.ст.) для α - PbO_2 : $E^0 = 1,6871$ В, а для β - PbO_2 : $E^0 = 1,6971$ В.

Активна маса катоду складається з діоксиду свинцю, який може існувати в двох кристалічних модифікаціях: ромбічної (α - PbO_2) та тетрагональної (β - PbO_2). Утворення α - PbO_2 пов'язано з відносно малою кислотністю середовища у внутрішніх шарах (в порах) позитивних електродів, що достатньо добре ілюструє діаграма Пурбе системи $Pb - H_2SO_4 - H_2O$ (рис. 1.11) [61]. Аналіз даної діаграми дозволяє прогнозувати можливі варіанти утворення тієї чи іншої модифікації PbO_2 при різних значеннях pH середовища. Наприклад, за умови проведення зарядження повністю розрядженої СКАБ, коли концентрація H_2SO_4 в розчині електроліту дуже зменшилась через утворення $PbSO_4$ та H_2O , вірогідність утворення ромбічної модифікації α - PbO_2 буде вищою, ніж утворення β - PbO_2 . В той же час вірогідність утворення тетрагональної β - PbO_2 буде вищою в періоди пониження pH середовища, тобто, коли акумулятор даної електрохімічної системи буде заряджатись в кінцевій фазі процесу заряду.

Крім pH електроліту впливати на фазовий склад діоксиду свинцю може також швидкість процесу його отримання, тобто густина струму та концентрація солі свинцю в розчині електроліту. Як показано в [60], ромбічна модифікація α - PbO_2 може отримуватись в чистому вигляді при pH електроліту 3,8-4,8 (рис. 1.12) за умови малих густин струму на електроді. Дану особливість необхідно враховувати в кінцеві періоди заряду СКАБ, які проходять при малих струмах.

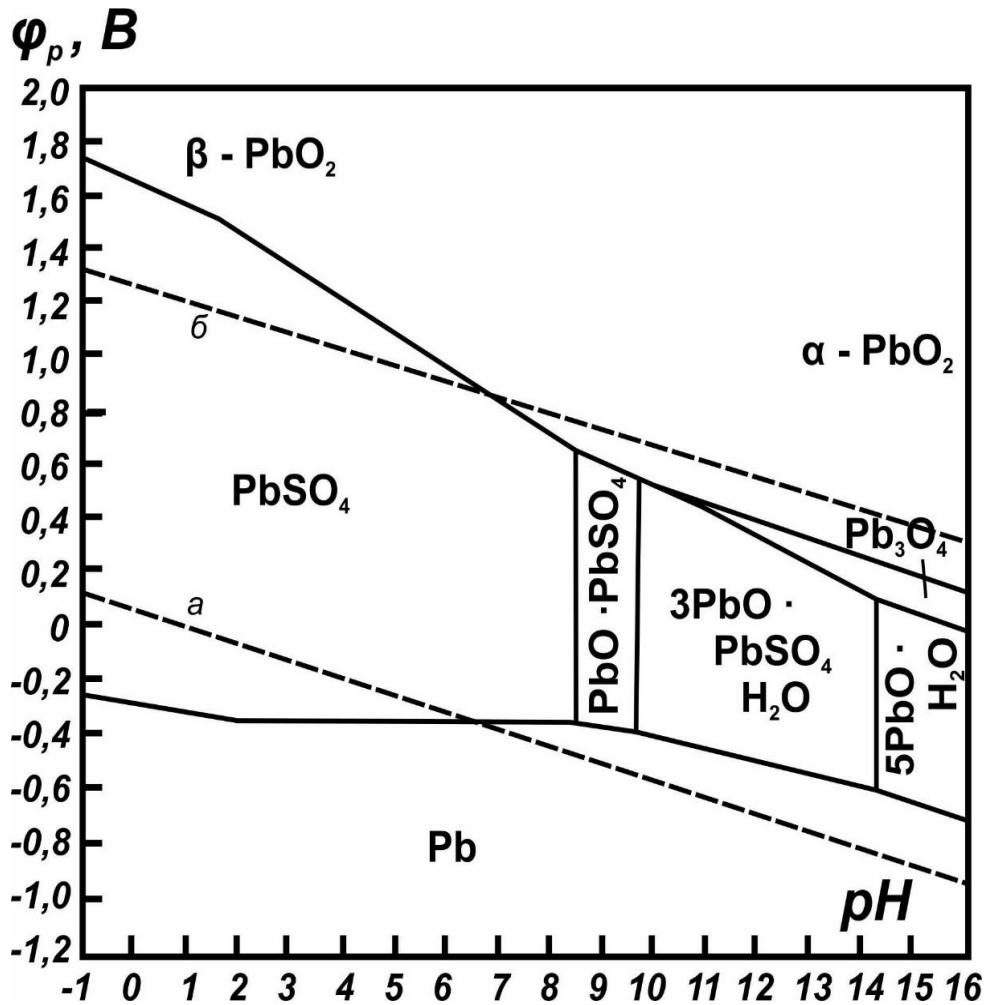
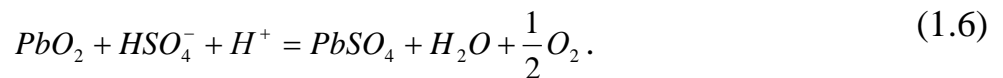


Рис. 1.11. Залежність рівноважних потенціалів φ_p від кислотності розчину pH в системі $Pb - H_2SO_4 - H_2O$ [18].

Важливою характеристикою СКАБ є його швидкість саморозряду і для діоксид свинцевого електроду вона описується наступним рівнянням:



Швидкість саморозряду даного електроду визначається перенапругою виділення кисню на ньому. Відносно низьке значення перенапруги на $\alpha-PbO_2$ у порівнянні з $\beta-PbO_2$ обумовлює більшу швидкість самочинного відновлення даної модифікації. Саморозряд тетрагональної $\beta-PbO_2$ відбувається вдвічі повільніше, ніж саморозряд $\alpha-PbO_2$. Враховуючи, що в процесі експлуатації (напрацюванні циклів заряд-розряд) відбувається поступове перетворення $\alpha-PbO_2$ у $\beta-PbO_2$, швидкість саморозряду даного електроду в цілому зменшується по мірі експлуатації акумулятора.

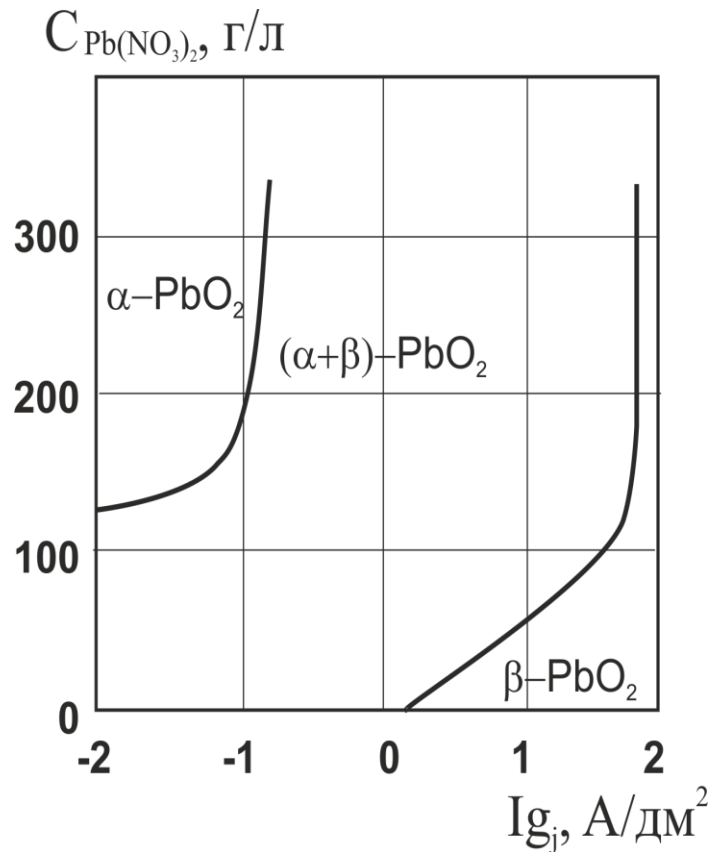
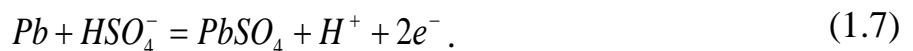


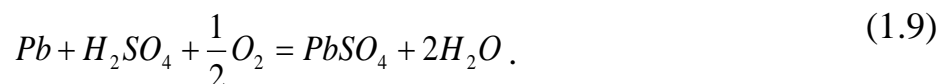
Рис. 1.12. Вплив умов електроосадження: концентрації $C_{Pb(NO_3)_2}$ та логарифма густини струму на фазовий склад діоксиду свинцю.

Електрохімічний напівпроцес на свинцевому електроді (аноді) описується наступним рівнянням:



Згідно рівняння Нернста по мірі зарядження даного електроду і акумулятора відповідно відбувається зростання концентрації сульфат іонів, що в свою чергу призводить до зміщення рівноважного потенціалу у від'ємну сторону.

Саморозряд свинцевого електроду зазвичай визначає саморозряд акумулятору в цілому і описується наступними рівняннями:



Для заряду СКАБ на практиці використовують наступні методи:

- зарядження при постійній напрузі є основним методом для АБ, що працюють в циклічному режимі;
- зарядження при постійній напрузі та постійному струмі полягає в початковому заряді при струмі $0,4C_n$, а потім контролюють величину напруги одиничного елемента, яка до кінця заряду при температурі $(20\pm 25)^\circ\text{C}$ повинна складати $2,45\text{ В}$;
- двоступінчатий заряд при постійній напрузі дозволяє скоротити час заряду при переході від робочого режиму в режим очікування, до стану компенсаційного підзаряду при малій величині струму заряду. Даний метод не можна використовувати у випадку, коли батарея працює в буферному режимі з навантаженням (тобто, якщо навантаження з'єднане паралельно із батареєю);
- компенсуючий заряд найчастіше застосовують на заключній стадії процесу заряду. Можливе його використання, як основного, при роботі свинцево-кислотних АБ в режимі очікування;
- плаваючий заряд – це метод заряду, при якому акумуляторна батарея під'єднана паралельно до навантаження і зарядження проводиться постійно;
- багатоступінчатий заряд відбувається в три етапи: заряд постійним струмом, основний заряд та компенсуючий заряд;
- відновлюючий заряд використовується у випадках глибокого розряду АБ. Його необхідно проводити якомога швидше, оскільки зберігання сильно розрядженої свинцево-кислотної батареї призведе до сульфітації її пластин і зниження ємності або, навіть, до повного виходу з ладу;
- імпульсний заряд прямокутними імпульсами дозволяє прискорити процес формування електродних матеріалів у АБ;
- асиметричний імпульсний заряд має двофазний характер і складається з трьох компонентів: імпульсу, що власне заряджає, наступного за ним короткого імпульсу оберненої спрямованості, що деполяризує, і періоду, що стабілізує.

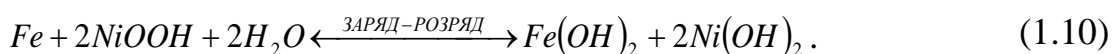
Як показує практика, в існуючих системах електроживлення на основі вітро- та фотоелектричних установок найчастіше використовують традиційні зарядні пристрої, що проводять зарядження акумуляторних батарей при

постійній напрузі [5]. Однак, для зарядження електромобілів даний метод є актуальним зазвичай в нічний період, коли власник електричного транспортного засобу не користується ним. Однак у випадках руху електромобілів на значні відстані із обмеженням часу на подолання заданої відстані нічного заряду може не вистачити і в такому випадку необхідне застосування методів швидкого зарядження акумуляторних батарей від вітроелектричних, фотоелектричних чи комплексних зарядних станцій. Реалізація швидкого заряду можлива за умов наявності достатньої потужності джерела, однак на практиці виникають ситуації, коли вихідна потужність установок на основі відновлюваних джерел енергії є недостатньою для здійснення процесу швидкого заряду (відсутність або не номінальні значення відновлюваних енергоресурсів, а саме швидкості вітру чи інтенсивності сонячної радіації), а енергія, що виробляється в таких умовах, може бути недостатньою для здійснення швидкого заряду. Дане питання потребує більш глибокого аналізу та пошуку нових методів зарядження та технічних рішень [62].

1.3.2. Особливості застосування лужних нікель-залізних акумуляторних батарей

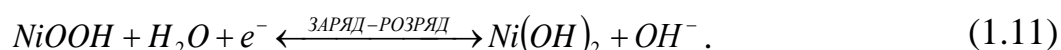
Подальший пошук альтернативних варіантів надійного акумулятора для електромобіля з метою покращення технічних, енергетичних та екологічних характеристик автономного джерела живлення припадає на відкриття Томаса Едісона в 1901р., коли ним було створено нікель-залізне вторинне джерело енергії. Вже на початку ХХ століття даний тип акумуляторів почали використовували для таких електромобілів, як Detroit Electric та Baker Electric [63].

Електрохімічна система нікель-залізного акумулятора складається з оксидно-нікелевого катоду, залізного аноду та лужного електроліту. Основний струмоутворюючий процес даного акумулятора описується наступним рівнянням:



На відміну від свинцево-кислотної АБ в нікель-залізних (НЗ) акумуляторах по мірі проходження процесу розряду відбувається витрата води в той час, як власне електроліт (зазвичай використовують луги $NaOH$ або KOH) відповідає лише за перенесення заряду через межу поділу фаз «провідник першого роду – провідник другого роду».

Напівпроцес на катоді даної електрохімічної системи в загальному випадку описується наступним рівнянням:



Механізм даного напівпроцесу є значно складнішим, що обумовлено в першу чергу твердофазним характером процесу, існуванням β - та γ -модифікацій $NiOOH$, а також утворенням при зарядженні оксидів зі ступенем окислення нікелю більше, ніж +3.

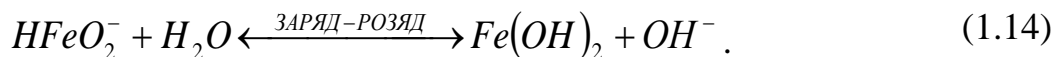
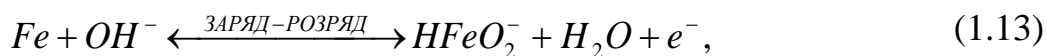
Електропровідність гідрооксиду $NiOOH$, значно вища електропровідності $Ni(OH)_2$, тому процес відновлення $NiOOH$, потрібно вести не більше, ніж на 80%. Модифікація β - $NiOOH$ має однакову з β - $Ni(OH)_2$ гексагональну кристалічну решітку, тому при заряді та розряді не відбувається зміна решітки і деформації електрода. При високих концентраціях лугу або високих зарядних струмах можливе утворення γ - $NiOOH$, який має меншу густину та викликає набухання (збільшення об'єму, роздування) електрода.

Після отримання близько половини зарядної ємності на оксидно-нікелевому електроді розпочинається побічний процес з виділенням кисню за наступною реакцією:



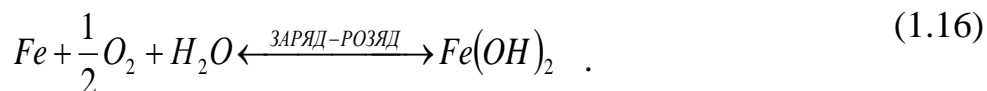
Утворення вищих оксидів нікелю, які мають місце при зарядженні нікель-залізного акумулятора, після закінчення відміченого процесу починають поступово розкладатись з виділенням кисню, що є однією з причин швидкого саморозряду свіжозаряджених оксидно-нікелевих електродів.

Для виготовлення аноду нікель-залізного акумулятора використовуються гематит (Fe_2O_3) або магнетит (Fe_3O_4), а також термічно відновлене залізо. Напівпроцес на аноді описується наступними рівняннями:



Складність анодного процесу пояснюється діаграмою Пурбе системи $Fe - H_2O$. (рис. 1.13) [64]. Аналіз даної діаграми дозволяє прогнозувати можливі варіанти утворення тієї чи іншої форми гідроксиду заліза ($Fe(OH)_2$ чи $Fe(OH)_3$) в залежності від зміни pH середовища, або потенціалу на електроді. Зокрема, проведення заряду аноду необхідно проводити будь-яким із застосовуваних методів за умови, що pH приелектродного простору буде більше 9,5, а зміна потенціалу електроду буде коливатись в межах $(-0,4 \div -1,1)V$. При більш високих значеннях потенціалу (до $+0,4V$) на електроді можливе окислення заліза до ступеня окислення $+3$ з утворенням трьохосновного гідроксиду $Fe(OH)_3$, а при більших електродних потенціалах в заданому діапазоні pH можливе утворення аніонів FeO_4^{2-} , що в кінцевому результаті призводитиме до можливого виходу з ладу аноду. Дану особливість необхідно враховувати при виборі методу зарядження та специфіки роботи джерела енергії, від якого здійснюватиметься заряд.

Залізний електрод схильний до самочинного розчинення в розчинах лугів з виділенням водню, що обумовлює значний практичний саморозряд даного акумулятора. Крім реакції з виділенням водню можливий самочинний процес з поглинанням кисню. В загальному випадку процеси саморозряду на залізному електроді описуються наступними рівняннями:



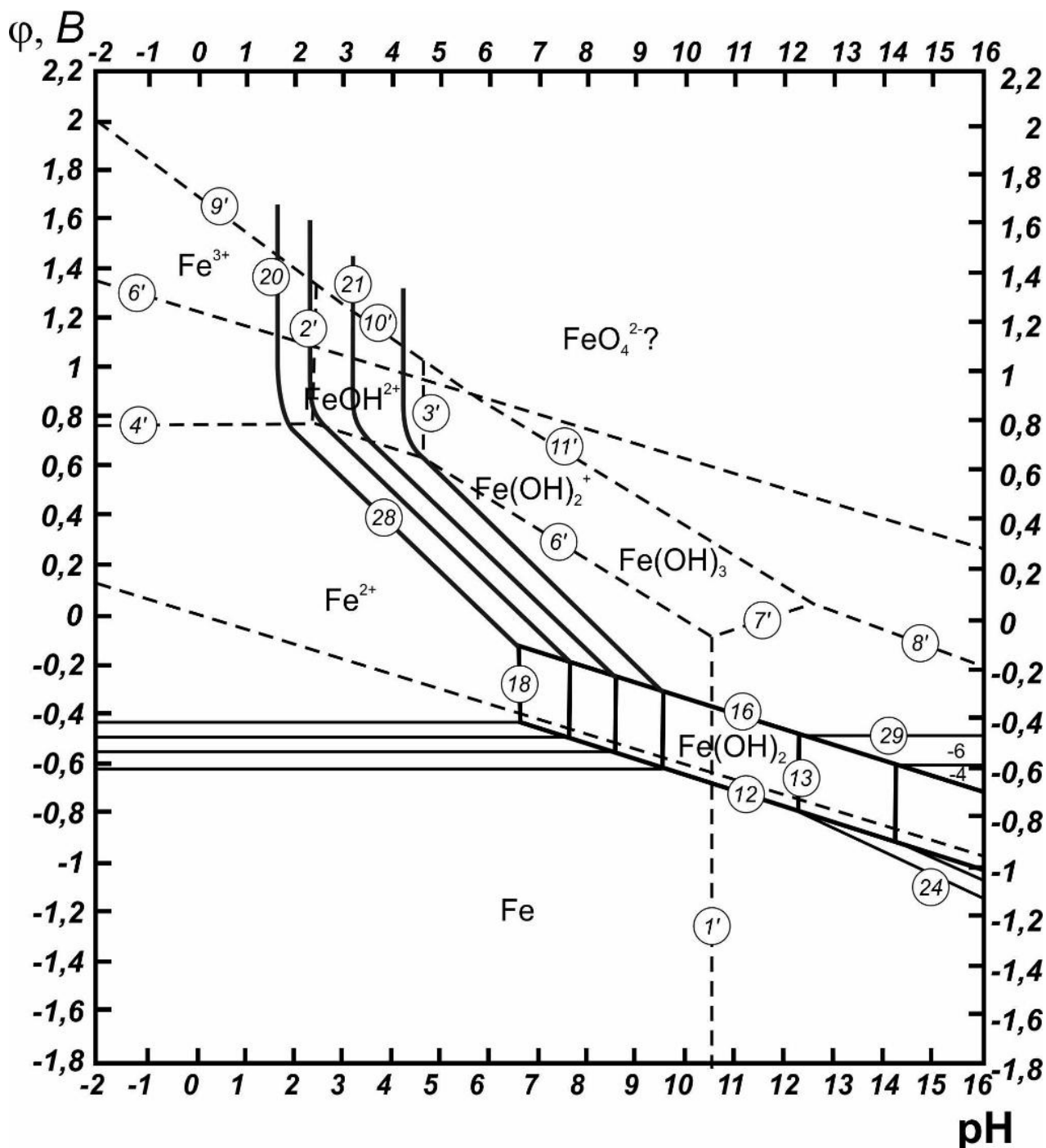


Рис. 1.13. Залежність рівноважних потенціалів ϕ_p від кислотності розчину pH в системі $Fe - H_2O$.

Згідно даних С.О. Розенцвейга, саморозряд залізного електроду складає приблизно 40% за місяць для чистих матеріалів та доходить до 80% для технічного заліза.

До позитивних моментів використання лужного акумулятора як тягового джерела електротранспорту є те, що всі компоненти, які утворюються в процесі

заряду і розряду, практично нерозчинні в електроліті і не вступають в будь-які хімічні реакції.

НЗАБ можуть тривалий час перебувати в напівзарядженому і навіть в повністю розрядженому стані, що абсолютно неприпустимо для СКАБ. Лужні акумулятори мають велику перевантажувальну здатність, тобто можуть працювати з великими струмами при розрядах і зарядах. Завдяки великому внутрішньому опору короткочасне замикання і глибокі розряди не виводять з ладу ці акумулятори.

Для зарядження нікель-залізних АБ на практиці використовують наступні методи:

1. Згідно [65] заряд лужних нікель-залізних акумуляторів проводять:

- при постійному струмі $(0,2 \div 0,25)C_n$ протягом $(6 \div 7)$ год. Закінчення зарядження настає при напрузі на кожному елементі $(1,75 \div 1,9)$ В, при цьому розпочинається інтенсивне «кипіння» електроліту в усіх елементах. Під час заряду потрібно стежити за тим, щоб температура електроліту не перевищувала $+40$ °С. Для зниження температури зменшують зарядний струм;

- при постійній напрузі $(1,5 \div 1,9)$ В протягом $(6 \div 7)$ год.

2. Посилений заряд лужних нікель-залізних акумуляторів проводять при 12 -годинному режимі номінальним зарядним струмом $0,25C_n$. Даний режим застосовують:

- при введенні в експлуатацію акумулятора;

- через кожні десять циклів заряду-розряду і раз на місяць у разі нерегулярної роботи акумулятора;

- після заміни електроліту в акумуляторі;

- після глибокого розряду нижче допустимого кінцевого значення напруги;

- після заряду слабким струмом, який проводився з перервами 16 годин і більше.

3. Прискорений режим зарядження 2,4 години силою струму, в два рази більше номінальної і 2 години - номінальною силою струму.

- імпульсний заряд прямокутними імпульсами дозволяє прискорити процес формування електродних матеріалів у АБ;

- асиметричний імпульсний заряд має двофазний характер і складається з трьох компонентів: імпульсу, що власне заряджає, наступного за ним короткого імпульсу оберненої спрямованості, що деполяризує, і періоду, що стабілізує.

Застосування прискорених режимів заряду від установок на основі відновлюваних джерел енергії потребує додаткових досліджень не тільки через стохастичну особливість роботи даних джерел енергії, але й через фактор інтенсивного газовиділення при заряді даних АБ високими струмами.

В роботі [66] запропонований спосіб заряду НЗ батареї двоступінчастим струмом постійної величини з контролем ступеня заряду і з перемиканням струму заряду в залежності від температури і напруги батареї, заснований на результатах випробувань тепловозних НЗ батареї на стенді і на тепловозі, спрямований на збільшення терміну служби цих батареї. В результаті проведених експериментів та теоретичного аналізу визначено, що для заряду тепловозних НЗ батареї в експлуатації раціональним є заряд номінальним струмом, чисельно рівним $0,25 C_n$ з переходом на струм $0,04 C_n$ при ступенях заряду $(0,7 \div 0,8)$ від номінальної ємності батареї. Проте даний метод не може застосовуватись за умови обмеження часу заряду акумуляторів даної електрохімічної системи.

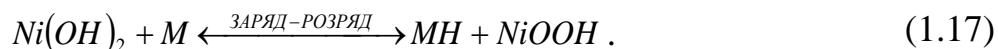
Застосування нікель-залізних акумуляторних батареї на електротранспорті актуальне, однак зарядження акумуляторів розглянутими вище методами базується на використанні стаціонарного джерела живлення. Заряд даних акумуляторів від станцій на основі відновлюваних джерел енергії (вітроелектричних, фотоелектричних чи комплексних) досліджений не в повній мірі. У випадках руху електротранспортних засобів на значні відстані із обмеженням часу на подолання заданої відстані попереднього заряду можливе виникнення необхідності у застосуванні швидкого зарядження акумуляторних від станцій на основі ВДЕ. Різні режими роботи електротранспортних засобів з нікель-залізними АБ ставлять питання пошуку можливих нових варіантів

зарядження та технічних рішень для їх реалізації з урахуванням специфіки роботи стохастичних джерел виробітку електричної енергії та забезпечення показника гарантованого заряду [62].

1.3.3. Особливості застосування нікель-металогідридних акумуляторних батарей

Наступним кроком в розвитку джерел живлення для електромобіля стало створення нікель-металогідридної акумуляторної батареї, коли вперше був запатентований винахід Віллом в 1975 р. Проте промислове виробництво даних вторинних хімічних джерел струму стало можливим після створення сплаву La-Ni-Co, який дозволяв оборотно адсорбувати водень протягом більше 100 циклів заряду-розряду.

Загальна струмоутворююча електрохімічна реакція нікель-металогідридного акумулятору описується наступним рівнянням [67]:

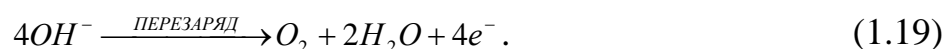


Електрохімічна система складається з оксидно-нікелевого катоду, аноду, що, зазвичай, представляє собою сплав декількох металів та лужного електроліту. Як видно із сумарної реакції, процес проходить з перенесенням протону від катоду до аноду при розряді і навпаки під час зарядження акумулятора, тому концентрація електроліту залишається незмінною.

Напівпроцес на катоді даної електрохімічної системи в загальному випадку описується наступним рівнянням:



При досягненні номінальної ємності на катоді розпочинається побічний процес виділення кисню за наступним рівнянням:



Кисень, що утворився на катоді при перезаряді дифундує через пористий сепаратор до аноду і відновлюється на ньому:

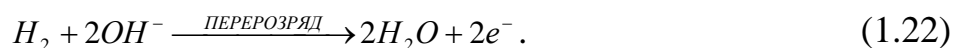


Реакції утворення кисню на катоді (1.19) та його відновлення на аноді (1.20) при перезаряді нікель-металогідридного акумулятору реалізують замкнутий кисневий цикл, який дозволяє стабілізувати тиск в герметичних акумуляторах даної електрохімічної системи.

При розряді після витрати всіх активних компонентів (ємності) катоду на ньому починає протікати побічна реакція виділення водню за наступним рівнянням:

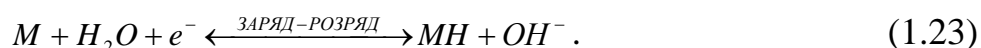


Утворений водень дифундує через пористий електрод до поверхні аноду і окислюється на ньому:



Реакції утворення водню на катоді (1.21) та його окислення на аноді (1.22) при перерозряді нікель-металогідридного акумулятора реалізують замкнутий водневий цикл, який дозволяє стабілізувати тиск в герметичних акумуляторах даної електрохімічної системи.

Напівпроцес на аноді нікель-металогідридного акумулятора описується наступним рівнянням:



Основним матеріалом, що визначає характеристики нікель-металогідридного акумулятора, є сплав металів, що здатний абсорбувати в 1000 разів більший об'єм водню, ніж його власний. Зазвичай сплави металів складаються з металу А, який екзотермічно поглинає водень, та металу В, що утворює гідриди з поглинанням теплоти (ендотермічний процес). В залежності від складу сплавів їх розділяють на наступні типи: АВ, АВ₂, АВ₅, А₂В.

При заряді та розряді нікель-металогідридного акумулятора відбувається розширення та стиснення на (15÷25)% кристалічної решітки сплавів через абсорбцію та десорбцію водню.

Згідно [6] стандартизований заряд нікель-металогідридного акумулятора проводять при температурі навколишнього середовища (20 ± 5)°С постійним

струмом $0,1Cn$, що вважається класичним методом заряду для даної електрохімічної системи.

Згідно [68] методи заряду НМГ АБ розрізняють за швидкістю:

- крапельна зарядка (trickle charge) - зарядка струмом $0,1Cn$;
- швидка зарядка (quick charge) - струмом порядку $0,3Cn$;
- прискорена зарядка (fast charge) - струмом $(0,5\div 1)Cn$.

Насправді принципових відмінностей між швидкою і прискореною зарядкою немає, вони відрізняються лише кращими методами визначення кінця процесу зарядки. Тому частіше розрізняють тільки два види зарядки: крапельну і швидку.

На відміну від свинцево-кислотних та лужних нікель-залізних АБ повільний заряд (а в даному випадку його називають крапельним) не сприяє довгому ресурсу роботи нікель-металогідрих акумуляторів. При крапельному заряді струм не відключають навіть після досягнення номінального значення ємності. Вважається, що навіть якщо вся енергія при заряді буде перетворюватися в теплоту, то при такому малому струмі акумулятор не зможе істотно нагріватися. Для NiMH акумуляторів невеликої ємності, які погано реагують на перезарядку, струм крапельного заряду рекомендується не більше $0,05Cn$. Для акумуляторів більшої ємності значення струму крапельної зарядки більше. Це означає, що зарядні пристрої, призначені для зарядження акумуляторів великої ємності, будуть непридатними для акумуляторів малої ємності, оскільки можливе сильне розігрівання, що в кінцевому результаті скорочує термін їх служби.

Єдиною перевагою крапельної зарядки є простота реалізації (без контролю кінця зарядки). У той же час виробники нікель-металогідридних акумуляторів не рекомендують користуватися крапельною зарядкою. В останній час деякі виробники акумуляторів спеціально заявляють, що сучасні НМГ АБ акумулятори не деградують під впливом тривалої крапельної зарядки.

Більшість виробників нікель-металогідридних акумуляторів приводять характеристики своїх акумуляторів для випадку швидкого заряду струмом $1Cn$.

Хоча можливо зустріти рекомендації не перевищувати струм понад $0.75C_n$. Ці рекомендації пов'язані з небезпекою відкривання вентиляційних отворів акумулятора (такі клапани є на кожному корпусі акумулятора) при швидкій зарядці в умовах підвищеної температури навколишнього середовища. Зарядний пристрій повинен оцінити умови і прийняти рішення про допустимість швидкого заряду. Вважається, що швидкий заряд можна використовувати тільки в діапазоні температур $(0 \div + 40)^\circ\text{C}$ і при напрузі на акумуляторі $(0,8 \div 1,8)\text{В}$. ККД процесу швидкої зарядки дуже високий (близько 90%), тому акумулятор нагрівається слабо. В кінці заряду при досягненні C_n ККД даного процесу різко падає і практично вся енергія, що надається акумулятору, починає перетворюватися в теплову.

Алгоритм роботи швидкого зарядного пристрою складається з декількох фаз:

1. Визначення наявності акумулятора;
2. Кваліфікація акумулятора (Qualification);
3. Попередня зарядка (Pre-charge);
4. Перехід до швидкої зарядки (Ramp);
5. Швидка зарядка (Fast charge);
6. Дозарядження (Top-of charge);
7. Підтримуюча зарядка (Maintenance charge).

Для виключення перезаряду нікель-металогідридних АБ застосовують ряд методів контролю заряду з відповідними давачами, що встановлюються в батареї або зарядному пристрої:

- метод відключення по абсолютній температурі T_{max} ;
- метод відключення по швидкості зміни температури $\Delta T/\Delta \tau$;
- метод відключення по негативній дельті напруги $-\Delta U$;
- метод відключення по максимальному часу зарядження τ_{max} ;
- метод відключення по максимальному тиску P_{max} ;
- метод відключення по максимальній напрузі U_{max} .

Не дивлячись на переваги та недоліки кожного з методів, доцільне їх поєднання для покращення ефективності швидких зарядних пристроїв даних акумуляторів.

Для нікель-металогідридних акумуляторів не рекомендують проводити заряд при постійній напрузі, оскільки це може призвести до теплового виходу з ладу. Це пов'язано з тим, що в кінці зарядження відбувається підвищення зарядного струму, який пропорційний різниці між напругою електроживлення та напругою акумулятора, а напруга акумулятора в кінці заряду понижується через підвищення температури системи (рис. 1.14). У випадку короткого замикання в одному з акумуляторів батареї відбуватиметься подача підвищеного струму на інші акумулятори.

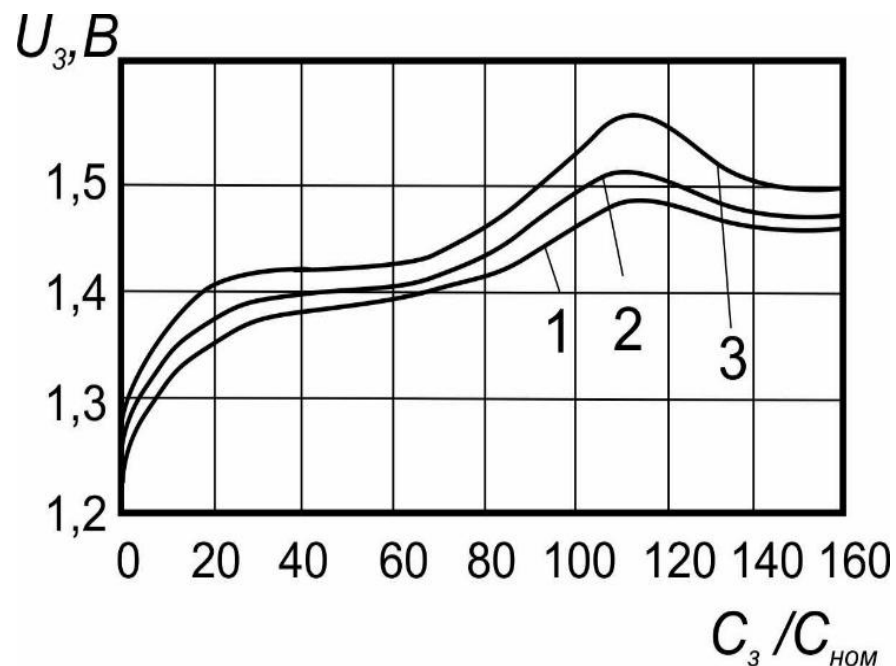


Рис. 1.14. Зарядні характеристики нікель-металогідридного акумулятору при температурі 20°C та різних нормованих струмах заряду:

1 – $0,1C_N$;

2 – $0,5C_N$;

3 – $1C_N$.

Більшість нікель-металогідридних акумуляторів можуть експлуатуватись в буферному режимі при зарядженні нормованим струмом $(0,01 \div 0,03)C_n$ без обмеження часу.

Зарядження даних АБ від вітроелектричних чи фотоелектричних установок потребує додаткових досліджень не тільки через стохастичну особливість роботи даних джерел енергії, але й через фактор інтенсивного розігріву у випадку перезаряду даних АБ високими струмами.

Нікель-металогідридні акумуляторні батареї застосовуються на електротранспорті, однак зарядження акумуляторів розглянутими вище методами базується на використанні стаціонарного джерела живлення. Створення зарядних станцій на основі відновлюваних джерел енергії (вітроелектричних, фотоелектричних чи комплексних) потребує подальших наукових досліджень, зокрема, в питаннях використання даних акумуляторів в буферному режимі на даних зарядних станціях, а також в питаннях ефективних методів зарядження для покращення експлуатаційних показників даних вторинних хімічних джерел живлення електротранспортних засобів різного функціонального призначення [69].

1.3.4. Особливості застосування літій-іонних акумуляторних батарей

Використання літєвих вторинних хімічних джерел струму як тягового джерела живлення електромобілів на сьогоднішній день є найбільш масовим, що пояснюється в першу чергу високими питомими енергетичними характеристиками даних акумуляторних батарей, великим ресурсом роботи та незначним саморозрядом в порівнянні зі свинцево-кислотними, нікель-залізними та нікель-металогідридними АБ. Не дивлячись на те, що первинні літєві елементи були відкриті на початку 70-х років минулого століття, на створення вторинного літєвого хімічного джерела струму пішло біля 20 років. Промислове виробництво літєвих акумуляторів припадає на 1991 рік, коли японська

компанія Sony розпочала їх масове виготовлення [60]. З того часу об'єми виробництва даних акумуляторних батарей тільки зростають, особливо, починаючи з XXI-го століття [70] (рис. 1.15).

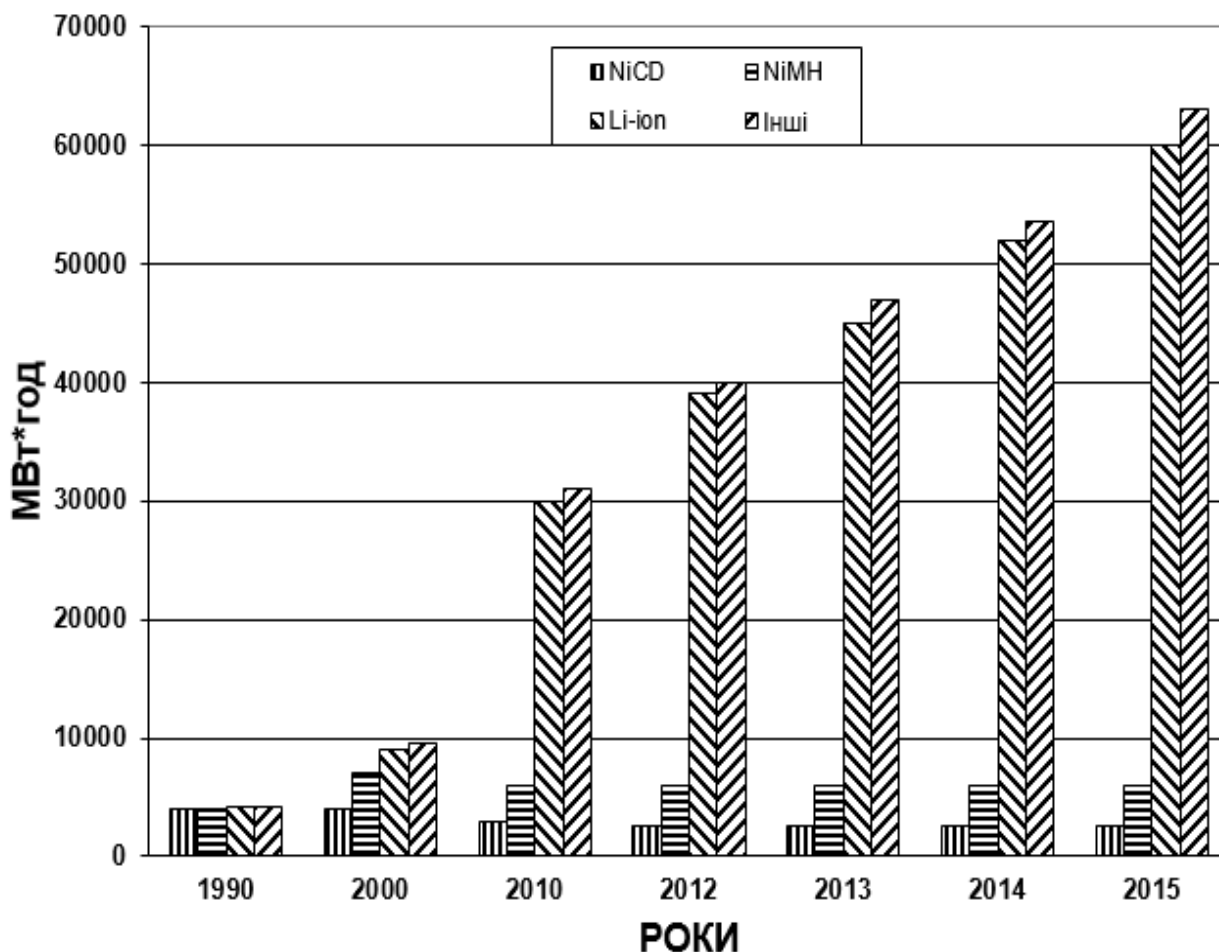


Рис. 1.15. Приріст виробництва акумуляторних батарей різних типів без урахування свинцево-кислотних АБ.

При цьому постійно зростаюча частка виробництва літєвих елементів припадає на потреби електротранспорту (рис. 1.16-1.17). Згідно прогнозних розрахунків до 2025 року відбудеться зростання літєвих АБ на 10% від загально світового виробництва всіх типів АБ.

Особливість роботи літєвого електроду полягає в тому, що в будь-яких електролітах він самочинно покривається пасивною плівкою, яка має провідність твердого електроліту за іонами літію, не перешкоджає анодному розчиненню активного матеріалу та запобігає саморозряду.

На сьогоднішній день прийнято розрізняти три типи літєвих АБ:

- акумулятори з металевим літєвим електродом та рідким електролітом;
- літій-іонні акумулятори;
- літій-полімерні акумулятори.

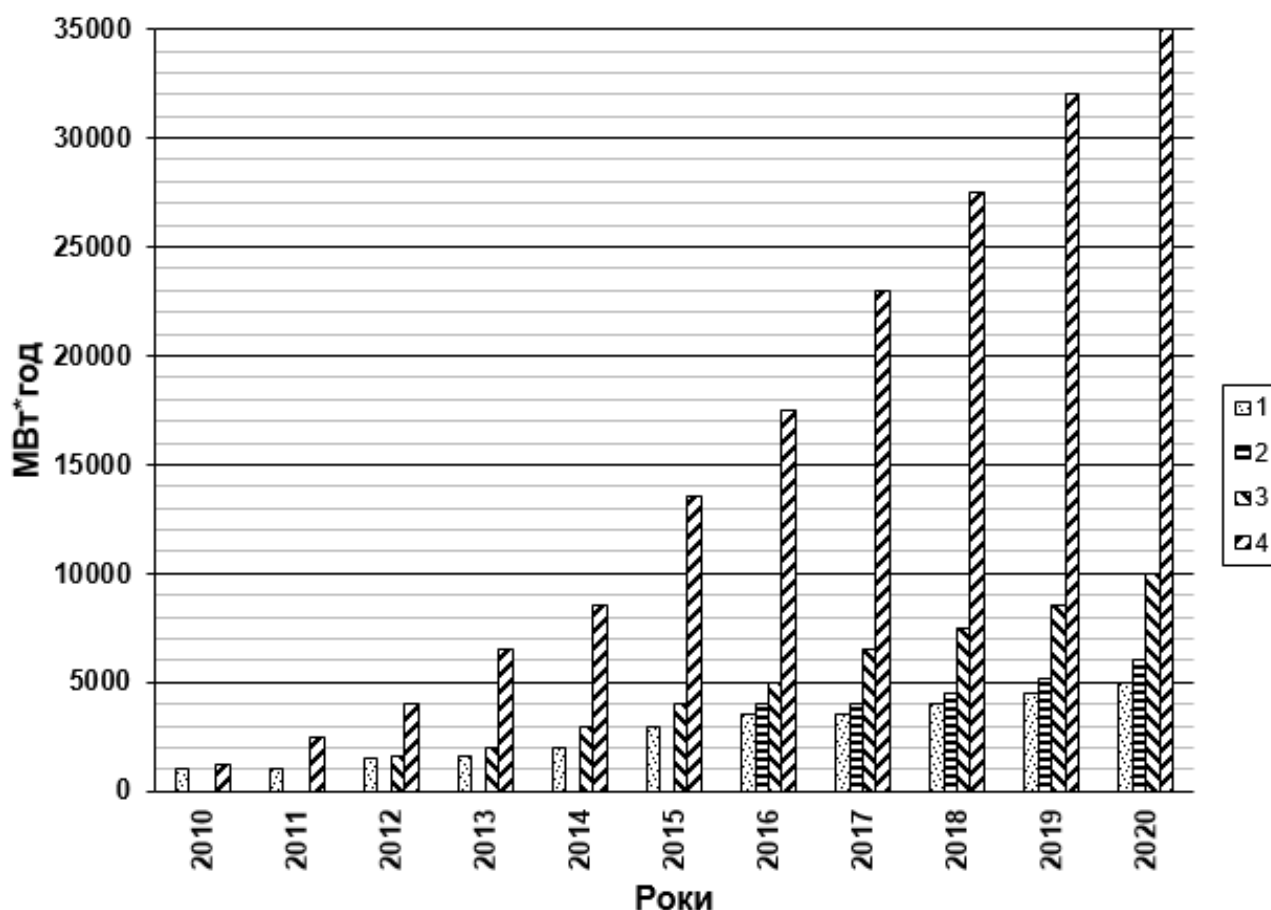


Рис. 1.16. Динаміка зростання та прогноз використання літій-іонних акумуляторних батарей як тягових джерел живлення електротранспорту різних типів:

- 1 – нікель-металогідридні АБ для гібридних транспортних засобів;
- 2 – літій-іонні АБ для гібридних транспортних засобів;
- 3 – літій-іонні АБ для заряджуваних гібридних транспортних засобів;
- 4 – літій-іонні АБ для електромобілів.

У літєвих акумуляторах промислового виробництва аноди виготовляють зі сплавів металів, в яких оборотно відбувається катодне занурення (катодна інтеркаляція) та анодна екстракція (анодна деінтеркаляція) літію.

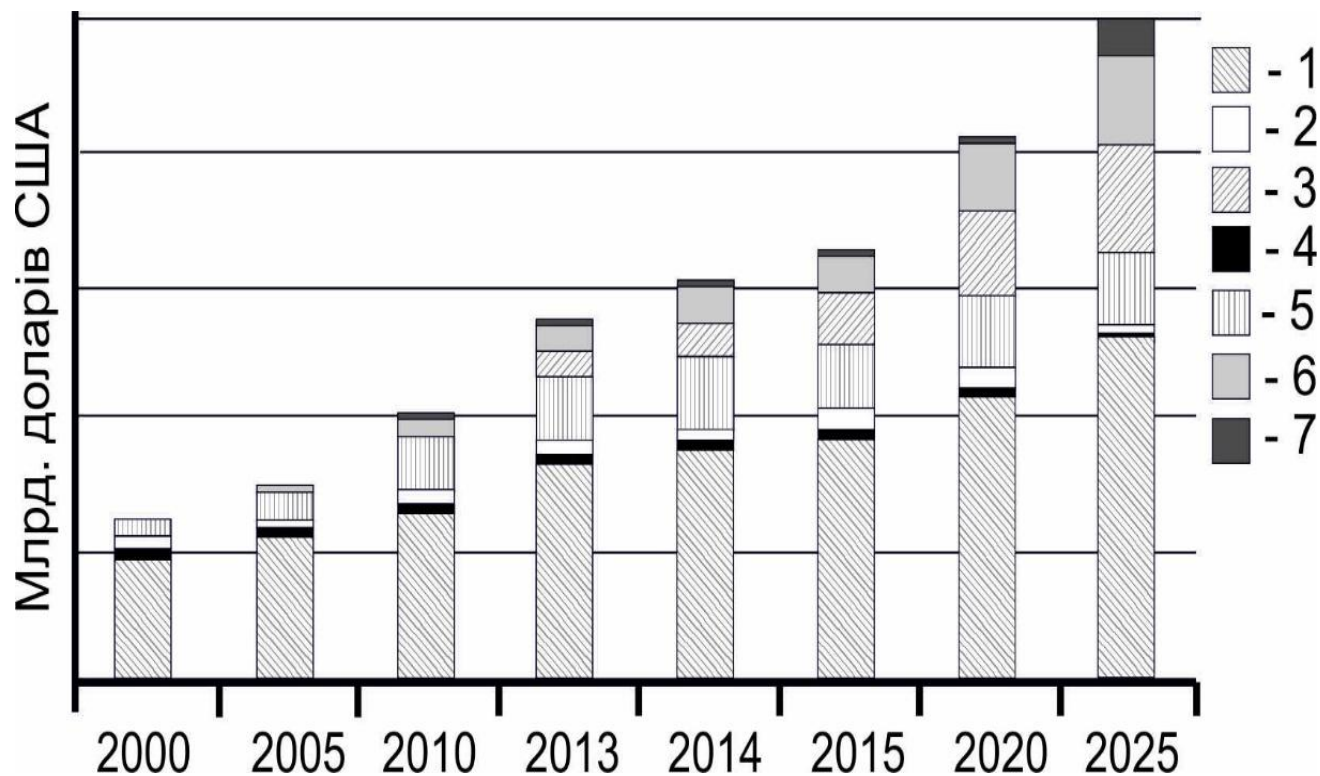
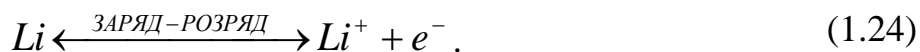


Рис. 1.17. Існуючий приріст (2000-2015 роки) та прогностні показники (2015-2025 роки) збільшення інвестицій у виробництво акумуляторних батарей різних типів:

- 1 – свинцево – кислотні АБ;
- 2 – нікель – метало гідридні АБ;
- 3 – літєві АБ для електромобілів;
- 4 – нікель – кадмієві АБ;
- 5 – літій – іонні АБ для комп’ютерів, комунікацій та споживчої електроніки;
- 6 – літій – іонні АБ для іншого обладнання, крім електротранспорту;
- 7 – інші типи АБ для електротранспорту.

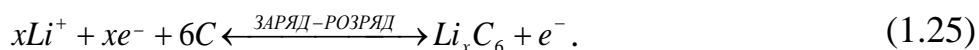
Струмоутворююча електрохімічна реакція на літєвому електроді в акумуляторах з металевим літєвим електродом та рідким електролітом описується наступним рівнянням [56]:



Однією з основних проблем функціонування металевого літєвого електроду є дендритоутворення та інкапсулювання. На даний час проводяться пошукові роботи для вирішення даної проблеми.

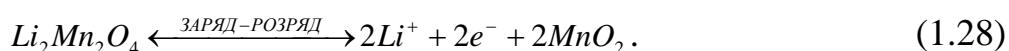
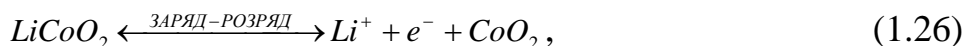
У всіх літій-іонних акумуляторах промислового виробництва аноди виготовляють з вуглецевих матеріалів, в яких оборотно відбувається катодне занурення (катодна інтеркаляція) та анодна екстракція (анодна деінтеркаляція) літію. При цьому застосовують апротонні неводні електроліти.

При використанні графітових структур як основної матриці анодного матеріалу струмоутворююча електрохімічна реакція на літєвому електроді в літій-іонних акумуляторах описується наступним рівнянням:



В результаті пошуку вирішення проблеми негативного електроду літєвого акумулятора запропоновано використання полімерних електролітів, що виключило явище інкапсулювання та знизило, а в деяких електрохімічних літєвих системах взагалі виключило короткі замикання через дендритоутворення. При цьому застосування полімерних електролітів було поширено і на літій-іонні АБ.

Католи літєвих та літій-іонних АБ виготовляють з літєвих оксидів кобальту або нікелю, а також з літій-марганцевих шпінелей. Робота катоду зазвичай зводиться до інтеркаляції та деінтеркаляції літію відповідно під час розряду та заряду даного електроду за наступними рівняннями:



Більшістю виробників літєвих та літій-іонних електрохімічних акумуляторів у відповідності з матеріалами, наведеними в [70], рекомендовано проводити заряд за складним графіком (рис. 1.18), згідно якого спочатку заряджають акумулятор при постійному струмі величиною $(0,2\div 1)C_n$, до досягнення заданого значення напруги (наприклад, для літій-іонних АБ $(4,1\div 4,3)V$), при цьому отримується $(70\div 80)\%$ необхідної ємності. Після цього відбувається переключення на заряд при постійній напрузі, а струм зменшується в залежності від часу заряду.

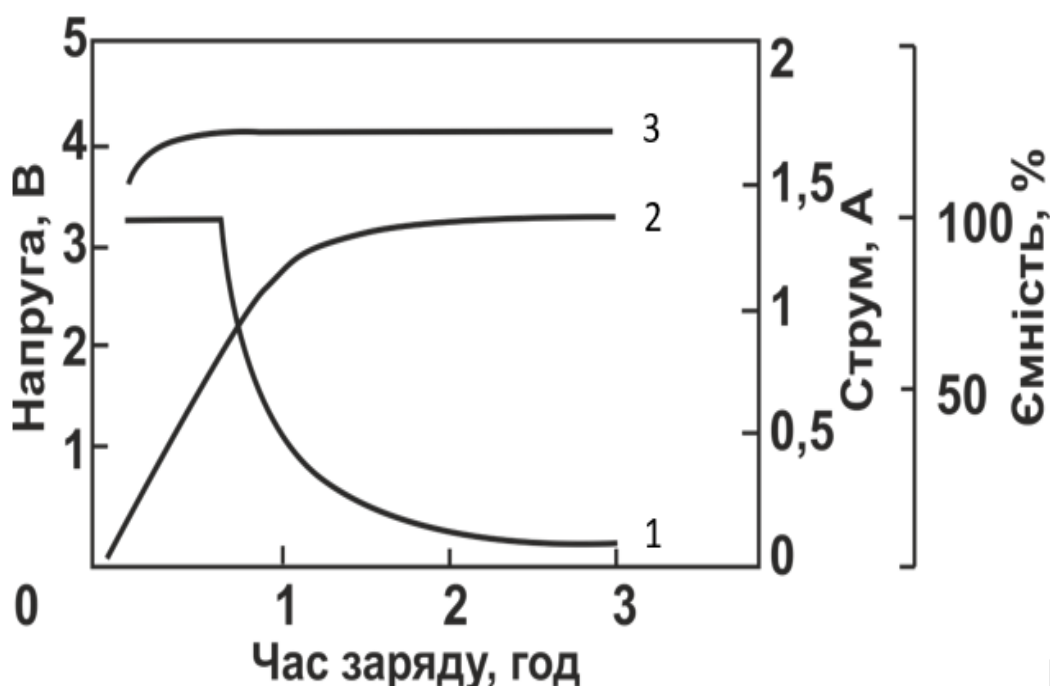


Рис. 1.18. Типовий графік заряду літій-іонного акумулятора нормованим зарядним струмом $1C_n$, при постійній напрузі $4,1V$: 1 – струм, 2 – ємність, 3 – напруга.

Всі літєві та літій-іонні акумулятори споруджуються вбудованою системою електронного захисту від перезаряду, перерозряду, переполюсування, короткого замикання, перегріву та ін. Основні промислові літєві АБ подані в табл. 1.1.

В роботі [72], досліджено швидкий заряд літій-іонного акумулятору заряджуваного гібридного транспортного засобу (PHEV) струмом $3C_n$, в широкому інтервалі температур з метою встановлення можливості експлуатації

таких гібридів в будь-якій кліматичній зоні. Зокрема, зроблено акцент на можливості швидкого заряду при температурі навколишнього середовища $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оскільки при низьких температурах та високих струмах заряду зростає ймовірність дендритоутворення і, як наслідок, короткого замикання акумулятору, запропоновано його поміщати в «батарею для будь-яких кліматичних зон» (АСВ) (рис.1.21).

Таблиця 1.1

Базові технічні характеристики основних типів літєвих АБ, що мають промислове виробництво [71]

| Характеристики | Назва та абревіатура АБ | | | | | |
|--|---|--|--|---|---|---|
| | Літій-кобальтовий акумулятор (Lithium Cobalt Oxide, ЛСО) | Літій-нікель-кобальт-алюмінієвий акумулятор (Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide, ЛНКА) | Літій-нікель-марганцево-кобальтовий акумулятор (Lithium Nickel, Manganese, Cobalt Oxide, ЛНМКО) | Літій-марганцевий акумулятор (Lithium Manganese Spinel, ЛМО) | Літій-залізо-фосфатний акумулятор (Lithium Iron Phosphate, ЛІФП) | Літій-титановий акумулятор (Lithium Titanate, ЛТО) |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Катод | LiCoO_2 | $\text{Li}(\text{Ni}_{0,85}\text{Co}_{0,1}\text{Al}_{0,05})\text{O}_2$ | $\text{Li}(\text{Ni}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33})\text{O}_2$ | LiMn_2O_4 | LiFePO_4 | Графіт |
| Анод | Графіт | Графіт | Графіт | Графіт | Графіт | $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ |
| Напруга одиночного елементу, В: - номінальна; - робочий діапазон. | 3,6 3,0 ÷ 4,2 | 3,6 3,0 ÷ 4,2 | 3,6 ÷ 3,7 3,0 ÷ 4,2 | 3,7 3,0 ÷ 4,2 | 3,2 ÷ 3,3 2,5 ÷ 3,6 | 2,4 1,8 ÷ 2,85 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--|--|--|--|--|---|--|
| Питома енергія при нормованом у струмі розряду | $150 \div 240$ $\frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$ | $200 \div 260$ $\frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$ | $150 \div 240$ $\frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$ | $100 \div 150$ $\frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$ | $90 \div 120$ $\frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$ | $70 \div 80$ $\frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$ |
| Ресурс | $500 \div 1000$ | 500 | $1000 \div 2000$ | $300 \div 700$ | $1000 \div 2000$ | $3000 \div 7000$ |

В даній батареї передбачене додавання на стінки блоку металевої фольги, яка створюватиме нагрів в камері АСВ при активації короткими імпульсами розряду і заряду, що дозволяє заряджати акумулятор до 80% від C_n за 14 хв, на відміну від 160 хв. для звичайного стандартизованого заряду літій-іонного акумулятора. Результати експерименту показали витримку даного заряду на протязі 500 циклів заряд-розряд без порушення структури літійового електроду.

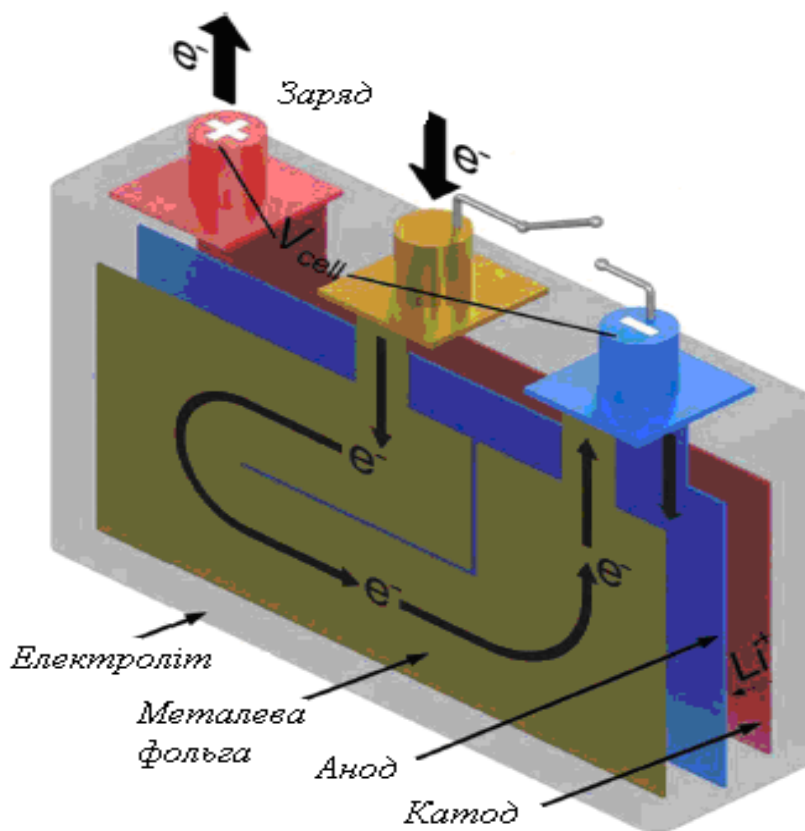


Рис. 1.19. Схематичне відображення «батареї для будь-яких кліматичних зон» (АСВ).

Підвищення нормованого зарядного струму до $(5\div 7)C_n$, при понижених температурах не рекомендується через негативний вплив на структуру аноду, та скорочення ресурсу роботи акумулятора в цілому. Крім того в роботі сказано, що заряд $5C_n$ можливо вести при температурі навколишнього середовища $25\text{ }^\circ\text{C}$, однак ефективність такого заряду та його вплив на ресурс роботи акумулятора не показана (рис. 1.20). Точки на кривих моделювання відповідають 80% заряду від номінальної ємності.

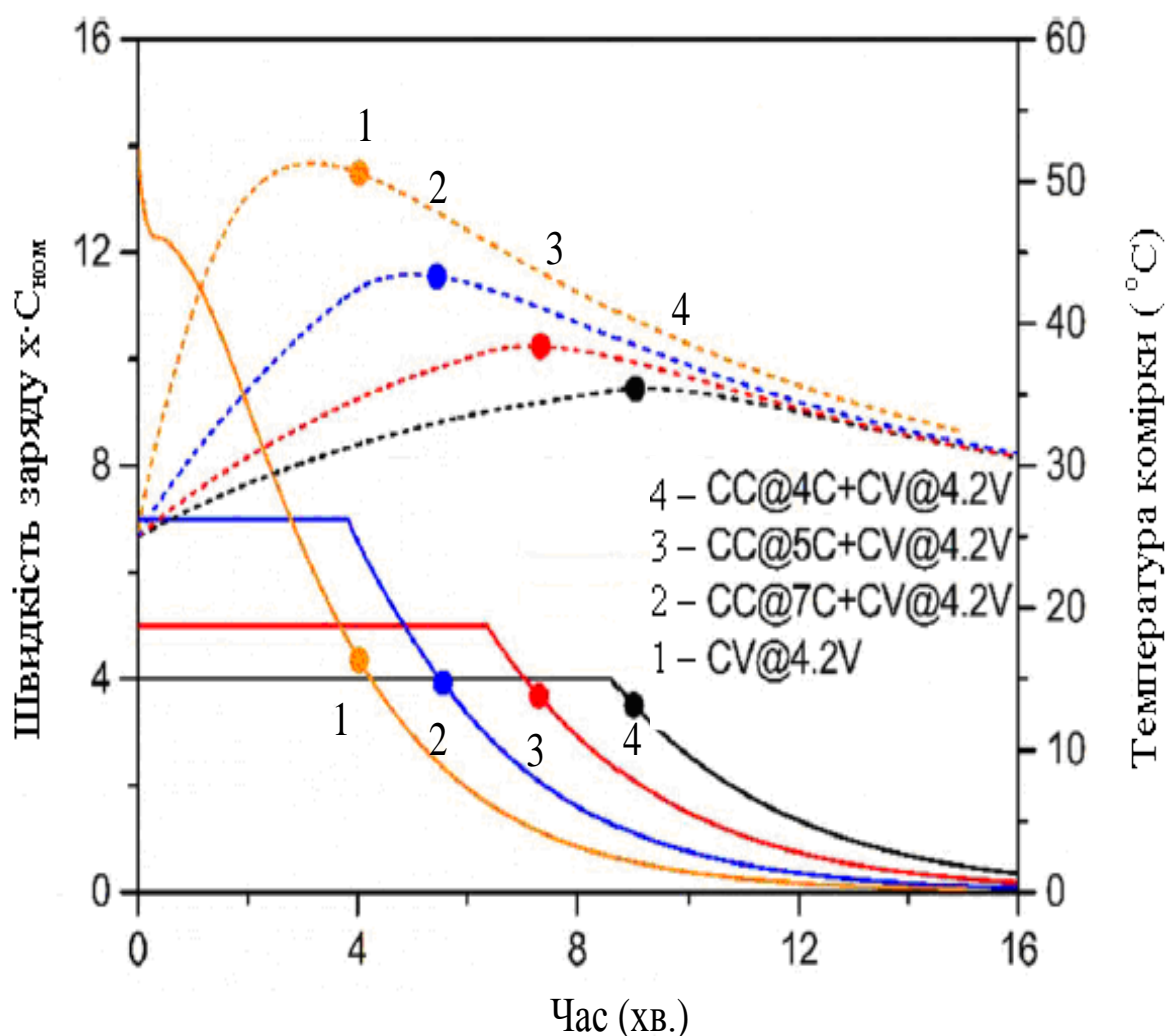


Рис. 1.20. Результати моделювання різних швидкостей зарядження при $25\text{ }^\circ\text{C}$ [31]:

- 1 – заряд при постійній напрузі 4,2В;
- 2 – заряд при постійному струмі $7C_{\text{НОМ}}$ + постійній напрузі 4,2В;
- 3 - заряд при постійному струмі $5C_{\text{НОМ}}$ + постійній напрузі 4,2В;
- 4 - заряд при постійному струмі $4C_{\text{НОМ}}$ + постійній напрузі 4,2В.

Як відомо, вітроелектричні установки мають стохастичний характер виробітку енергії, зважаючи на це в роботі [73] проведено дослідження впливу непостійного та неповного заряду акумуляторних батарей різних типів: свинцево-кислотна АБ (LA), літій-оксидно-кобальтова АБ (LCO), літій-нікель-марганець-кобальтова (композитний катод) АБ (LCO-NMC), літій-залізо-фосфатна АБ (LFP). В результаті дослідження встановлено, що при систематичних недозарядах та тривалому зберіганні в розрядженому стані в зв'язку з стохастичною роботою ВЕУ, мінімальне зменшення показників номінальної ємності при більше 1000 циклів заряду-розряду продемонструвала літій-залізо-фосфатна АБ, в результаті чого зроблено висновок про рекомендацію до застосування даної електрохімічної АБ як джерела живлення для портативних систем (в тому числі і електротранспорту) за умови, що їх заряд будуть проводити від вітроелектричних та фотоелектричних установок. До недоліків даної роботи слід віднести те, що в роботі досліджувався тільки класичний заряд АБ, в той час, як для електротранспорту актуальним стоїть питання швидкого заряду тягових джерел живлення.

Отримані результати матимуть більшу користь для автономних зарядних станцій на основі ВДЕ за умови їх поширення на літій-залізо-фосфатні АБ, при використанні останніх як буферного джерела зберігання енергії автономної зарядної станції.

Практика використання літєвих АБ на електротранспорті різного призначення демонструє постійні темпи зростання, що в свою чергу вимагає розвиток інфраструктури зарядних станцій, в тому числі і автономних на основі ВДЕ, які дозволятимуть реалізовувати як класичний заряд (за умови відсутності часових обмежень), так і швидкий заряд (обмежена тривалість зупинки на заряд тягових АБ електромобіля). Вирішення питання ефективних автономних зарядних станцій електромобілів на основі ВДЕ можлива за умови врахування при їх побудові факторів випадкового характеру виробітку енергії, необхідності та масштабів буферного резервування енергії, оптимізації підбору генеруючого обладнання з урахуванням фактору місцевості та особливості

кліматометеорологічних умов та ін. Комплексний підхід до побудови екологічно чистих заправних станцій дозволить збільшити частку ВДЕ у виробництві енергії локалізуючи вплив на роботу централізованих енергосистем.

1.4. Особливості застосування суперконденсаторів

В останні роки все більш широко почали застосовуватись суперконденсатори (СК). Вони мають ряд характеристик, які з успіхом дозволяють їх використовувати:

- в приладобудуванні, як резервне джерело живлення для комп'ютерів, таймерів, автономної електронної апаратури, разом з сонячними батареями, персональних приладів медичного контролю, калькуляторів та інших портативних електронних приладів;

- в автомобілебудуванні, шляхом створення акумуляторно-конденсаторних та конденсаторних систем для запуску двигунів внутрішнього згорання, систем охоронної сигналізації та аудіосистем для автомобілів;

- в машинобудуванні та електротехніці, шляхом створення систем для запуску і зупинки електродвигунів постійного струму;

- в енергетиці, шляхом створення систем накопичення та рекуперації енергії для вітрових та сонячних енергоустановок, а також в джерелах безперебійного електроживлення.

Основною причиною високої вартості СК є малосерійність їх виробництва. Тому, розширення областей використання СК сприятиме розвитку їх виробництва за рахунок збільшення попиту та зменшення вартості одиничного виробу.

Одним з таких варіантів розширення використання СК є розроблення комбінованих систем електроживлення електромобілів або інших активно-індуктивних навантажень.

Враховуючи той факт, що тягові АБ електромобілів працюють не тільки на забезпечення енергією активного навантаження, а і активно-індуктивного

(двигуни постійного та змінного струму), що супроводжуються важкими пусковими режимами, велика їх кількість може негативно впливати на роботу тих електрохімічних АБ, які при високих розрядних струмах віддаватимуть значно меншу ємність, ніж C_n .

При цьому організація електроживлення даного навантаження від АБ може бути виконана окремим напівпровідниковим перетворювачем для кожного електродвигуна, що дозволить проводити плавний пуск і значно зменшити пускові струми до $2I_H$. Однак, така структура, з одного боку, при цілому ряді переваг (регульований електропривод) має відносно високу вартість і з цієї причини не завжди може бути використана.

В цей же час двигуни постійного струму (ДПС) дозволяють безпосереднє під'єднання до АБ і здійснення регулювання швидкості за допомогою відносно недорогих напівпровідникових регуляторів. Однак, в цьому випадку при прямому пуску ДПС якірний струм, що буде споживатись від АБ, досягне значної величини (від 10 до 20 I_H).

Таким чином, характер функціонування перерахованих вище навантажень, негативно вплине на номінальну ємність АБ та інших характеристик джерела живлення.

При високих значеннях пускових струмів в момент під'єднання зовнішнього навантаження, наприклад, АД і ДПС, відбувається провал напруги на АБ із подальшим виходом її на стаціонарне значення (рис. 1.21). Значна кількість таких провалів призводить до зниження ємності АБ [74].

Вирішення задачі зняття пускових навантажень з АБ в електромобілях можливе при використанні в буферному режимі суперконденсаторів. Суперконденсатори (іоністори, СК) – це конденсатори з великою електричною ємністю, що накопичують енергію в подвійному електричному шарі на поверхні високопористої структури. До переваг СК слід віднести високу ємність (до 3200 Φ), велику потужність (до 6500 $Вт/кг$), низькі струми втрат, велику кількість циклів заряду-розряду ($1 \cdot 10^6$), широкий робочий діапазон температур (від -40 $^{\circ}C$ до $+75$ $^{\circ}C$), малий внутрішній опір (до 1 $мОм$), швидкодію (досягнення

максимальної потужності складає $(10\div 30)$ мкс), високу питому енергію (в кращих зразках до $(6\div 10)$ Вт·год/кг, тоді як найкращі зразки звичайних конденсаторів мають на порядок нижчі показники, до $0,4$ Вт·год/кг). Поряд з цим існує ряд недоліків, які обмежують широкомасштабне використання даних пристроїв. Зокрема, висока вартість (до $\$0,3$ США за 1 Вт·год) накопиченої енергії, що пов'язано із малосерійним виробництвом, низькою напругою одиничного елемента в межах $(3\div 6)$ В [75-76].

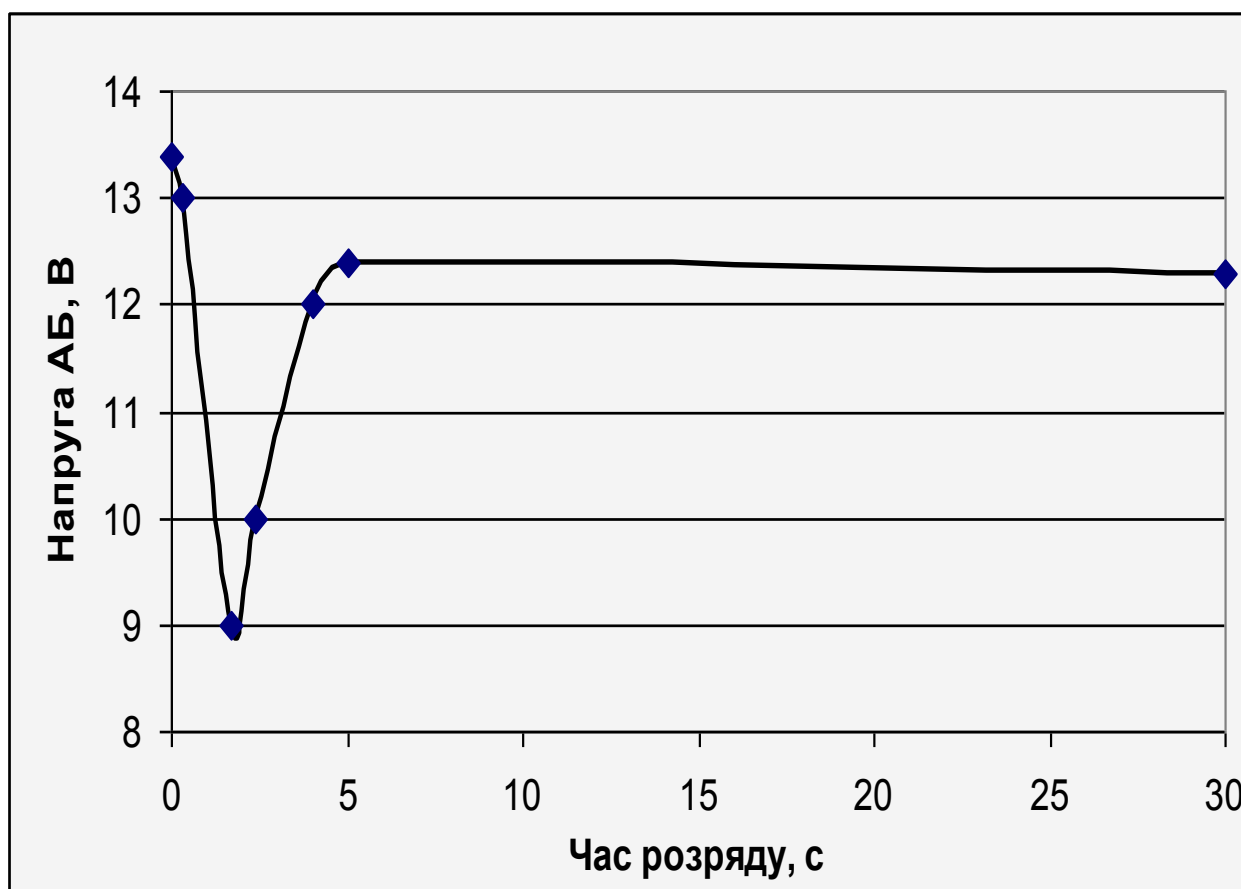


Рис. 1.21. Розрядна характеристика АБ в період приєднання активно-індуктивного навантаження.

Враховуючи властивість швидкодії СК з нарощення високої потужності, в початковий період пуску двигунів вони прийматимуть на себе пікове навантаження з подальшим перемиканням на АБ, в результаті чого виключатиметься можливість провалу напруги на останніх.

Прикладом використання суперконденсорів для електротранспорту є спільний китайсько-американський 41-місний електробус Ultracap Bus, що розвиває швидкість 48 км/год. та має запас ходу 8 км. Такі параметри значно менші, ніж в електротранспорту на АБ, однак поєднання позитивних параметрів суперконденсаторів з параметрами АБ може дозволити створити якісне комплексне тягове джерело живлення електромобіля з покращеними експлуатаційними параметрами.

Так, зокрема в роботі [77], показано, що застосування суперконденсатору згладжує струм акумуляторної батареї АКБ в системі тягового електроприводу, що збільшує час міжзарядного пробігу. Встановлено, що якщо енергоємність суперконденсатору менша (15÷25)% по відношенню до АБ, практично неможливо реалізувати переваги їх сумісного використання. При збільшенні відносної енергії, накопиченої в суперконденсаторі до енергії АБ від 10% до 24%, відносний час пробігу зростає від 10% до 20%.

До недоліків даної роботи слід віднести відсутність даних із впливу швидкого режиму заряду (що актуально для електромобіля) на роботу такого комплексного тягового джерела живлення. Крім того, відсутні дані з оцінки енергетичних втрат в гібридному блоці «суперконденсатор-акумуляторна батарея». Не відомо, як буде себе поводити таке джерело живлення електромобіля при його зарядженні від вітроелектричних, фотоелектричних чи комплексних зарядних станцій на основі ВДЕ.

В роботі [78] проаналізовано різні аспекти використання суперконденсаторів в електромобілях та інших транспортних засобах з автономними джерелами живлення. В результаті проведеного аналізу автори дійшли висновків, що заміна акумуляторних батарей на суперконденсатори проблематична через низький рівень питомої енергії СК. Так, наприклад, для електромобіля середньої вантажопідйомності (1,5 ÷ 2) т витрати енергії складають не менше 1 кВт· год/км. В цьому випадку при установці на борту СК енергоємністю 10 кВт· год електромобіль проїде 10 км, при швидкості 40 км/год, час руху становитиме 15 хвилин, а маса СК - 2 тони (при питомій

енергії 5 Вт· год/кг). На відновлення енергії СК потрібно теж 15 хвилин. Природно, що такий режим експлуатації електромобіля можливий тільки на обмеженій території.

Доцільність спільного функціонування СК і АБ вимагає ретельного пророблення питань (в кожному конкретному випадку), які недостатньо досліджені і висвітлені: визначення необхідної ємності СК, рівня номінальної напруги АБ, діапазону зміни напруги СК, організації режимів розряду і заряду СК на борту електромобіля, вибору частотного діапазону роботи силового обладнання та застосування довиконавчих LC фільтрів, оцінки маси і габаритів СК і т.д. Відзначено також, що застосування СК в комбінованій системі живлення електромобіля призводить до ускладнення структурної схеми електрообладнання, збільшення напівпровідникових і електромагнітних компонентів і підвищення вартості всієї системи.

Підсумовуючи, слід зауважити, що повна заміна тягових акумуляторних батарей електромобілів на блоки живлення на основі суперконденсаторів можлива лише для обмеженої кількості електротранспортних засобів, з коротким міжзарядним пробігом та можливістю постійного підзаряду від центральної електромережі. У випадку тривалих пробігів можливі варіанти застосування змішаних тягових блоків електроживлення електромобілів «акумуляторна батарея-суперконденсатор», однак даний варіант вимагає вирішення ряду проблемних питань, в тому числі і швидкого заряду від автономних зарядних станцій на основі відновлюваних джерел енергії з урахуванням особливості роботи генеруючого обладнання даного типу.

1.5. Вимоги до реалізації процесу заряду тягових акумуляторних батарей різних електротранспортних засобів

Згідно міжнародного стандарту [77], виділяють 4 основні методи зарядження акумуляторних батарей електромобілів:

1. Метод 1- повільного зі сталими значеннями струму зарядження (АС)-

передбачає пряме підключення електромобіля до мережі змінного струму (1-фаза або 3-фази), при максимальному струмі до 16 А на одну фазу (від 3,7кВт до 11кВт відповідно). Даний метод зобов'язує застосування заземлення для електромобіля під час його зарядження. Підключення електромобіля до мережі змінного струму здійснюється з використанням стандартних силових кабелів. Не вимагається спеціальних вилок-конекторів для підключення.

2. Метод 2- повільного зі сталими значеннями струму зарядження (АС)- передбачає пряме підключення електромобіля до мережі змінного струму (1-фаза або 3-фази), при максимальному струмі до 32 А на одну фазу (від 7,4кВт до 22,2кВт відповідно). Даний метод зобов'язує застосування заземлення для електромобіля під час його зарядження та автоматичний вимикач захисту. Підключення електромобіля до мережі змінного струму здійснюється з використанням спеціального кабелю з проміжним електронним пристроєм з функцією управління пілот-сигналу і захисту. Не вимагається спеціальних вилок-конекторів для підключення.

3. Метод 3 - повільного зі сталими значеннями струму зарядження (АС) та напівшвидкого заряду - передбачає підключення електромобіля до мережі змінного струму (1-фаза або 3-фази), при максимальному струмі до 32 А на одну фазу (від 7,4кВт до 22,2кВт відповідно). Даний метод зобов'язує застосування заземлення та систему контролю і управління зарядом. Вимагає застосовувати спеціальні вилки-конектори.

4. Метод 4 дозволяє реалізовувати швидкий заряд електромобілю і передбачає підключення з фіксованим захистом. Заряд може проводитись максимальним струмом до 400А при напрузі до 600В. Вимагає застосовувати спеціальні вилки-конектори, а підключення до мережі здійснюється через зовнішні зарядні пристрої.

Для зарядження акумуляторних батарей електромобілів на сьогоднішній день стандартизовано ряд вилок-конекторів, які дозволяють реалізовувати всі відмічені вище методи зарядження:

1) CHAdeMO (розроблено в Японії) – назва швидкого способу зарядження акумуляторної батареї електричних транспортних засобів потужністю до 330 кВт при постійному струмі до 550 А, а напруга 600 В (третій максимально можливий рівень) або згідно протоколу CHAdeMO до максимальної потужності 62,5 кВт при постійному струмі до 125 А, а напруга 500 В через спеціальний електричний роз'єм [78]. Запропонований як глобальний галузевий стандарт і включений в ІЕС 62196 – тип 4, як конкуруючий стандарт. Зарядна система CHAdeMO має підтримку з боку більшості виробників електромобілів. Ряд автовиробників підтримують CHAdeMO, зокрема: Toyota, Mitsubishi, Subaru, Nissan та ін.

2) Combined Charging Standard, CCS – Співтовариство автотранспортних інженерів (Society of Automotive Engineers, SAE) розробило власний стандарт швидкого зарядження акумуляторних батарей електротранспортних засобів, який називається «комбінована зарядна система» (Combined Charging Standard, CCS). Комбінована система зарядки є швидкий спосіб зарядки акумуляторних батарей електричних транспортних засобів, високої напруги та струму через спеціальний електричний роз'єм, стандартизований в SAE J1772 тип 1 або роз'єм типу 2 в ІЕС 62196. Дана вилка підходить для будь-яких методів заряду акумуляторів. Оскільки вилка поєднує в собі роз'єм змінного струму та постійного струму, в результаті чого вилка також називається як комбінований розгалужувач (скорочено Combo2). Ряд автовиробників підтримують CCS, зокрема: Volkswagen, BMW, Hyundai, General Motors, Daimler, Ford та ін.

3) The EV Plug Alliance був створений 2010 року компаніями з Франції (Schneider Electric, Legrand) та Італії (SCAME). Дозволяє проводити комбінований заряд електричних транспортних засобів.

1.6. Існуючий досвід впровадження зарядних станцій

електромобілів на основі відновлюваних джерел енергії

Перша зарядна станція електромобілів на основі ВДЕ (південний схід США, штат Теннессі) [79] була встановлена на критій автостоянці з

інтегрованими в дах фотоелектричними батареями встановленою потужністю 20 кВт (рис.1.22). Дана зарядна станція дозволяє проводити заряд як гібридних, так і повністю електричних транспортних засобів класичним методом зарядження.



Рис. 1.22. Стоянка з фотоелектричною зарядною станцією в штаті Теннессі.

Ще одним прикладом фотоелектричної зарядної станцій на 50 кВт (рис.1.23) для електротранспорту є проект, реалізований в 2011 році в США (штат Айова), що дозволяє заряджати транспортні засоби різних брендів, зокрема EXV-2, GEM, Chevy Volt та Toyota Prius [80].



Рис. 1.23. Стоянка з фотоелектричною зарядною станцією біля University Services Building (США).

Компанія Envision solar [81] випускає та реалізує зарядні станції на основі фотоелектричних батарей потужністю 3,4 кВт та 4,1 кВт (рис. 1.24). В складі зарядних станцій використовують буферний акумулятор, що дозволяє реалізовувати заряд електромобіля не лише в світлі пору доби, але й вночі або у випадку відключення електроживлення в централізованій електромережі. Недоліком таких станцій є відсутність швидкого заряду електромобілів, що пояснюється невеликою потужністю даних зарядних станцій.



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.24. Приклади зарядних станцій електротранспорту від фотоелектричних батарей компанії Envision solar: а – потужністю 3,4 кВт, б – 4,1 кВт, в – цифрова зарядна станція, г – мобільна зарядна станція.

Компанія Innoventum (Швеція) в 2014 році на виставці Business of Design Week в Гонконзі (Китай) представила власну розробку Giraffe 2.0 (рис.1.25), яка представляє собою комплексну фото-вітроелектричну зарядну станцію електромобілів [82]. Для опори вітроустановки висотою 12 м використані матеріали з дерева, а фотоелектрична система, що складається з 24 фотопанелей, виконана у формі навісу для зарядки двох електромобілів. Згідно даних заявника, дана система дозволяє виробляти від 10000 кВт· год до 20000кВт· год електроенергії на рік в залежності від швидкості вітру та рівня сонячної радіації. Спеціальне позиціонування фотоелектричних панелей дає стабільне виробництво енергії на чотири години довше в порівнянні з класичним монтажем фотостанцій.



Рис. 1.25. Приклад комплексної зарядної станції електротранспорту Giraffe 2.0 на основі фотобатарей та вітроелектричних установок компанії Innoventum (Швеція).

На рис. 1.26 показано виробіток електричної енергії вітро- (крива 1) та фотоелектричною (крива 2) установками. Враховуючи той факт, що вітроелектроустановка дає більший виробіток електричної в період осінь-зима-весна, а фотоелектрична установка в період весна-літо-осінь, приведена результуюча крива (крива 3), яка показує, що комплексне використання ВЕУ та

ФЕБ дозволяє значно вирівняти графік виробку, що підвищує показник гарантованого енергозабезпечення. Зокрема, при середньорічній швидкості вітру 6 м/с та приходу сонячної енергії біля 1000 кВт·год на 1 м² площі поверхні виробіток системи становить 13850 кВт·год електроенергії, за умови вартості системи 55 тис. €.

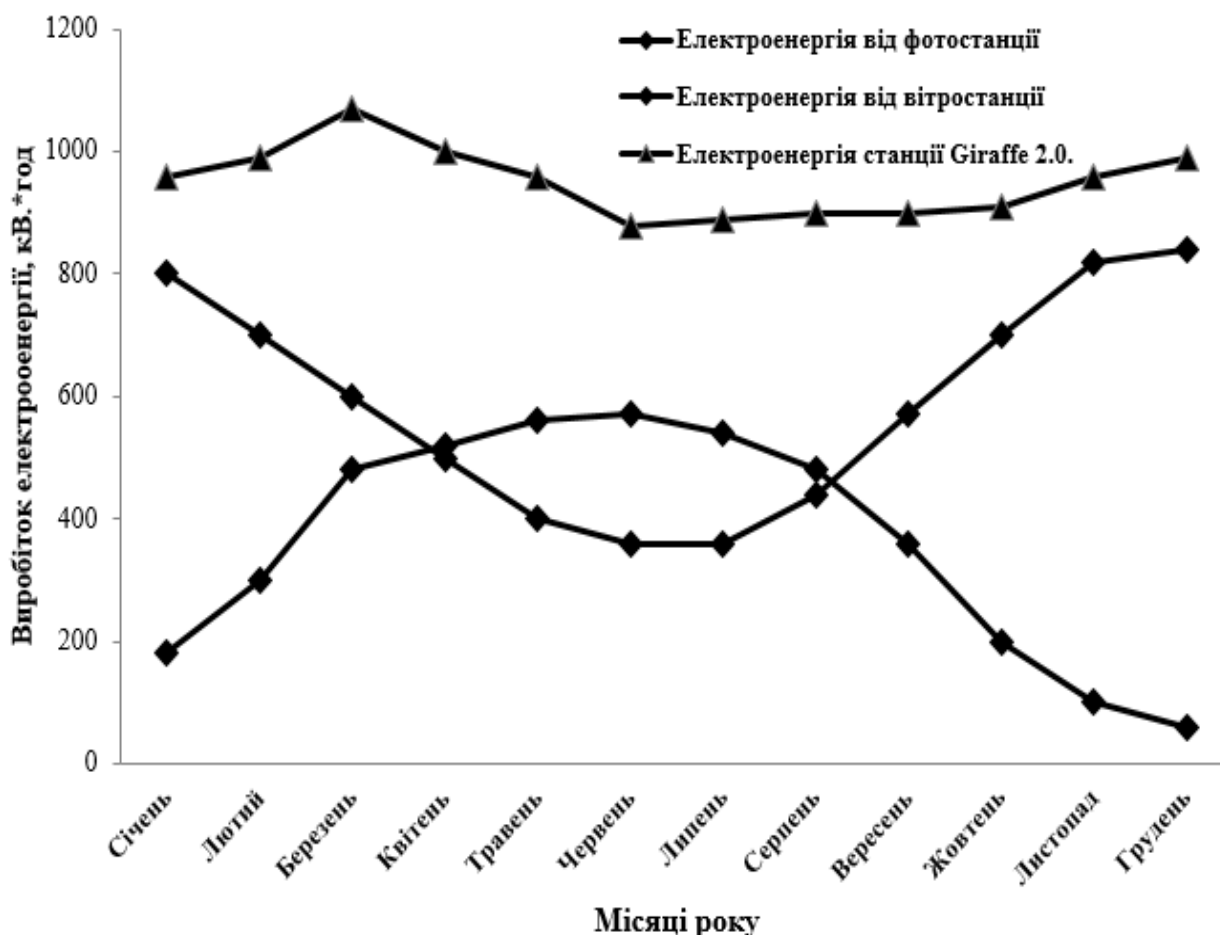





Рис. 1.26. Виробіток електричної енергії комплексною зарядною станцією Giraffe 2.0:

- 1 –  Електроенергія від ФЕС;
- 2 –  Електроенергія від ВЕС;
- 3 –  Електроенергія станції Giraffe 2.0.

Компанія XsunX (Commercial & Residential Solar Solutions, США) [83], зважаючи на зростаючий попит на електромобілі в США, вийшла на ринок з

пропозицією зарядних станцій на базі фотоелектричних систем, виконаних у вигляді навісів, або дахових козирків (CEO of XsunX), що дозволяють заряджати електромобілі від енергії Сонця (рис.1.27). Згідно даних виробника, дана система дозволяє забезпечувати до 100% потреби в електричній енергії для зарядження електромобіля.



Рис. 1.27. Зарядна фотоелектрична станція електротранспорту CEO компанії XsunX (США).

Компанія Tesla (США) робить акцент на поєднання сонячної енергетики та електротранспорту, підтвердженням чого є об'єднання Tesla Motors з енергетичною компанією Solar Sity [84]. В результаті аналізу ринку Tesla пропонує нову розробку – фотоелектричну зарядну станцію для автомобілів власного модельного ряду (рис.1.28) з метою відмови від централізованої електричної мережі, оскільки з 2017 року, централізовані зарядні станції стали платними, Ілон Маск хоче зберегти безкоштовний проїзд через 48 штатів США безкоштовним за рахунок енергії Сонця та фотоелектричних батарей.



Рис. 1.28. Зарядна фотоелектрична станція електротранспорту Tesla (США).

Аналіз ринку станцій швидкого заряду CHAdeMO від центральної електромережі показує динаміку швидкого зростання, що відповідає попиту на електромобілі (рис. 1.29) [85]. Згідно приведених даних на середину 2016 року кількість станцій швидкого заряду склала більше 12 тис. одиниць по всьому світі, з яких 4 встановлено в м. Київ.

Збільшення кількості зарядних станцій між містами потребує підведення електричної енергії великої потужності. Зокрема, Tesla встановлює свої зарядні станції швидкого заряду через кожні 80 км, що вимагає підведення до кожної станції відповідного електричного кабелю. В такому разі заряд від відновлюваних джерел енергії є більш доцільний.

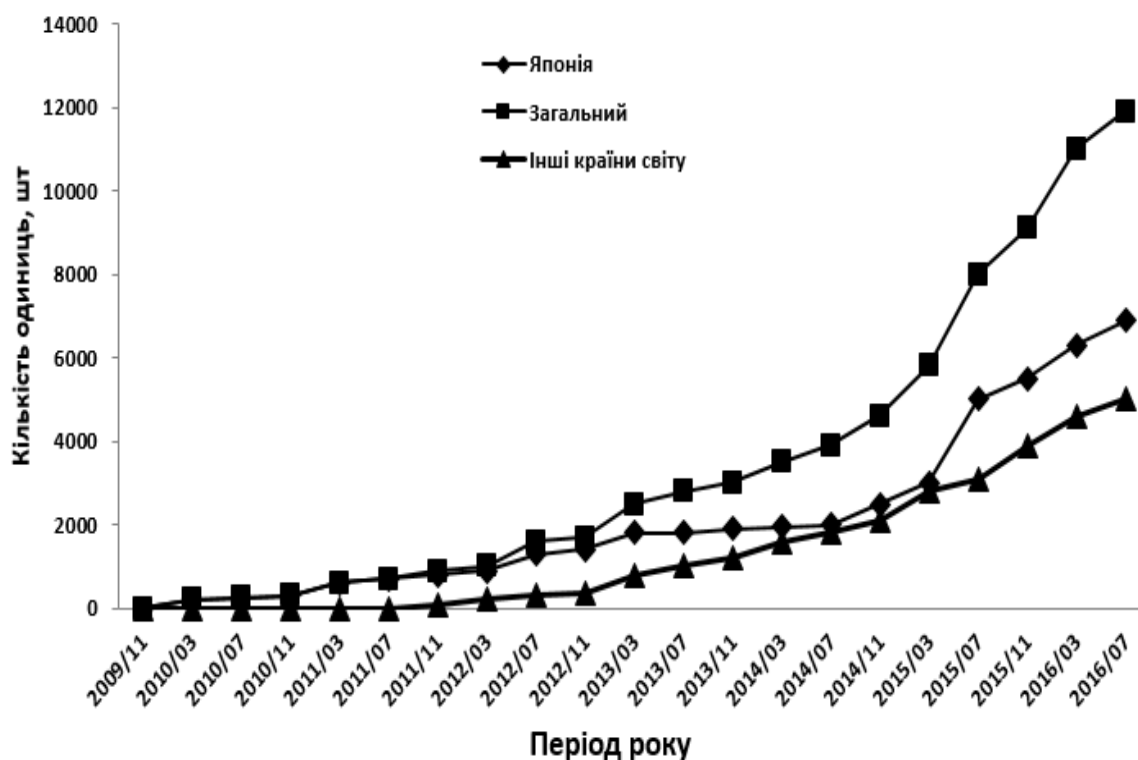


Рис. 1.29. Графіки зростання кількості станцій прискореного заряду електромобілів від централізованої електромережі.

Постійний приріст об'єктів відновлюваної енергетики з однієї сторони та стрімкий розвиток ринку електромобілів і відповідно зарядних станцій електромобілів від центральної електромережі з іншої сторони з врахуванням позитивного світового досвіду впровадження станцій класичного заряду на основі ВДЕ визначає необхідність розвитку інфраструктури зарядних станцій, які зможуть заряджати акумуляторні батареї від установок на основі відновлюваних джерел енергії як класичними, так і новими методами «швидкого» заряду [59].

1.7. Аналіз можливостей використання водню як акумулятора та енергоносія отриманого за рахунок відновлюваних джерел енергії для заправки електромобілів на паливних елементах

Одним з напрямків розширення використання ВДЕ без впливу на роботу централізованих енергосистеми є перетворення отриманої чистої електроенергії

в енергію універсального енергоносія, яким може бути водень (H_2). Водень, як енергоносіє, може використовуватись в багатьох сферах людської життєдіяльності, зокрема в хімічній, металургійній, медичній, та транспортній сферах.

З енергетичної точки зору водень - єдина альтернатива нафті і природному газу [38]. Це пояснюється такими факторами:

- запаси водню в вигляді води на нашій планеті практично невичерпні;
- водень має високу теплоту згорання, в кілька разів вищу, ніж у природних газів;
- водень, як паливо, може бути використаний для одержання теплової і електричної енергії, а також в будь-якому типі двигунів;
- водень - екологічно чисте паливо, основним продуктом його згорання є водяна пара, яка зволожує атмосферу.

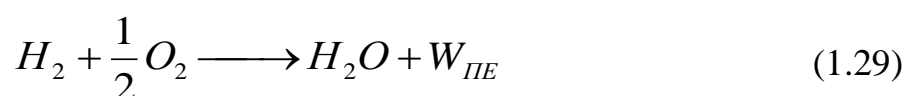
Все ширше розглядається можливість використання водню як енергоносія майбутнього для вирішення важливих енергетичних і екологічних проблем і зменшення ризику, пов'язаного із збагаченням атмосфери CO_2 . Методи одержання, зберігання, транспортування, розподілу та використання водню достатньо широко вивчені і використовуються в промисловості, основною задачею в даний час є підвищення їх економічності, тобто зниження вартості при використанні різних видів водневих систем в промисловому масштабі.

Сучасні дослідження показують [38], що водень може покрити до 85% всіх енергетичних потреб в секторі індустрії і 92% потреб побутового сектору і сектору індивідуальних споживачів. Він може замінити природний газ для побутових потреб, бензин - в двигунах внутрішнього згорання, спеціальні види пального - в ракетній техніці, ацетилен - в процесах зварювання металів, кокс - в металургійних процесах, метан - в паливних елементах. В даний час за кордоном створено ряд повномасштабних демонстраційних і дослідно-промислових установок, що діють на основі нових технологій отримання водню, його очистки, акумулювання, транспортування і використання в окремих галузях: енергетиці, металургії, нафтопереробці, хімічній промисловості, автотранспорті та інших.

З точки зору збільшення використання ВДЕ для зарядження електромобілів актуальними є технології електролізного виробництва водню та його використання паливними елементами, які встановлюються на електромобілях (FCEVs) для живлення електродвигунів. На відміну від звичайних електромобілів (BEV), в яких електроживлення забезпечується електрохімічними акумуляторними батареями, електромобілі на паливних елементах (Fuel Cells) використовують водень та повітряний кисень для реалізації електрохімічного процесу «холодного горіння водню», в результаті чого утворюється електричний струм для живлення електродвигунів. При цьому роботи з розширення використання паливних елементів фокусуються на широкий спектр транспортних засобів, тобто на легкові електромобілі, електробуси, далекобійні електротягачі, електропоїзди, електрокатери та навіть підводні електросубмарини [86].

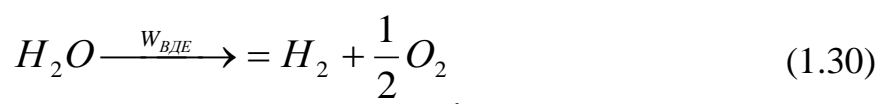
Заправні станції електромобілів на паливних елементах за принципом побудови та реалізації процесів дозаправки аналогічні звичайним заправним станціям транспортних засобів на викопних невідновлюваних видах палива. В цьому є певні переваги заправних станцій електромобілів на паливних елементах (FCEVs) над заправними станціями електромобілів з акумуляторними батареями (BEV). Зокрема, тривалість повної заправки FCEVs складає до 10 хвилин (в залежності від об'єму баку на транспортному засобі), в той час, як EV навіть при застосуванні технології Super Charge дозволяє реалізовувати неповний заряд до 80% від номінальної ємності за період до 30 хв.

В паливних елементах в результаті перетворення водню в електричну енергію побічними продуктами процесу є утворення води та теплової енергії, тобто електромобілі на паливних елементах (FCEVs) не створюють забруднення навколишнього середовища вихлопними газами:



де: W_{PE} – електроенергія, яку виробляють паливні елементи при взаємодії водню з повітряним киснем, кВт·год.

Виробництво водню можливе багатьма промисловими методами. З точки зору перетворення та використання енергії відновлюваних джерел енергії, перспективною є технологія електролізу води з використання електроенергії виробленої установками на основі ВДЕ: Процес виробництва водню електролізом води відрізняється від інших методів одностадійністю і відносно простим апаратурним та технологічним оформленням. Крім того, основною сировиною в даному випадку є вода - найбільш доступне і практично невичерпне джерело. Процес електрохімічного розкладу води з використанням лужного розчину описується представленим нижче рівнянням.



де $W_{ВДЕ}$ – електроенергія, яка виробляється установками на основі відновлюваних джерел енергії, кВт·год.

З однієї сторони, реалізація таких систем виробництва водню не вимагає погодження роботи з централізованими електроенергосистемами, тобто вони працюють автономно. З іншої сторони, виробництво універсального енергоносія (H_2) можливе як в безпосередній близькості від заправної станції електромобілів на паливних елементах (PCEVs), так і на віддалених територіях в місцях зі значним енергетичним потенціалом відновлюваних джерел енергії з подальшим транспортуванням водню до заправних станцій в спеціальних цистернах або за допомогою трубопроводу. Крім того, водневе акумулювання енергії відновлюваних джерел дає можливість створювати довготривалі міжсезонні запаси енергії, що особливо актуально при вирішенні питання стабільного енергозабезпечення.

Оскільки ринок електромобілів на паливних елементах (PCEVs) знаходиться на початковому етапі розвитку [87], про що свідчить незначна кількість моделей, які серійно випускаються для реалізації, важливим фактором, що визначатиме динаміку зростання даного ринку є розвиток інфраструктури водневих заправних станцій і відповідно розвиток технологій виробництва

водню в тому числі і з використанням електроенергії, отриманої від відновлюваних джерел.

В Україні даний напрям розширення використання енергії відновлюваних джерел є актуальним через достатньо високий загальний технічно-досяжний енергетичний потенціал ВДЕ, який складає 68 млн. т. н. е. [54]. Крім того, електролізне виробництво водню від ВДЕ не впливатиме на роботу центральної енергосистеми, яка на сьогоднішній день потребує додаткових регулюючих потужностей.

Для успішного розвитку в Україні технологій виробництва водню з відновлюваних джерел необхідне вирішення ряду задач, що дозволять визначити конкретні відновлювані джерела енергії, придатні для даного застосування, визначити основні принципи побудови систем перетворення енергії відновлюваних джерел в енергію водню, провести оцінку ефективності перетворення енергії наявних відновлюваних джерел в енергію універсального енергоносія, порівняти схем застосування різних видів відновлюваних джерел для зарядження електромобілів всіх типів.

Нові розробки по підвищенню ефективності та здешевленню проведення процесів в галузі одержання та зберігання водню, а також в галузі використання відновлюваних джерел як первинних джерел енергії, стимулюватимуть створення різних проектів з використанням водню, як енергоносія. Великий інтерес можуть представляти проекти по великомасштабному виробництву водню для віддалених районів з високим енергетичним потенціалом відновлювальних джерел. В даному випадку можна говорити про конкурентну здатність таких енергосистем в порівнянні з традиційними; це обумовлено тим, що транспорт водню на далекі відстані дешевше, ніж транспорт електроенергії. Крім того, виключаються витрати, пов'язані з “піковою електроенергією” - водень витрачається по мірі необхідності. Ефективним також є проекти невеликих потужностей для автономних об'єктів і будівель, які включають в себе енергопостачання для побутових потреб та заправку автотранспорту.

1.8. Висновки до розділу

Зважаючи на відмічене вище та проведений аналіз наукових та сучасних технічних даних з особливостями застосування відновлюваних джерел енергії, їх впливу на роботу об'єднаної енергосистеми, враховуючи високі темпи приросту потужності об'єктів відновлюваної енергетики та зростання ринку електромобілів для вирішення наукової проблеми з розширення можливостей застосування енергопотенціалу вітру та Сонця на території України без негативного впливу на роботу енергосистеми, необхідно вирішити наступні задачі даного дисертаційного дослідження:

- проаналізувати існуючі підходи до формування мереж зарядних станцій електромобілів з використанням енергії вітру та сонячного випромінювання;
- розробити математичні моделі процесу зарядження електрохімічних акумуляторних батарей від вітроелектричних установок, що входять до складу зарядних станцій електромобілів;
- розробити математичні моделі процесу зарядження електрохімічних акумуляторних батарей від фотоелектричних установок, що входять до складу зарядних станцій електромобілів;
- розробити математичні моделі процесу зарядження електрохімічних акумуляторних батарей від комплексних вітро-сонячних енергоустановок, що входять до складу зарядних станцій електромобілів;
- промодельовати процеси забезпечення енергією зарядних станцій електромобілів від відновлюваних джерел з урахуванням реальних даних кліматометеорологічних умов та оцінка адекватності запропонованих моделей;
- обґрунтувати раціональні параметри буферних акумуляторів енергії та енергетичного обладнання та устаткування відновлюваної енергетики в залежності від енергобалансових потреб зарядної станції електромобілів;
- проаналізувати види застосування водневих технологій акумуляування енергії відновлюваних джерел з подальшим застосування водню для заправки електромобілів на основі паливних елементів;

- визначити техніко-економічних аспекти реалізації зарядних станцій електромобілів з використанням буферних акумуляторів енергії при застосуванні відновлюваних джерел енергії як первинних енергоносіїв.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ ОПИСАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАРЯДЖЕННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ НА ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЯХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ТА БУФЕРНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ

2.1 Умови створення мереж автономних зарядних станцій електромобілів з використання відновлюваних джерел енергії

Існуючі темпи приросту кількості електричних транспортних засобів в Україні вимагають відповідного зростання кількості станцій швидкого заряду, тобто розвитку мереж зарядних станцій електромобілів. Розвиток таких мереж може реалізовуватись на базі існуючих заправних станцій традиційних автомобілів з ДВЗ, або як нові ЗС, які враховуватимуть специфіку потреби в електричній енергії для зарядження електромобіля. В обох випадках їх реалізація може відбуватись двома шляхами.

Традиційний – полягає в підключенні станцій прискореного заряду до централізованих ліній електропередачі. Однак в такому випадку виникає питання наявності необхідної потужності електричної мережі та впливу великих навантажень під час швидкого заряду на якість роботи мережі. На станціях такого типу можливе застосування буферного акумулятора енергії, який в нічний час накопичуватиме заряд, а в денний період, коли найбільший попит, буде спрацьовувати збережену енергію. Однак даний підхід не вирішує питання пропускної здатності мережі і у випадку невеликих потужностей підведених централізованих ЛЕП даний підхід не дасть бажаного результату.

Альтернативний – полягає в розвитку мереж зарядних станцій з буферними акумуляторами енергії при використанні вітроелектричних, фотоелектричних чи комплексних вітро-сонячних енергоустановок. Даний підхід

не обмежується наявними потужностями ЛЕП і може бути реалізованим в будь-якій місцевості.

Умови, що визначають будову мережі зарядних станцій електромобілів з буферними акумуляторами енергії і з використанням ВЕУ та ФЕБ як первинних генераторів електроенергії, полягають в наступному:

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{\text{бн}} \langle l_{\text{кп}}, \\ E_n \langle \sum_{i=1}^n E_i, \\ \tau_z \langle \tau_{\text{норм}}, \\ \tau_{\text{об}} \langle \tau_{\text{кр}}, \\ S_{\text{ЗСЕМ}} \langle S_{\text{кр}} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

де: $l_{\text{бн}}$ – базова довжина пробігу електромобіля, км;

$l_{\text{кп}}$ – критична довжина пробігу електромобіля, км;

E_n – потреба в енергії ЗСЕМ, кВт·год;

E_i – енергія, що надходить від відновлюваного джерела, кВт·год;

τ_z – час зарядження електромобіля, год;

$\tau_{\text{норм}}$ – нормований час зарядження електромобіля, год;

$\tau_{\text{об}}$ – час обслуговування електромобіля, год;

$\tau_{\text{кр}}$ – критичний час очікування на виконання заявки по обслуговуванню електромобіля, год;

$S_{\text{ЗСЕМ}}$ – площа ЗСЕМ, м²;

$S_{\text{кр}}$ – критична площа ЗСЕМ, м².

Розглянемо особливості даних умов на прикладі мережі ЗСЕМ з використанням енергії сонячного випромінювання та вітру, реалізованих на ділянках автомобільних доріг поблизу міста Мелітополь Запорізької області (рис. 2.1).

Згідно картам автомобільних доріг України [88], через місто Мелітополь проходить дві міжнародні автодороги, які слід вважати фронтальними ділянками при побудові мережі ЗСЕМ:

- М26 з'єднує в північному напрямку з містом Запоріжжя на відстані 117 км та в південному напрямку з містом Генічеськ на відстані 104 км;
- М14 з'єднує в східному напрямку з містом Бердянськ на відстані 114 км та в західному напрямку з містом Нова Каховка на відстані 148 км.

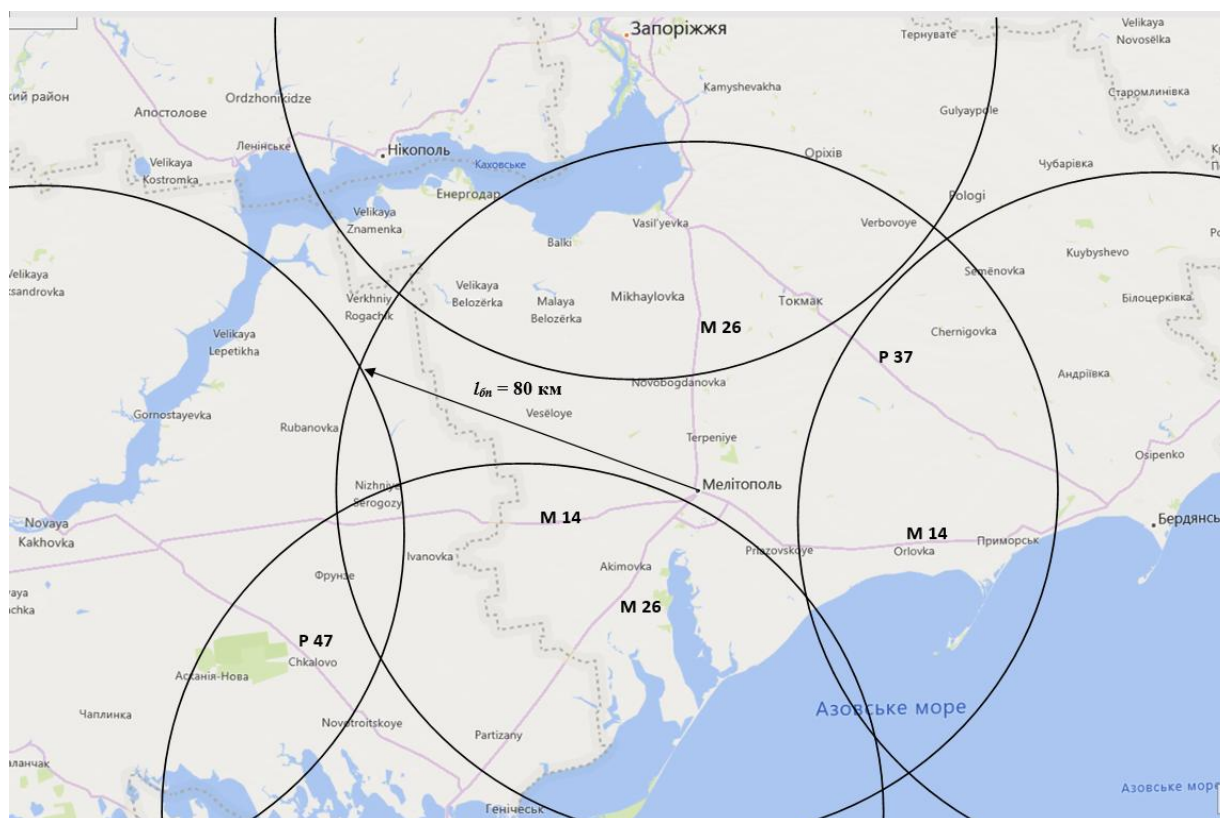


Рис. 2.1. Реалізація мережі ЗСЕМ навколо міста Мелітополь Запорізької області.

Крім того, міста Генічеськ та Нова Каховка з'єднані між собою районною автомобільною дорогою Р 47 з відстанню між містами в 127 км, а місто Бердянськ та місто Василівка (розміщене на М26) з'єднані між собою районною автомобільною дорогою Р 37 з відстанню між містами в 138 км. Дані ділянки слід вважати рокадними ділянками при побудові мережі ЗСЕМ.

Враховуючи, що найбільша кількість електромобілів, що реєструються в Україні, наприклад, за минулий 2018 рік припадає на Nissan Leaf в кількості 64 % від усіх куплених електромобілів, з них 94 % - з закордонним пробігом [89], з характеристиками критичного пробігу в 120 км при повному

заряді, а на ЗСЕМ він прибуде з найбільшою ймовірністю при рівні заряду 40-50% від номінального значення, тобто пройшовши відстань біля 80 км, відповідно перетини зон з радіусом базового пробігу визначають оптимальні зони розташування ЗСЕМ з використання енергії вітру та сонячного випромінювання на відповідних ділянках як фронтальних, так і рокадних доріг.

Реалізація ЗСЕМ з використанням ВЕУ та ФЕБ проводиться за умови оцінки надходження енергії вітру та сонячного випромінювання відповідно. За умови комплексного застосування двох відновлюваних джерел енергії після отриманої оцінки визначається їх співвідношення, яке дозволить реалізовувати ефективний заряд електромобілів в межах року. В такому разі:

$$E_n \langle E_1 + E_2,$$

де: $E_1 = \int_0^t E_{cs} \cdot dt$ - енергія, що надходить від сонячного випромінювання,

кВт· год;

$E_2 = \int_0^t E_v \cdot dt$ - енергія, що надходить від вітру, кВт· год.

Станції прискореного заряду передбачають тривалість зарядження до 80% номінального значення ємності бортової тягової АБ за час в межах (0,1÷0,5) год. струмами до (1÷4) $C_{ном}$. Поруч з цим нормований струм зарядження АБ в залежності від типу та ємності складає від 8 год. і більше, що пояснюється малими значеннями нормованих струмів заряду (0,01÷0,1) $C_{ном}$, які визначаються технічними умовами до експлуатації АБ.

Класична заправка традиційних транспортних засобів з ДВЗ в залежності від об'єму баку для палива коливається в середньому в межах (0,1÷0,5) год. Зважаючи на це, час обслуговування на ЗСЕМ повинен знаходитися в даних межах, через небажання споживача витратити більше часу на зарядження електромобіля. Відповідно, зростання ринку електромобілів повинне враховуватись і визначати кількість каналів, що забезпечуватимуть оптимальний час обслуговування, який має бути менше критичного.

Критична величина площі під реалізацію ЗСЕМ визначається втратами енергії при її передачі від генеруючого устаткування до буферного акумулятору енергії та економічними затратами на використання ділянки під реалізацію станції. Джерела генерації повинні бути рівномірно розташовані від центра накопичення енергії, що дозволить звести до мінімуму втрати. В ідеальному варіанті розташування генеруючого обладнання має реалізовуватись в межах вписаного кола за умови, що центр накопичення енергії відповідає центру даного кола (рис. 2.2). При цьому радіус станції обмежується величиною критичної площі: $R_{ЗСЕМ} \leq f(S_{кр})$.

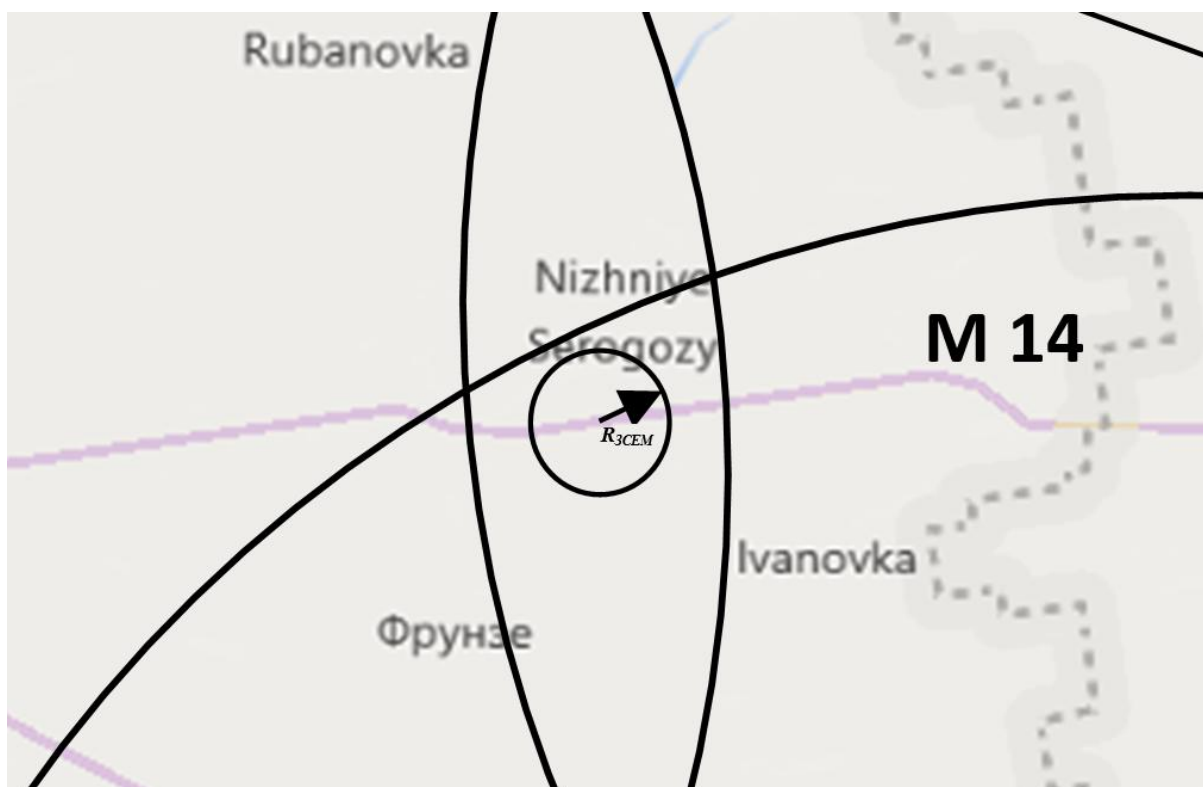


Рис. 2.2. Реалізація мережі ЗСЕМ на ділянці дороги М14 між містом Мелітополь та Нова Каховка в районі населеного пункту Нижні Сірогузи.

Врахування відмічених вище умов дозволяє реалізовувати та розвивати ефективну мережу ЗСЕМ з використанням вітро- та фотоелектричних установок як первинних генераторів електричної енергії, що в свою чергу дозволить

розширити можливості застосування енергетичного потенціалу вітру та сонячного випромінювання на території України.

2.2. Існуючі підходи до математичного моделювання роботи вітроелектричних установок

Складність моделювання виробництва електричної енергії вітроелектричною установкою $E_{BEU}(t)$ обумовлюється випадковим характером вітрового потоку (який виступає в ролі енергетичного ресурсу), та нелінійним алгоритмом перетворення енергії вітру в електричну, що вносить додаткову невизначеність через особливості роботи вітроелектричних установок в різних кліматичних умовах та різних рельєфних ландшафтах.

З метою розроблення математичної моделі процесу зарядження АБ на зарядних станціях електромобілів (ЗСЕМ) з використанням в їх складі вітроелектричних установок (ВЕУ) та буферного акумулятора енергії для вирівнювання виробітку та споживання електричної енергії, проведемо аналіз існуючих підходів до моделювання процесу перетворення енергії вітрового потоку в електричну енергію шляхом застосування вітроелектричних установок. Крім того, проаналізуємо роботу акумуляторних батарей, з урахуванням специфіки реалізації процесу зарядження та стану заряду АБ. На основі проведеного аналізу можливо запропонувати математичний опис роботи системи автономної зарядної станції електромобілів на основі ВЕУ.

Енергія вітрового потоку як випадкова величина має не симетричний розподіл, відповідно виробництво електроенергії вітроелектричними станціями (як автономними так і мережевими), також має непостійний характер. Розподіл швидкості вітру найчастіше описують функцією Вейбула [38]. Однак за наявності певної специфіки у поведінці вітру пропонуються також інші види представлення функції щільності розподілу швидкості вітру по градаціях: розподіл Релея (найпростіша форма), експоненційний розподіл за методом

максимуму ентропії, комбінування кількох розподілів (в тому числі нормального, поліномів Чебишева тощо).

Потужність ВЕУ обмежена певною величиною, яка дорівнює номінальній (установленій) потужності P_n незалежно від сили вітру. Графічний приклад типової кривої потужності приведено на рис. 2.1.

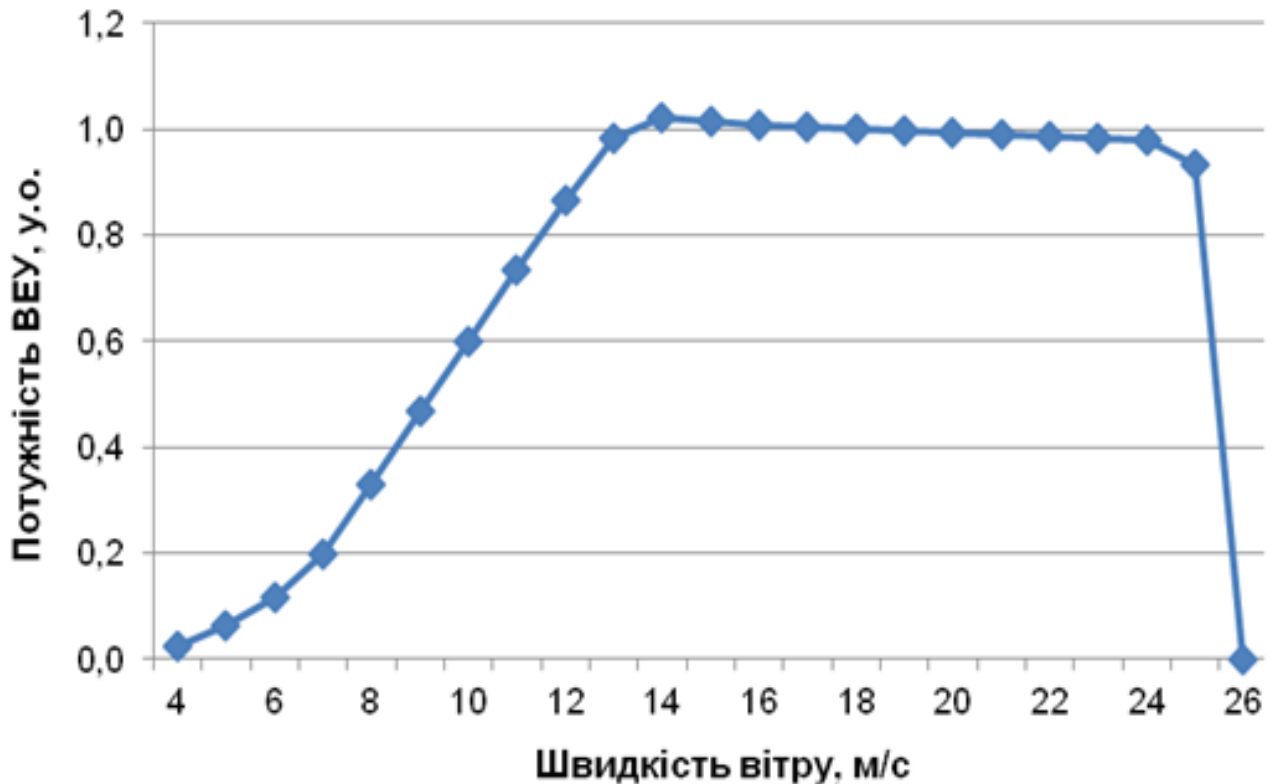


Рис. 2.1. Типова крива потужності ВЕУ.

Згідно [90] потужність при заданій швидкості вітру визначають за виразом:

$$P_{BEV}(v) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot F \cdot \eta(v) \cdot \eta_m \cdot \eta_{eg}, \quad (2.6)$$

де: P_{BEV} – потужність вітроелектричної установки при заданій швидкості вітру, кВт;

ρ – густина вітрового потоку, кг/м^3 , при атмосферному тиску 760 мм.рт.ст., та температурі 15 °С становить 1,225 кг/м^3 ;

v – поточна величина швидкості вітрового потоку, м/с;

$\eta(v)$ – коефіцієнт використання вітрової потужності;

F – площа обмаху ротора, м², зазвичай визначається як площа кола, тобто:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (2.7)$$

де: d – діаметр ротора, м.

Поточна (миттєва) величина потужності ВЕУ має певний змінний характер. Для більш повної оцінки ефективності роботи зарядної станції на базі ВЕУ більш наочним є графік виробітку електричної енергії протягом певного періоду (декади, місяця, кварталу чи року), що буде накопичена в буферному акумуляторі, а потім надана акумуляторній батареї ЕМ. При високому коефіцієнті надійності роботи кількість ВЕУ в складі однієї зарядної станції практично не впливає на характер (динаміку) виробітку електричної енергії, що підтверджується реальними даними роботи Краснодарської ВЕС, до складу якої входить 10 ВЕУ типу FL 2500 (рис. 2.2) [91].

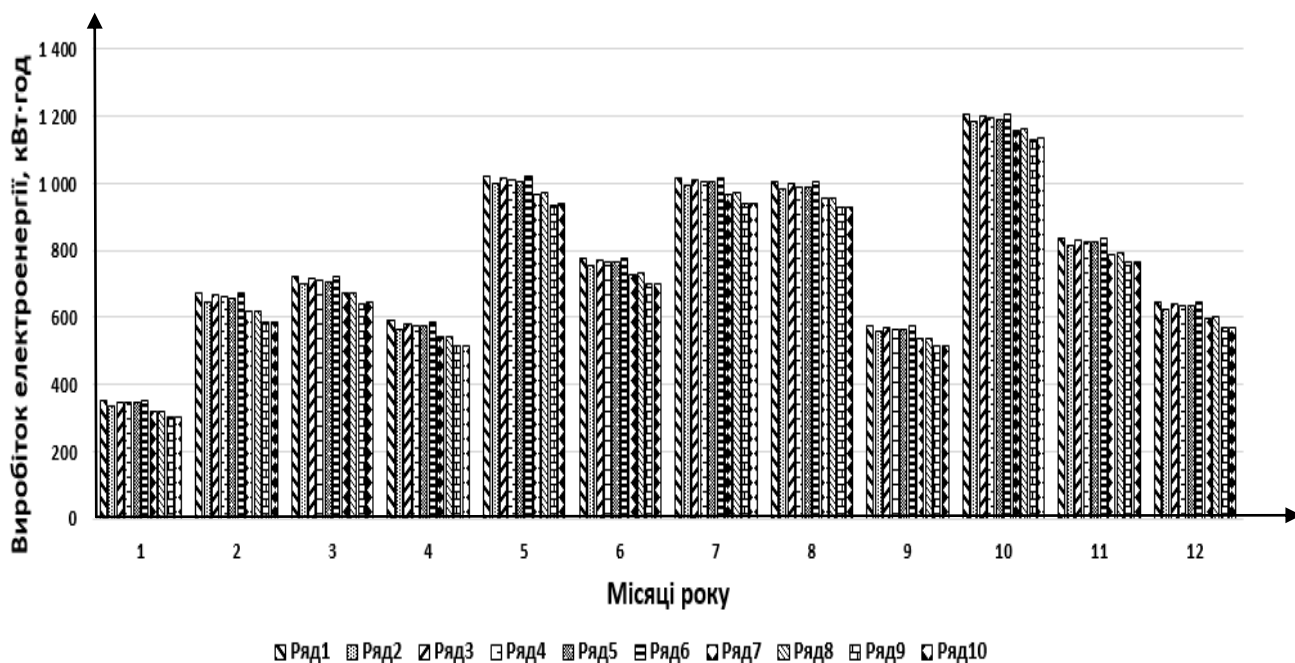


Рис. 2.2. Діаграма виробітку електричної енергії десяти ВЕУ що входять до складу Краснодарської ВЕС протягом року [3]:

Ряд 1 – ВЕУ 1 (FL-801); Ряд 2 – ВЕУ 2 (FL-802);

Ряд 3 – ВЕУ 3 (FL-803); Ряд 4 – ВЕУ 4 (FL-804);

Ряд 5 – ВЕУ 5 (FL-805); Ряд 6 – ВЕУ 6 (FL-806);

Ряд 7 – ВЕУ 7 (FL-807); Ряд 8 – ВЕУ 8 (FL-808);

Ряд 9 – ВЕУ 9 (FL-809); Ряд 10 – ВЕУ 10 (FL-810).

В роботі [92] модель вітроустановки задається кривою потужності $P(v)$, при цьому швидкість вітру v (м/с) перераховується на висоту осі ротора. В загальному випадку описання потужності здійснюється залежністю наступного вигляду:

$$P_n(v) = \begin{cases} 0, & v \leq v_0, v \geq v_{\max} \\ f(v), & v_0 < v < v_p \\ P_m, & v_p \leq v < v_{\max} \end{cases} \quad (2.8)$$

Як приклад, в роботі [93] запропоновано логістичну модель характеристики потужності, що має наступний вигляд:

$$P(v) = \frac{a}{1 + be^{-cv}}, \quad (2.9)$$

де: a, b, c — параметри моделі, що визначаються за методом найменших квадратів.

Для оцінювання параметрів даної моделі на базі паспортних даних ВЕУ в роботі розроблено спеціальний ітераційний метод, що є комбінацією методу найменших квадратів, методу спуску по групах змінних і методу лінеаризації. Метод полягає у наступному. Значення параметра a є асимптотою функції, тому в якості його початкового наближення приймається максимальна потужність ВЕУ. Для відомого значення $a = a_0$ параметри b і c можна оцінити, комбінуючи метод найменших квадратів з методом лінеаризації. Використовуючи отримані оцінки b і c , параметр a уточнюється за формулою лінійного методу найменших квадратів.

Згідно роботи [94] електроенергія, що виробляється ВЕУ, визначається як інтеграл Рімана-Стілтєса стосовно інтегральної функції розподілу $F(v)$, або звичайного інтеграла Рімана при наявності неперервної диференційної функції розподілу $\varphi(v)$:

$$E_{BEY}(T) = T \int_0^{\infty} P(v) dF(v) = T \int_0^{\infty} P(v) \varphi(v) dv, \quad (2.10)$$

де: $P(v)$ – характеристика залежності потужності вітроустановки від швидкості вітру;

T – часовий проміжок, стосовно якого визначено функцію розподілу.

У роботі [95] для моделювання стохастичного процесу виробітку вітрової електроенергії пропонується логарифмічно-нормальний розподіл:

$$E(t) \sim e^{\omega(t)+U(t)}, \quad (2.11)$$

де: $\omega(t)$ – алгебраїчна функція, що представляє середнє значення логарифму від величини виробленої ВЕС енергії;

$U(t)$ – є стохастичним процесом Орнштейна-Уленбека.

Таке представлення дозволяє описувати випадковий процес в термінах розподілу Гауса (нормального розподілу).

Отже, є можливість переходу до оцінки режиму виробітку будь-якої реальної вітроелектричної установки (ВЕУ) за наступною нелінійною функцією, яка на відміну від (3) розділяє робочу зону кривої потужності на дономінальний режим та виробіток при режимній швидкості вітру [96]. Такий підхід дозволяє враховувати технічні можливості сучасних зарядних пристроїв з однієї сторони та особливості роботи електрохімічних акумуляторних батарей як буферних так і тягових, що встановлені в електромобілях з іншої.

$$E(v) = \begin{cases} 0 & \text{при } v < v_0, \\ E_{MH}, & \text{при } v_0 < v \leq v_n, \\ E_n, & \text{при } v_n \leq v < v_{кр}, \\ 0 & \text{при } v > v_{кр}, \end{cases} \quad (2.12)$$

де: v_0 – початкова швидкість вітру роботи ВЕУ, м/с;

v_n – номінальна швидкість вітру м/с;

$v_{кр}$ – критична швидкість вітру, при якій припиняється робота ВЕУ м/с;

E_{MH} – енергія, що може бути вироблена при швидкості вітру менше номінальної, кВт· год;

E_n – енергія, що може бути вироблена при режимній швидкості вітру

кВт· год.

Дана модель показує необхідність застосування нових методів зарядження акумуляторних батарей різних типів (буферних тягових чи інших) при малій вихідній енергії відновлюваного джерела (ВЕУ), що в свою чергу дозволяє підвищити ефективність використання низькопотенційної енергії відновлюваного джерела. Для роботи системи ЗСЕМ з використанням ВЕУ як первинного генератора електричної енергії частка малих вітрів не є визначальною в загальній ефективності роботи системи, тому в подальшому для описання даних систем будемо застосовувати модель, що описується рівнянням (2.10).

2.3. Розроблення математичної моделі процесу зарядження акумуляторних батарей на зарядних станціях електромобілів з використанням вітроелектричних установок

Ефективна робота будь-якої зарядної станції електромобілів (ЗСЕМ) реалізовуватиметься за умови, коли енергія, що вироблятиметься місцевими генераторами (в даному випадку ВЕУ) дорівнюватиме енергії, що споживається при зарядженні тягових АБ електромобілів, і в найпростішому вигляді дане співвідношення можна подати наступним чином:

$$E_{BEU} = E_{AB}^{EM}, \quad (2.13)$$

де: E_{BEU} – енергія, що виробляється ВЕУ, кВт·год;

E_{AB}^{EM} , енергія, що споживається електромобілем, при його зарядженні, кВт·год, дана енергія має випадковий характер, що вимагає розроблення моделі для врахування цієї особливості.

Енергію акумуляторної батареї електромобіля можна подати у вигляді:

$$E_{AB}^{EM} = E_{ABz}^{EM} + E_{ABp}^{EM}. \quad (2.14)$$

де: E_{ABz}^{EM} – залишкова енергія тягової АБ електромобіля, що залишається в

ньому на момент початку процесу зарядження на ЗСЕМ від ВЕУ,
кВт·год;

E_{ABp}^{EM} – витрачена (розряджена) енергія тягової АБ електромобіля в процесі руху транспортного засобу, кВт·год.

Враховуючи нерівномірний характер виробітку електричної енергії ВЕУ як в добовому, так і в місячному та сезонному розрізі часу, з однієї сторони, та випадковий характер споживання електричної енергії електромобілями з іншої, ефективна робота ЗСЕМ від ВЕУ в плані балансування виробітку та споживання енергії можлива за умови включення до її складу буферного акумулятору. Тоді, в початковий момент роботи зарядної станції електромобілів на базі ВЕУ:

$$E_{BEU} = E_{AB}^{BY\Phi} + E_{AB}^{EM}. \quad (2.15)$$

де: $E_{AB}^{BY\Phi}$ – енергія буферного акумулятору, що входить до складу автономної вітроелектричної зарядної станції електромобілів, кВт·год.

Під час роботи такої зарядної станції, коли процес зарядження тягових АБ електромобіля гарантується буферним акумулятором, що вирівнює стохастичний виробіток енергії зі стохастичним споживанням, енергія буферного акумулятору може бути представлена наступним чином:

$$E_{AB}^{BY\Phi} = E_3^{BY\Phi} + E_p^{BY\Phi}, \quad (2.16)$$

де: $E_3^{BY\Phi}$ – залишкова енергія, що залишається в буферному акумуляторі після зарядження електромобіля, кВт·год;

$E_p^{BY\Phi}$ – енергія витрачена на зарядження тягової АБ електромобіля, кВт·год. В такому разі, $E_p^{BY\Phi} = E_{ABp}^{EM}$.

Зважаючи на це співвідношення (2.15) набуде наступного вигляду:

$$E_{BEU} = E_3^{BY\Phi} + E_{AB3}^{EM} + E_p^{BY\Phi}. \quad (2.17)$$

Як відомо, енергія накопичена в АБ (E_{AB}) визначається напругою на її клеммах U_{AB} (В), номінальною ємністю $C_{AB}^{ном}$ (А·год).

$$E_{AB} = U_{AB} \cdot C_{AB}^{nom}. \quad (2.18)$$

При цьому ємність АБ в даний момент часу визначається як:

$$C = \int_0^{\tau} I \cdot d\tau. \quad (2.19)$$

де: I – струм, А,

τ – час, год.

З іншої сторони, повне значення ємності визначається функцією [7]:

$$C_{AB} = 3600 C_{AB}^{max} \cdot f(T) \cdot f(n), \quad (2.20)$$

де: C_{AB}^{max} – повна ємність АБ, А·год,

$f(T)$ – коректуючий множник для врахування залежності ємності АБ від температури;

$f(n)$ – коректуючий множник для врахування старіння акумуляторної батареї при напрацюванні певного ресурсу n (зарядно-розрядних циклів).

Використання залежності (2.15) необхідне для опису стану АБ на момент її зарядження при визначенні ключових точок (параметрів стану АБ) системою контролю акумулятору (BMS – battery monitoring system).

Енергія, яка надається АБ під час зарядження (E_{AB}^{BX}) враховує також коефіцієнт корисної дії процесу заряду $\eta_{зAB}$, тоді;

$$E_{AB}^{BX} = U_{AB} I_{зAB} \tau_z \cdot \eta_{зAB}. \quad (2.16)$$

Енергія, яка відбирається від АБ в процесі розряду (E_{AB}^{BIX}) враховує також коефіцієнт корисної дії процесу розряду $\eta_{рAB}$, тоді;

$$E_{AB}^{BIX} = U_{AB} I_{рAB} \tau_p \cdot \eta_{рAB}. \quad (2.17)$$

Відповідно, загальний коефіцієнт роботи АБ (η_{AB}) представлятиме собою добуток:

$$\eta_{AB} = \eta_{зAB} \eta_{рAB}. \quad (2.18)$$

Зважаючи на відмічене вище, енергія, необхідна для зарядження АБ електромобіля становитиме [7]:

$$E_{AB}^{EM} = \frac{U_{зAB}}{\eta_{AB}} \cdot \int_{C_0}^{C_{nom}} C_{зAB} \cdot \psi(C) \cdot dc, \quad (2.19)$$

де: $\psi(C)$ – функція, що враховує випадковий характер та частоту настання процесу зарядження АБ електромобіля.

Визначення функції $\psi(C)$ можна проводити евристичним методом на основі прийняття певних припущень з урахуванням особливості роботи та вимог з експлуатації тягових АБ електромобіля. У випадку застосування в електромобілях літій-іонних АБ (90% світового ринку електромобілів) приймаємо:

1) Мінімальний залишковий заряд АБ перед його зарядженням повинен становити не менше 20%, що пояснюється значною віддаленістю між собою зарядних станцій (згідно [4] для автомобілів Tesla Model S віддаленість між зарядними станціями пропонується 80 км, що при залишковому заряду менше 20% може призвести до того, що автомобіль не доїде до зарядної станції, згідно [97] для автомобілів Nissan Leaf віддаленість між зарядними станціями пропонується 30 км, що при залишковому заряду менше 20% може призвести до того, що автомобіль не доїде до зарядної станції) та негативними впливом повного розряду АБ на ресурс роботи акумулятору.

2) Ступінь зарядження тягових АБ електромобіля повинен становити не більше 80%, що дозволить проводити процес зарядження. При більших степенях зарядження процес заряду відбувається повільно через концентраційні обмеження (зменшення носіїв заряду іонів Li^+) тому застосування швидкого заряду стає неможливим, а повільний заряд не задовольняє сучасним вимогам швидкості заправки транспортних засобів, яка повинна становити не більше 0,5 год.

3) Рівномірний розподіл імовірності проміжних значень ступеню зарядження виглядає нереалістичним, оскільки мінімальний рівень є небажаним з різних міркувань, а при максимальному – дозаряджати здається недоцільним. Отже, має бути певний максимум імовірного ступеню зарядження. Можливим варіантом опису функції щільності розподілу його імовірності може бути нормальний розподіл, обмежений зверху та знизу. Приклад застосування такого розподілу (Truncated Normal distribution) можна знайти, наприклад, в [98].

На основі зазначених припущень отримано розподіл настання процесу зарядження тягових АБ електромобіля (рис. 2.4).

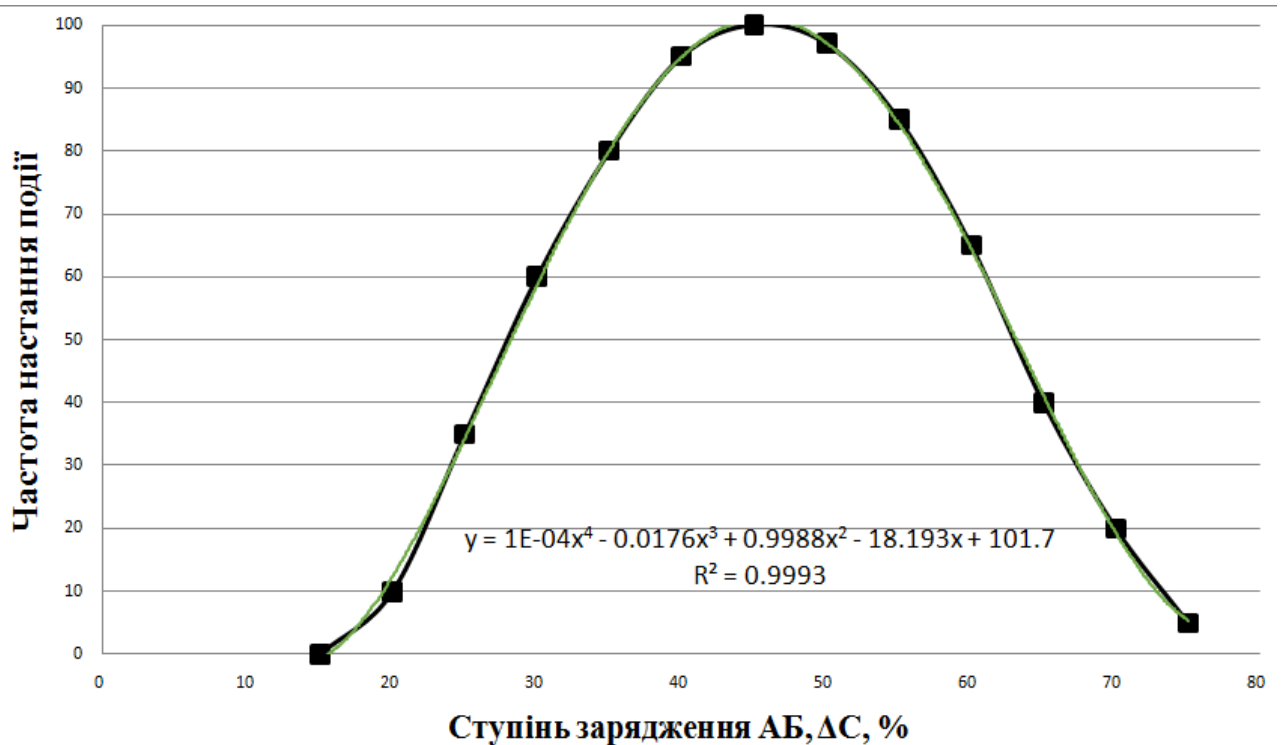


Рис. 2.4. Розподіл можливого зарядження АБ електромобіля при різних ступенях заряду акумуляторів.

Отриману залежність слід обмежити за критичним ступенем зарядження АБ ЕМ в $20\%C_{\text{ном}}$, оскільки при менших залишкових значеннях заряду акумулятору електромобіль не зможе доїхати до зарядної станції. З іншої сторони, при заряді АБ ЕМ більше 80% ймовірність того, що електромобіль буде заїжджати на зарядну станцію теж наближається до 0. Для отриманої математичної залежності

$\psi(C)$ на криву було нанесено лінію тренда, в результаті при застосуванні поліноміального закону коефіцієнт кореляції склав 0,9993 [7].

Враховуючі отримані результати узагальнена математична модель процесу зарядження акумуляторної батареї на ЗСЕМ від ВЕУ з урахуванням (2.19) виглядатиме наступним чином [7]:

$$K_3^{BEY} \cdot T \int_0^{\infty} P(v) \phi(v) dv = E_{AB}^{BY\Phi} = \frac{k_{HE}^{BY\Phi}}{\eta_{AB}} (E_{ВП}^{ЗСЕМ} + \frac{U_{зАБ}}{\eta_{зАБ}} \cdot \int_{C_0}^{C_{ном}} C_{зАБ} \cdot \psi(C) \cdot dc). \quad (2.20)$$

де: K_3^{BEY} – коефіцієнт забезпечення енергопотреби зарядної станції електромобілів від вітроелектричної установки;

$E_{ВП}^{ЗСЕМ}$ – власні енергетичні потреби зарядної станції електромобілів від вітроелектричної установки.

Для описання функції $\psi(C)$ можливе застосування і інших підходів, зокрема теорії черг [8], з метою порівняння з отриманою залежністю в даному дослідженні та визначенню адекватності запропонованих моделей.

2.4. Моделювання забезпечення енергією ЗСЕМ від ВЕУ з врахуванням розподілу швидкостей вітру для заданої місцевості

Проаналізуємо можливість забезпечення енергією ЗСЕМ від ВЕУ з врахуванням розподілу швидкостей вітру для м. Мелітополь Запорізької області, Україна, використавши при цьому реальні експериментальні дані вимірювання швидкості вітру для заданої місцевості.

Вимірювання швидкості вітру на висоті 66 м над поверхнею землі проводилося через 10 хвилин протягом року. Розподіл швидкостей вітру (рис. 2.7) для повної сукупності даних можна описати розподілом Вейбула з коефіцієнтом масштабу $a = 7.8512$ і коефіцієнтом форми $b = 2.5226$. Якщо враховувати, що виробіток електроенергії вітроустановкою починається при швидкості вітру більше 4 м/с і відкинути відповідні значення, то крива

диференційного розподілу зміститься вправо і звужиться, при цьому обидва параметри зростуть до значень $a = 8.6809$ і $b = 3.3263$.

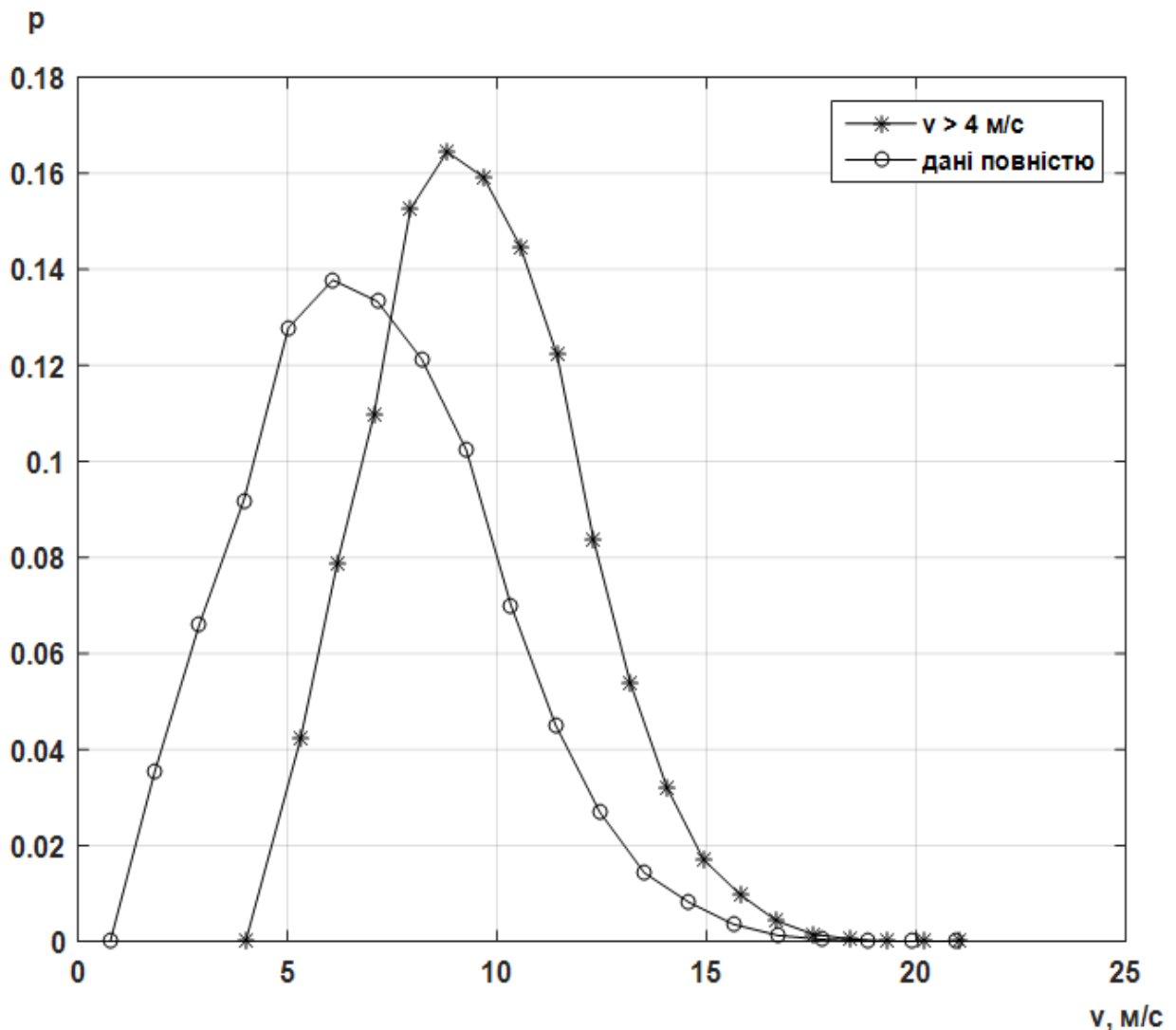


Рис. 2.7. Розподіл швидкостей вітру за даними, виміряними протягом року для місцевості м. Мелітополь Запорізької області, Україна.

Виробіток електроенергії вітроустановкою, як відомо, пропорційний не першій степені, а кубу швидкості вітру. Характер розподілу Вейбула різко змінюється і параметри розподілу $a = 654.1836$, $b = 1.1088$ фактично відповідають експоненціальному розподілу (рис. 2.8). Таким чином, можна зробити висновок, що виробіток електроенергії вітроустановкою відповідає двох-параметричному (з параметром зсуву) експоненціальному розподілу.

Враховуючи, що для даної вітроустановки $\eta(v) \sim \text{const}$, оскільки визначається конструктивними особливостями ВЕУ, і куб швидкості вітру є практично єдиним параметром виробітку електроенергії, що не залежить від конструкції вітроустановки, подальший розгляд питання про виробіток електроенергії проведемо у відносних одиницях.

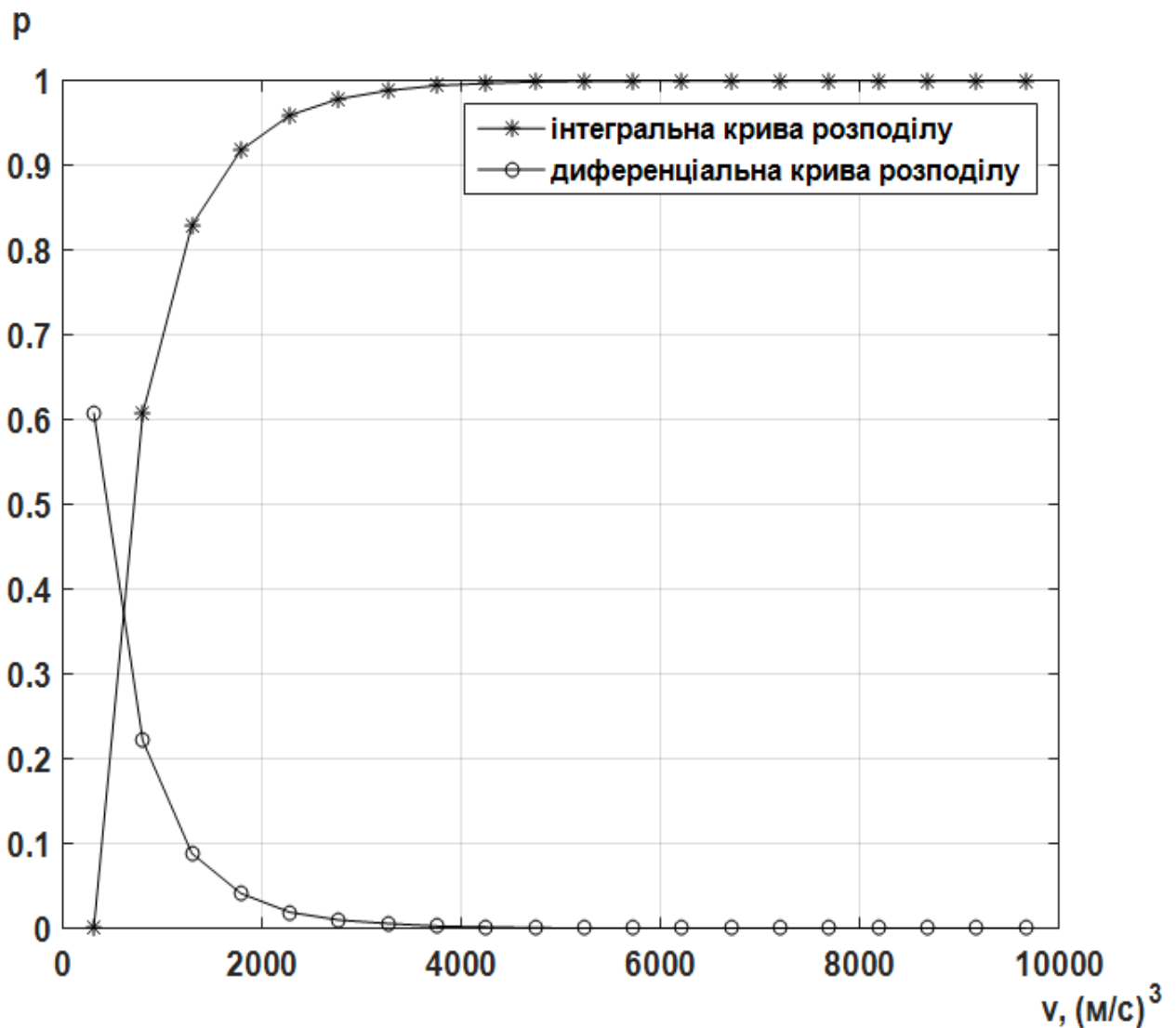


Рис. 2.8. Розподіл швидкості вітру в кубі за даними, виміряними протягом року для місцевості м. Мелітополь Запорізької області, Україна.

Для аналізу кількості електроенергії, що може виробити вітроустановка, розіб'ємо сукупність даних відносно швидкості вітру на добові складові і

розглянемо усереднення за кубом швидкості вітру подово (рис. 2.9) і за 10-хвилинний інтервал протягом року (рис. 2.10).

Аналіз даних показує, що по-перше, відносна енергія вітроустановки через меншу швидкість вітру в травні-червні в 3 рази менша середньої, а в жовтні-листопаді в 1,6 раз більша, тому для розрахунку можливості забезпечення електроенергією зарядної станції за рахунок енергії вітроустановки потрібно орієнтуватися на кінець весни – початок літа. По-друге, дещо неочікувано виявилось, що усереднена протягом року швидкість вітру має два чітко виражених мінімуми: з 6 до 11 години зранку і з 18 до 21 години – ввечері.

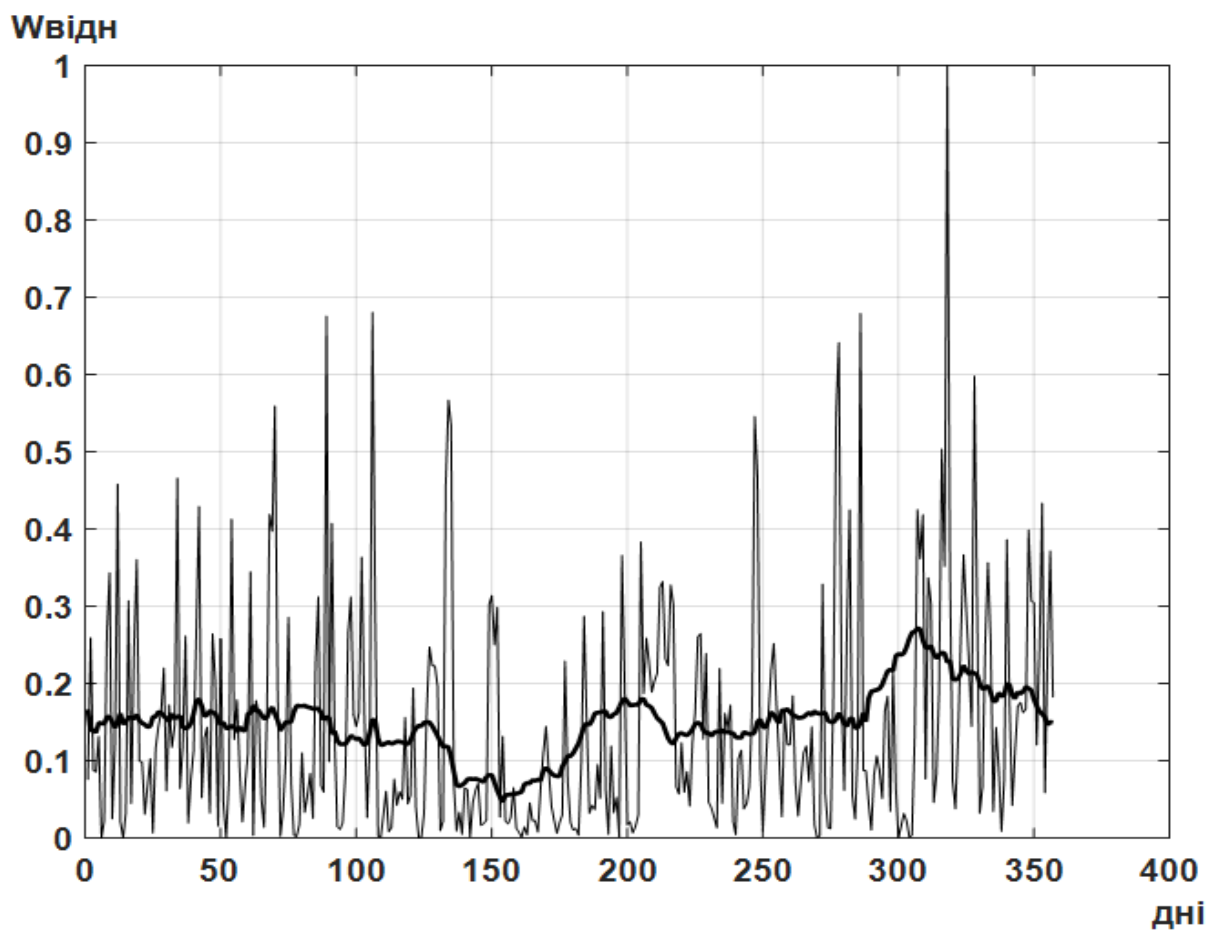


Рис. 2.9. Подобовий розподіл швидкості вітру в кубі за даними вимірюванням протягом року для місцевості м. Мелітополь Запорізької області, Україна.

При цьому, вранці виробіток енергії зменшується в 1,5 рази в порівнянні з середньою, а ввечері в 1,16 рази, що досить принципово для зарядної станції.

Так, що навесні виробіток електроенергії ВЕУ може бути в 3,5 – 4 раз меншим, ніж у середньому, причому досить тривалий час.

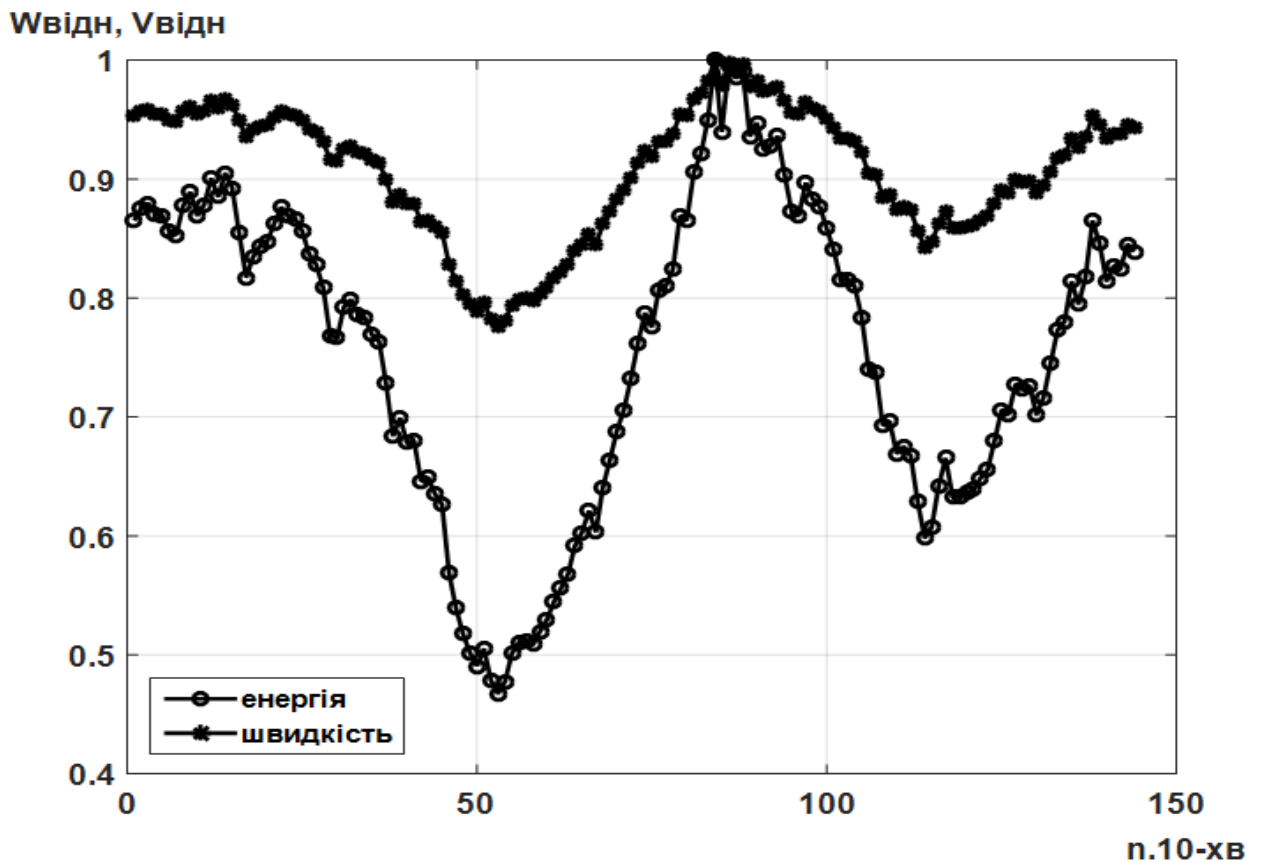


Рис. 2.10. Розподіл за 10-ти хвилинний інтервал протягом року швидкості вітру в кубі за даними виміряним протягом року для місцевості м. Мелітополь Запорізької області, Україна.

Враховуючи, провал у виробітку енергії, що має місце у світлий час доби, найдоцільніше використати для зарядної станції комбінацію вітроелектрична установка-буферний акумулятор енергії, що дозволить вирішити питання вирівнювання виробітку електричної енергії з її споживанням, однак залишається актуальним питання встановлення ємності буферної акумуляторної батареї при комплексному використанні декількох відновлюваних джерел генерування електроенергії, що дозволить зменшити капітальні витрати при забезпеченні обслуговування більшої кількості електромобілів [21].

2.5. Визначення енергоємності буферного акумулятору ЗСЕМ на основі ВЕУ

Розрахунок ємності буферної АБ ЗСЕМ на основі ВЕУ необхідно проводити при заданих параметрах потреби споживача, тобто при врахуванні необхідної кількості енергії для заряду електромобіля.

Враховуючи опис виробітку ВЕУ (2.10), а також опис енергії електрохімічної акумуляторної батареї (2.19) розглянуті вище, математична модель процесу заряду на ЗСЕМ на основі ВЕУ може бути подана наступним виразом [21]:

$$K_3^{BEU} \cdot T \int_0^{\infty} P(v) \phi(v) dv = E_{AB}^{BY\Phi} = \frac{k_{HE}}{\eta_{AB}} \cdot (E_{ВП}^{ЗСЕМ} + \frac{U_{зАБ}}{\eta_{зАБ}} \cdot \int_{C_0}^{C_{ном}} C_{зАБ} \cdot \psi(C) \cdot dC), \quad (2.23)$$

або у спрощеному вигляді:

$$K_3^{BEU} \cdot E_{BEU} = E_{AB}^{BY\Phi} = \frac{k_{HE}}{\eta_{AB}^{BY\Phi}} \cdot (E_{ВП}^{ЗСЕМ} + \frac{E_{AB}^{EM}}{\eta_{зАБ}}). \quad (2.24)$$

де: k_{HE} – коефіцієнт надлишкової енергії буферної АБ.

Приймаємо, що виконуються такі попередні умови:

1) власні потреби ЗСЕМ (освітлення та ін.) на рівні 3 кВт·год на день;

2) залишковий заряд АБ ЕМ при заїзді електромобіля на зарядну станцію становить 20% від його максимального значення, тобто $0,2 \cdot E_{AB}^{EM}$, оскільки при менших залишкових значеннях заряду акумулятора електромобіль може не доїхати до зарядної станції;

3) ймовірність заїзду електромобілю на зарядну станцію при залишковому заряді АБ ЕМ від 80% і більше рівна 0, оскільки дозаряд електромобіля в діапазоні від необхідно проводити в стаціонарному (не прискореному) режимі заряду;

4) надлишкова енергія буферної АБ ЗСЕМ повинна становити не менше 20% від номінального значення, тобто $k_{HE} = 1,2$;

5) максимальне значення напруги буферної АБ ЗСЕМ приймаємо рівним $U_{AB}^{BY\Phi} = 600V$, згідно [28];

б) прийmemo для розрахунків коефіцієнт корисної дії повного циклу «заряд-розряд» буферної акумуляторної батареї рівним 80% ($\eta_{AB}^{BY\Phi} = 0,8$), а коефіцієнт корисної дії заряду акумуляторної батареї електромобіля – рівним 90% ($\eta_{зAB} = 0,9$).

Аналіз модельного ряду комерційних електромобілів показав, що на сьогоднішній день питомі затрати на пробіг 1 км шляху в режимі ЕРА (Environmental Protection Agency – американський вимірювальний цикл, що найкраще підходить для умов доріг України) коливаються від 0,133 кВт·год (BMW і3) до 0,261кВт·год (Toyota RAV4 EV), тобто від 13,3 кВт·год/100км пробігу до 26,1 кВт·год/100км пробігу відповідно (додаток А-Б) [99-116]. При цьому повна енергія АБ сучасних електромобілів знаходиться в межах (16÷100)кВт·год, а в перспективі можна очікувати на її збільшення, однак із заявлених на найближчі 5 років перспективних новинок електромобілів [117] значення енергії АБ ЕМ не перевищує 100 кВт·год.

Відповідно, якщо електромобіль в заданому діапазоні споживання енергії приїде на ЗСЕМ на основі ВЕУ, то необхідна енергія буферного акумулятора має визначатись згідно рівняння (2.37).

Як відомо [118], ККД повного циклу заряду-розряду літєвих АБ знаходиться в межах (80÷90)%. Прийmemo для розрахунків $\eta_{AB}^{BY\Phi} = 0,8$, а ККД заряду АБ електромобіля $\eta_{зAB} = 0,9$.

Згідно прийнятого енергія буферної АБ для гарантованого забезпечення роботи ЗС при заряді ЕМ з максимальною потребою в 60 кВт·год повинна становити:

$$E_{AB}^{BY\Phi} = k_{ZE} \cdot \frac{E_{ВП}^{ЗСЕМ} + E_{AB}^{EM}}{\eta_{AB}^{BY\Phi}} = 1,2 \cdot \frac{3 + \frac{60}{0,9}}{0,8} = 104,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (2.25)$$

Відповідно, ємність буферної АБ повинна становити:

$$C_{AB}^{BY\Phi} = \frac{E_{AB}^{BY\Phi}}{U_{AB}^{BY\Phi}} = \frac{104500}{600} = 174,2 A * год \quad (2.26)$$

Тобто, енергія буферної АБ повинна становити не менше, ніж $1,742 \cdot E_{AB}^{EM}$, де 1,742 є відношення $\frac{E_{AB}^{BY\Phi}}{E_{AB}^{EM}}$. Позначимо $K_{3E}^{BY\Phi} = \frac{E_{AB}^{BY\Phi}}{E_{AB}^{EM}}$ - коефіцієнт запасу енергії буферної АБ ЗСЕМ.

Розглянемо ймовірність приїзду на ЗСЕМ електромобілю із нульовою залишкової енергією (електромобіль з повністю розрядженими тяговими АБ притягнули за допомогою аварійного канату чи привезли евакуатором). В такому випадку енергія буферної АБ для гарантованого забезпечення роботи ЗСЕМ при заряді ЕМ з максимальною потребою в 80 кВт·год повинна становити:

$$E_{AB}^{BY\Phi} = k_{3E} \cdot \frac{E_{ВП}^{ЗСЕМ} + E_{AB}^{EM}}{\eta_{AB}^{BY\Phi}} = 1,2 \cdot \frac{3 + \frac{80}{0,9}}{0,8} = 137,83 кВт * год. \quad (2.27)$$

Відповідно, ємність буферної АБ повинна становити:

$$C_{AB}^{BY\Phi} = \frac{E_{AB}^{BY\Phi}}{U_{AB}^{BY\Phi}} = \frac{137830}{600} = 229,7 A * год \quad (2.28)$$

В даному випадку енергія буферної АБ повинна становити не менше, ніж $1,72 \cdot E_{AB}^{EM}$.

Зважаючи на змінний характер коефіцієнту запасу енергії буферної акумуляторної батареї від енергії заряду електромобіля, проаналізовано залежність $K_{AB}^{BY\Phi} = f(E_{AB}^{EM})$ в діапазоні заряду від 1кВт· год до 1000 кВт·год (рис.2.11). При цьому, на рис. 2.11 для біль кращого наочного відображення по вісі енергії приведені значення до 300 кВт кВт·год, оскільки, при подальшому збільшенні енергоємності акумуляторної батареї електромобіля величина коефіцієнту запасу буферної акумуляторної батареї зарядної станцій практично не змінюється, тобто його зміна не значна.

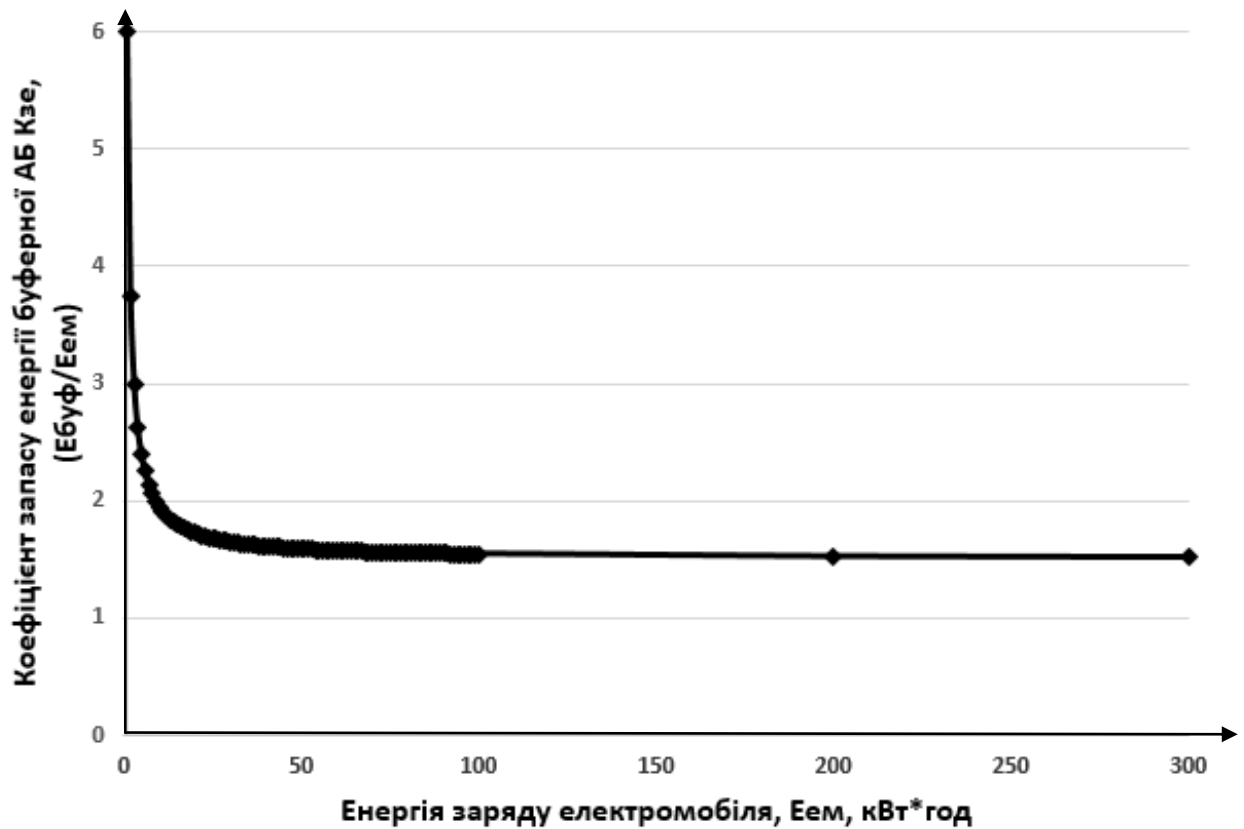


Рис. 2.11. Зміна коефіцієнта запасу енергії буферної АБ ЗСЕМ від енергії, необхідної для заряду електромобіля.

Якщо електромобіль, якому необхідна зарядна енергія в заданому діапазоні споживання, приїде на ЗСЕМ на основі ВЕУ, то необхідна енергія буферного акумулятору визначатиметься рівнянням:

$$E_{AB}^{BY\Phi} = K_{AB}^{BY\Phi} \cdot \left(E_{BII}^{ЗСЕМ} + \frac{1}{\eta_{AB}^3} \cdot U_{AB} \cdot \int_{C_0}^1 C_{зAB} \cdot \psi(C) \cdot dC \right). \quad (2.29)$$

Враховуючи відмічене вище, математичний опис системи АЗСЕМ на основі ВЕУ для гарантованого заряду одного електромобіля з максимальною енергоємністю АБ з розрахунку на один електромобіль можна подати наступним рівнянням:

$$K_3^{BEY} \cdot T \int_0^{\infty} P(v) \phi(v) dv = E_{AB}^{BY\Phi} = K_{AB}^{BY\Phi} \cdot \left(E_{BII}^{ЗСЕМ} + \frac{U_{зAB}}{\eta_{зAB}} \cdot \int_{C_0}^{C_{ном}} C_{зAB} \cdot \psi(C) \cdot dC \right). \quad (2.30)$$

Для застосування даної моделі до ЗСЕМ на два і більше електромобілів необхідно ввести складову n , що враховуватиме необхідну кількість

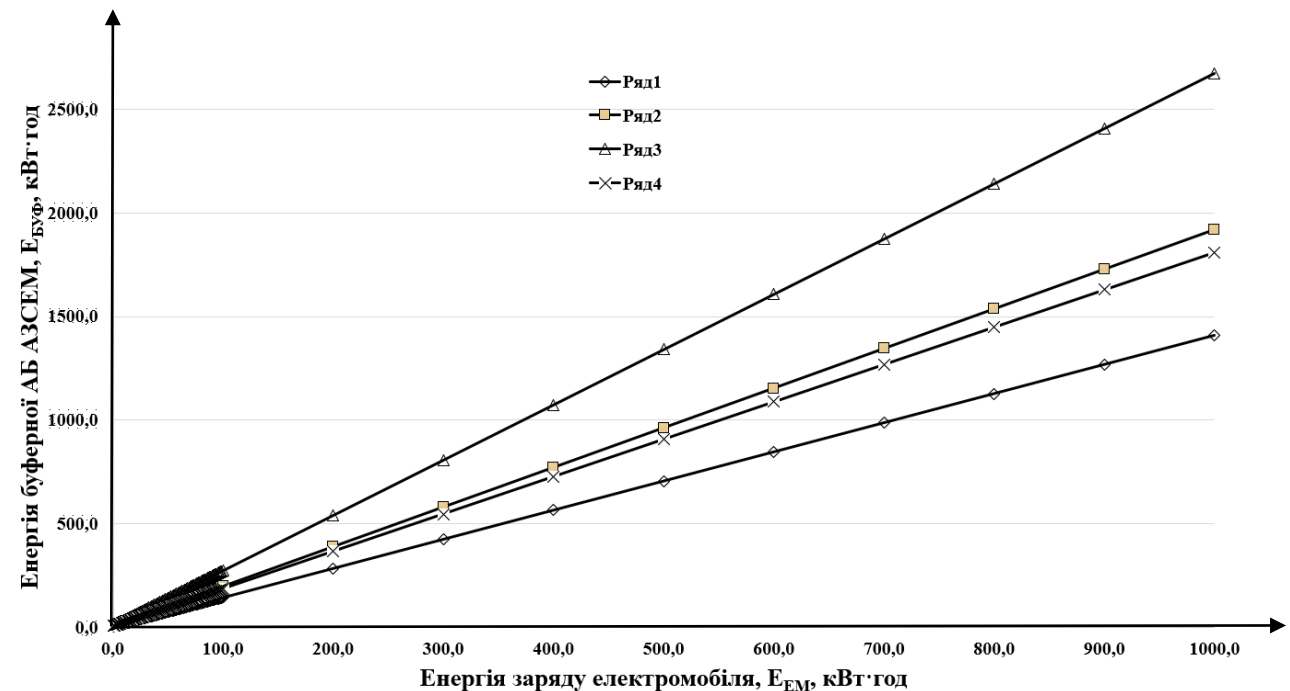
електромобілів, на які розраховуватиметься зарядна станція, тобто рівняння (2.30) набуде вигляду:

$$K_3^{BEV} \cdot T \int_0^{\infty} P(v) \phi(v) dv = E_{AB}^{BV\Phi} = K_{AB}^{BV\Phi} \cdot (E_{ВП}^{ЗСЕМ} + \frac{n \cdot U_{зАБ}}{\eta_{зАБ}} \cdot \int_{C_0}^{C_{ном}} C_{зАБ} \cdot \psi(C) \cdot dC). \quad (2.31)$$

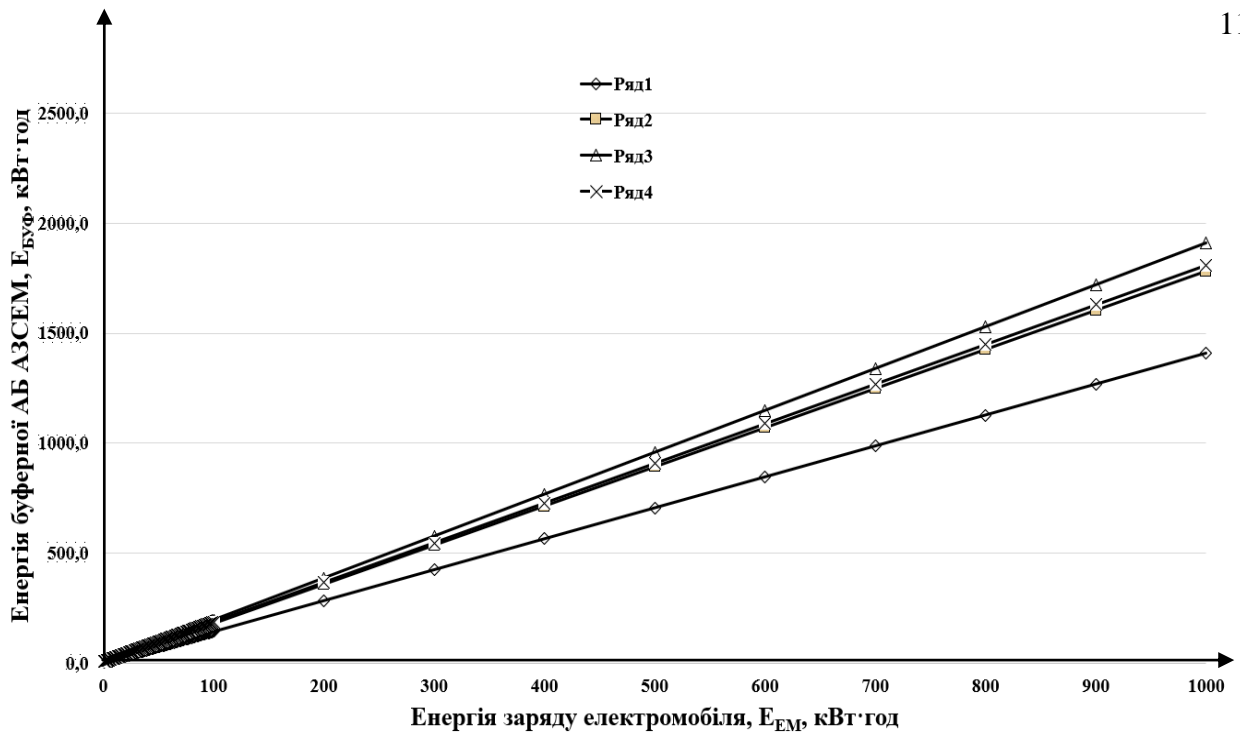
В результаті аналізу встановлено, що при збільшенні енергії АБ електромобілів до 100 кВт·год і вище коефіцієнт запасу наближається до значення 1,67, а енергії буферної АБ ЗСЕМ з даним запасом буде достатньо для гарантованого заряду всіх існуючих електромобілів, що випускаються серійно.

Отримана математична модель (2.46) зарядження акумуляторних батарей на ЗСЕМ з використанням вітроелектричної установки дозволяє проводити аналіз впливу типу електрохімічної системи АБ на запас енергії, необхідний для забезпечення зарядження електромобіля (рис. 2.12).

Аналіз залежностей приведених на рис. 2.12 показує, що як для буферу зарядної станції, так і для електромобілів різних типів найкращим варіантом буде застосування літєвої електрохімічної системи, що пояснюється кращими питомими характеристиками.



а)



б)

Рис. 2.12. Залежність енергоємності буферного акумулятора для зарядження ЕМ: а) від типу електрохімічної системи буферу; б) від типу тягової АБ електромобіля:
 ряд 1 – літєва електрохімічна система;
 ряд 2 – металогідридна електрохімічна система;
 ряд 3 – свинцево-кислотна електрохімічна система;
 ряд 4 – лужна нікель-кадмієва електрохімічна система.

Запропонована математична модель (2.46) ЗСЕМ з ВЕУ дозволяє, також, аналізувати вплив величини власного споживання зарядної станції на енергоємність буферної АБ (рис. 2.13). В результаті аналізу встановлено, що зростання власного споживання зарядної станції призводить до збільшення коефіцієнта запасу за умови однакових потреб для заряду електромобіля. За крайової умови (рис. 2.13, ряд 9), коли $E_{ВП}^{ЗСЕМ} = E_{зЕМ}$, коефіцієнт запасу буферної АБ залишається постійним, однак такі варіанти не є притаманними для зарядних станцій.

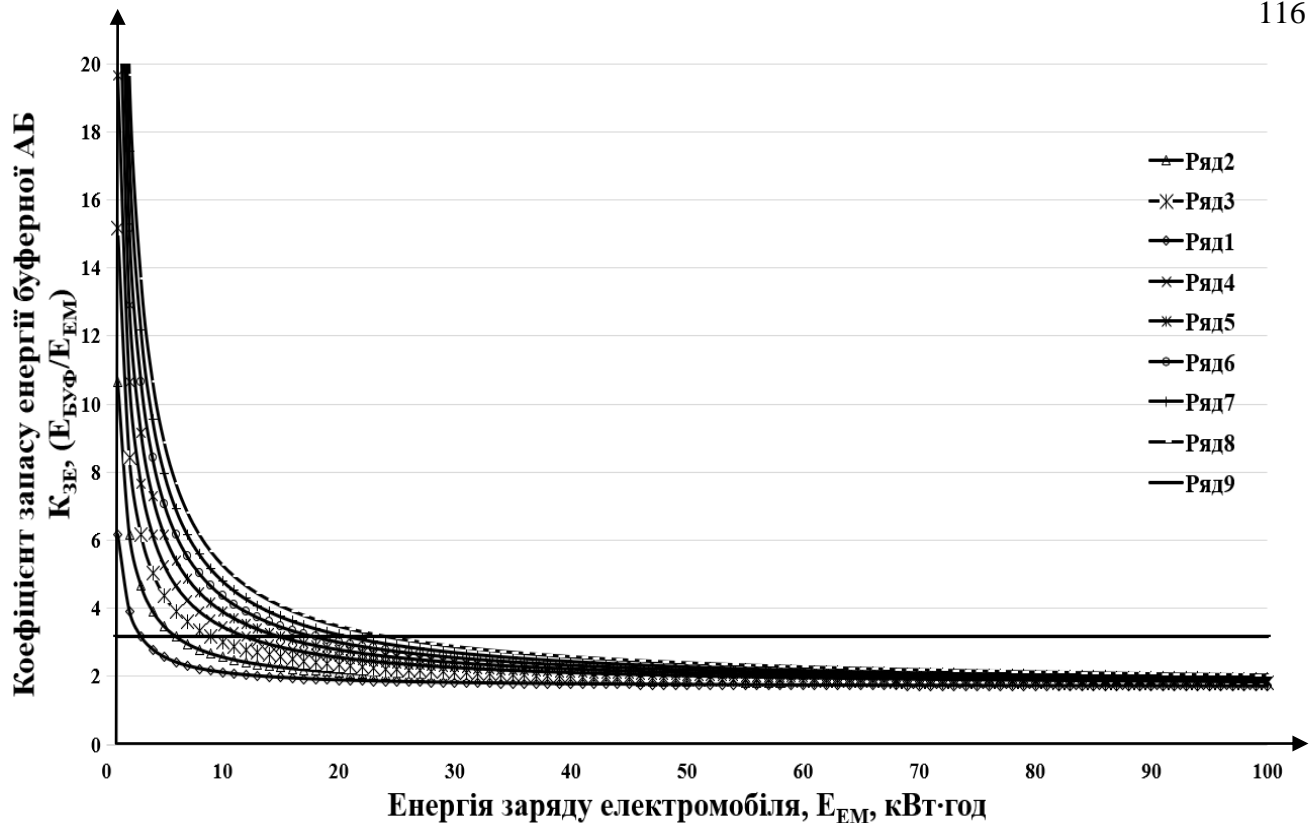


Рис. 2.13. Залежність коефіцієнту запасу буферного акумулятору для

зарядження ЕМ від величини власного споживання:

$$\text{ряд 1} - E_{\text{В.П.}}^{\text{АЗСЕМ}} = 3 \text{ кВт} \cdot \text{год}; \quad \text{ряд 2} - E_{\text{В.П.}}^{\text{АЗСЕМ}} = 6 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$\text{ряд 3} - E_{\text{В.П.}}^{\text{АЗСЕМ}} = 9 \text{ кВт} \cdot \text{год}; \quad \text{ряд 4} - E_{\text{В.П.}}^{\text{АЗСЕМ}} = 12 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$\text{ряд 5} - E_{\text{В.П.}}^{\text{АЗСЕМ}} = 15 \text{ кВт} \cdot \text{год}; \quad \text{ряд 6} - E_{\text{В.П.}}^{\text{АЗСЕМ}} = 18 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$\text{ряд 7} - E_{\text{В.П.}}^{\text{АЗСЕМ}} = 21 \text{ кВт} \cdot \text{год}; \quad \text{ряд 8} - E_{\text{В.П.}}^{\text{АЗСЕМ}} = 24 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$\text{ряд 9} - E_{\text{В.П.}}^{\text{АЗСЕМ}} = E_{\text{зЕМ}}.$$

2.6. Особливості зарядження акумуляторної батареї електромобіля від стаціонарної вітроелектричної станції

В цей же час необхідно відмітити те, що в основному використання ВЕУ, особливо великої потужності (100 кВт-7,5 МВт) здійснюється при сумісному функціонуванні зі стаціонарною електромережею, тобто електроенергія, що виробляється ВЕУ, подається до споживача через об'єднану енергосистему (як регіональну, так і загальнодержавну).

Однак у ряді випадків користувач електромобіля не завжди має можливість мати доступ до стаціонарної мережі електроживлення, тому питання поповнення енергії тягової акумуляторної батареї електромобіля стає актуальним.

Проблема може бути вирішена, наприклад, шляхом застосування автономної дизельної електростанції або фотоелектричної батареї. Однак у першому випадку необхідно витратити органічне паливо, що, крім економічних затрат, призводить до погіршення екології, а по-друге – кількість енергії, необхідна для зарядження АБ, обмежена певною частиною світлового дня та пори року [1].

Нижче розглядаються можливості зарядження тягових акумуляторних батарей електромобіля від ВЕУ та визначаються особливості процесу поповнення електроенергії електромобіля в залежності від різних факторів, що впливають на величину вироблення енергії ВЕУ.

В залежності від зміни швидкості вітру та величини навантаження стаціонарна ВЕУ постійного струму може працювати у двох режимах:

- 1) ВЕУ заряджає тягову акумуляторну батарею;
- 2) ВЕУ заряджає тягову акумуляторну батарею та одночасно живить зовнішнє навантаження.

Як відомо [38], вітер на різних висотах атмосфери Землі для кожної точки її поверхні характеризується швидкістю, яка є випадковою змінною в просторі й часі, що залежить від багатьох факторів: особливостей місцевості, сезону року, погодних умов. Відповідно всі процеси, прямо пов'язані з використанням поточного значення швидкості вітру, зокрема, генерація електроенергії у вітроелектричних установках, мають складний випадковий характер, їх характеристики мають статистичні розбіжності і невизначеність середніх очікуваних значень. Тому на сучасному рівні досліджень завдання оцінки цих процесів формулюється як створення імовірнісного опису випадкового процесу за допомогою розбивки всього процесу на окремі часові інтервали, у межах кожного з яких можна використовувати наближення стаціонарності, тобто

незалежності всіх обумовлених параметрів від часу. Як період стаціонарності можуть бути прийняті різні тимчасові інтервали з відповідною точністю опису залежно від реальних умов випадкового процесу. Зокрема, у деякому наближенні можна вважати процес стаціонарним у всьому розглянутому часі, наприклад, протягом року.

Розглянемо, як приклад, режим роботи вітроелектричної станції на зарядження тягової свинцево-кислотної АБ електромобіля. При проведенні розрахунків прийняті наступні умови:

Діапазон ємностей АБ ($100 \div 500$) А·год, 120В.

Мінімальний необхідний час зарядження АБ від ВЕУ становить 2920 год/рік (8 годин на добу).

Виріток електроенергії ВЕУ розраховувався за методикою, наведеною в [38].

Розрахунок проводиться з використанням, як приклад, технічних параметрів ВЕУ типу ZH5KW (Китай) та Polaris (США) встановленою потужністю 5 кВт; 7,5 кВт; 10 кВт; 20 кВт; 30 кВт; 50 кВт та 100 кВт.

Вихідна напруга ВЕУ приймається незмінною в межах 120 В.

Розглянемо режим роботи ВЕУ (типу ZH5KW встановленою потужність $P_{BTC} = 5$ кВт), при якому заряджається тягова акумуляторна батарея ємністю $Q_{AB} = 100$ А·год та напругою $U = 120$ В. Згідно [119] для ВЕУ даного типу характерна наступна залежність потужності від швидкості навігаючого повітряного потоку (рис. 2.14). Як приклад, приймається, що стаціонарна ВЕУ буде розташована поблизу міста Біла Церква, неподалік автотраси Київ-Одеса. На основі даних багаторічних метеорологічних спостережень, наведених в [120], проведено розрахунок середньодобового, місячного та річного виробітку електричної енергії ВЕУ. При розрахунках встановлено, що згідно прийнятих вище умов загальний виробіток електричної енергії протягом року складає 7716,02 кВт·год (рис. 2.15). При цьому згідно [119] виробіток електроенергії починається при швидкості вітру 3 м/с, однак вихідна потужність ВЕУ при даній швидкості становить 200 Вт, а відповідно струм – 1,67 А, що є недостатнім для реалізації

ефективного режиму заряду. В результаті подальших розрахунків встановлено, що ефективний заряд АБ буде відбуватись при швидкостях вітру більше 5 м/с.

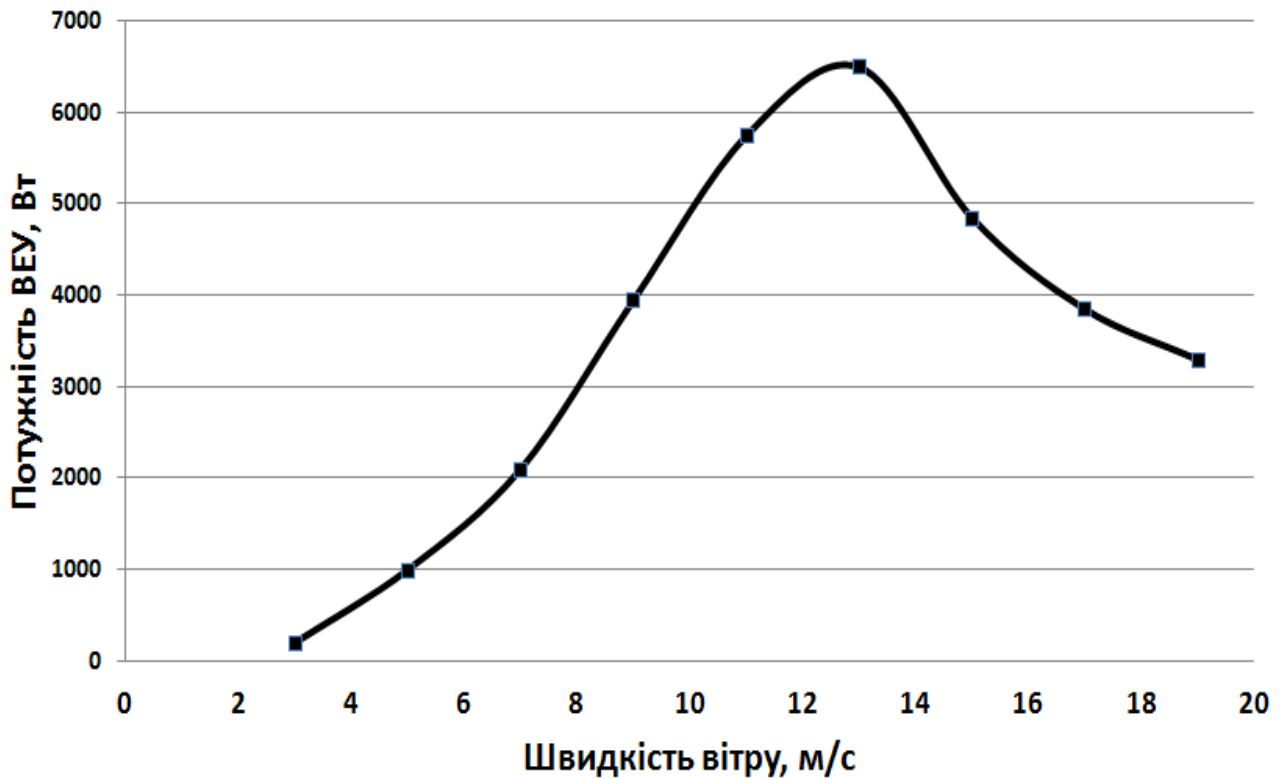


Рис. 2.14. Крива залежності потужності ВЕУ типу ZH5KW від швидкості вітру.

При використанні класичного методу зарядження тягової свинцево-кислотної АБ ємністю 100 А·год і напругою 120 В, що експлуатуються на електромобілях, від ВЕУ типу ZH5KW встановленою потужністю 5 кВт при класичному заряді використовується $W_{AB} = 6680,04$ кВт·год електричної енергії (рис. 2.15), тоді як сумарний показник виробітку складає $W_{ЗАГ} = 7716,02$ кВт·год. Використання низькопотенційної електричної енергії, виробленої ВЕУ при малих швидкостях вітру (а для ВЕУ даного типу це 1035,98 кВт·год), необхідно проводити шляхом застосування імпульсного режиму зарядження АБ, переваги використання якого викладені в [1].

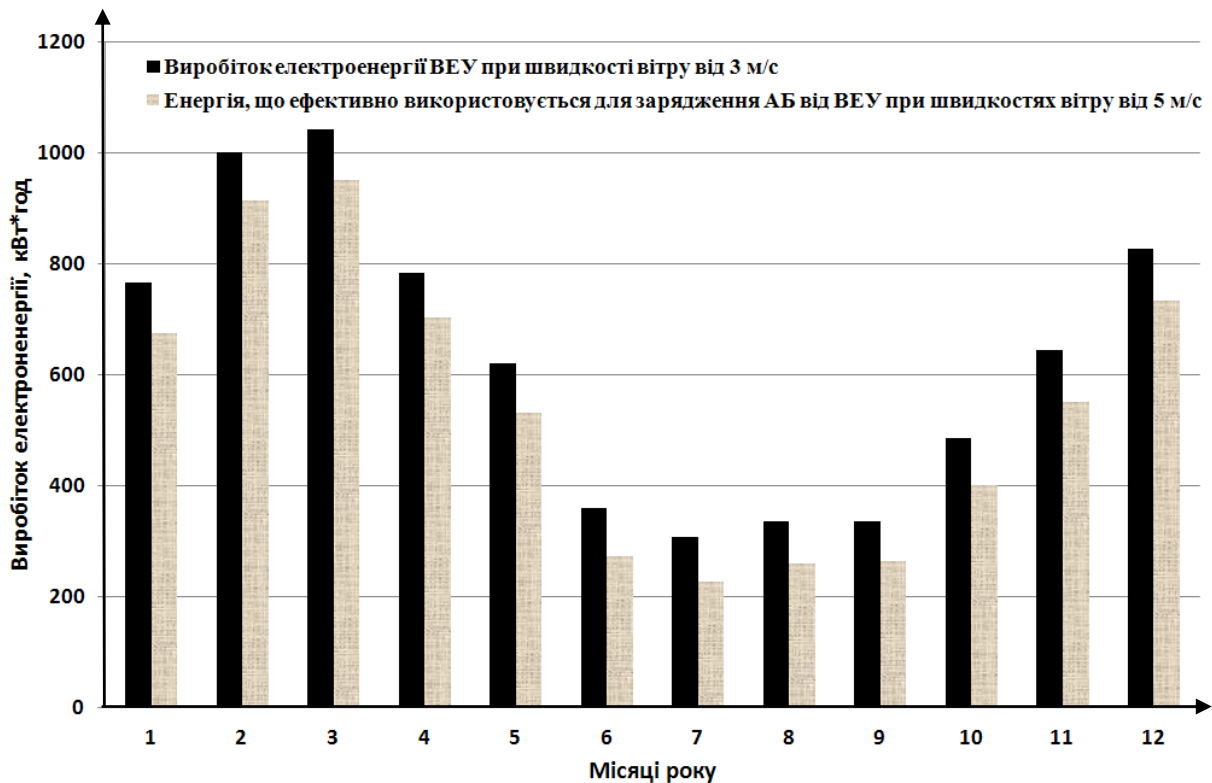


Рис. 2.15. Зведена діаграма виробітку електричної енергії ВЕУ типу ZH5KW та її використання для зарядження АБ по місяцях.

Враховуючи вимогу мінімальної обов'язкової тривалості зарядження АБ від ВЕУ 8 годин на добу, проведений розрахунок середньодобового показника виробництва електричної енергії, який показав, що ВЕУ потужністю 5 кВт у прийнятій місцевості встановлення (м. Біла Церква, Київська область) дає можливість забезпечити ефективний заряд акумуляторної батареї ємністю 100 А·год. напругою 120 В протягом усього року за умови використання двох методів зарядження АБ – класичного постійнострумового та імпульсного (таблиця 2.1) [1].

Аналіз наведених даних (таблиця 2.1) показує, що для виконання умови щодо обов'язкової кількості енергії, яку необхідно подати на заряд АБ щодоби (9,6 кВт·год/добу), протягом червня-вересня необхідне обов'язкове додаткове застосування імпульсного методу зарядження, тоді як протягом інших місяців виробленої енергії при швидкостях вітру більше 5 м/с достатньо для зарядження АБ класичним методом. Слід також враховувати, що застосування імпульсного методу зарядження АБ збільшить сумарний час заряду акумулятора. Однак,

якщо розглянути режим роботи ВЕУ з точки зору ефективності використання виробленої нею енергії, то використання імпульсного методу зарядження акумуляторів підвищує показник використання енергії від енергогенеруючого джерела на 13,43%.

Таблиця 2.1.

Зведені показники розрахунків середньодобового виробництва електричної енергії ВЕУ встановленою потужністю 5 кВт та енергії, що використовується для зарядження АБ ємністю 100 А·год та напругою 120 В класичним методом та імпульсним методом

| Місяці року | Мінімальна необхідна кількість електроенергії для зарядження АБ ємністю 100 А·год, 120 В | Середньодобовий показник вироблення електроенергії ВЕУ (5 кВт) по місяцях, кВт·год | Середньодобовий показник використання електроенергії від ВЕУ при класичному методі зарядження АБ (5 кВт) по місяцях, кВт·год | Середньодобовий показник використання електроенергії від ВЕУ при імпульсному методі зарядження АБ (5 кВт) по місяцях, кВт·год |
|----------------------|--|--|--|---|
| 1 | 9,6 | 24,68 | 21,75 | 2,92 |
| 2 | | 38,82 | 35,54 | 3,28 |
| 3 | | 34,45 | 31,56 | 2,89 |
| 4 | | 27,24 | 24,49 | 2,75 |
| 5 | | 20,13 | 17,22 | 2,90 |
| 6 | | 12,49 | 9,50 | 2,99 |
| 7 | | 9,89 | 7,30 | 2,59 |
| 8 | | 10,86 | 8,38 | 2,47 |
| 9 | | 11,58 | 9,13 | 2,45 |
| 10 | | 15,96 | 13,24 | 2,71 |
| 11 | | 22,28 | 19,11 | 3,16 |
| 12 | | 26,65 | 23,67 | 2,97 |
| Середнє річне | | 21,14 | 18,3 | 2,84 |

Аналогічно проведені розрахунки щодо вироблення електричної енергії ВЕУ різної встановленої потужності згідно запропонованого ряду (умова 4) для попередньо прийнятої місцевості (м. Біла Церква, Київська область), які показали подібні результати.

На основі проведених розрахунків отримано залежність між потужністю ВЕУ та ємністю АБ (рис. 2.16) з урахуванням метеорологічних умов місцевості (швидкості вітру), використання якої дозволяє провести вибір потужності ВЕУ в залежності від потреб електромобіля (різна ємність тягового акумулятора) [1].

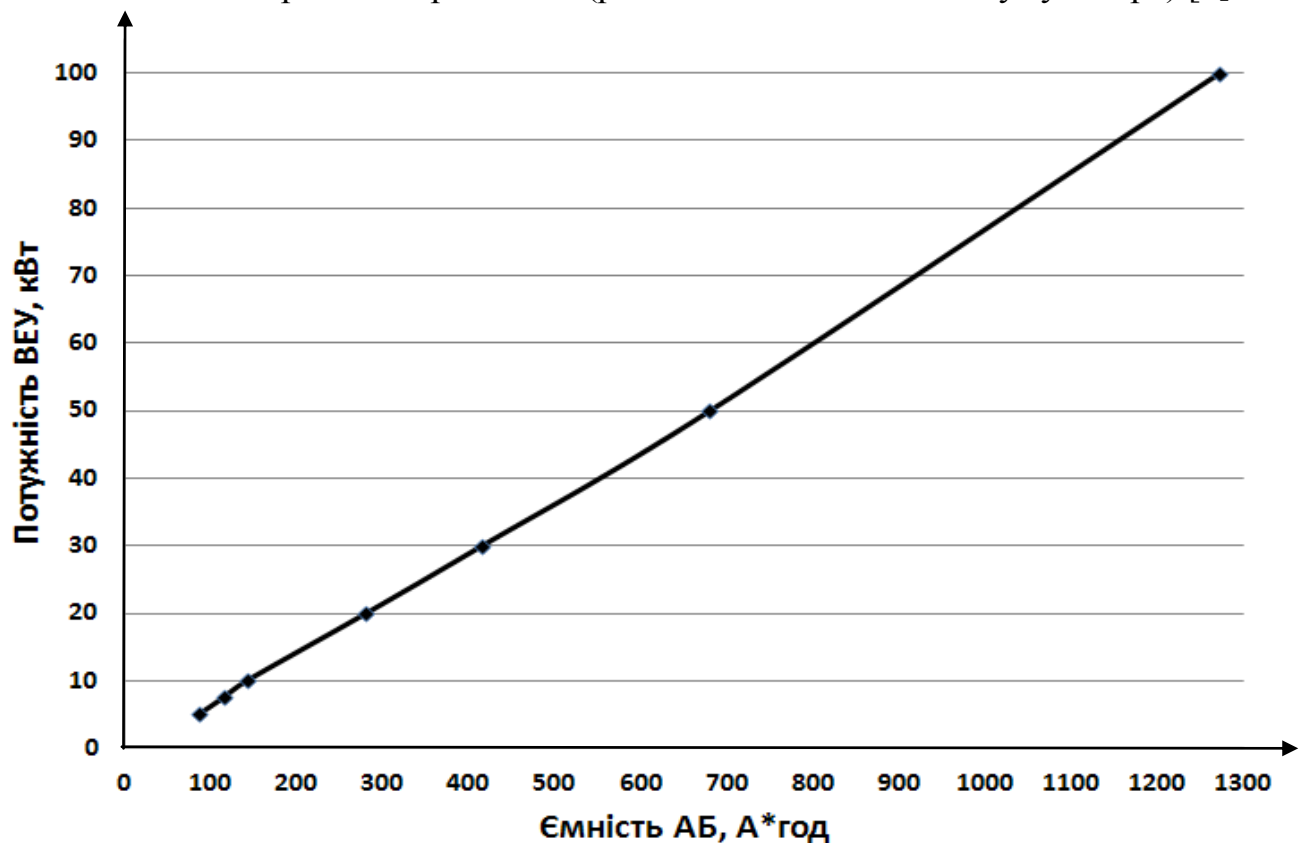


Рис. 2.16. Залежність потужності ВЕУ від ємності АБ електромобіля, що забезпечує необхідну для зарядження кількість енергії.

2.7. Застосування теорії масового обслуговування для описання імовірнісних параметрів процесу заряду електромобілів від відновлюваних джерел енергії

Враховуючи стрімкий розвиток ринку електромобілів з однієї сторони [55] та необхідність збільшення мережі автозаправних станцій (ЗС), в тому числі і на

основі ВДЕ з іншої [4], постає актуальне питання побудови математичної моделі роботи ЗС на основі ВДЕ, яка враховуватиме специфіку виробітку електроенергії з відновлюваних джерел, проміжне (буферне) зберігання енергії та випадковий характер процесів зарядки електромобілів (ЕМ).

Згідно запропонованої моделі [7] ЗСЕМ від ВЕУ не визначеною залишається функція $\psi(c)$, що враховує випадковий характер та частоту настання процесу заряду акумуляторної батареї (АБ ЕМ).

Розглянемо можливість застосування теорії масового обслуговування для описання функції $\psi(c)$.

Теорія масового обслуговування призначена для вирішення ймовірнісних задач, що пов'язані з роботою систем масового обслуговування (СМО), до яких можна віднести обслуговування ЕМ на зарядній станції. Дана система складається із певного числа обслуговуючих одиниць, які називаються каналами обслуговування [121]. В нашому випадку зарядні пристрої (ЗП) розташовані на одній ЗС ЕМ. Системи масового обслуговування можуть бути одно– (1 зарядний пристрій) та багатоканальними (2 і більше зарядних пристроїв).

Робота системи масового обслуговування полягає у виконанні потоку вимог або заявок, що поступають на неї. При цьому заявки поступають одна за іншою в деякі випадкові моменти часу.

Обслуговування отриманої заявки (наприклад, заряд електромобіля) триває певний час, після чого канал звільняється та знову готовий для приймання наступної заявки (заряду наступного ЕМ). Предметом теорії масового обслуговування (ТМО) є встановлення залежності між характером потоку заявок (як часто ЕМ заїжджають на ЗС ЕМ, та на який проміжок часу), продуктивність каналу (спроможністю одного ЗП зарядити певну кількість електромобілів за одиницю часу), кількістю каналів (ЗП на ЗС ЕМ) та ефективністю обслуговування (пропускною здатністю).

Пропускна здатність в загальному випадку залежить не тільки від параметрів системи, але й від характеру заявок. Якби заявки на заряд електромобілів поступали регулярно через задані проміжки часу і

обслуговування такої заявки мало б визначену (постійну) тривалість, то розрахунок пропускної здатності системи не викликав би ніяких складностей. На практиці, зазвичай власники електромобілів не домовляються між собою, коли вони заряджатимуть свій електромобіль, моменти надходження заявок є випадковими, а в більшості випадків випадковою є і тривалість обслуговування заявки (що визначатиметься рівнем залишкового заряду АБ ЕМ). В зв'язку з цим процес роботи системи (а в нашому випадку ЗС ЕМ від ВДЕ) протікає нерегулярно, і в потоці заявок на заряд електромобілів утворюються місцеві скупчення і розрідження. Скупчення ЕМ на заряд можуть призвести або до відмов в обслуговуванні (через обмеження кількості ЗП) або до утворення черг. Розрідження можуть призвести до невиробничих простоїв окремих каналів (ЗП) або систем (ЗС в цілому).

Таким чином, функціонування системи ЗС ЕМ від ВДЕ представляє собою випадковий процес. Для надання рекомендацій по раціональній організації системи ЗС ЕМ від ВДЕ, з'ясування її пропускної здатності та встановлення вимог до її роботи необхідно вивчити випадковий процес, що протікає в системі, і описати його математично.

Отже, випадковий процес, що протікає в системі масового обслуговування (ЗС ЕМ від ВДЕ) полягає в тому, що система у випадкові моменти часу переходить з одного стану в інший: змінюється число зайнятих каналів (ЗП), число заявок, що стоять у черзі (ЕМ в черзі) і так далі. СМО представляє собою фізичну систему дискретного типу з кінцевою кількістю станів, а перехід системи з одного стану в інший відбувається стрибкоподібно в момент, коли відбувається якась подія (приїзд нового електромобіля на ЗС, звільнення ЗП, виїзд ЕМ з черги і так далі).

Розглянемо нашу фізичну систему (ЗСЕМ від ВДЕ) X зі скінченною кількістю станів: X_1, X_2, \dots, X_n .

В будь-який момент часу t система X може бути в якомусь з цих станів. Якщо позначити $P_k(t)$ ($k=1, 2, \dots, n$) як ймовірність того, що в момент часу t система буде знаходитись в стані x_k , то для будь-якого t :

$$\sum_k p_k(t) = 1. \quad (2.32)$$

Сукупність ймовірностей $P_k(t)$ для кожного моменту часу t характеризує даний переріз випадкового процесу, що протікає в системі. Ця сукупність не є вичерпною характеристикою процесу, але досить добре його описує.

Для системи масового обслуговування (в тому числі і нашого випадку) основним фактором, що обумовлює процеси в ній, є потік заявок (в даному випадку на заряд електромобіля). Тому математичне моделювання починається з описання потоку заявок.

Під потоком подій в теорії ймовірності розуміють послідовність подій, що відбуваються одна за іншою в певні моменти часу (випадок потоку заявок на заряд електромобілів повністю підпадає під дане визначення). Потік однорідних подій можна відобразити як послідовність точок t_1, t_2, \dots, t_k на числовій вісі (рис.2.17), що відповідають моментам появи подій.



Рис. 2.17. Типове відображення потоку однорідних подій.

Потік подій називається регулярним, якщо події відбуваються одна за одною через чітко визначені (задані) проміжки часу. Однак такий потік не є характерним для системи масового обслуговування на ЗС ЕМ від ВДЕ. Для нашого випадку типовим є випадковий потік заявок.

Для розгляду потоку подій, що володіють певними простими властивостями, вводять ряд визначень.

1. Потік подій називається стаціонарним, якщо ймовірність попадання того чи іншого числа подій на ділянку часу довжиною τ (рис. 2.17) залежить лише від довжини ділянки і не залежить від того, де саме на вісі $0t$ розміщена дана ділянка.

2. Потік подій називається потоком без післядії, якою для будь-яких ділянок часу, що не перекриваються, число подій, які попадають на одну із них, не залежить від числа подій, що потрапляють на інші ділянки.

3. Потік подій називається ординарним, якщо ймовірність попадання на елементарну ділянку Δt двох або більше подій настільки мала, що нею можна знехтувати у порівнянні з ймовірністю попадання однієї події.

Якщо потік подій володіє усіма трьома властивостями, то він називається простим потоком (або стаціонарним пуасонівським потоком). Це пояснюється тим, що при дотриманні умов 1÷3 число подій, що потрапляють на будь-який фіксований інтервал часу, буде розподілене по закону Пуасона. Випадкова величина X (яка може приймати тільки цілі, невід'ємні значення: 0, 1, 2, ... m) розподілена по закону Пуасона, якщо ймовірність того, що вона прийме певне значення m , виражається формулою:

$$P_m = \frac{a^m}{m!} \cdot e^{-a} (m = 0, 1, \dots), \quad (2.33)$$

де: a – певна позитивна величина, що називається параметром закону

Пуасона, яку ще називають математичним очікуванням випадкової величини X , оскільки:

$$m_x = a \cdot e^{-a} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a^k}{k!} = a \cdot e^{-a} \cdot e^a = a. \quad (2.34)$$

Дисперсія випадкової величини X :

$$D_x = a_2 - m_x^2 = a^2 + a - a^2 = a, \quad (2.35)$$

тобто дисперсія випадкової величини, розподіленої по закону Пуасона, дорівнює її математичному очікуванню a .

Розглянемо більш детально умови 1÷3 для розуміння, чому вони відповідають властивостям потоку заявок і за рахунок чого вони можуть порушуватись.

1. Умові стаціонарності відповідає потік заявок, ймовірнісні характеристики якого не залежать від часу. Для стаціонарного потоку характерна постійна густина (середнє число заявок на одиницю часу). На практиці часто

зустрічаються потоки заявок, які можуть розглядатись як стаціонарні. Наприклад, потік заявок на заряд електромобілів на відрізок часу з 12 до 13 години може вважатись стаціонарним, однак цей же самий потік, але на протязі доби вже не може вважатись стаціонарним (оскільки в нічний час кількість рухомих електромобілів скорочується і, відповідно, кількість заявок на заряд буде значно меншою). Використання умови стаціонарності потоку заявок на АЗС ЕМ є доцільною при аналізі роботи системи в стаціонарних умовах, або на окремих часових інтервалах.

2. Умова відсутності післядії означає, що заявки поступають в систему незалежно одна від одної. Наприклад, приїзд певного одиночного в даний конкретний момент часу електромобіля на ЗС ЕМ не залежить від інших електромобілів, які приїхали до того (для вхідного потоку). Однак слід відмітити, що вихідний потік (від'їзд електромобіля від зарядного пристрою) зазвичай має післядію, навіть якщо вхідний потік її не має. Наприклад, для СМО ЗС ЕМ від ВДЕ час обслуговування (заряду) однієї заявки становить $t_{зар}$. Тоді в потоці виконаних заявок мінімальний час між заявками, що залишають ЗС ЕМ буде становити $t_{зар}$. Досить просто переконатись, що наявність такого мінімального інтервалу неминуче призводить до післядії.

3. Умова ординарності означає, що заявки приходять одиничними, а не спареними чи потрійними. Наприклад, потік одиничних електромобілів, що заїжджають на ЗС ЕМ при довільному русі по дорозі, буде ординарним. І потік даного прикладу не буде ординарним, якщо електромобілі ідуть в колоні з двох і більше транспортних засобів і які одночасно заїдуть на ЗС ЕМ.

Оскільки:

$$\alpha = \lambda \cdot \tau, \quad (2.36)$$

де: λ – густина потоку (середнє число подій, що приходиться на одиницю часу), то ймовірність того, що за час τ відбувається рівно m подій (замовлень на заряд електромобілів) становить:

$$P_m(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^m}{m!} e^{-\lambda\tau}. \quad (2.37)$$

Ймовірність того, що ділянка виявиться пустою (не відбудеться жодної події) становить:

$$P_0(\tau) = e^{-\lambda\tau}. \quad (2.38)$$

Щільність розподілу визначається як:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ при } (t > 0). \quad (2.39)$$

Закон розподілу з щільністю (2.39) називається показниковим (або експоненційним) (рис.2.18).

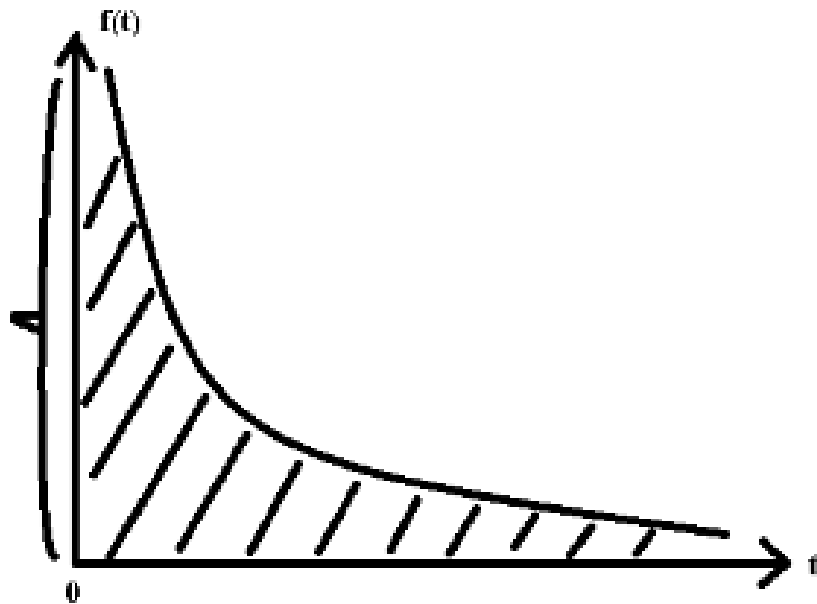


Рис. 2.18. Показниковий закон розподілу з густиною потоку λ .

Якщо потік подій нестационарний, то його основною характеристикою є миттєва густина $\lambda(t)$. Миттєва густина потоку представляє собою границю відношення середнього числа подій, що надходять на елементарну ділянку часу $(t, t + \Delta t)$ до довжини цієї ділянки, коли остання прямує до нуля:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{\Delta t} = m'(t), \quad (2.40)$$

де: $m(t)$ - математичне очікування числа подій на ділянці $(0, t)$.

Такий потік називається нестационарним пуассонівським потоком. Для такого потоку число подій, що потрапляють на ділянку довжини τ з початком в точці t_0 , підпорядковується закону Пуассона:

$$P_m(\tau, t_0) = \frac{a^m}{m!} e^{-a} \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (2.41)$$

де a – математичне очікування числа подій на ділянці від t_0 до $t_0 + \tau$, дорівнює:

$$a = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \lambda(t) \cdot dt. \quad (2.42)$$

В даному випадку величина a залежить не тільки від довжини τ ділянки, але й від її розташування на вісі $0t$.

Густина розподілу для нестационарного потоку подій визначається як:

$$f_{t_0}(t) = \lambda(t_0 + t) e^{-\int_{t_0}^{t_0 + t} \lambda(t) dt} \quad (t > 0). \quad (2.43)$$

Не дивлячись на те, що структура нестационарного пуассонівського потоку дещо складніша, ніж найпростішого, він дуже зручний в практичних застосуваннях: головна властивість найпростішого потоку – відсутність наслідку – в ньому збережено. А саме, якщо ми зафіксуємо на осі $0t$ довільну точку t_0 , то закон розподілення $f_{t_0}(t)$ часу T , що визначає цю точку від найближчої по часу майбутньої події, не залежить від того, що відбувалося на проміжку часу, що передує t_0 та в самій точці t_0 (тобто чи з'явилися раніше інші події і коли саме).

Ще один важливий параметр, який необхідно врахувати при описанні СМО на прикладі ЗСЕМ від ВДЕ, є час обслуговування електромобілів, який визначатиме продуктивність самої СМО. Час обслуговування СМО визначається, зазвичай, кількістю каналів n (кількість зарядних пристроїв на одній ЗСЕМ) та швидкодією кожного каналу (швидкістю заряду кожного ЗП). Як правило, час обслуговування однієї заявки позначають як $T_{об}$ і цей параметр є однією з найважливіших величин СМО.

При розгляді випадкової величини $T_{об}$ її виражають через функцію розподілу $G(t)$.

$$G(t) = P(T_{об} < t), \quad (2.44)$$

а $g(t)$ – щільність розподілу:

$$g(t) = G'(t). \quad (2.45)$$

Для вирішення практичних задач особливий інтерес представляє випадок, коли величина $T_{об}$ має показниковий розподіл:

$$g(t) = \mu e^{-\mu t} \quad \text{при } (t > 0), \quad (2.46)$$

де: μ - величина, обернена середньому часу обслуговування однієї заявки:

$$\mu = \frac{1}{m_{t_{об}}}, \quad m_{t_{об}} = M[T_{об}]. \quad (2.47)$$

Роль, яку відіграє в ТМО показниковий закон розподілу величини $T_{об}$, пов'язана із властивістю даного закону. В даному випадку ця властивість (особливість) формулюється наступним чином: якщо в якийсь момент часу t_0 відбувається обслуговування заявки, то закон розподілу решти часу обслуговування не залежить від того, скільки часу обслуговування вже продовжувалось.

Показниковим законом добре описувати ті випадки, коли щільність розподілу часу обслуговування по тим або іншим причинам спадає при зростанні аргументу t . Наприклад, основна маса автомобілів заряджається швидко (достатньо заряду в акумуляторі, чи прогресивна технологія заряду, чи малі авто), рідше бувають затримки (дуже розряджені, великі авто, застарілі, тощо), і дуже рідко – ті, що потребують складної тривалої процедури (переналаштування, дрібний ремонт тощо). Інший варіант – окремі зарядні пристрої працюють із замовниками, які потребують мало часу, тому їх пропускна можливість вища.

Показниковий закон не є універсальним законом розподілу часу обслуговування. Досить часто час обслуговування краще описується законом Ерланга. Однак, пропускна здатність та інші характеристики СМО порівняно мало залежать від виду закону розподілу часу обслуговування, а залежать від

його середнього значення $m_{t_{об}}$. Тому в ТМО частіше за все користуються припущенням, що час обслуговування розподілений по показниковому закону. Ця гіпотеза дозволяє сильно спростити математичний апарат, що застосовується для вирішення задач масового обслуговування і, в ряді випадків, отримати прості аналітичні формули для характеристик пропускної здатності системи.

2.8. Висновки до розділу

1. Вперше запропоновано математичну модель процесу зарядження акумуляторної батареї на зарядній станції електромобілів з використанням вітроелектричних установок для зарядження електричних транспортних засобів з урахуванням нелінійного характеру виробітку електроенергії та стохастичного характеру її споживання протягом доби, який окрім класичних моделей роботи ВЕУ та АБ враховує коефіцієнт запасу енергії, необхідний для ефективної роботи зарядної станції.

2. Вперше запропоновано рівняння визначення енергії заряду тягової акумуляторної батареї електромобіля в яке включено функцію $\psi(C)$, що враховує випадковий характер та частоту настання процесу зарядження АБ електромобіля.

3. На основі експериментальних даних швидкості вітру в результаті моделювання в програмному середовищі Matlab визначене співвідношення енергетичних показників буферної акумуляторної батареї та акумулятора електромобілю для конкретних метеорологічних умов.

4. Запропонований підхід забезпечення гарантованого заряду електромобіля від вітроелектричної установки може бути поширеним для інших потенційно перспективних місць встановлення автономних зарядних станцій електромобілів для різних регіонів України при наявності об'єктивних вихідних даних по розподілу швидкості вітру.

5. Розглянуто теоретичні основи стаціонарного та нестаціонарного процесів СМО на прикладі ЗСЕМ та отримані математичні вирази ймовірності настання випадкового процесу заряду електромобілів, що визначатимуть

потребу в електричній енергії, отриманій від відновлюваних джерел. На основі існуючих підходів до описання продуктивності СМО розглянуто час обслуговування заявки та обґрунтовано застосування показникового закону до його описання.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ ОПИСАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАРЯДЖЕННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ НА ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЯХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ТА БУФЕРНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ

3.1. Існуючі теоретичні підходи до математичного описання процесу перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну фотоелектричними установками

Складність моделювання виробництва електричної енергії фотоелектричною батареєю $E_{ФЕБ}$ обумовлюється випадковим характером інтенсивності сонячного випромінювання (яке виступає в ролі енергетичного ресурсу), та нелінійним алгоритмом перетворення енергії Сонця в електричну, що вносить додаткову невизначеність через особливості роботи фотоелектричних установок в різних кліматичних умовах та різних рельєфних ландшафтах.

Зважаючи на це актуальною науковою задачею є розроблення математичного опису системи зарядної станції електромобілів ЗСЕМ з використанням фотоелектричних установок (ФЕУ) та буферних акумуляторів енергії для вирівнювання виробітку та споживання електричної енергії.

Для вирішення даної задачі необхідно провести аналіз існуючих підходів до моделювання процесу перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію шляхом застосування фотоелектричних установок. При цьому необхідно враховувати специфіку роботи акумуляторних батарей. На основі проведеного аналізу необхідно запропонувати модель роботи зарядної станції електромобілів (ЗСЕМ) на основі ФЕБ.

Інтенсивність сонячного випромінювання, що визначає енергію, яка потрапляє на одиницю площі поверхні за одиницю часу, так само як і енергія

вітрового потоку, є випадковою величиною, відповідно виробництво електроенергії фотоелектростанціями має змінний характер.

Описання надходження сонячного випромінювання проводять бета, гама, експоненційним, геометричним та логнормальним розподілами.

Потужність ФЕБ обмежена певною величиною, яка дорівнює номінальній (установленій) потужності $P_{\text{ФЕБ}}$ незалежно від величини інтенсивності сонячного випромінювання. Графічний приклад типової кривої потужності приведено на рис. 3.1. З однієї сторони, аналіз сімейства вольт-амперних характеристик показує прямо пропорційну залежність струму ФЕБ від інтенсивності сонячної радіації (G , Вт/м²). З іншої сторони, приведені ВАХ показують нелінійність залежностей $I_{\text{ФЕБ}} = f(U)$, які змінюються залежно від інтенсивності випромінювання і температури. Це в кінцевому результаті визначатиме і нелінійну залежність $P_{\text{ФЕБ}} = f(U)$, оскільки потужність ФЕБ $P_{\text{ФЕБ}}$, як джерела електричної енергії, в найпростішому випадку виглядає як добуток: $P_{\text{ФЕБ}} = U_{\text{ФЕБ}} \cdot I_{\text{ФЕБ}}$.

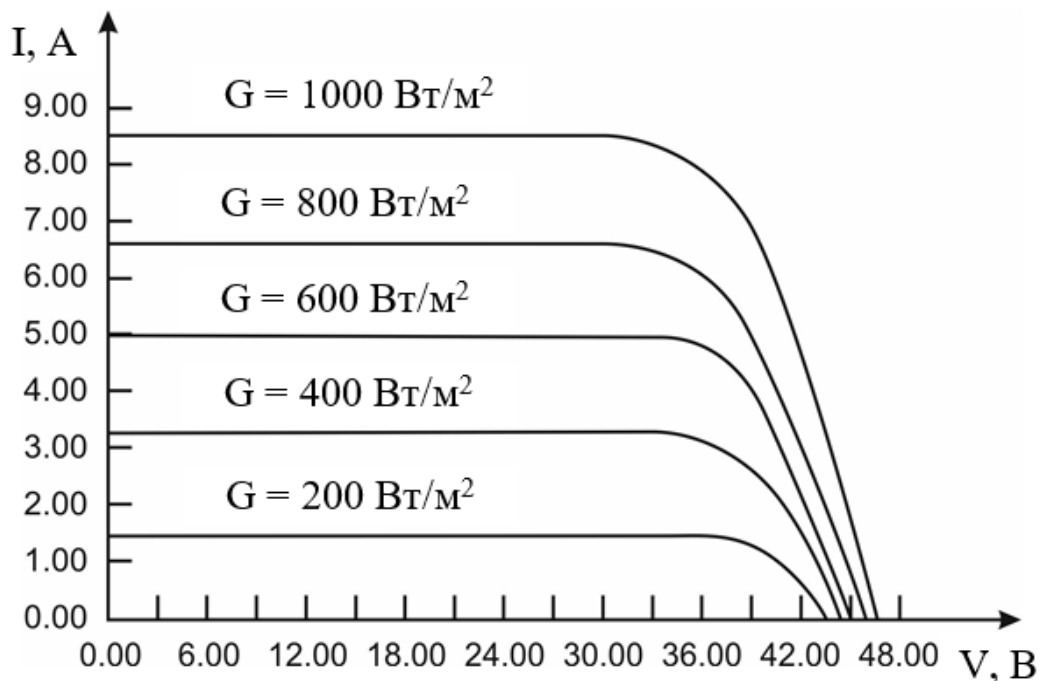


Рис. 3.1. Сімейство типових вольт-амперних характеристик фотомодуля в залежності від інтенсивності сонячного випромінювання.

Згідно [38] модель потужності фотобатарей виражається наступним рівнянням:

$$P_{\Phi EB} = \eta_{\Phi EB} \cdot F_{\Phi EB} \cdot G_t = \eta_r \cdot \eta_{pc} \cdot \left(1 - \beta(T_c - T_{ref})\right) \cdot A_{\Phi EB} \cdot G_t, \quad (3.1)$$

де: $F_{\Phi EB}$ – площа фотобатарей, м²;

G – відносна інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м²;

$\eta_{\Phi EB} = \eta_r \cdot \eta_{pc} \cdot [1 - \beta(T_c - T_{ref})]$ – коефіцієнт ефективності;

η_r – паспортна ефективність фотомодуля;

η_{pc} – ефективність використання потужності, рівна 1 при досягненні точки максимальної потужності MPPT (Maximum Perfect Power Tracker);

β – температурний коефіцієнт ефективності, вважається постійним для конкретного виду напівпровідника (наприклад для кремнієвих фотоелементів 0,004÷0,006 °C⁻¹);

T_{ref} – паспортна температура фотоелементів, °C;

T_c – поточна температура фотоелементів, °C, яка розраховується наступним чином:

$$T_c = T_a + \left[\left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \right] \cdot G_t, \quad (3.2)$$

де: T_a – температура навколишнього середовища, °C;

$NOCT$ – номінальна температура роботи фотоелементів, °C.

Оскільки параметри η_{pc} , β , $NOCT$ та $F_{\Phi EB}$ залежать від типу фотомодуля та задаються виробником, то незалежними випадковими величинами виступають температура та інтенсивність сонячного випромінювання. Аналіз рівняння (3.1) показує лінійний характер залежності вихідної потужності від інтенсивності сонячного випромінювання.

Згідно роботи [122], визначення вихідної потужності фотоелектричної батареї проводиться наступним чином:

$$P_{\Phi EB}(t) = P_{\Phi EBном} \cdot k_{зе} \cdot \frac{\overline{I_{\beta}(t)}}{I_{cy}} \left[1 + \alpha_p (v_{\Phi EB}(t) - v_{cy}) \right], \quad (3.3)$$

де: $P_{\Phi EB}(t)$ – вихідна потужність ФЕБ, кВт;

$P_{\text{ФЕБном}}$ – номінальна потужність ФЕБ при стандартних умовах, кВт;

$k_{з.е.}$ – коефіцієнт зниження ефективності ФЕБ;

$\overline{I_p(t)}$ – середнє значення густини потоку сонячного випромінювання, яке потрапляє на поверхню ФЕБ за годинний інтервал, Вт/м²;

I_{cy} – густина потоку сонячного випромінювання, яке потрапляє на поверхню ФЕБ при стандартних умовах, Вт/м²;

α_p – температурний коефіцієнт потужності ФЕБ, °С⁻¹ (як правило величина α_p від'ємна, що означає зменшення ефективності ФЕБ з підвищенням температури);

$v_{\text{ФЕБ}}(t)$ – поточна температура ФЕБ, °С;

v_{cy} – температура ФЕБ при стандартних умовах, °С.

Під стандартними умовами мається на увазі: густина сонячного випромінювання рівна 1000 Вт/м², температура поверхні ФЕБ рівна $v_{\text{ФЕБ}} = 25$ °С.

До переваг використання моделей (3.1) та (3.3) відносять врахування впливу температури навколишнього середовища, впливу температури фотомодуля, можливість підвищення точності імітаційного моделювання енергоустановок на основі ФЕБ та врахування впливу струму навантаження, хоча, яким чином здійснюється врахування останнього не зрозуміло.

Аналіз літературних джерел [123-124], де вивчалось питання моделювання роботи ФЕБ показав, що найбільш поширеною та простою в реалізації вважається одніодна схема заміщення фотоелементів (рис. 3.2). Еквівалентна схема моделі фотоелемента складається з джерела фотоструму ($I_{\text{ФС}}$), діода (D), резистора ($R_{\text{Ш}}$), встановленого паралельно до джерела струму і резистора ($R_{\text{ПО}}$), що описує внутрішній опір комірки, а залежність $I_{\text{ФЕБ}} = f(U)$ описується наступним рівнянням:

$$I_{\text{ФЕБ}} = I_{\text{ФС}} - I_D \left(\exp \left[\frac{q(U + IR_{\text{ПО}})}{k \cdot T \cdot A} \right] - 1 \right) - \frac{(U + IR_{\text{ПО}})}{R_{\text{Ш}}}, \quad (3.4)$$

де: $I_{\text{ФС}}$ – фотострум, А;

$$I_{\Phi C} = G \cdot (I_{K3} + K_I (T - T_{CT})), \quad (3.5)$$

де: I_{K3} – струм короткого замикання фотоелемента, А;

K_I – температурний коефіцієнт струму короткого замикання;

T_{CT} – стандартна (еталонна) температура фотоелемента, К;

I_D – зворотній струм насичення діоду, А;

$R_{Ш}$ – шунтуючий опір, Ом;

$R_{ПО}$ – послідовний опір, Ом;

q – заряд електрона, $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

k – стала Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – робоча температура фотоелемента, К;

A – фактор ідеальності фотоелемента, що залежить від технології виготовлення;

U – напруга на виході фотоелемента, В.

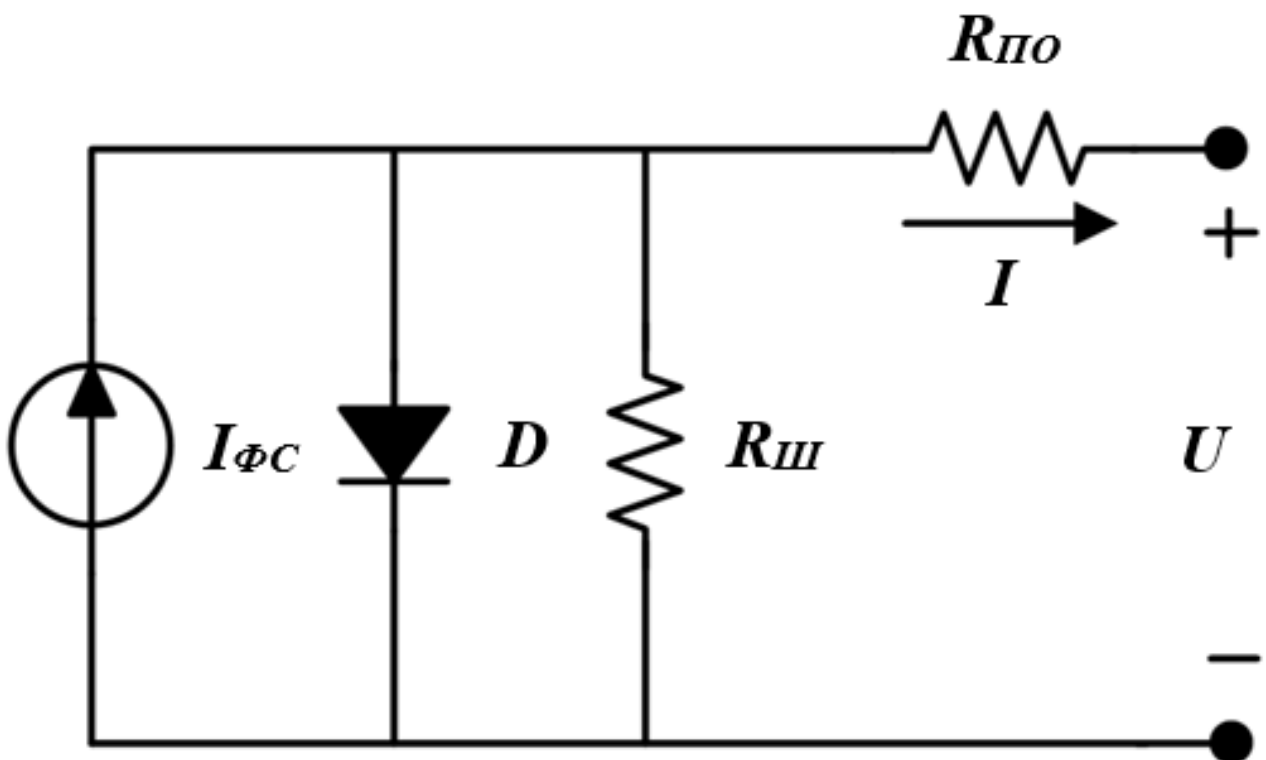


Рис. 3.2. Еквівалентна схема однієї моделі фотоелемента.

На практиці більшого застосування отримала спрощена модель ідеального фотоелемента (в якій послідовний опір $R_{ПО} = 0$, а шунтуючий опір $R_{Ш} = \infty$). Зважаючи на прийняті умови, математичний опис вихідної потужності фотобатарей можна представити наступним чином:

$$P_{\Phi EB} = U_{\Phi EB} \cdot \left(G[I_{K3} + K_I(T - T_{CT})] - I_D \left(\exp \frac{qU_{\Phi EB}}{k \cdot T \cdot A} \right) - 1 \right), \quad (3.6)$$

де: $U_{\Phi EB}$ – напруга фотобатарей, В.

Представлене рівняння (3.6) дозволяє враховувати вплив температури навколишнього середовища (T) та інтенсивності сонячного випромінювання (G) на вихідну потужність фотоелемента, однак дану модель необхідно також прив'язати до навантаження з метою оцінки його впливу на роботу системи ЗСЕМ в цілому, а це в свою чергу дасть можливість оцінити ефективність використання виробленої енергії та дати оцінку якості забезпечення.

Ефективність використання ФЕУ в автономних енерговузлах визначається кліматометорологічними умовами місцевості. При виборі ФЕУ для автономного енергозабезпечення проводиться попередня енергетична оцінка потенціалу сонячної енергії, за якою визначають придатність конкретної території до використання фотоелектричних установок.

Виробіток електроенергії, яку можна отримати за рахунок фотоелектричного перетворення ($W_{\Phi EY}$, кВт·год) з урахуванням (3.6), можна визначити як:

$$\begin{aligned} W_{\Phi EY}(G, T) &= \tau_{\Phi EY} \cdot P_{\Phi EY}(G, T) = \tau_{\Phi EY} \cdot U_{\Phi EY} \cdot I_{\Phi EY}(G, T) = \\ &= \tau_{\Phi EY} \cdot U_{\Phi EY} \cdot \left(G(I_{K3} + K_I(T - T_{CT})) - I_D \cdot \left(e^{\frac{qU_{\Phi EY}}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \right), \end{aligned} \quad (3.7)$$

де: $\tau_{\Phi EY}$ – час роботи фотоелектричної установки, год.

Рівняння (3.7) можна вважати математичним описом виробітку електроенергії фотоелектричної батареї (або елемента) при конкретних умовах інтенсивності сонячного випромінювання (G), температурі фотоелемента (T), та часу перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію ($\tau_{\Phi EB}$).

3.2. Аналіз впливу кліматометеорологічних умов на роботу ЗСЕМ з використанням фотоелектричних установок

Як відомо, виробіток електричної енергії ФЕУ залежить від кліматометеорологічних умов місцевості, на якій вона застосовується.

Промодельовано в програмному середовищі Matlab можливість забезпечення енергією ЗСЕМ від ФЕБ з врахуванням розподілу інтенсивності сонячного випромінювання для м. Мелітополь Запорізької області, Україна, використавши при цьому реальні експериментальні дані вимірювання інтенсивності сонячної радіації (G) для заданої місцевості.

Для аналізу надходження сонячної радіації використаємо дані Мелітопольської актинометричної станції за 2017 рік, що реєструвалися на протязі року з інтервалом 10 хв. (24262 відліки).

Загальний вигляд закономірностей надходження сонячної радіації (рис. 3.3), приведеної до зимового часу, ілюструє екстремальний характер сонячної радіації як на протязі доби, так і на протязі року.

Тривалість світлового дня змінюється від 7 год в січні-грудні до 15 год в червні-липні симетрично відносно 11,5 год.

Слід відзначити, що добова інтенсивність сонячної радіації відрізняється від теоретичної косинусоїди внаслідок деякого розширення за рахунок радіації вранішньої та вечірньої зорі та практичної стабільності її максимальних значень від 10 до 13 год.

Максимальні значення сонячної радіації біля 1000 Вт/м^2 з варіацією всього в 7% мають місце з 70 по 250 дні, тобто на протязі половини року, зовні цього інтервалу радіація зростає в першій половині року від 500 до 1000 Вт/м^2 , а в другій половині – спадає до 400 Вт/м^2 . Таким чином, в залежності сонячної радіації від дня року можна виділити пряму радіацію і вважати її наближено косинусоїдальною, що накладається на сталу складову розсіяної радіації з максимальною інтенсивністю $400 - 500 \text{ Вт/м}^2$.

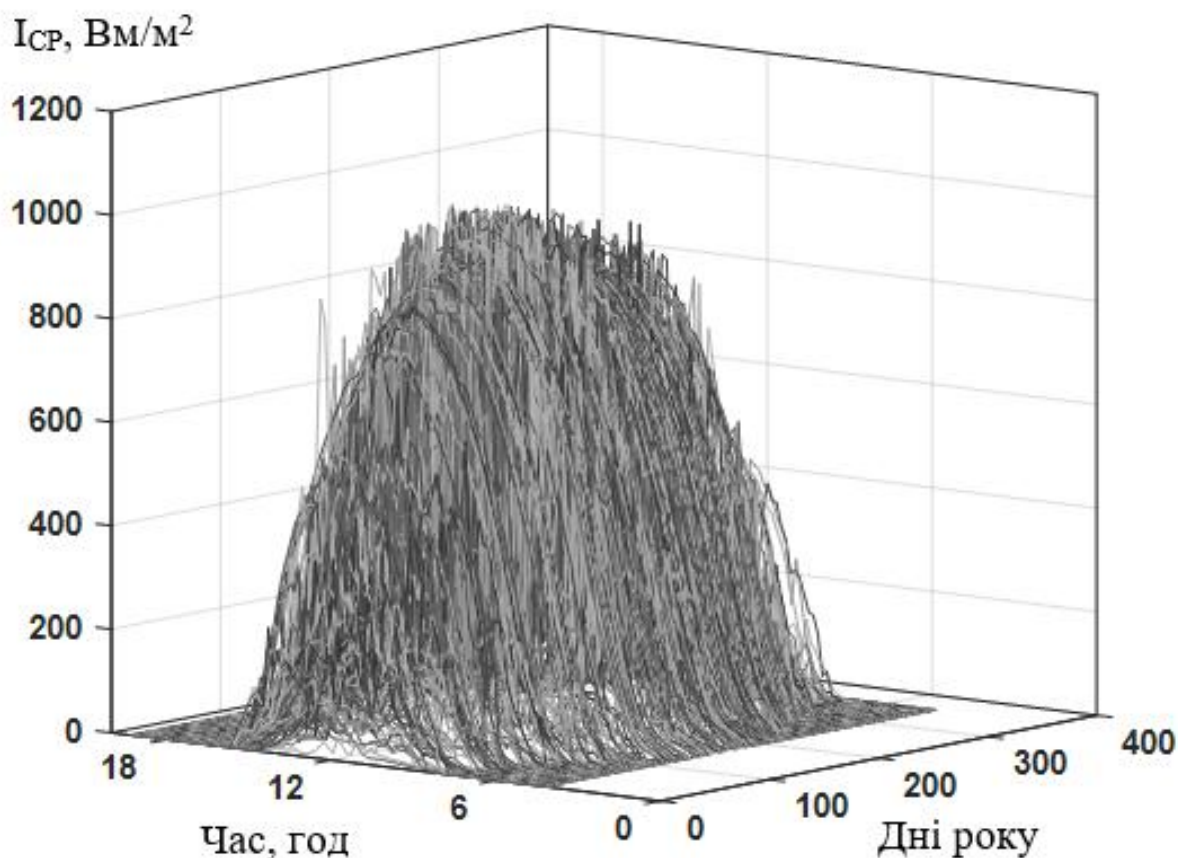


Рис. 3.3. Надходження сонячної радіації на протязі доби та на протязі року на основі реальних експериментальних даних для м. Мелітополь Запорізької області.

Якщо взяти середню і максимальну сонячну радіацію (рис. 3.4), то середня сонячна радіація складає близько половини максимальної і тримається на постійному рівні близько 500 Вт/м^2 від 50 до 270 днів. Але при таких загальних закономірностях добова сонячна радіація дуже сильно залежить від хмарності (рис. 3.5) і може на протязі літнього дня в сонячний день при мінливій хмарності змінюватися від 1000 до 150 – 400 Вт/м^2 .

Якщо ж брати до уваги і хмарні дні, то справа значно ускладнюється. Максимальна сонячна радіація 6 січня за день складає всього $42 \text{ Вт}\cdot\text{год/м}^2$, в той час, як, наприклад, 23 травня, $1005 \text{ Вт}\cdot\text{год/м}^2$, тобто в залежності від пори року і метеорологічних умов рівень сонячної радіації може змінюватися в 25 разів, що разом з відсутністю сонячної радіації вночі, незалежно від того, що усереднення по інтервалах часу на протязі року дає досить стабільні значення середньої

сонячної радіації, свідчить про необхідність обов'язкового акумулювання сонячної енергії для забезпечення неперервної роботи зарядної станції.

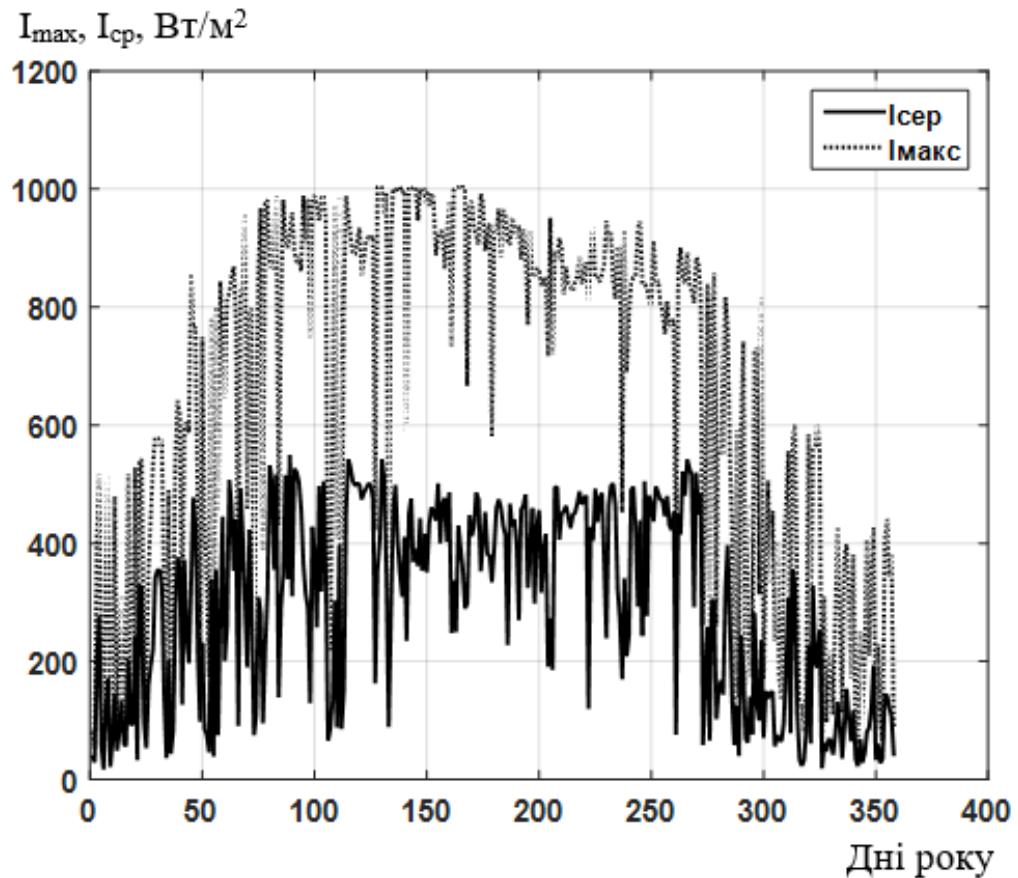


Рис. 3.4. Показники надходження середньої та максимальної сонячної радіації на протязі року на основі реальних експериментальних даних для м. Мелітополь Запорізької області.

Загальна інтегральна крива розподілу експериментальних даних (24262 значення) не відповідає жодному з теоретичних законів розподілу (рис. 3.6). Найближче відповідають їй експоненціальний і гама розподіли (на графіку вони практично співпадають), однак з 300 Вт/м^2 відповідність порушується і експериментальний розподіл до максимального значення сонячної радіації досить добре описується рівномірним розподілом. Відповідно, і гістограма експериментального розподілу (рис. 3.7) від 300 до 900 Вт/м^2 зберігає практично сталі значення, може з невеликим мінімумом, зважаючи на значне число даних.

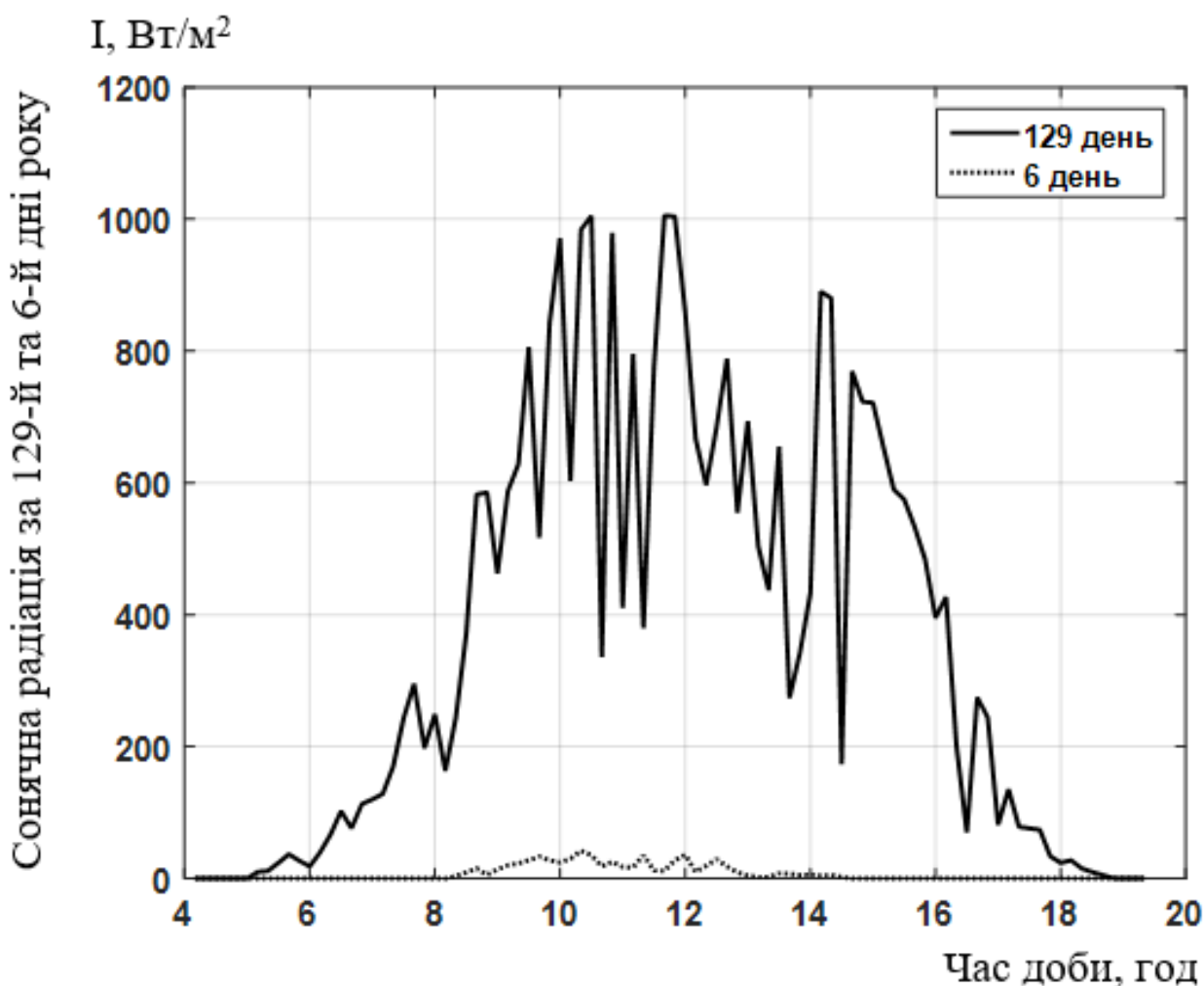


Рис. 3.5. Надходження добової сонячної радіації в дні з найбільшими показниками інтенсивності сонячної радіації (129 день 2017 року) та найменшими показниками інтенсивності сонячної радіації (6 день 2017 року) для м. Мелітополь Запорізької області.

Статистична перевірка гіпотез про закон розподілу для критичного значення критерію значимості за тестом Колмогорова – Смірнова дала такі значення: нормальний розподіл – $3,2 \cdot 10^{-4}$, Вейбула – $1,2 \cdot 10^{-5}$, логнормальний – $1,1 \cdot 10^{-9}$, логістичний – $3,6 \cdot 10^{-4}$, експоненціальний – $4,2 \cdot 10^{-11}$, гама – $7,2 \cdot 10^{-7}$. І лише рівномірний розподіл дійсно наближений до експериментального розподілу, наприклад для розподілу середніх значень сонячної радіації критерій значимості становить 0,0106.

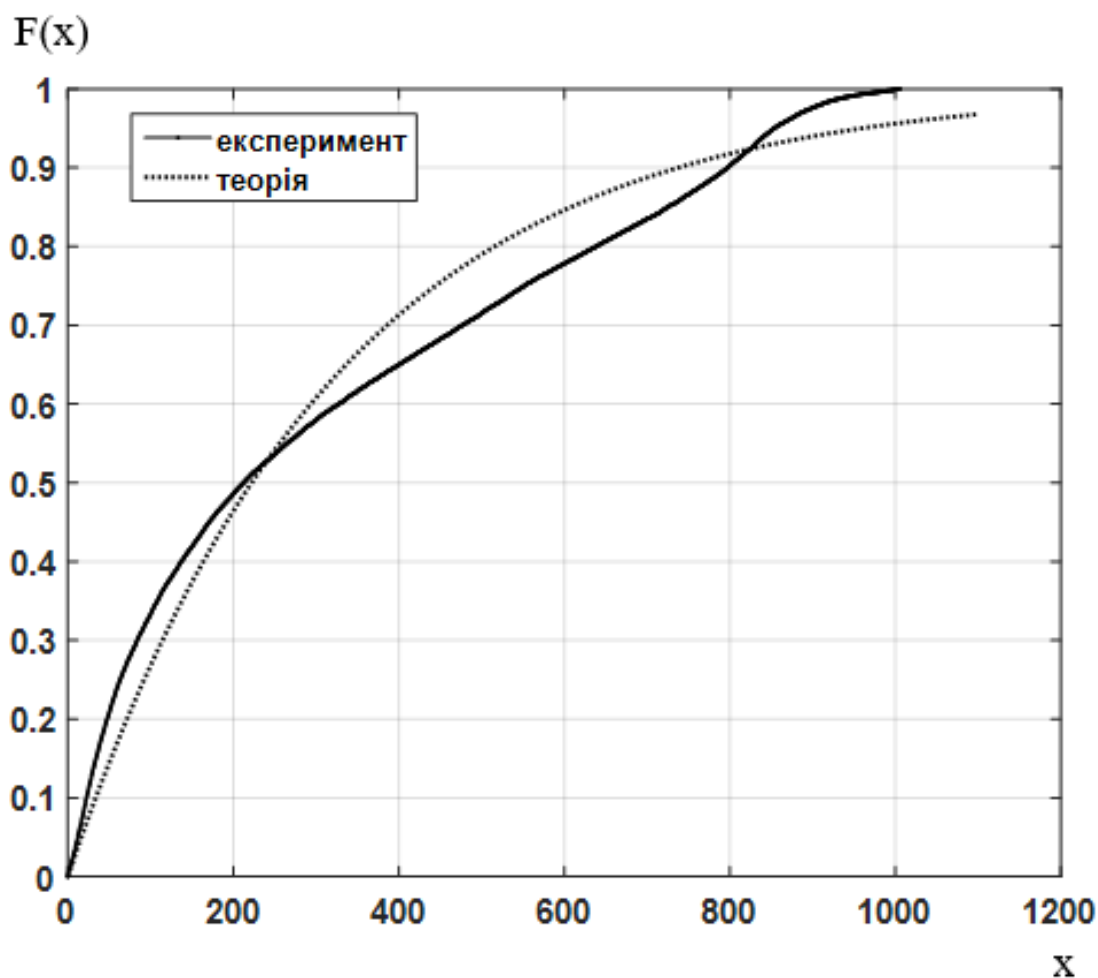


Рис. 3.6. Загальна інтегральна крива розподілу експериментальних даних інтенсивності сонячної радіації за 2017 рік для м. Мелітополь Запорізької області.

Крім того, помісячний розгляд інтенсивності сонячної радіації показує, що при максимальній інтенсивності сонячної радіації $400 - 600 \text{ Вт/м}^2$ періоди, коли максимальна сонячна радіація не перевищує 200 Вт/м^2 , у листопаді, грудні і січні можуть сягати 5 днів. В ці дні сумарний виробіток і накопичена енергії в акумуляторах повинні бути достатніми для заряду автомобіля з врахуванням короткого світлового дня. В той же час максимальна інтенсивність сонячної радіації у травні і у літні місяці досить стабільно знаходиться на рівні $900 \div 1000 \text{ Вт/м}^2$, так що при вибраній необхідній для роботи ЗСЕМ енергоємності буферного акумулятору виробіток ФЕБ може перевищувати потреби.

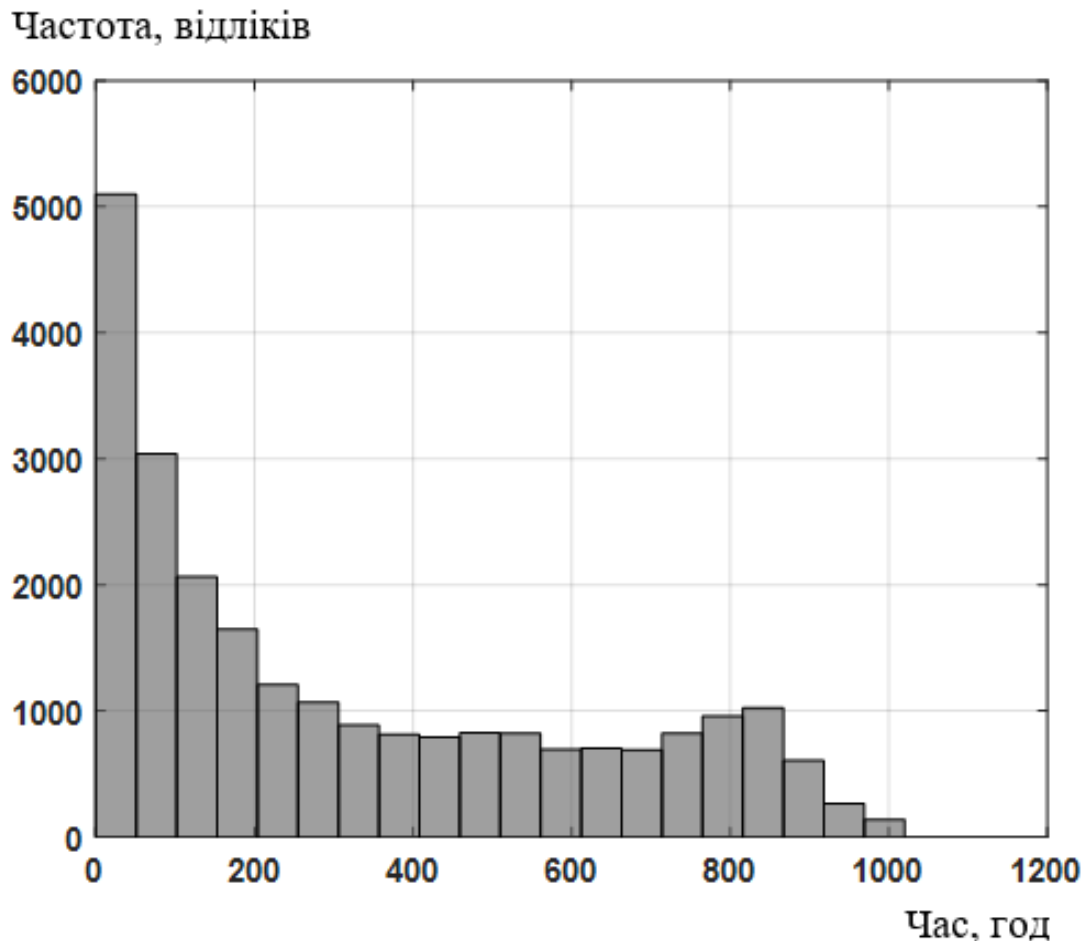


Рис. 3.7. Гістограма розподілу експериментальних даних інтенсивності сонячної радіації за 2017 рік для м. Мелітополь Запорізької області.

3.3. Математична модель процесу зарядження АБ на зарядній станції електромобілів з фотоелектричними установками

Використання фотоелектричних батарей при створенні систем генерування є актуальним не лише для виробітку додаткової кількості електроенергії, але й доцільним при створенні ЗСЕМ, про що було відмічено вище. Робота такої зарядної станції буде ефективною при виконанні умови:

$$W_{AB}^{BY\Phi} = W_{\Phi EV} = W_{BII}^{ЗСЕМ} + W_{AB}^{EM},$$

де: $W_{AB}^{BY\Phi}$ – енергія буферної акумуляторної батареї, кВт· год;

$W_{BII}^{ЗСЕМ}$ – енергія, що витрачається на власні потреби ЗСЕМ, кВт· год;

W_{AB}^{EM} – енергія, необхідна для зарядження ЕМ, кВт· год.

Як відомо [7], енергія, необхідна для зарядження АБ електромобіля, визначається рівнянням:

$$E_{зАБ}^{EM} = \frac{1}{\eta_{зАБ}} \cdot U_{АБ} \cdot \int_{C_0}^{C_{\max}} C_{зАБ} \cdot \psi(C) \cdot dC = \frac{E_{АБ}^{EM}}{\eta_{зАБ}}, \quad (3.8)$$

де: $E_{зАБ}^{EM}$ – енергія необхідна для заряду електромобіля, кВт· год;

$\psi(C)$ – функція, що враховує випадковий характер та частоту настання процесу зарядження АБ електромобіля;

$\eta_{зАБ}$ – коефіцієнт корисної дії заряду АБ електромобіля;

$U_{АБ}$ – напруга АБ ЕМ, В.

Коефіцієнт запасу енергії, $K_{3E}^{BY\Phi}$ буферної АБ визначається як:

$$K_{3E}^{BY\Phi} = \frac{k_{ДЕ} \cdot k_{ВП}}{\eta_{АБ}^{BY\Phi}}, \quad (3.9)$$

де: $k_{ДЕ}$ – коефіцієнт додаткової енергії, що має передбачатися у буферній АБ;

$k_{ВП}$ – коефіцієнт врахування впливу величини споживання енергії на власні потреби ЗСЕМ;

$\eta_{АБ}^{BY\Phi}$ – повний коефіцієнт корисної дії (заряд-розряд) буферної АБ.

Враховуючи математичну модель перетворення енергії ФЕБ (рівняння 3.7), модель перетворення енергії в електрохімічній акумуляторній батареї (рівняння 3.8), а також математичний опис коефіцієнту запасу енергії (рівняння 3.9) розглянуті вище математична модуль процесу зарядження АБ на ЗСЕМ з використанням ФЕБ заряду n електромобілів можна записати наступним чином:

$$\begin{aligned} & K_3^{\Phi EY} \cdot \tau_{\Phi EY} \cdot U_{\Phi EY} \left[G(I_{K3} + K_I(T - T_C)) - I_D \left(e^{\frac{q \cdot U_{\Phi EY}}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \right] = \\ & = K_{АБ}^{BY\Phi} \left(E_{ВП}^{ЗСЕМ} + \frac{n \cdot U_{зАБ}}{\eta_{зАБ}} \cdot \int_{C_0}^{C_{ном}} C_{зАБ} \cdot \psi(C) \cdot dc \right), \end{aligned} \quad (3.10)$$

де: $E_{ВП}^{ЗСЕМ}$ – енергія на власні потреби ЗСЕМ, кВт· год;

$K_3^{\Phi EY}$ – коефіцієнт заповнення енергопотребі ЗСЕМ за рахунок ФЕУ;

n – кількість електромобілів.

Рівняння 3.10 можна представити у вигляді енергій наступним чином:

$$W_{AB}^{BY\Phi} = K_3^{FEY} \cdot W_{FEY} = K_{AB}^{BY\Phi} \cdot (W_{BII}^{ZCEM} + W_{AB}^{EM}), \quad (3.11)$$

де: $E_{AB}^{BY\Phi}$ - енергія буферної акумуляторної батареї, кВт· год.

3.4. Визначення потужності фотоелектричної системи ЗСЕМ для гарантованого заряду буферного акумулятора

Аналіз модельного ряду комерційних електромобілів (додаток Б-В) показав, що на сьогоднішній день питомі затрати на пробіг 1 км шляху в режимі ЕРА (Environmental Protection Agency – американський вимірвальний цикл, що найкраще підходить для умов доріг України) коливаються від 0,133 кВт· год (BMW i3) до 0,261кВт· год (Toyota RAV4 EV), тобто від 13,3кВт· год/100км пробігу до 26,1кВт· год/100км пробігу відповідно. При цьому повна енергія АБ сучасних електромобілів знаходиться в межах (16÷100) кВт· год, а в перспективі можна очікувати її збільшення, однак із заявлених на найближчі 5 років перспективних новинок легкових електромобілів значення енергії АБ ЕМ не перевищує 100 кВт·год.

Проаналізуємо можливість забезпечення електроенергією ЗСЕМ з використанням ФЕБ для крайніх умов, тобто для днів з найменшим максимальним значенням інтенсивності сонячного випромінювання в (06.01.2017) та для доби з максимальним значенням інтенсивності сонячного випромінювання (10.05.2017), з урахуванням температури навколишнього середовища.

Для визначення енергоємності буферної АБ ЗЕСМ прийmemo:

1) власні потреби ЗСЕМ (освітлення та ін.) E_{BII}^{ZCEM} на рівні 3 кВт· год на день;

2) залишковий заряд АБ ЕМ при заїзді електромобіля на зарядну станцію становить 20% від його максимального значення, тобто $0,2 \cdot E_{AB}^{BY\Phi}$, оскільки при

менших залишкових значеннях заряду акумулятора електромобіль може не доїхати до зарядної станції;

3) ймовірність заїзду електромобілю на зарядну станцію при залишковому заряді АБ ЕМ від 80% і більше рівна 0, оскільки дозаряд електромобіля в діапазоні від $(0,8 \div 1)E_{AB}^{EM}$ необхідно проводити в стаціонарному (не прискореному) режимі заряду;

4) додаткова енергія буферної АБ АЗСЕМ повинна становити не менше 20% від номінального значення, тобто $k_{ДЕ} = 1,2$;

5) максимальне значення напруги буферної АБ ЗСЕМ приймаємо рівним $U_{AB}^{BY\Phi} = 600 \text{ В}$;

6) коефіцієнт корисної дії буферної акумуляторної батареї приймається рівним 80% ($\eta_{AB}^{BY\Phi} = 0,8$), а коефіцієнт заряду акумуляторної батареї електромобіля – рівним 90% ($\eta_{зАБ} = 0,9$).

Розглянемо можливість забезпечення заряду одного електромобілю з найбільшою бортовою АБ, наприклад, $E_{AB}^{EM} = 100 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ (Tesla Model X) із нульовою залишковою енергією (електромобіль з повністю розрядженими тяговими АБ, доставлений за допомогою аварійного канату чи привезений евакуатором). В такому випадку енергія буферної АБ для гарантованого забезпечення роботи ЗСЕМ при заряді ЕМ з максимальною потребою в $80 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ повинна становити:

$$E_{AB}^{BY\Phi} = \frac{3 + \frac{80}{0,9}}{0,8} = 137,83 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.12)$$

Для визначення необхідної потужності фотоелектричної установки приймаємо для розрахунків параметри фотомодуля LG365Q1C-A5 (Південна Корея) [125], для якого характерний підвищений ККД в 21,1%, а максимальна потужність при $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$ складає $P_{ФЕБ} = 365 \text{ Вт}$.

Враховуючи прийняту щоденну потребу для заряду одного електромобіля в $137,82 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, а також показники інтенсивності сонячного випромінювання для доби з найменшим приходом сонячної енергії згідно рівняння 3.7 з

використання програмного середовища Matlab встановлено, що потужність фотоелектричної станції для прийнятих умов має складати $P_{ФЕС} = 1264,2$ кВт. При цьому, при встановленні такої потужності ФЕС в інші дні з більшим приходом сонячного випромінювання спостерігається виробіток надлишкової енергії, що вимагатиме вирішення питання її подальшого використання. У випадку відключення ФЕС по мірі повного зарядження буферної АБ виникатиме проблема неефективного використання генеруючого устаткування.

В цей же час, використовуючи показники інтенсивності сонячного випромінювання для доби з найбільшим приходом сонячної енергії встановлено, що потужність фотоелектричної станції для прийнятих умов має складати $P_{ФЕС} = 21,44$ кВт. При цьому, при встановленні такої потужності ФЕС в інші дні з меншим приходом сонячного випромінювання спостерігатиметься недозаряд буферної АБ і, відповідно, робота ЗСЕМ буде неефективною.

3.5. Концепція зарядження акумуляторної батареї електромобілю від фотоелектричної станції

Як відомо, проблема збільшення міжзарядного пробігу електромобілів є досить актуальною. В роботі [126] розглядаються питання співвідношення міжзарядного і експлуатаційного пробігів та способи збільшення останнього. Якщо міжзарядний пробіг залежить в основному лише від ємності електрохімічного джерела живлення, то експлуатаційний пробіг електротранспортного засобу може бути збільшений декількома способами.

Одним з досить ефективних способів подовження міжзарядного пробігу електромобілю є застосування гібридного джерела живлення [127]. В даний час найбільш розповсюдженим є спосіб, який суміщає роботу акумуляторних батарей та двигуна внутрішнього згорання з генератором. Однак і в цьому випадку не вдається повністю уникнути шкідливих викидів від двигуна внутрішнього згорання в порівнянні з джерелом живлення, який складається з електрохімічного акумулятору та фотобатарей, встановленої на транспортному

засобі [27]. Така комбінація практично вважається екологічно чистою та найбільш прийнятною.

В роботі [126] розглянуте питання збільшення міжзарядного пробігу електромобілю при живленні його електродвигуна від комбінованого джерела, яке складається з акумуляторної батареї та фотоелектричного джерела (АБ-ФБ). Енергія фотобатарей в даній роботі визначається за формулою:

$$W_{\text{ФЕБ}} = P \cdot t, \quad (3.13)$$

де: P – потужність фотобатарей, Вт;

t – час роботи фотобатарей на протязі експлуатаційного пробігу, год.

Відомо, що в умовах внутрішньо міських перевезень транспортний засіб, як правило, експлуатується в перервному режимі переміщення, тобто в залежності від призначення автомобіль може мати декілька простоїв (протягом всього робочого дня) різних по тривалості. Такий характер руху аналогічно відноситься і до електротранспортних засобів з автономними джерелами енергії.

Розглянемо питання збільшення пробігу електротранспортного засобу з комбінованою системою живлення (АБ-ФБ) з урахуванням підзаряду АБ від ФБ під час технологічних простоїв машини, коли відсутнє споживання енергії від акумуляторної батареї. В цьому випадку енергія фотобатарей визначається по формулі:

$$W'_{\text{ФЕБ}} = P \cdot (t + t_{\text{П}}), \quad (3.14)$$

де: $t_{\text{П}}$ – час технологічного простою ЕМ, год.

Зведені результати розрахунків експлуатаційного пробігу електротранспортного засобу (проведених по методиці, викладеній в роботі [127]) для різних співвідношень енергоємності АБ ($W_{\text{АБ}}$) та різних значень часу $t_{\text{П}}$ показані в табл. 3.1.

Згідно даних, приведених в табл. 3.1, побудовано графіки залежностей збільшення пробігу (у відсотках) при $t_{\text{П}} = \text{var}$ – для різних значень $W_{\text{АБ}}$ (рис. 3.8) та при $W_{\text{АБ}} = \text{var}$, для різних значень $t_{\text{П}}$ (рис. 3.9) [15].

З рис. 3.8 видно, що функція $S = f(t_{\text{П}})$, має прямулінійний характер, знижуючи нахил в сторону збільшення $W_{\text{АБ}}$ та зменшення $t_{\text{П}}$. В цей же час

$S = f(W_{AB})$ має криволінійний характер (експонента) і зменшення її величини відбувається по мірі збільшення W_{AB} .

Таким чином, видно, що застосування фотобатареї на автономному транспортному засобі більш суттєво впливає на величину пробігу при умові відносного співставлення по вихідному струмі фотобатареї і зарядному струмі базової АБ, тобто, чим менша ємність останньої, тим більше проявляється ефект ФБ на величину пробігу електромобілю.

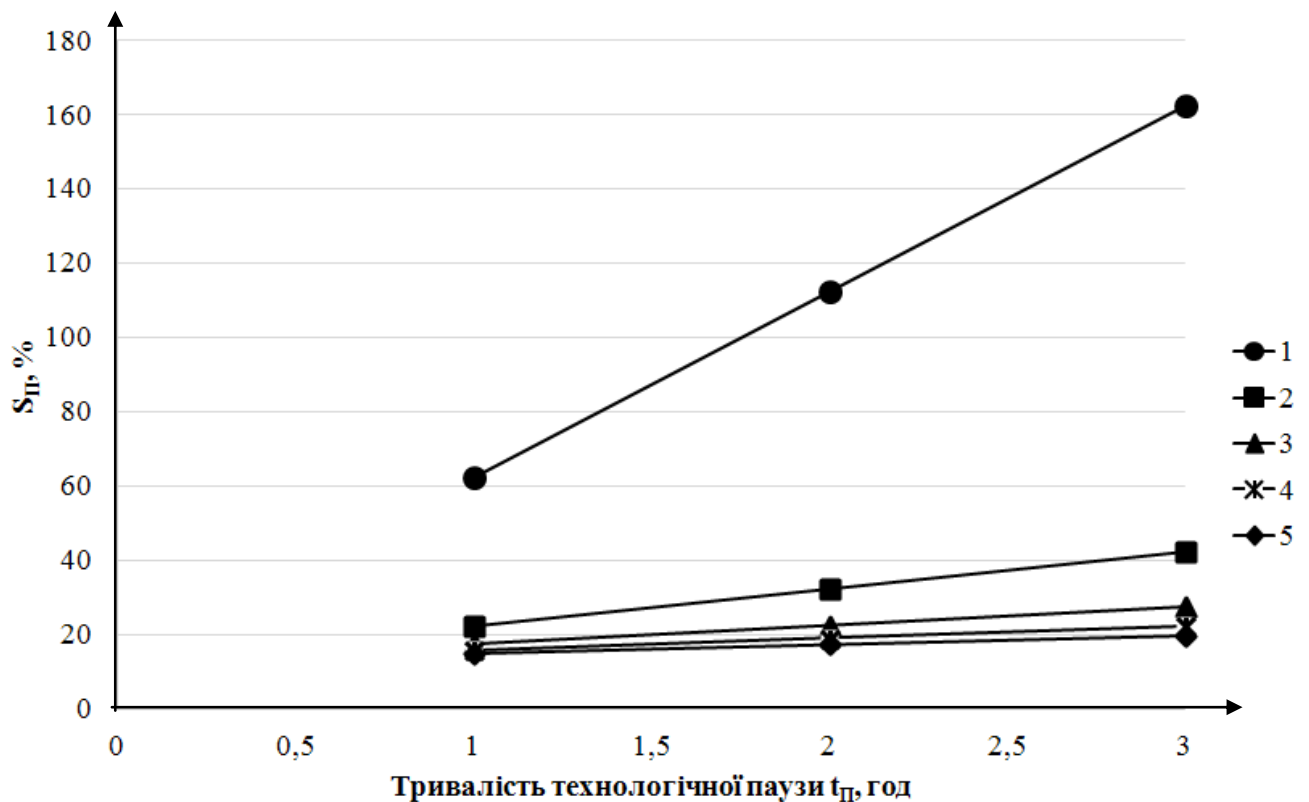


Рис. 3.8. Залежність відносної величини пробігу електромобіля від тривалості технологічної паузи при $W_{AB} = var$:

1–1 кВт·год;

2–5 кВт·год;

3–10 кВт·год;

4–15 кВт·год;

5–20 кВт·год.

Таблиця 3.1.

Результати розрахунків експлуатаційних показників електромобілю
при використанні комбінованого джерела живлення

| № п/п | q , кВт · год/км | W_{AB} , кВт · год | $P_{Ф}$, кВт | S_{AB} , км | t , год | $W_{Ф}$, кВт · год | W , кВт · год | S , км | $t_{п}$, год | $W_{Фп}$, кВт · год | $W_{п}$, кВт · год | $S_{п}$, км | S , % | $S_{п}$, % |
|-------|--------------------|----------------------|---------------|---------------|-----------|---------------------|-----------------|----------|---------------|----------------------|---------------------|--------------|---------|-------------|
| 1 | 0,1 | 1 | 0,5 | 10 | 0,25 | 0,125 | 1,125 | 11,25 | 1 | 0,625 | 1,625 | 16,25 | 12,5 | 62,5 |
| | | | | | | | | | 2 | 1,125 | 2,125 | 21,25 | 12,5 | 112,5 |
| | | | | | | | | | 3 | 1,625 | 2,625 | 26,25 | 12,5 | 162,5 |
| 2 | 0,1 | 5 | 0,5 | 50 | 1,25 | 0,625 | 5,625 | 56,25 | 1 | 1,125 | 6,125 | 61,25 | 12,5 | 22,5 |
| | | | | | | | | | 2 | 1,625 | 6,625 | 66,25 | 12,5 | 32,5 |
| | | | | | | | | | 3 | 2,125 | 7,125 | 71,25 | 12,5 | 42,5 |
| 3 | 0,1 | 10 | 0,5 | 100 | 2,5 | 1,25 | 11,25 | 112,5 | 1 | 1,75 | 11,75 | 117,5 | 12,5 | 17,5 |
| | | | | | | | | | 2 | 2,25 | 12,25 | 122,5 | 12,5 | 22,5 |
| | | | | | | | | | 3 | 2,75 | 12,75 | 127,5 | 12,5 | 27,5 |
| 4 | 0,1 | 15 | 0,5 | 150 | 3,75 | 1,875 | 16,875 | 168,75 | 1 | 2,375 | 17,375 | 173,7 | 12,5 | 15,8 |
| | | | | | | | | | 2 | 2,875 | 17,875 | 178,7 | 12,5 | 19,16 |
| | | | | | | | | | 3 | 3,375 | 18,375 | 183,7 | 12,5 | 22,25 |
| 5 | 0,1 | 20 | 0,5 | 200 | 5 | 2,5 | 22,5 | 225 | 1 | 3 | 23 | 230 | 12,5 | 15 |
| | | | | | | | | | 2 | 3,5 | 23,5 | 235 | 12,5 | 17,5 |
| | | | | | | | | | 3 | 4 | 24 | 240 | 12,5 | 20 |

В цей же час, як показує практика, більш доцільно проводити заряд тягових електромобільних акумуляторів від фотобатарей в стаціонарних умовах. При цьому існує можливість здійснювати штатний (згідно інструкції виробника АБ) заряд, що не завжди можливо при використанні в якості джерела фотобатарей, яка розміщена на транспортному засобі враховуючи обмеження по площі ФБ. Однак, при стаціонарному заряді також необхідно враховувати ряд

факторів, що впливають на величину потужності ФБ, основними з яких є інтенсивність сонячної радіації та площа.

Режими роботи фотоелектричних станцій (ФЕС) для зарядження тягових акумуляторних батарей електромобілів залежать від ряду факторів, що обумовлені показниками інтенсивності сонячної радіації протягом року для місця розташування зарядної станції, температурними режимами роботи фотоелектричних панелей (ФЕП), а також режимами експлуатації електромобілів.

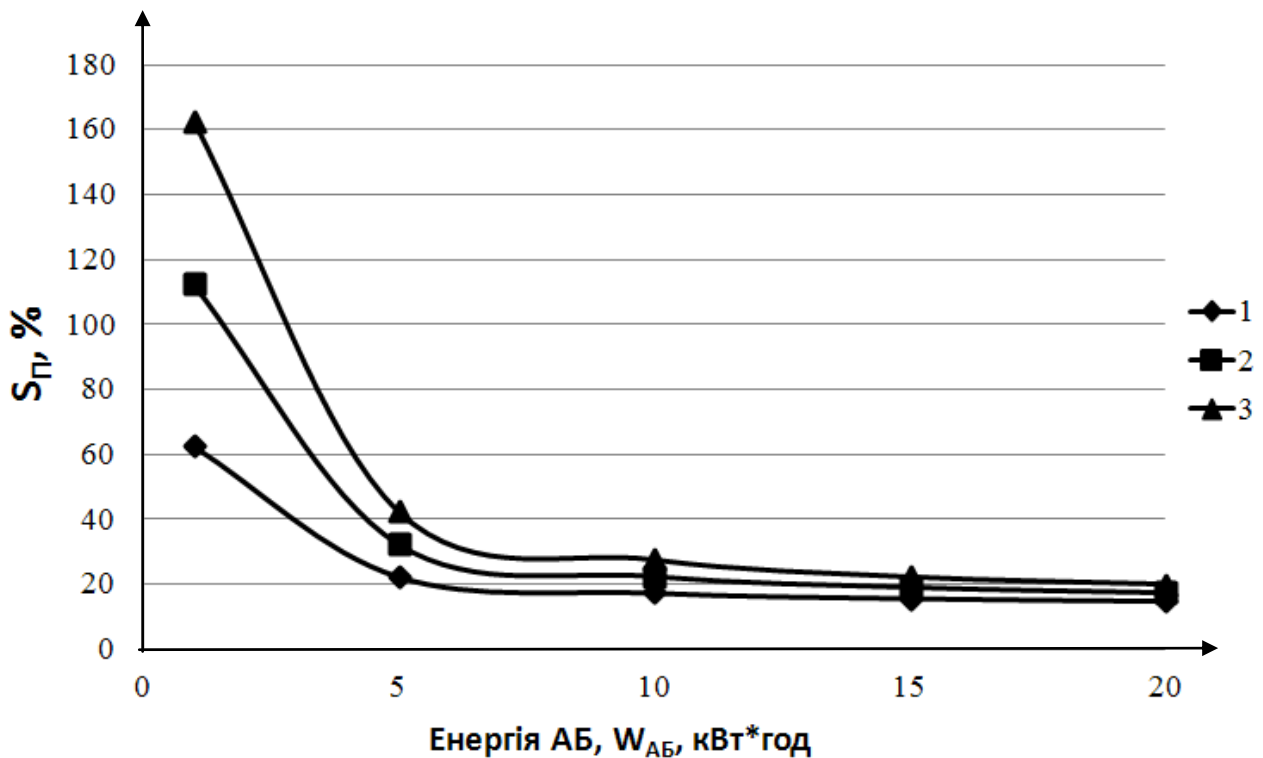


Рис. 3.9. Залежність відносної величини пробігу електромобіля від енергії акумуляторної батареї при $t_{П} = \text{var}$:

- 1 – 1 год;
- 2 – 2 год;
- 3 – 3 год.

Відомо [38], що виробіток електричної енергії ФЕС залежить від параметрів інтенсивності сонячної радіації ($I_{СР}, [Вт/м^2]$). Наприклад, для ФЕП типу PV-MLU250НС компанії Mitsubishi Electric встановленою потужністю

РВСТ = 250 Вт залежності потужності та струму мають лінійний характер і описуються відповідно наступними рівняннями:

$$P_B = 0,2534 \cdot I_{CP} - 4,1235. \quad (3.15)$$

$$I_\phi = 0,0081 \cdot I_{CP} - 0,0066. \quad (3.16)$$

Поруч з цим, зміна напруги ФЕП від параметрів інтенсивності сонячної радіації має характер поліному (рис. 3.10) та описується наступним рівнянням:

$$U_\phi = -4 \cdot 10^{-6} \cdot I_{CP}^2 - 0,0083 \cdot I_{CP} + 26,389. \quad (3.17)$$

Відомо [128], що інтенсивність сонячної радіації на поверхню Землі має випадковий характер і змінюється протягом доби, досягаючи свого максимуму в полудень, і протягом року, досягаючи максимуму в літні місяці і мінімуму в зимові. Різним регіонам планети властива різна інтенсивність сонячної радіації протягом року – в районах пустель у зимовий час надходження сумарної сонячної радіації майже в 2 рази менше порівняно з літнім періодом року, в районах високих широт – менше майже в 10 разів. Так, у південних районах України це співвідношення дорівнює 4-5, а в північних – 6-7. Згідно [128], середні показники інтенсивності сонячної радіації на поверхню Землі для регіону міста Києва мають типовий характер зростання від січня до липня з наступним спаданням до грудня місяця.

Розглянемо на прикладі свинцево-кислотних АБ можливість реалізації процесу зарядження від ФЕС. Згідно [129], ефективне зарядження класичних тягових свинцево-кислотних акумуляторних батарей можливе за умови, що джерело живлення забезпечує зарядний струм $0,1 \cdot Q_H$. Враховуючи цю вимогу доцільно дослідити вплив параметрів інтенсивності сонячної радіації (I_{CP}) на обґрунтування потужності ФЕС (РВСТ) (площі ФЕС, $S_{ФЕС}$) для зарядження тягової АБ різної ємності (Q_{AB}) і розглянути просторовий вплив трьох координатної системи.

При проведенні розрахунків прийняті наступні умови [15].

1. Мінімальний необхідний час зарядження тягової АБ від ФЕС становить 4 год.

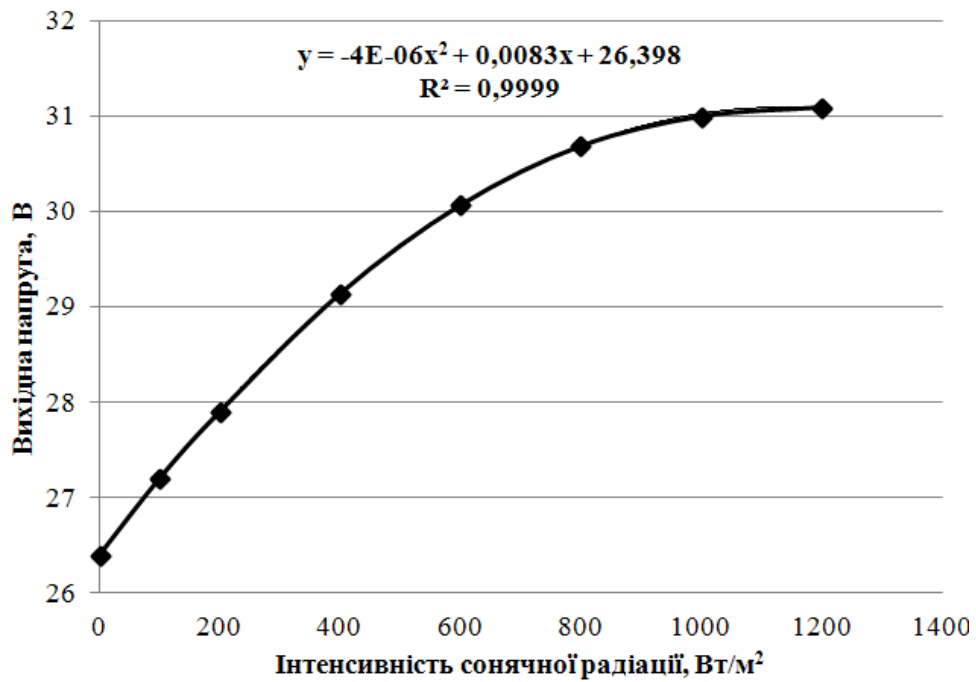


Рис. 3.10. Залежність вихідної напруги ФЕП типу PV-MLU250HC від інтенсивності сонячної радіації.

2. Розрахунок виробітку електроенергії проведено в програмному забезпеченні PVGIS.
3. Струм зарядження тягової АБ становить не менше $0,1 \cdot QH$.
4. При комутації ФЕП прийнята схема 4-х послідовно з'єднаних модулів при нарощуванні паралельного ланцюга (рис. 3.11).
5. Розроблення схеми проводилось на основі використання електричних параметрів фотоелектричних панелей типу PV-MLU250HC (табл. 3.2).

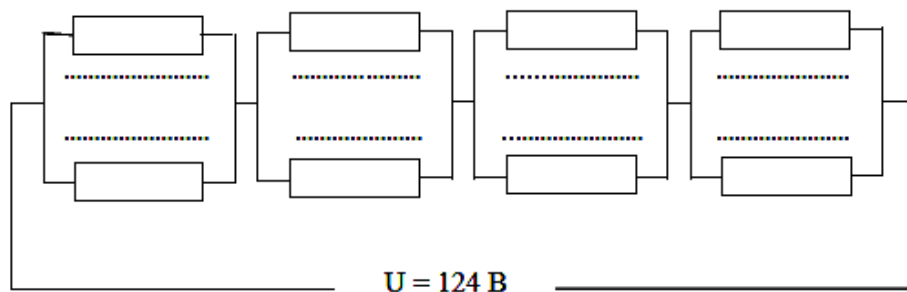


Рис. 3.11. Схема підключення ФЕП для забезпечення напруги на клемах 124 В та варіацією вихідного струму для зарядження тягової АБ.

Технічні параметри фотоелектричної панелі типу PV-MLU250HC [130]

| № | Назва параметру | Величина |
|----|---|--------------------------|
| 1 | Тип комірки | Монокристалічний кремній |
| 2 | Розміри комірки, мм | 78 X 156 |
| 3 | Кількість комірок на одній панелі, шт. | 120 |
| 4 | Максимальна потужність, Вт | 250 |
| 5 | Гарантоване мінімальне значення максимальної потужності, Вт | 242,5 |
| 6 | Напруга холостого ходу, В | 37,6 |
| 7 | Струм короткого замикання, А | 8,79 |
| 8 | Напруга при максимальній потужності, В | 31 |
| 9 | Струм при максимальній потужності, А | 8,08 |
| 10 | Коефіцієнт корисної дії, % | 15,1 |
| 11 | Допустимі відхилення максимальної потужності, % | ± 3 |
| 12 | Нормальна робоча температура комірки, °С | 45,7 |
| 13 | Максимальна напруга системи, В | 600 |
| 14 | Струм спрацювання запобіжника, А | 15 |
| 15 | Габаритні розміри, мм | 1625 X 1019 X 46 |
| 16 | Вага, кг | 20 |

Вибір схеми комутації ФЕП для стаціонарної ФЕС (рис.3.12), призначеної для зарядження тягових АБ, що експлуатуються в електромобілях, проводився згідно наступних міркувань. Згідно [131], реалізація процесу зарядження можлива за умови, коли вихідна напруга джерела енергії (в нашому випадку ФЕС) більша напруги споживача (АБ). Для конкретно прийнятого прикладу, виконання цієї умови, при врахуванні залежності напруги від величини інтенсивності сонячної радіації можливе за рахунок послідовного з'єднання 4-х

ФЕП типу PV-MLU250НС. За умови номінальної напруги тягової АБ 100 В оптимальне значення напруги ФЕС становитиме 124 В (при $ICP = 1000 \text{ Вт/м}^2$), а нижнє значення – 108 В (при $ICP = 100 \text{ Вт/м}^2$).

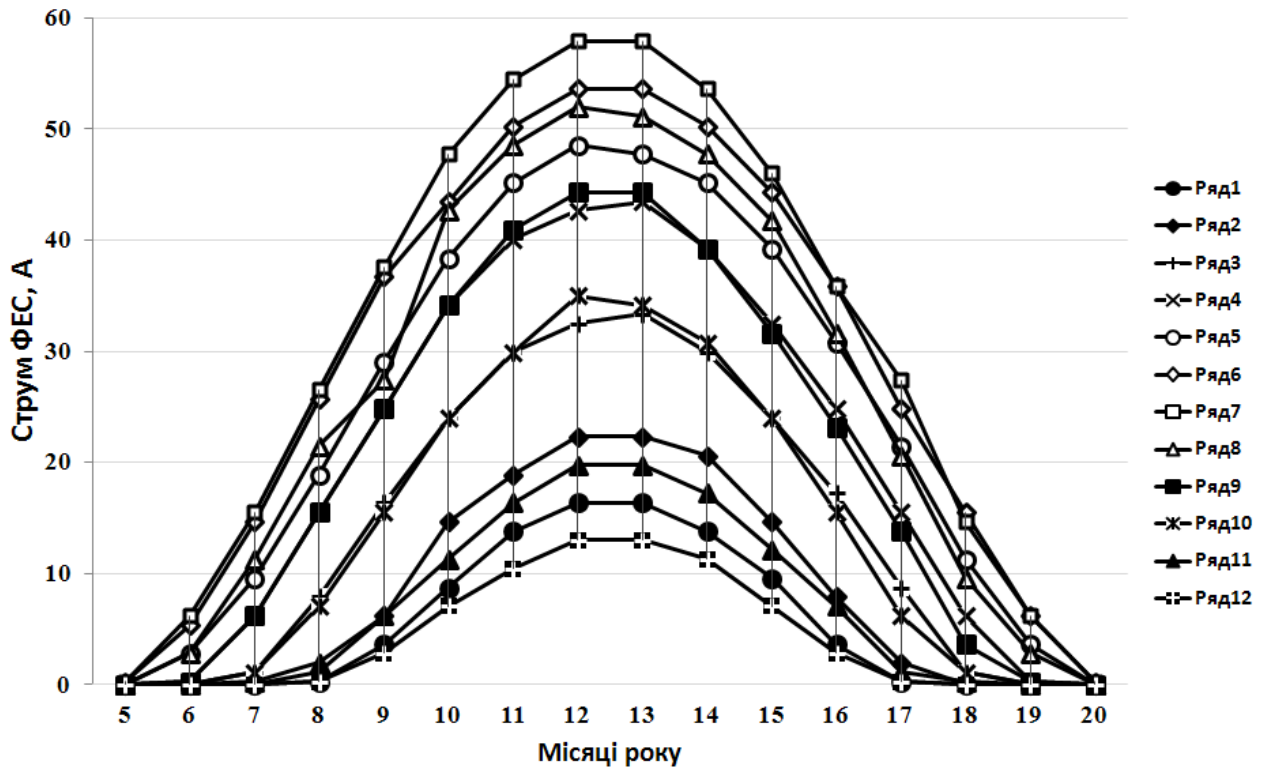


Рис. 3.12. Вихідний струм ФЕС встановленою потужністю 9 кВт протягом доби для регіону міста Києва протягом року по місяцям:

Ряд 1 – січень; Ряд 2 – лютий; Ряд 3 – березень;

Ряд 4 – квітень; Ряд 5 – травень; Ряд 6 – червень;

Ряд 7 – липень; Ряд 8 – серпень; Ряд 9 – вересень;

Ряд 10 – жовтень; Ряд 11 – листопад; Ряд 12 – грудень.

Не менш важливим фактором при розробленні схеми з'єднання ФЕБ є врахування впливу змінного характеру інтенсивності сонячної радіації (ICP) на вихідний струм ФЕУ. Враховуючи кліматометеорологічні умови міста Києва [128], а також першу умову для проведення розрахунків (мінімальний необхідний час зарядження тягової АБ від ФЕУ становить 4 год) встановлено, що для забезпечення класичного заряду тягової АБ (ємністю 100 А·год, напругою 100 В), зарядним струмом не менше 10 А необхідне встановлення

ФЕС потужністю 9 кВт (площа 59,616 м²) при паралельному з'єднанні 9-ти ФЕП типу PV-MLU250НС. При цьому графік залежності вихідного струму ФЕС для зарядження тягової АБ без урахування температурного впливу для різних місяців року матиме змінний характер (рис. 3.12).

При розрахунку виробітку електричної енергії ФЕС враховано температурні втрати, втрати кутових ефектів віддзеркалення, втрати в кабелях, інверторах та іншому допоміжному обладнанні. При цьому реальний виробіток електричної енергії протягом року становить 9210 кВт·год, а характер виробітку має наступний вигляд (табл. 3.3 та рис. 3.13). Слід відмітити, що використання електроенергії при вихідних струмах ФЕС менше 10 А є неефективним при класичному методі зарядження тягових АБ.

Таблиця 3.3.

Зведені показники виробітку електричної енергії ФЕС встановленою потужністю 9 кВт

| Місяці | Середньодобовий виробіток електроенергії, кВт*год | Середньомісячний виробіток електроенергії, кВт*год | Середньодобовий прихід сонячної радіації, кВт*год/м ² | Середньомісячний прихід сонячної радіації, кВт*год/м ² |
|----------------|---|--|--|---|
| Січень | 9,52 | 295 | 1,24 | 38,5 |
| Лютий | 15,6 | 436 | 2,08 | 58,3 |
| Березень | 28 | 867 | 3,86 | 120 |
| Квітень | 34,2 | 1030 | 4,97 | 149 |
| Травень | 39,5 | 1230 | 5,95 | 185 |
| Червень | 38,9 | 1170 | 5,89 | 177 |
| Липень | 38 | 1180 | 5,83 | 181 |
| Серпень | 35,6 | 1100 | 5,41 | 168 |
| Вересень | 28,1 | 844 | 4,11 | 123 |
| Жовтень | 19,4 | 603 | 2,73 | 84,7 |
| Листопад | 8,65 | 260 | 1,17 | 35,1 |
| Грудень | 6,71 | 208 | 0,88 | 27,2 |
| Сумарно за рік | | 9210 | | 1350 |

Цікавим фактом, з точки зору розроблення схеми комутації ФЕП в загальній схемі, є встановлення просторової залежності між стохастичним

параметром інтенсивності сонячної радіації та площею ФЕС, яка необхідна для задоволення потреб в зарядному струмі згідно по експлуатації АБ (рис. 3.14) [15].

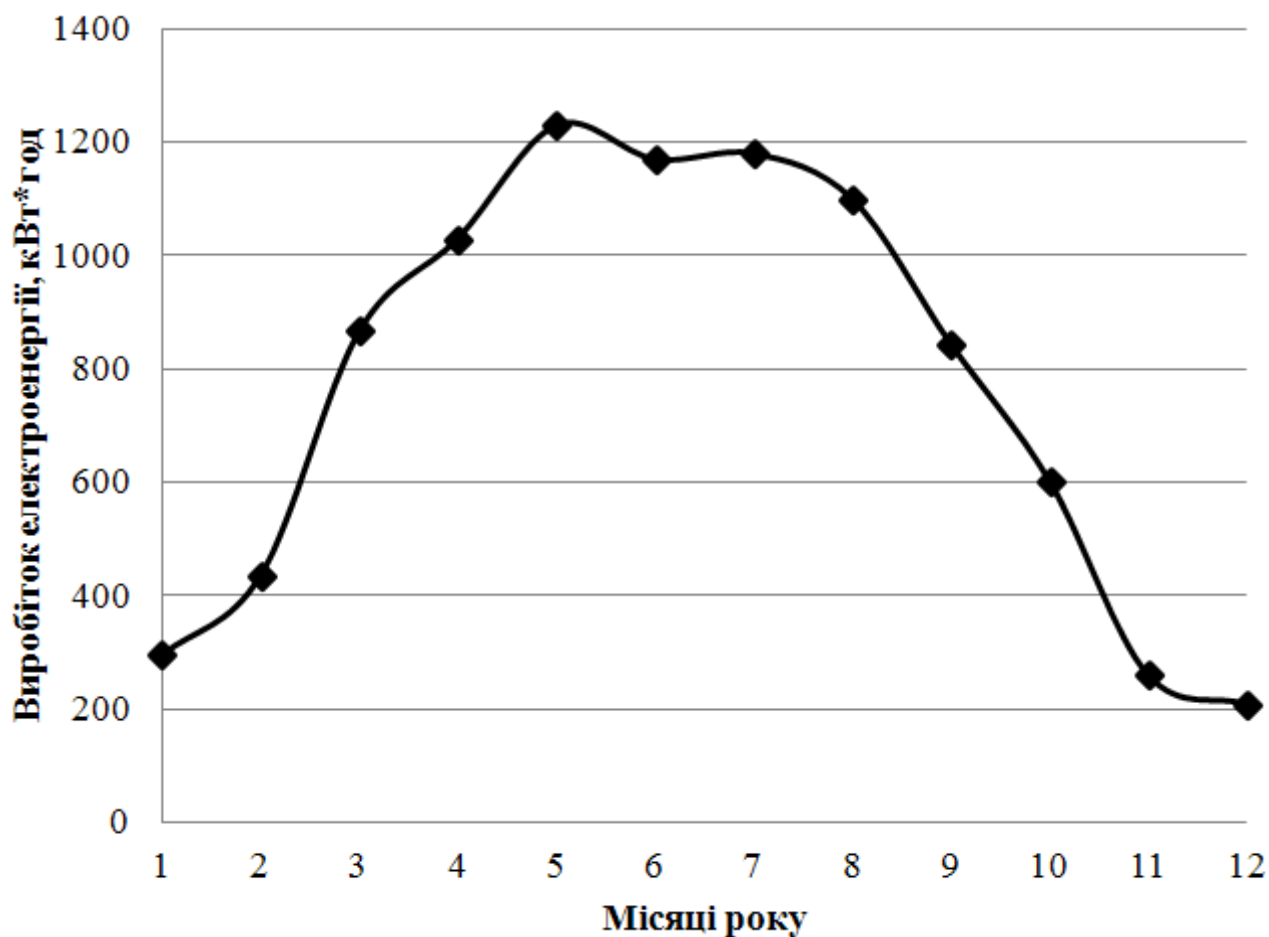


Рис. 3.13. Виробіток електричної енергії ФЕС встановленою потужністю 9 кВт протягом року по місяцям для регіону міста Києва.

Підсумовуючи слід сказати, що використання ФЕС на базі екіпажної частини електромобілю дозволяє збільшити експлуатаційний пробіг останнього при зарядженні АБ під час руху транспортного засобу, а тим більше під час технологічного простою. Найбільш ефективним є стаціонарний заряд АБ електромобілю, оскільки при цьому досягається заряд згідно технічної документації по експлуатації акумуляторів. Враховуючи змінний характер інтенсивності сонячної радіації як протягом доби, так і протягом року,

запропоновано новий метод зарядження АБ від ФЕС шляхом комутації секцій ФЕП в процесі заряду.

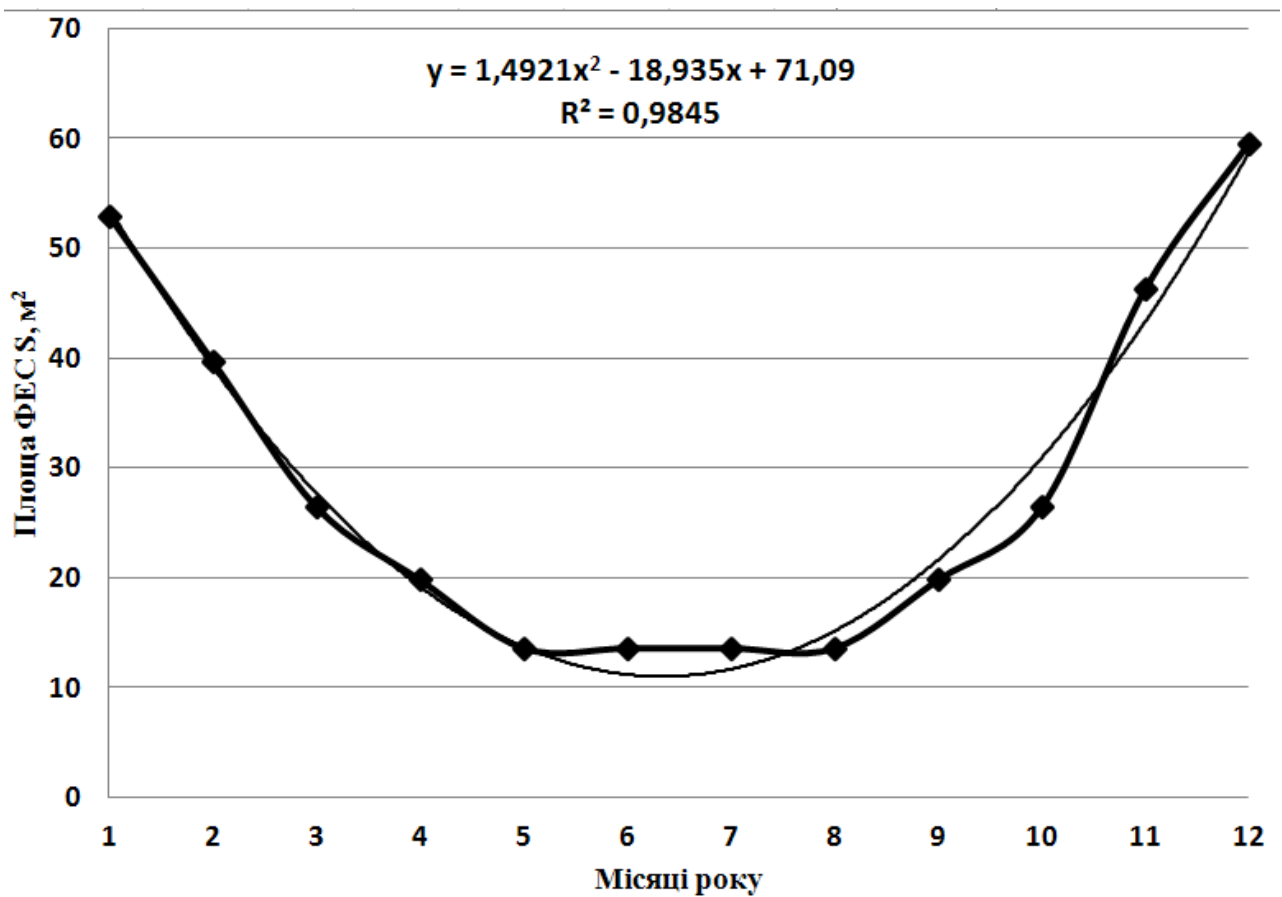


Рис. 3.14. Виробіток електричної енергії ФЕС встановленою потужністю 9 кВт протягом року по місяцям для регіону міста Києва.

3.6. Дослідження режимів паралельної роботи тягових джерел живлення гібридного електромобіля

В рамках виконаних наукових робіт із розроблення гібридної системи живлення співробітниками кафедри відновлюваних джерел енергії КПІ ім. Ігоря Сікорського разом з науковцями Інституту відновлюваної енергетики НАН України та Інституту електродинаміки НАН України створено дослідний зразок екомобіля (ЕМ) на базі автомобіля "Соболь-Э" [133]. Разом з цим була розроблена методика випробувань дослідного зразка. Згідно з розробленою

методикою були проведені випробування джерела живлення – "акумуляторна батарея (АБ) – фотобатарея (ФБ) – дизельний двигун" при паралельному включенні в різних режимах роботи екомобіля:

- при русі у стандартному міському циклі (SAE j 227);
- при русі з постійною швидкістю різної величини;
- при русі в режимі розвезення (доставлення з тривалими зупинками).

Формалізований підхід до проведення дослідницьких задач для автономного електротранспорту, де найважливішим фактором, що визначає його ефективність, є баланс енергії, витраченої та отриманої бортовим джерелом, може бути побудований, як відмічено вище, на стандартних середньостатистичних європейських міських їздових циклах *SAE j 227*, швидкісно-часова діаграма яких наведена на рис. 3.15, а відповідні характерним циклам *A – D* параметри руху зведено у табл. 3.4, де V_i – максимальна швидкість, км/год; τ_a – час розгону, с; τ_{cr} – тривалість руху з $V = \text{const}$, с; τ_{co} – тривалість руху накатом, с; τ_b – час гальмування, с; τ_{int} – тривалість стоянки, с; T – загальний час циклу, с; a_i – прискорення у зоні 0 – 1, м/с²; V_{cpi} – середня швидкість розгону, м/с.

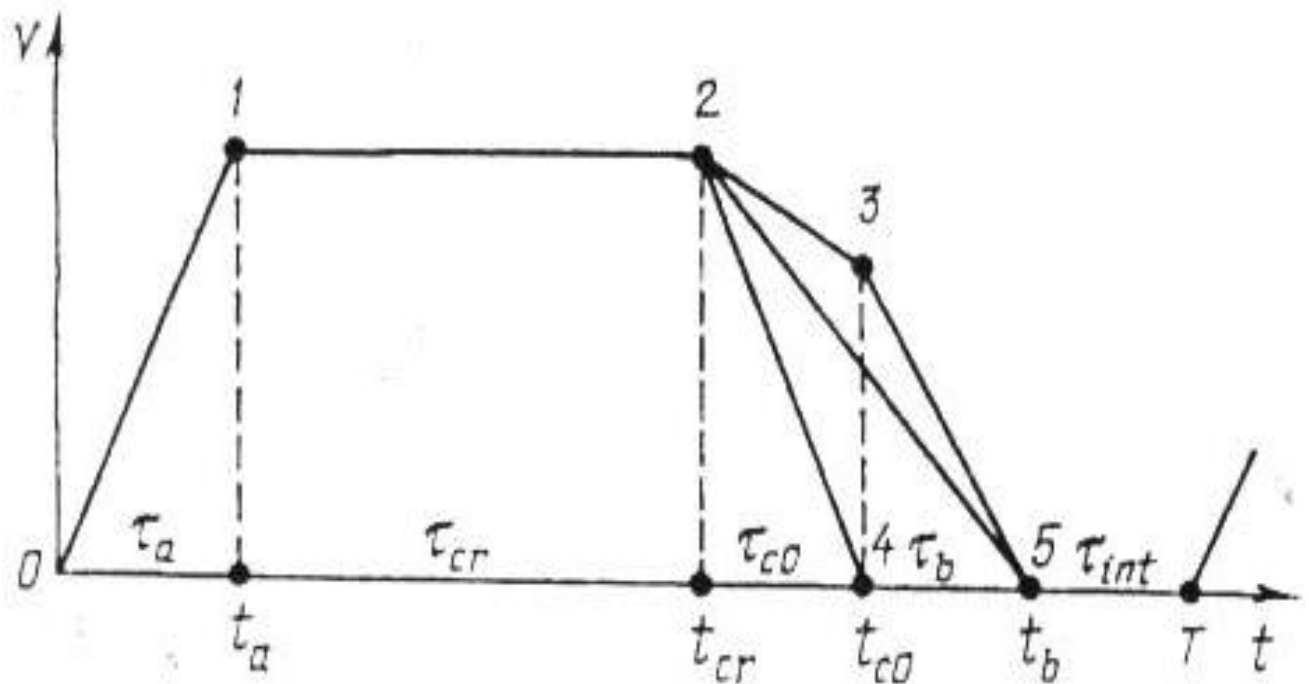


Рис. 3.15. Діаграма швидкості стандартного циклу SAE j 227.

Параметри руху екомобіля

| Параметр | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| V_i , км/ГОД | $16 \pm 1,5$ | $32 \pm 1,5$ | $48 \pm 1,5$ | $72 \pm 1,5$ |
| τ_a , с | 4 ± 1 | 19 ± 1 | 18 ± 2 | 28 ± 2 |
| τ_{cr} , с | 0 | 19 ± 1 | 20 ± 1 | 50 ± 2 |
| τ_{co} , с | 2 ± 1 | 4 ± 1 | 8 ± 1 | 10 ± 1 |
| τ_b , с | 3 ± 1 | 5 ± 1 | 9 ± 1 | 9 ± 1 |
| τ_{int} , с | 30 ± 2 | 25 ± 2 | 25 ± 2 | 25 ± 2 |
| T , с | 39 ± 2 | 72 ± 2 | 80 ± 2 | 122 ± 2 |
| a_i , км/ГОД ² | 1,11 | 0,47 | 0,74 | 0,71 |
| V_{cpi} , км/ГОД | 2,22 | 4,44 | 6,67 | 10,0 |

Цикл *A* характерний для дрібної розвозки типу обслуговування поштових скриньок. Цикл *B* максимально відповідає перевезенням виробів і товарів до магазинів, торговельних пунктів та організацій. Основний міський цикл руху – *C*, який відповідає централізованим перевезенням або руху в транспортних потоках при наявності світлофорів. Цикл *D* характерний для приміських режимів руху. Таким чином, цикли *A-D* задають найбільш типові режими руху транспортних засобів в умовах міста, а їх швидкісні та часові показники підібрані коректно і цілком відповідають реальній динаміці міського руху. Крім того, формальна фіксація режимних їздових параметрів, з одного боку, дозволяє вирішувати аналітичні задачі, а з другого – без ускладнень провести їздовий експеримент і оцінити схожість теоретичних та практичних результатів.

Як бачимо з діаграми (рис. 3.15), у кожному з циклів виконується розгін (0–1), рух із постійною швидкістю (1–2), вільний пробіг або накат (2–3), а також гальмування, включаючи й рекуперативне, яке може бути виконане після вільного пробігу по траєкторії (3–5), або минаючи останній по траєкторії (2–5) чи (2–4).

В таблиці 3.5 представлені результати випробувань ЕМ, проведені три рази для кожного стандартного циклу, де наведено усереднені показники по циклу [133].

В таблиці прийняті наступні позначення:

V_{AB} – напруга тягової акумуляторної батареї, номінальне значення – 120 В, ємність – 100 А·год;

$I_{AB; \text{спож}}$ – струм AB – середній струм споживання від AB при різних режимах руху екомобіля, А;

$I_{AB; \text{заряд}}$ – загальний струм зарядження AB, А;

$I_{Г}$ – струм зарядження від генератора, А;

$I_{ФБ}$ – струм зарядження від фотобатареї, А.

Таблиця 3.5

Результати випробувань екомобіля

| № | Цикл SAE j 227 | V_{AB} , В | $I_{AB; \text{спож}}$, А | $I_{AB; \text{заряд}}$, А | $I_{Г}$, А | $I_{ФБ}$, А |
|---|----------------|--------------|---------------------------|----------------------------|-------------|--------------|
| 1 | A | 130 | 70 | 4 | 0 | 4 |
| 2 | A | 130 | 68 | 4 | 0 | 4 |
| 3 | A | 128 | 72 | 4 | 0 | 4 |
| 1 | B | 134 | 91 | 7 | 3 | 4 |
| 2 | B | 133 | 91 | 8 | 4 | 4 |
| 3 | B | 130 | 94 | 7 | 3 | 4 |
| 1 | C | 133 | 102 | 10 | 6 | 4 |
| 2 | C | 130 | 104 | 10 | 7 | 3 |
| 3 | C | 127 | 107 | 10 | 6 | 4 |
| 1 | D | 132 | 121 | 10 | 10 | 0 |
| 2 | D | 134 | 120 | 10 | 10 | 0 |
| 3 | D | 128 | 124 | 10 | 10 | 0 |

Аналіз результатів випробувань показує, що на різних ділянках циклу руху можлива робота (зарядження AB) від двох джерел енергії (електрогенератора і фотобатареї) як спільна, так і роздільна, залежно від швидкості руху машини, тобто від швидкості обертання валу двигуна внутрішнього згорання (в даному випадку, без урахування рівня сонячної радіації). Так, для циклів A і B, де швидкості обертання генератора відносно невеликі, зарядження AB здійснюється

тільки від ФБ. В циклі С відбувається зарядження від генератора і ФБ одночасно, а в циклі D – тільки від генератора, оскільки на великій швидкості обертання його напруга завжди вище напруги ФБ. При цьому слід зазначити, що АБ, яка встановлена на екомобіль "Соболь-Э", має ємність 100 А·год, тому струм зарядження обмежений величиною 10 А. Номінальна напруга АБ – 120 В.

При русі ЕМ з постійною швидкістю необхідно зазначити наступне:

- при швидкості до 32-35 км/год зарядження АБ здійснюється тільки від ФБ;
- спільне зарядження від двох джерел здійснюється в діапазоні швидкостей 35-40 км/год з різним ступенем від кожного окремо;
- якщо швидкість ЕМ перевищує 40 км/год, то зарядження АБ здійснюється тільки від генератора.

При русі ЕМ, наприклад, у режимі розвезення товарів з тривалими зупинками (що часто має місце на практиці при завантаженні і розвантаженні товарів) зарядження АБ в досить великій мірі здійснюється тільки від ФБ, що дозволяє економити органічне паливо.

На графіках (рис. 3.16) показані зони роботи двох джерел гібридного електромобіля залежно від швидкості руху машини. Як видно, зона спільної роботи електрогенератора і фотобатарей невелика, однак для кожної швидкісної ділянки робота окремого джерела досить суттєва [133].

Під час проведення випробувань оцінювався також час зарядження від ФБ при різних ступенях заряду АБ. Графіки зарядження показані на рис. 3.17 Такий режим найбільш імовірний на практиці при стоянці екомобіля з ФБ на борту, при цьому можливе зарядження і від мережі змінної напруги, однак, від ФБ воно більш доцільне (використовується місцеве екологічно чисте і безкоштовне джерело енергії Сонця) [133].

В роботі проведено аналіз залежності площі ФБ від величини енергії, спожитої від основного джерела живлення (тягової акумуляторної батареї), за умови її зарядження тільки від ФБ.

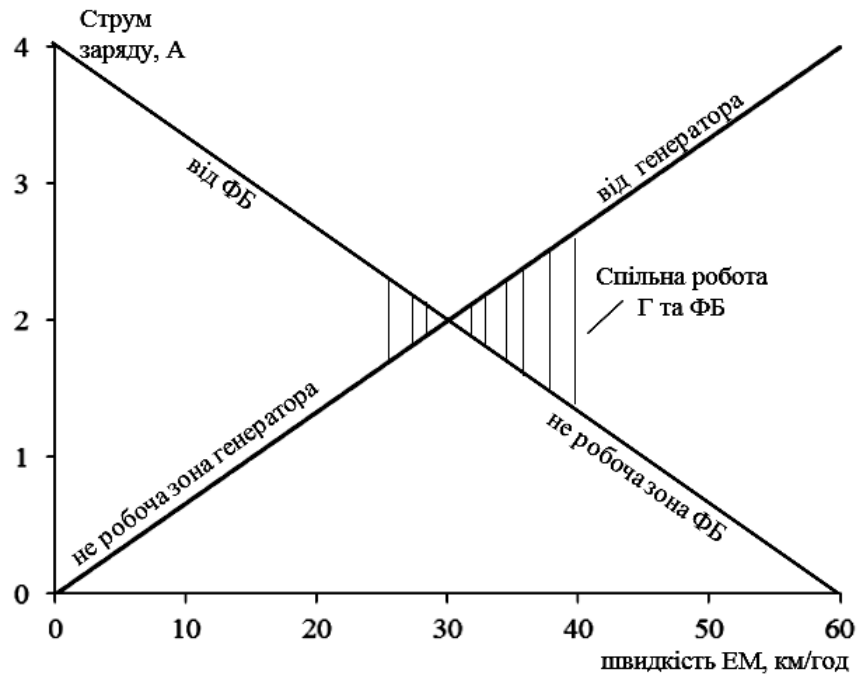


Рис. 3.16. Зведена залежність роботи двох тягових джерел живлення екомобіля.

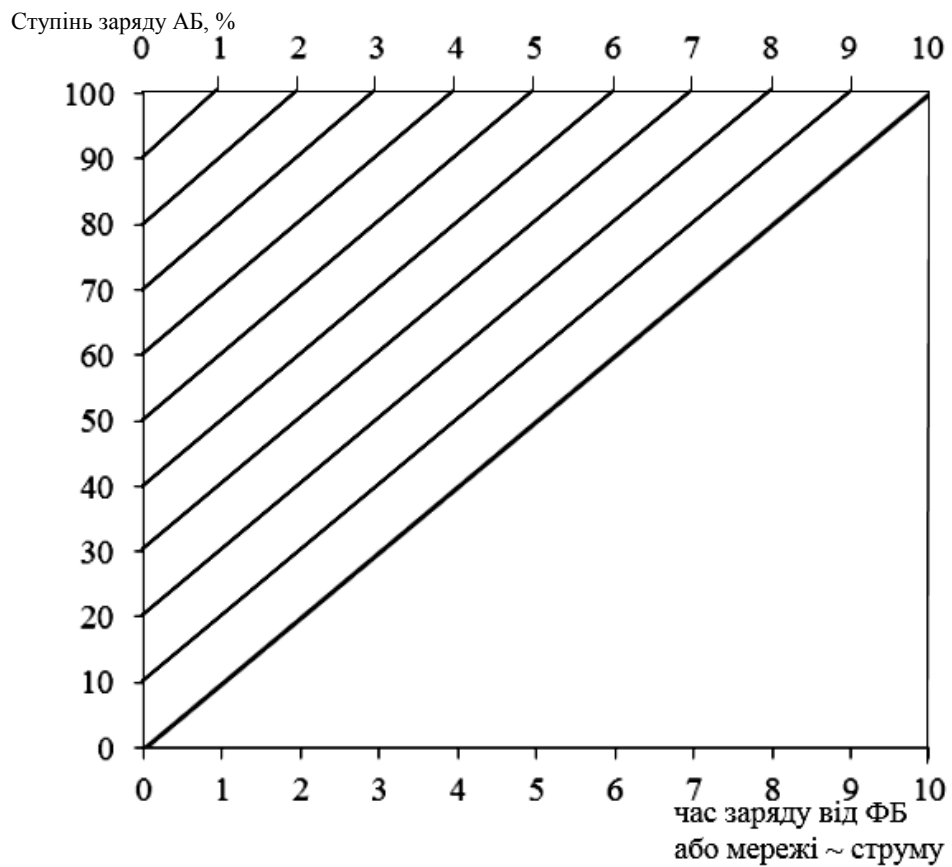


Рис. 3.17. Залежності заряду тягових АБ екомобіля від фотоелектричної батареї.

Природно, що споживання енергії від АБ значною мірою залежить від маси машини за умови руху з постійною швидкістю.

У роботі [133] показані витрати енергії на кілометр шляху для різних значень маси екомобіля (теоретична і експериментальна графічні залежності), рис. 3.18.

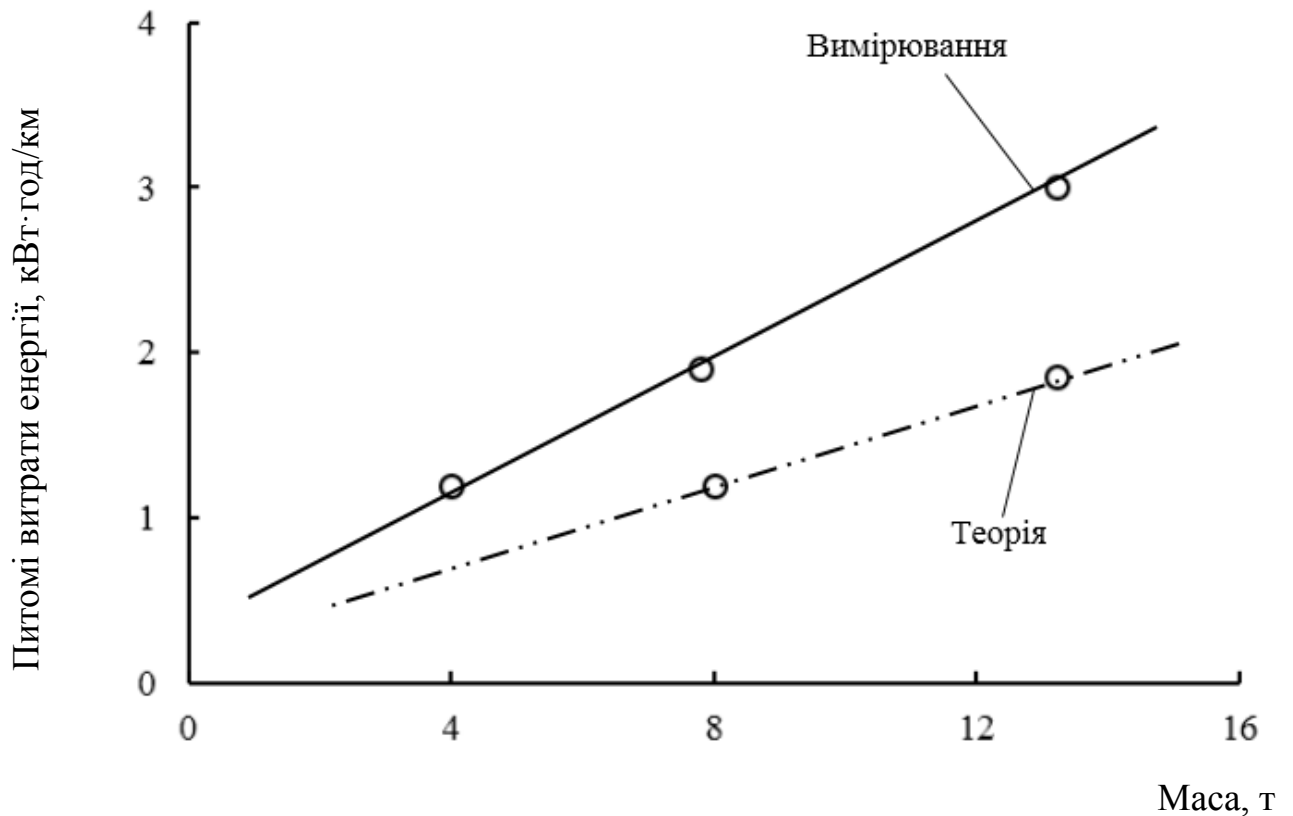


Рис. 3.18. Залежність питомих витрат енергії від маси екомобіля.

На рис. 3.19 та рис. 3.20 показані значення потужності ФБ, необхідної для зарядження тягової АБ електромобілів з різною масою (рис. 3.19) і час зарядження АБ залежно від величини її енергоємності (маси електромобіля) та потужності ФБ (рис. 3.20).

З графіків на рис. 3.20 видно, що час зарядження АБ нелінійно зменшується зі збільшенням потужності ФБ і, природно, збільшується по мірі зростання маси ЕМ [2].

Таким чином, можна підсумувати, згідно проведених випробувань та аналізу отриманих даних, що у різних режимах роботи екомобіля можливе надходження

електричної енергії в тягові АБ як від сумісної роботи ФБ та генератора, так і окремо від кожного джерела.

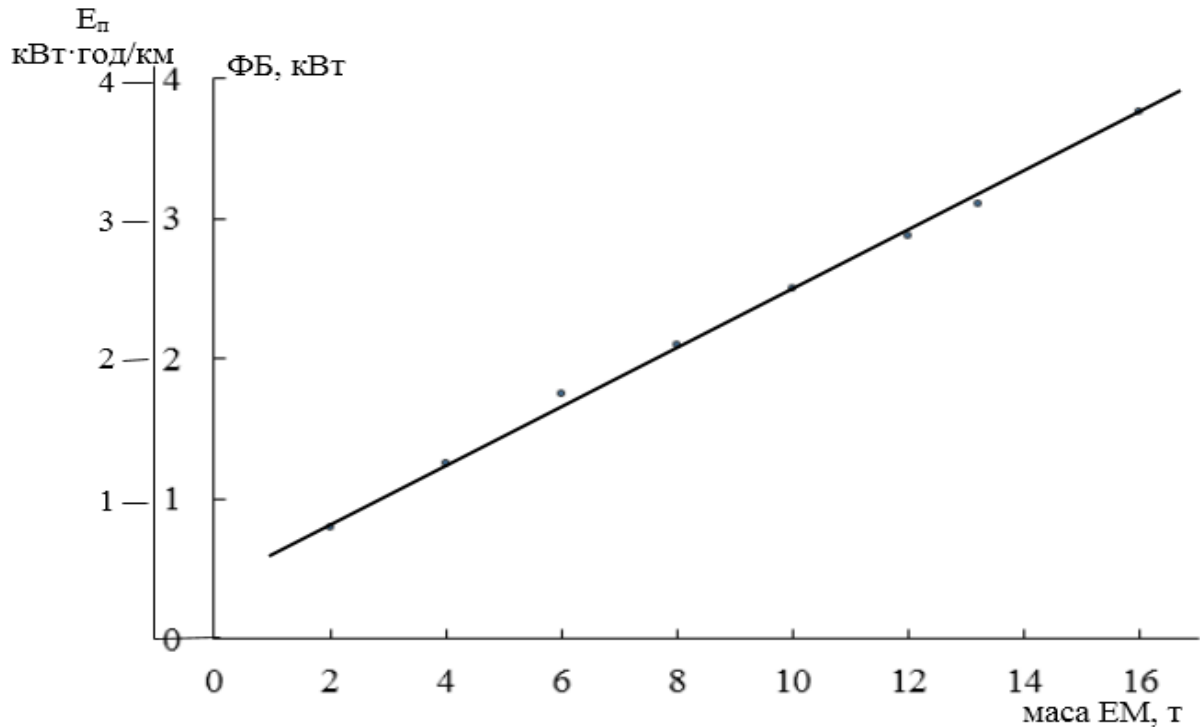


Рис. 3.19. Залежність витрати енергії АБ на пробіг 1 км від маси електромобіля.

Зважаючи на те, що потужність ФБ залежить від її площі, очевидно, що не завжди є можливість зарядити АБ лише від фотобатареї, що пояснюється габаритними обмеженнями транспортного засобу. Режим експлуатації екомобіля з частими і тривалими зупинками дозволяє отримати достатню кількість енергії від ФБ для зарядження АБ. Найбільш раціональним є зарядження тягової АБ екомобіля в стаціонарних умовах, що пояснюється непостійністю в часі інтенсивності сонячного випромінювання і, відповідно, відсутність гарантованого заряду АБ в хмарну погоду. З іншої сторони, реалізація мереж стаціонарних зарядних станцій з фотоелектричними установками та буферними акумуляторами енергії дозволяє вирівняти виробіток і споживання електричної енергії незалежно від погодних умов.

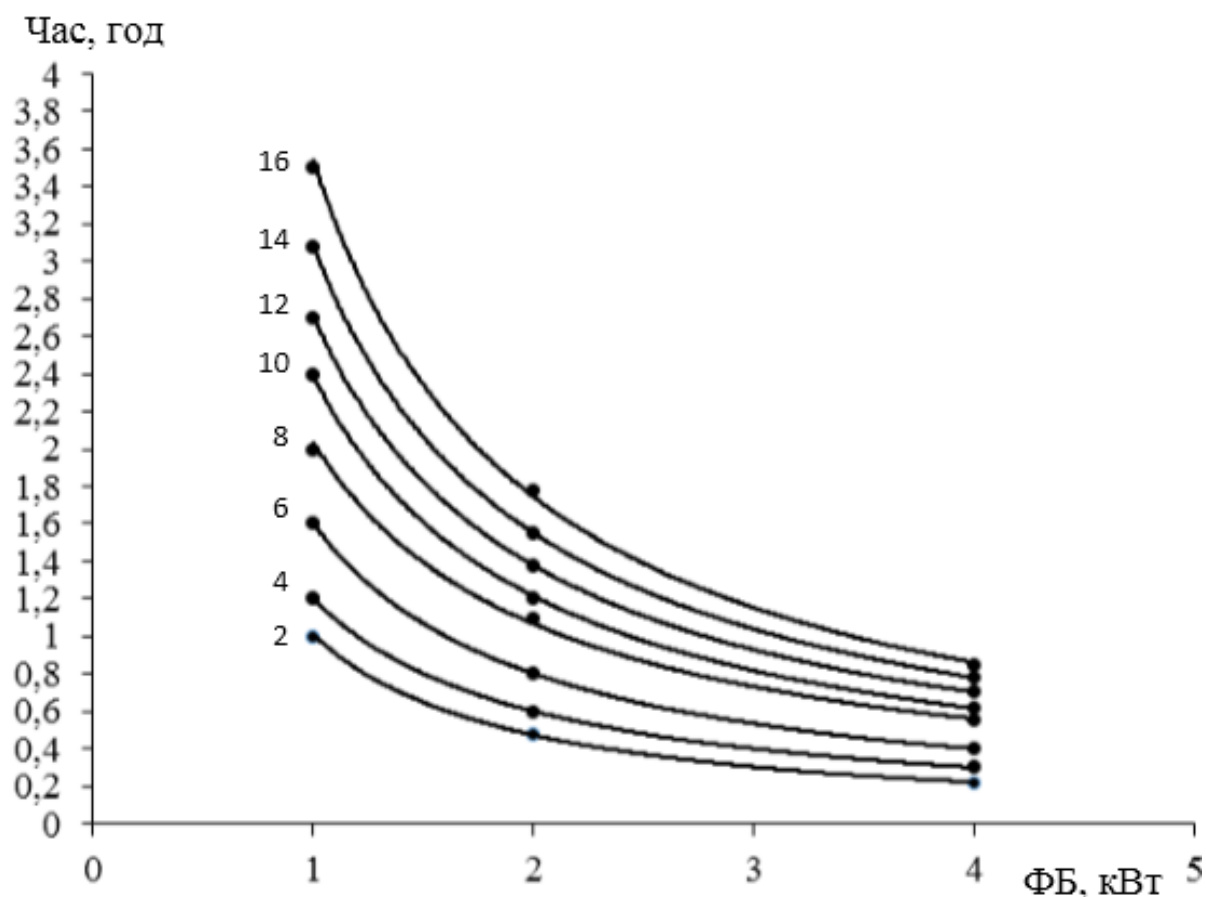


Рис. 3.20. Залежність тривалості зарядження тягової АБ від потужності фотоелектричної батареї.

3.7. Висновки до розділу

1. Вперше запропонована математична модель процесу зарядження акумуляторних батарей на зарядних станціях електромобілів з використанням фотоелектричних установок та буферних акумуляторів енергії для заряду електричних транспортних засобів з урахуванням нелінійного характеру виробітку електроенергії та стохастичного характеру її споживання протягом доби. Дана модель може бути поширеною на будь-які потенційно перспективні місця встановлення зарядних станцій електромобілів в різних регіонах України за умови наявності об'єктивних вихідних даних по розподілу інтенсивності сонячного випромінювання.

2. В результаті програмного моделювання в середовищі Matlab встановлено, що необхідна потужність ФЕС в складі ЗСЕМ для заряду одного

ЕМ з максимальною енергоємністю тягової АБ коливається в межах від $P_{ФЕС} = 21,44$ кВт для доби з найбільшим приходом сонячного випромінювання до $P_{ФЕС} = 1264,2$ кВт для доби з найменшим приходом сонячної енергії для умов міста Мелітополь Запорізької області. Такий великий розбіг потужності ФЕС говорить про необхідність комплексного використання декількох відновлюваних джерел енергії, наприклад, «ВЕС-ФЕС», «ГЕС-ФЕС», «Біогазова електростанція - ФЕС», що дозволить зменшити вплив коливання інтенсивності сонячного випромінювання та раціоналізувати необхідну потужність ФЕС.

3. Використання ФЕС з мінімальною потужністю $P_{ФЕС} = 21,44$ кВт може забезпечити заряд ЕМ з максимальною енергоємністю в дні з меншим приходом сонячного випромінювання (в порівнянні з добою максимального сонячного випромінювання) за умови приїзду ЕМ з більшим значенням залишкової енергії тягової АБ, або за умови приїзду на АЗС електромобіля з меншою енергоємністю тягової АБ.

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНЕ ОПИСАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАРЯДЖЕННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ НА ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЯХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З КОМПЛЕКСНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ТА БУФЕРНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ

4.1. Аспекти комплексного використання відновлюваних джерел енергії для зарядження електромобілів

На сьогоднішній день в світі налічується більше 5 млн. зарядних станцій акумуляторів електромобілів і гібридних транспортних засобів, при постійному збільшенні їх кількості по роках [55]. Це обумовлено позитивною динамікою попиту на екологічно чисті і економічні електротранспортні засоби. Аналітики очікують, що це може сприяти істотному скороченню попиту на бензин та дизпаливо до 2030 року.

Зарядні станції є невід’ємною частиною інфраструктури, необхідної для експлуатації електрокарів.

Одночасно з розвитком зарядних пристроїв підвищується і дальність пробігу електромобілів на одному заряді акумулятора. Це обумовлено безперервним поліпшенням акумуляторних технологій на тлі реалізації численних науково-дослідних проектів в цій сфері. Але навіть з огляду на швидкий розвиток технології акумуляторобудування важливість систем зарядки електромобілів продовжує зберігатися – так само, як і значимість подальшого вдосконалення енергоефективності зарядної інфраструктури.

Стандарти зарядки електромобілів і гібридів, що підзаряджуються, регулюються Міжнародною електротехнічною комісією (МЕК або ІЕС в англійському варіанті). Основним є стандарт ІЕС 62196 [134], який визначає види використовуваних роз’ємів (розеток і вилок) і режими зарядки.

Принципово в стандарті ІЕС 62196 існує поділ зарядки змінним і постійним струмом. Відомо, що тягова батарея в електромобілі заряджається постійним струмом. Таким чином, в разі використання зарядної станції змінного струму застосовується бортовий зарядний пристрій електромобіля, який перетворює змінний струм зарядної станції в постійний, яким і заряджається тягова батарея. У цьому випадку швидкість зарядки електромобіля визначається потужністю бортового зарядного пристрою. Зазвичай цей параметр вказується виробником електромобіля.

Час, необхідний для зарядки конкретного електромобіля змінним струмом, визначається ємністю тягової батареї і потужністю бортового зарядного пристрою (ЗП). При зарядці електромобіля від станції постійного струму всією процедурою перетворення займається сама станція. Сьогодні станції змінного струму прийнято називати зарядними станціями стандартної зарядки. А станції постійного струму - комплексами експрес-зарядки або швидкими зарядними станціями.

Аналіз акумуляторних батарей і зарядних пристроїв, встановлених на практично усіх сучасних електромобілях, і способів їх зарядки показав наступне:

- заряд змінним струмом 10-16 А (однофазна мережа) – 60 %;
- заряд змінним струмом 22-35 А (трифазна мережа) – 40 %;
- заряд постійним струмом – 40 %.

Переважна більшість зарядних станцій для автономного електротранспорту функціонує від енергомережі змінного струму. При досить поширеній інфраструктурі електромереж вже зараз виникають проблеми при установці зарядних станцій, їх підключенні і забезпеченні необхідним запасом потужності для заряду більше одного електромобіля. До супутніх проблем при живленні від мережі змінного струму також відносяться:

- підключення ЗП до мережі в житловому мікрорайоні;
- прокладка додаткових кабелів для підключення на міжміських автомобільних дорогах;
- установка додаткових розподільних підстанцій в межах міста;

- виникнення додаткових перешкод в мережі при експлуатації ЗП з поганою електромагнітною сумісністю (ЕМС);
- підвищення шкідливих викидів на ТЕЦ при збільшенні вироблення електроенергії для заряду ЕМ.

Багатьох перерахованих вище проблем дозволяє уникнути технологія зарядки електромобілів від відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

З огляду на швидкі темпи приросту об'єктів відновлюваної енергетики з одного боку і не менш стрімкий розвиток приросту електромобілів з іншого, на сьогодні стає актуальним питання розвитку інфраструктури зарядних станцій, які зможуть заряджати акумуляторні батареї від установок на основі фотобатарей і вітроагрегатів, як стандартними, так і новими способами «швидкого» заряду. Тим більше, така інфраструктура може виявитися найбільш доцільною при міжміських поїздках на електромобілі. Позитивний досвід встановлення та експлуатації таких зарядних станцій, реалізованих у США, Європі, Китаї і т.д., підтверджує актуальність даного напрямку. Так, компанія Tesla (США) встановлює свої зарядні станції на відстані 80 км - при заявленому пробігу електромобілів 300 км і більше з однієї зарядки. Природно, що настільки часте підведення електроенергії до зарядної станції стає проблематичним. Тому компанія робить акцент на поєднанні сонячної енергетики і електротранспорту, підтвердженням чого є об'єднання Tesla Motors з енергетичною компанією Solar Sity [135]. В результаті аналізу ринку, Tesla пропонує нову розробку - фотоелектричну зарядну станцію для автомобілів власного модельного ряду з метою відмови від централізованої електричної мережі, оскільки, починаючи з 2017 року, централізовані зарядні станції є платними. Ілон Маск хоче зберегти проїзд через 48 штатів США безкоштовним за рахунок енергії Сонця і фотоелектричних батарей.

Розглянемо стандартний заряд змінним струмом. Структурна схема зарядної станції представлена на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Схема стандартного заряду електромобілів від установок змінного струму на основі відновлюваних джерел енергії: ФЕБ – фотоелектрична батарея; ВЕУ – вітроелектрична установка; ІНВ – інвертор; ЗП – зарядний пристрій; ЕМ – електромобіль.

Станом на сьогодні робота таких зарядних станцій на основі ВДЕ вивчена не в повній мірі, що пояснюється відсутністю єдиних підходів до режимів роботи відновлюваного джерела енергії в залежності від ємності тягових акумуляторних батарей електромобілів і методу зарядки АБ при врахуванні випадкового характеру вироблення енергії, і т. п. Це в свою чергу вимагає проведення пошукових робіт по дослідженню режимів роботи акумуляторів електромобілів в складі зарядних станцій на основі відновлюваних джерел з метою встановлення раціональних режимів роботи систем даного типу. Зокрема, одним із завдань є визначення потужності ФЕБ і ВЕУ, а також буферних накопичувачів в залежності від енергоемності акумуляторної батареї електромобіля і необхідного часу заряду [18]. Крім того, необхідне врахування складових покриття енергопотребы зарядної станції від різних відновлюваних джерел, які мають різну природу, характер та розподіл надходження енергії в часі.

4.2. Існуючі підходи до комплексного використання відновлюваних джерел енергії

Однією з причин обмеженого використання відновлюваних джерел енергії є дискретність енергетичних потоків – періодичність надходження та змінність енергетичного потенціалу, що свого часу спричиняло значні ускладнення в багатьох випадках їх використання і не відповідало сучасним вимогам щодо енергопостачання споживачів. Крім того, в процесі широкомасштабного впровадження обладнання відновлюваної енергетики постає проблема створення регулюючих потужностей на основі традиційних енергосистем для забезпечення стабільного енергопостачання в періоди відсутності енергії ВДЕ. Безумовно, в деяких випадках така необхідність є цілком виправданою, однак у даний час в рамках відновлюваної енергетики існує цілий ряд технічних засобів та методів вирішення проблеми, в тому числі за рахунок використання акумуляторів електричної та теплової енергії.

Високі техніко-економічні показники застосування відновлюваних джерел енергії, стабільні робочі параметри енергетичного обладнання та стабільне енергопостачання споживачів досягаються при комбінованому виробленні теплової та електричної енергії, комплексному її акумулюванні та при поєднанні ВДЕ як між собою, так і з технікою та технологіями традиційної енергетики. Створення ефективних комплексних енергосистем (КЕС) з комплексним використанням різних акумуляторів енергії дозволяє підвищувати ефективність енерговикористання ВДЕ на 30-50%, поліпшує параметри виробленої енергії та забезпечує стабільність енергопостачання споживачів. Сучасні технології та обладнання, а також прийоми раціонального використання ВДЕ, основані на комплексному використанні різних видів ВДЕ і акумуляторів енергії, фактично ліквідували перешкоди щодо їх широкомасштабного впровадження [38,136].

Науково-технічними проблемами створення та дослідження комбінованих енергосистем на основі ВДЕ в Україні займаються вже більше 25 років – у Відділенні комплексних енергетичних систем на основі ВДЕ – з 1980 по 1987 рік

при Київському політехнічному інституті, з 1987 по 2003 рік – в Інституті електродинаміки НАН України, з 2004 року – в Інституті відновлюваної енергетики НАН України. Ряд науково-технічних закладів та галузевих інститутів займаються окремими проблемами акумулювання енергії ВДЕ.

Основними завданнями при створенні комплексних енергосистем на основі відновлюваних джерел енергії є забезпечення їх надійними акумуляторами енергії та створення ефективного допоміжного обладнання для зниження флуктуацій параметрів енергосистем і підтримання необхідних робочих параметрів, а також створення обладнання для автоматичного управління режимами їх роботи.

Оптимальне співвідношення окремих елементів в комплексних енергетичних системах на основі ВДЕ визначається з урахуванням багатьох факторів, що впливають на роботу таких енергосистем, тому при їх впровадженні необхідно проведення досліджень для кожного конкретного об'єкту.

Комплексні енергосистеми на основі відновлюваних джерел, призначені для енергозабезпечення споживачів тепловою та електричною енергією, повинні бути обладнані комплексною системою акумулювання електричної і теплової енергії для вирівнювання коливань навантажень в тепловій та електричній мережах, які виникають внаслідок періодичності та нерівномірності енергопостачання, та для підвищення коефіцієнту корисного використання енергоустановок. Обов'язковим є також використання ефективного допоміжного обладнання для підтримання необхідних робочих параметрів та автоматичного управління роботою КЕС.

Суть ефективності застосування комплексних енергосистем на основі ВДЕ в першу чергу полягає в заощадженні традиційних паливно-енергетичних ресурсів. Для її оцінки було вибрано такі основні критерії: економічна ефективність (строк окупності), екологічна ефективність, яка є наслідком зменшення споживання органічного палива (охорона та відновлення оточуючого

середовища), соціальна ефективність (збільшення робочих місць, поліпшення якості життя).

У сучасній відновлюваній енергетиці все більше уваги приділяється якісним показникам енергії. При цьому великого значення набуває використання акумуляторів енергії, що забезпечують вирішення цілого ряду проблем накопичення, зберігання та перетворення енергії ВДЕ. Таким чином, актуальною стає проблема розробки і створення високоефективних засобів для акумуляування електричної та теплової енергії.

При виборі накопичувачів енергії для конкретної енергетичної системи необхідно в однаковій мірі враховувати енергетичні та експлуатаційні показники як обладнання на основі відновлюваних джерел і споживачів енергії, так і накопичувачів енергії. До основних характеристик належать: питома потужність, питома енергія, питома вартість накопичувача енергії, термін заряду-розряду, термін служби, ККД, саморозряд, безпека, простота обслуговування, вид виробленої та споживаної енергії [137]. Серед багатьох типів акумуляторів, що можуть бути використані в різних технічних системах, для застосування у відновлюваній енергетиці обираються такі, що за своїми властивостями та характеристиками найбільш придатні до роботи з обладнанням на основі ВДЕ.

Системи акумуляування електричної енергії призначені для накопичення і зберігання електричної енергії, отриманої на об'єктах відновлюваної енергетики, та позапікової енергії промислової електромережі на об'єктах традиційної енергетики з подальшим електроживленням споживачів. При роботі з електрогенеруючим обладнанням на основі ВДЕ системи акумуляування електричної енергії, працюючи в режимі постійного підзаряду, вирівнюють добові коливання, що виникають у процесі експлуатації, і забезпечують стабільне живлення споживачів електроенергії. При роботі з промисловою електромережею системи акумуляування електричної енергії накопичують позапікову електроенергію в нічний час і забезпечують електроживлення споживачів у періоди відключення від неї.

Система акумулювання електричної енергії при застосуванні в комплексних енергосистемах повинна відповідати таким вимогам:

- забезпечувати стабільне електроживлення споживачів електроенергії незалежно від періодичності роботи відновлюваних джерел енергії та в періоди відключення промислової електромережі;

- мати оптимальну енергоємність, що залежить від потреб енергосистеми в кожному конкретному випадку і забезпечується набором акумуляторів з послідовним або паралельним підключенням;

- забезпечувати необхідну робочу напругу та автоматичне регулювання режимами роботи.

Вибір марки електрохімічних акумуляторів проводиться на основі аналізу їх технічних характеристик, які повинні забезпечувати ефективну роботу систем акумулювання з енергетичним обладнанням на основі відновлюваних джерел енергії. При визначенні енергоємності акумуляторної батареї необхідно орієнтуватися на створення резервного запасу електроенергії для стабільного живлення споживачів; розрахунки проводяться або уточнюються в кожному окремому випадку. Необхідна енергоємність забезпечується набором певної кількості акумуляторів у певному їх підключенні – послідовному чи паралельному.

Важливим напрямом розвитку відновлюваної енергетики є воднева енергетика, яка займається вирішенням проблем, пов'язаних із застосуванням водню як енергоносія і акумулюючого середовища. Для комплексних енергосистем на основі ВДЕ водень як енергоносіє дає можливість створювати довготривалі міжсезонні запаси енергії.

На основі аналізу науково-технічної інформації та практичних напрацювань у галузі водневої енергетики створено ряд моделей екологічно чистих систем виробництва, зберігання і використання водню різної енергетичної ємності в залежності від потужності енергоустановок, визначено їх енергетичні параметри, економічні показники, технічне і технологічне забезпечення. Системи акумулювання універсальні, можуть бути застосовані в енергосистемах на

відновлюваних джерелах енергії (вітрова, сонячна та гідросилова енергія), при цьому енергія первинних джерел енергії використовується для одержання водню на електролізних установках [38]. В Україні на протязі останніх 35 років проводяться науково-дослідні роботи щодо отримання, зберігання і використання водню як енергоносія в галузі відновлюваної енергетики та застосування його як палива в автотранспорті. Національна академія наук України має значний науковий потенціал у даній галузі, підтверджений прикладним використанням. Наприклад, діюча вітроводнева станція, впроваджена вперше у Європі в 1994 році у Фолькецентрі в Данії за участю вчених Інституту відновлюваної енергетики НАН України. Досвід експлуатації підтвердив ефективність її використання.

Основою роботи таких систем є перетворення електричної енергії, виробленої відновлюваними джерелами, в хімічну енергію водню з наступним використанням її споживачами у вигляді електричної і теплової енергії залежно від потреб споживачів.

Основним елементом міжсезонної системи акумулювання на основі водню, на який орієнтовано розрахунок всіх її елементів, є установка для отримання водню. В свою чергу, вибір установки пов'язаний з енергетичною потужністю відновлюваних джерел енергії і знаходиться у прямій залежності від потужності електрогенеруючого обладнання.

При розгляді технічних характеристик промислових електролізних установок найбільш прийнятною для вирішення задач у комплексі з вітроелектричними установками вважалась електролізна установка для виробництва водню методом розкладу води типу СЕУ російського виробництва, які експлуатуються в даний час у промисловості, зокрема на ТЕЦ. Було визначено, що дана установка може ефективно використовуватися в енергетичних комплексах на основі відновлюваних джерелах енергії, причому в процесі експлуатації і проведення відповідних науково-дослідних робіт можливі деякі зміни в її конструкції та режимах роботи з метою удосконалення процесу електролізу та підвищення ККД установки. Для цього були реальні передумови –

піддаються зміні режими роботи (підвищення робочих температур і тиску), заміна матеріалів електродів, зміна відстані між електродами, заміна азбестових діафрагм на діафрагми з нових матеріалів та інше. Таким чином, вибір установки СЕУ-4 в період розробки систем акумулювання на основі водню не тільки забезпечував виробництво водню, але й передбачав можливість проведення науково-дослідних робіт з метою удосконалення технології одержання водню методом розкладу води [38]. Однак за останні роки створено і випускається ряд електролізних установок з більш високими техніко-економічними показниками (зокрема електролізні установки італійського виробництва типу WERDER MODEL), більш ефективних і прийнятних для застосування у відновлюваній енергетиці.

Використання водню в комплексній енергосистемі здійснюється в таких варіантах:

- спалювання з одержанням теплової енергії;
- перетворення в електричну енергію (мотор-генератор, паливні елементи);
- використання в автотранспорті.

Досліджені різні варіанти використання водню в теплових установках, проведені розрахунки з урахуванням ККД установок. В умовах енергокомплексу на основі ВДЕ середньої потужності може здійснюватися спалювання водню в пальниках побутового і промислового призначення. При використанні водню для побутових потреб використовуються плити, оснащені водневими пальниками, наприклад, уніфіковані газові плити з деякими змінами в конструкції пальників. Для забезпечення гарячого водопостачання і опалення будинків водень спалюється із застосуванням промислових пальників.

Особливий інтерес для отримання електроенергії представляють водень-кисневі паливні елементи, при цьому також вирішується проблема використання кисню, отриманого в процесі електролізу води. В паливних елементах водень і кисень використовуються у співвідношенні дві об'ємних частини до однієї відповідно.

В результаті науково-експериментальних досліджень, проведених науковцями Інституту відновлюваної енергетики НАН України, визначено ефективні області застосування різних типів акумуляторів енергії у галузі відновлюваної енергетики, оптимальні режими експлуатації електрохімічних акумуляторів і створено нові високоефективні теплоакумуючі матеріали. На їх основі розроблено і впроваджено системи акумулювання енергії відновлюваних джерел:

- система аварійного електрозабезпечення житлових та промислових об'єктів;
- система акумулювання електроенергії для вітроустановок;
- система акумулювання електричної енергії на основі водню для вітро-водневої станції потужністю 100 кВт (впроваджена у Фолькецентрі, Данія).

Для стабільного і надійного енергозабезпечення споживачів ВДЕ розроблено ряд енергетичних систем із застосуванням різних комбінацій відновлюваних джерел енергії та комплексним використанням різних типів акумуляторів електричної і теплової енергії:

- автономна система енергопостачання на основі вітрових і сонячних установок, електрохімічних акумуляторів та автоматичної системи управління режимами роботи;
- комплексна енергосистема на основі вітрових і сонячних енергоустановок і систем акумулювання теплової та електричної енергії для індивідуальних фермерських господарств, житлових і промислових об'єктів;
- комплексна енергосистема для населеного пункту із застосуванням вітрових, сонячних енергоустановок, систем акумулювання електричної енергії, розгалуженої системи акумулювання теплової енергії та міжсезонної системи акумулювання на основі водню.

Створені комплексні енергетичні системи на основі відновлюваних джерел енергії та системи акумулювання пройшли стадію науково-дослідних робіт, частково забезпечені конструкторською документацією і знаходяться на стадії підготовки до виготовлення дослідних демонстраційних зразків. Визначено

ефективність застосування в умовах України ряду комплексних енергосистем на основі відновлюваних джерел енергії, найбільш перспективні з них представлено нижче [136, 138].

Схематичне зображення складових елементів та роботи комплексної енергосистеми для енергозабезпечення житлових та промислових об'єктів сільського господарства, показано на рис. 4.2.

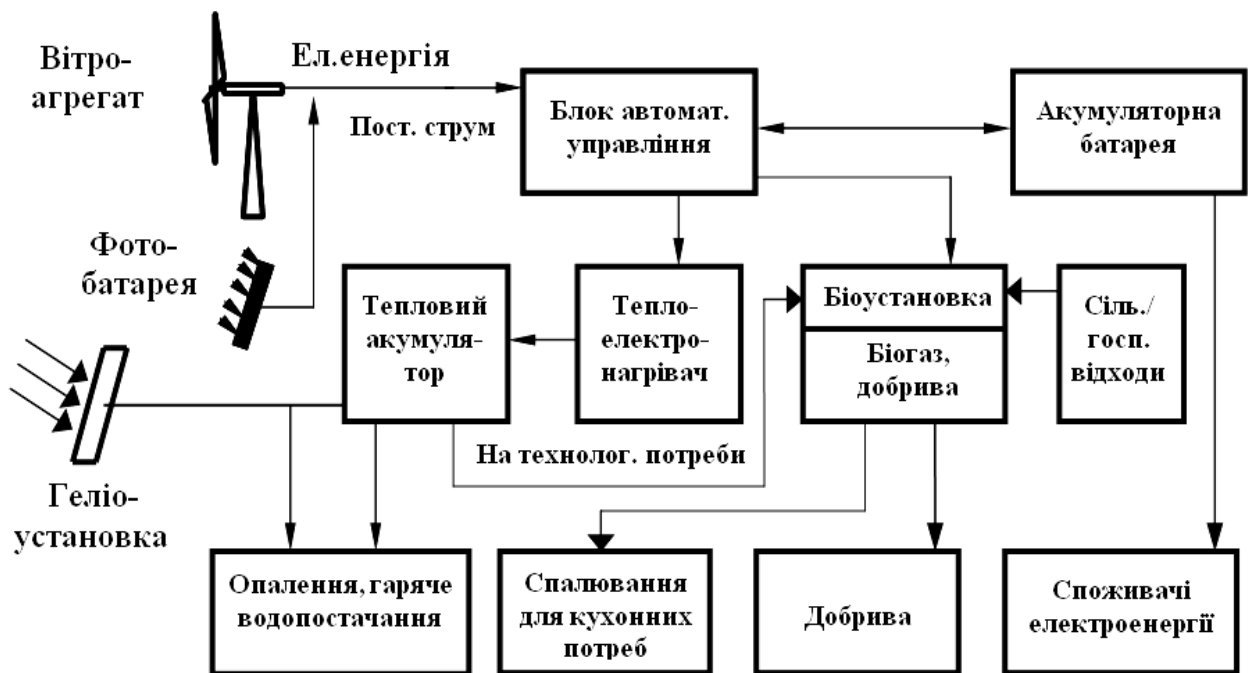


Рис. 4.2. Схема комплексної енергосистеми на основі ВДЕ.

До складу комбінованої енергосистеми входять: вітроелектрична установка (ВЕУ) потужністю 15 кВт, фотоелектрична сонячна батарея (ФБ) потужністю 50 Вт, геліоустановка з робочою поверхнею 5 м², біогазова установка (БГУ) з робочим об'ємом біореактора 3 м³, батарея електрохімічних акумуляторів ємністю 80 А·год, тепловий акумулятор енергоємністю 100 кВт·год.

Річна експлуатація такої комплексної енергосистеми в Київській області забезпечує сумарну економію традиційного палива в обсягах близько 16,5 т у.п., в тому числі: вітроустановка, при коефіцієнті використання 0,3, який досягається завдяки застосуванню системи акумуляування електричної енергії та блоку

автоматичного управління режимами роботи комплексної енергосистеми, заощаджує близько 14,2 т у.п./рік; фотобатарея – близько 0,052 т у.п./рік; геліоустановка з тепловим акумулятором заощаджує близько 1,3 т у.п./рік; біоустановка виробляє приблизно 1100 nm^3 біогазу, що еквівалентно 0,9 т у.п./рік (1nm^3 біогазу $\approx 0,8$ кГ у.п.).

Вітроустановка і фотобатарея виробляють електроенергію, яка розподіляється для подальшого використання за допомогою блоку автоматичного управління режимами роботи комбінованої енергосистеми. У першу чергу проводиться заряд акумуляторних батарей, які забезпечують живлення ламп освітлення, радіо- і телеапаратури, в другу чергу йде заряд теплового акумулятора. На тепловий акумулятор поступає вся надлишкова і некондиційна електроенергія від вітроустановки і фотобатареї та тепла енергія від геліоустановки.

Геліоустановка використовується в основному для забезпечення потреб гарячого водопостачання і, частково, потреб тепла для опалення. В теплі місяці року, коли знижуються потреби господарства в тепловій енергії, гаряча вода, отримана в процесі експлуатації геліоустановки, використовується для підтримання технологічної температури в біоенергетичному реакторі.

Біогазова установка виробляє біогаз, який поступає в основному на кухонні потреби, надлишки біогазу використовуються на гаряче водопостачання та опалення. В холодну пору року надлишки біогазу використовуються на власні потреби біогазової установки – для підтримання технологічної температури реакції анаеробного зброджування. Завдяки введенню в енергосистему акумуляторів енергії коефіцієнт корисного використання вітроустановки досягає 0,25-0,3, тоді як без систем акумуляування коефіцієнт корисного використання знаходиться в межах 0,1-0,15.

Автономна електроенергосистема на основі відновлюваних джерел енергії, схема якої представлена на рис. 4.3, призначена для автономного електроживлення об'єктів, віддалених від промислової електромережі (маяків, пасовищ, військових об'єктів, садових будинків та ін.) [38, 138].

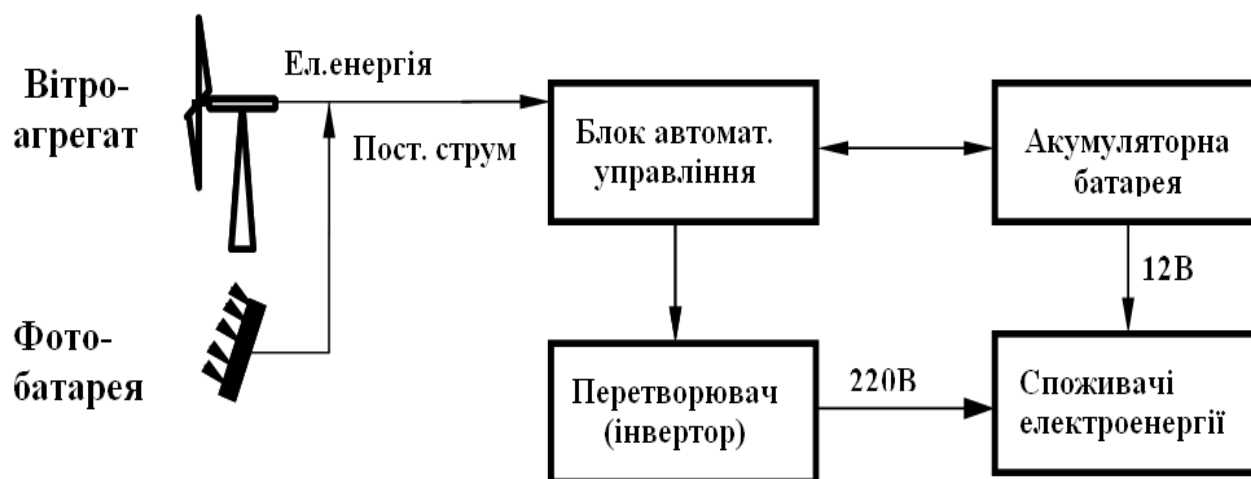


Рис. 4.3. Схема автономної електроенергосистеми на основі ВДЕ.

До її складу входять: вітроустановка потужністю 2 кВт, сонячна фотобатарея потужністю 50 Вт, батарея електрохімічних акумуляторів ємністю 80 А·год, автоматична система управління режимами роботи (АСУ). Означена комплексна енергосистема без застосування акумуляторів енергії здатна виробити близько 1,75 МВт·год електроенергії за рік ($\text{ККВ} \approx 0,1$). Завдяки застосуванню системи акумуляування електричної енергії та блоку автоматичного управління режимами роботи коефіцієнт корисного використання вітроустановки підвищується до 0,3.

Автономна енергосистема такого складу застосовується у випадках електроживлення споживачів постійним струмом та напругою 12 В (освітлення, теле- та радіоапаратура). Залежно від потреб споживачів, до складу автономної енергосистеми може вводитись інвертор, який забезпечує можливість подачі споживачам електроенергії напругою 220В, 50 Гц. Енергосистема може також ефективно використовуватись для катодного захисту трубопроводів.

Розроблено і виготовлено демонстраційний зразок системи резервного електроживлення комунальних та промислових об'єктів для нетрадиційної та традиційної енергетики, схематичне зображення якої представлено на рис. 4.4. Розрахунок її енергоємності системи проводиться в залежності від потреб споживачів і параметрів джерела енергії; система формується набором модулів

аккумуляторних батарей у кількості, що забезпечуватиме отримання необхідних технічних показників. Батарея електрохімічних акумуляторів енергоємністю забезпечує підвищення ефективності електроенергетичного обладнання сонячних та вітрових енергоустановок [136, 138].

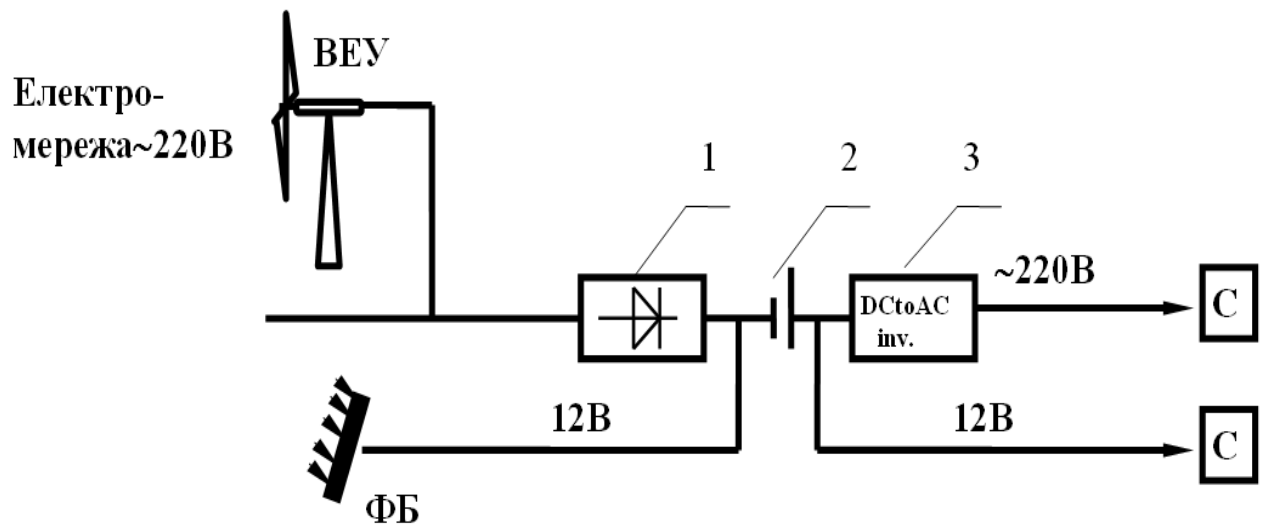


Рис. 4.4. Схема підключення системи резервного електроживлення:

1 – випрямляч, автоматика; 2 – акумуляторна батарея; 3 – інвертор; С – споживачі; ФБ – фотоелектрична батарея; ВЕУ – вітроелектрична установка.

Основними елементами вітроводневої станції (рис.4.5) [38,138] є вітроелектричний агрегат та міжсезонна система акумулювання енергії на основі водню. Система акумулювання має у своєму складі електролізу установку, обладнання для зберігання водню і кисню та перетворення водню в енергію необхідного споживачам виду. Для отримання електричної енергії використовуються паливні водень-кисневі елементи та мотор-генератор. Для забезпечення потреб споживачів у тепловій енергії водень спалюють у пальниках побутового та промислового призначення при деяких змінах у конструкції газових пальників. Тепловий акумулятор служить для утилізації технологічного тепла процесу електролізу води, що значно підвищує загальний ККД системи акумулювання. В даному рішенні передбачено також різні варіанти

використання водню та його паливних сумішей з бензином в якості палива для заправки автотранспорту.

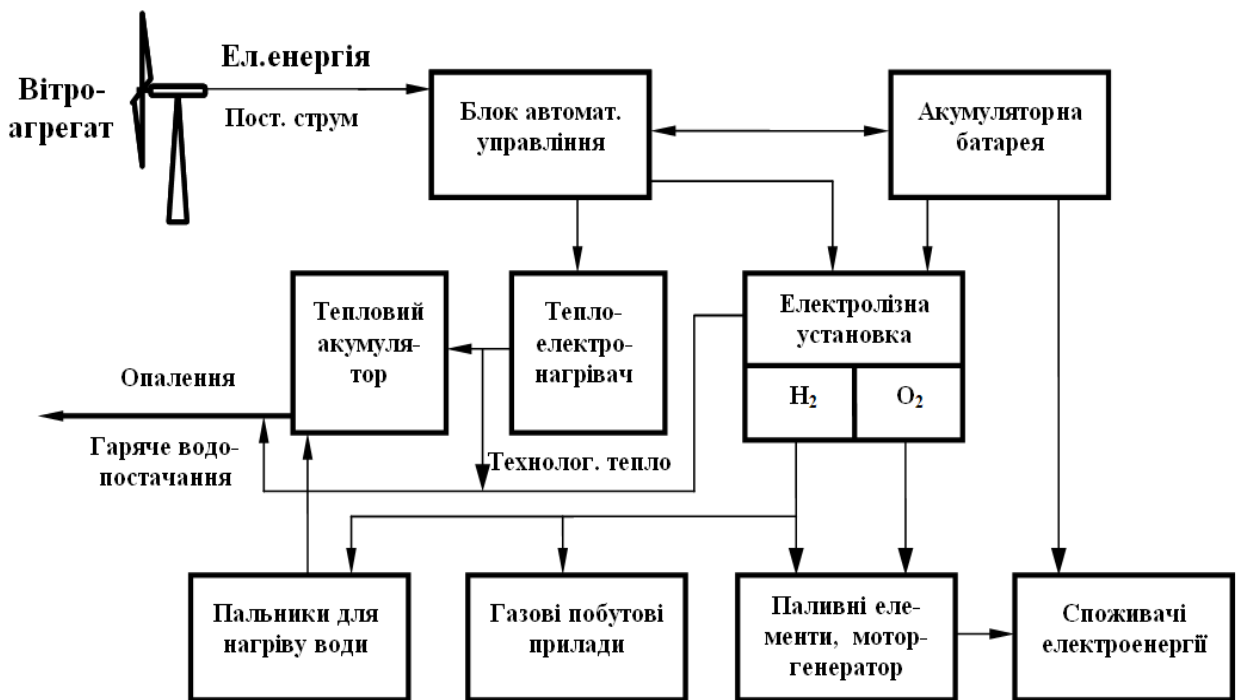


Рис. 4.5. Схема вітроводневої станції.

Особливо привабливим є комплексне використання енергії відновлюваних джерел на об'єктах, віддалених від ліній електропередач і важкодоступних місцях для їх підведення. В даному випадку витрати на доставку електроенергії можуть значно перевищувати витрати на установку устаткування на основі відновлюваних джерел енергії. Також увага звертається на необхідність розробки комплексних систем енергопостачання на основі відновлюваних джерел енергії для таких об'єктів, як великі будинки відпочинку, санаторії, ботанічні сади, заповідні зони, які розкидані на великих територіях. Їх енергопостачання з одного боку ускладнене, а з іншого – вимагає використання екологічно чистих джерел енергії. Інститутом відновлюваної енергетики НАН України розроблена і використовується як демонстраційний об'єкт комплексна енергосистема фотоелектричного і геліоенергетичного енергозабезпечення корпусу ІВЕ НАН України в Ботанічному саду ім. М.М. Гришка НАН України.

Проектом передбачене екологічно чисте електро- і теплопостачання і створення екологічно чистих транспортних засобів Ботанічного саду НАН України в м. Києві за рахунок енергії відновлюваних джерел.

Комплексні енергетичні системи для житлових та промислових об'єктів при компоновці, відповідній даній кліматичній зоні, та при врахуванні всіх вищенаведених факторів достатньо ефективні в експлуатації по всій території України. При визначенні оптимальних складових та потужності енергетичного обладнання, що входить до складу різних КЕС, встановлено, що в середній та північній географічних зонах України недоцільно прагнути їх повної автономності – деяку частку енергопостачання (недостатню кількість енергії, виробленої енергоустановками на основі ВДЕ) більш доцільно компенсувати не збільшенням потужності енергетичного обладнання, а використанням традиційного палива. Для південних областей України, при застосуванні пасивного теплового акумулювання в літній час, можна досягти повної автономності таких об'єктів [38,138].

На даному етапі новим напрямком розвитку систем комплексного використання відновлюваних джерел енергії слід вважати розроблення та впровадження у різних кліматичних зонах України автономних зарядних станцій електромобілів, а також водневих автономних заправних станцій електромобілів на паливних елементах з комплексним використанням енергії відновлюваних джерел, напрацювання і отримання конкретних результатів з метою визначення оптимальних технічних показників електрогенеруючого устаткування та обладнання на основі ВДЕ, що дозволить збільшити використання сонячного випромінювання та вітру враховуючи високі темпи нарощування електричних транспортних засобів (як чисто електричних, тобто, EV, так і гібридних - PHEV) на території України [14]. Розроблення систем комплексного використання відновлюваних джерел енергії для мереж автономних зарядних станцій дозволить збільшити енергетичну незалежність країни, при нарощуванні потужностей на основі власних ВДЕ.

4.3. Математичне описання процесу зарядження акумуляторних батарей на зарядних станціях електромобілів при комплексному використанні енергії сонячного випромінювання та вітру

Комплексне використання відновлюваних джерел енергії з буферним акумулюванням дає можливість покращити ефективність забезпечення споживачів енергією та підвищити її якість, підвищити коефіцієнт корисного використання енергоустановок на основі ВДЕ та значно знизити флуктуацію робочих параметрів енергетичних систем на основі ВДЕ.

Як відзначалось вище, математичні моделі зарядження АБ від ВЕУ та від ФЕУ на ЗСЕМ описуються відомими рівняннями (2.20, 3.10).

Робота ЗСЕМ на основі ФЕБ, так само, як і на основі ВЕУ має певні проблеми. Зокрема, в зимові періоди часу ЗСЕМ на основі ФЕБ не дає гарантованого заряду ЕМ через малий прихід сонячної енергії. Якщо потужність джерела енергії для ЗСЕМ розраховувати по зимовим показникам інтенсивності сонячного випромінювання, то у весняну, літню та осінню пори року постає питання неефективного використання генеруючого устаткування для заданого типу споживача.

Подібна ситуація спостерігається і при роботі ЗСЕМ на основі ВЕУ. Якщо потужність джерела енергії для ЗСЕМ розраховувати по літнім показникам швидкості вітру, то осінню, зимою та весною при збільшенні виробітку поставатиме питання неефективного використання генеруючих потужностей для заданого типу споживача.

Зважаючи на сказане вище, постає необхідність розроблення математичної моделі роботи ЗСЕМ на основі комплексного використання ФЕБ та ВЕУ з подальшим буферним акумулюванням енергії.

Робота такої зарядної станції буде ефективною при виконанні умови:

$$W_{AB}^{БУФ} = \omega^{ФЕУ} \cdot K_3^{ФЕУ} \cdot W_{ФЕБ} + \omega^{ВЕУ} \cdot K_3^{ВЕУ} \cdot W_{ВЕУ} = K_3^{AB} (W_{ВП}^{ЗСЕМ} + W_{AB}^{ЕМ}), \quad (4.1)$$

де: $\omega^{ФЕУ}$ – коефіцієнт забезпечення енергопотреби ЗСЕМ за рахунок ФЕУ;

ω^{BEV} – коефіцієнт забезпечення енергопотреби ЗСЕМ за рахунок ВЕУ.

Враховуючи моделі роботи елементів системи загальний вид моделі роботи ЗСЕМ на основі комплексного використання енергії Сонця та вітру виглядатиме наступним чином:

$$\begin{aligned} & \omega^{BEV} \cdot K_3^{BEV} \cdot \tau_{BEV} \cdot \int_0^{\infty} P_{BEV}(v) \cdot \phi(v) dv \\ & \sum \omega^{\Phi EV} \cdot K_3^{\Phi EV} \cdot \tau_{\Phi EV} \cdot U_{\Phi EV} \left(\left(I_{scs} \cdot \frac{G_a}{G_{as}} + \alpha_{scT} \cdot (T - T_s) \right) - I_s \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U_{\Phi EV}}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \right) = \\ & = K_{AB}^{3E} \sum \frac{1}{\eta_{3AB}} U_{AB}^{EM} \int_{C_0}^1 C_{AB}^{EM} \cdot \psi(c) \cdot dc \cdot W_{ВП}^{ЗСЕМ} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Запропонована модель дозволяє проводити аналіз взаємовпливу двох джерел енергії та випадкового характеру споживача на роботу ЗСЕМ в цілому. Для аналізу адекватності запропонованої моделі необхідно провести аналіз її роботи в програмному середовищі Matlab та порівняти результати моделювання з практичними даними систем даного типу.

4.4. Забезпечення енергією зарядної станції електромобілів на основі комплексного використання фотоелектричних та вітроелектричних установок з урахуванням кліматометеорологічних умов місцевості

Як було показано вище (розділ 2 та розділ 3), використання енергії одного тільки виду відновлюваного джерела енергії чи то вітру, чи то Сонця приводить до значного подорожчання ЗСЕМ за рахунок необхідності мати значну ємність буферного акумулятора, враховуючи, що вітрова енергія може бути меншою 4 м/с на протязі значного часу в літній період, а сонячна енергія взагалі не поступає в темну пору доби, яка в грудні може тривати до 16 годин.

При виборі вкладу в загальне надходження енергії відновлюваних джерел енергій від вітроустановки і сонячної електростанції необхідно привести їх до

вигляду, що полегшує оцінку цього вкладу. В подальшому ми будемо розглядати питомі значення енергії вітру і сонця на 1 м^2 вітроколеса чи фотопанелі.

Розрахунок коефіцієнтів логістичної кривої, що описує типову криву відносної потужності ВЕУ (рис. 4.6) дає такі значення: $a = 1$; $b = 60,43$ і $c = 0,9$. Розрахована крива потужності вітроустановки з використанням цих коефіцієнтів (рис. 4.7) свідчить про певну стабілізацію потужності вітроколеса, яка далі при передачі в електрогенератор фіксується на рівні номінальної.

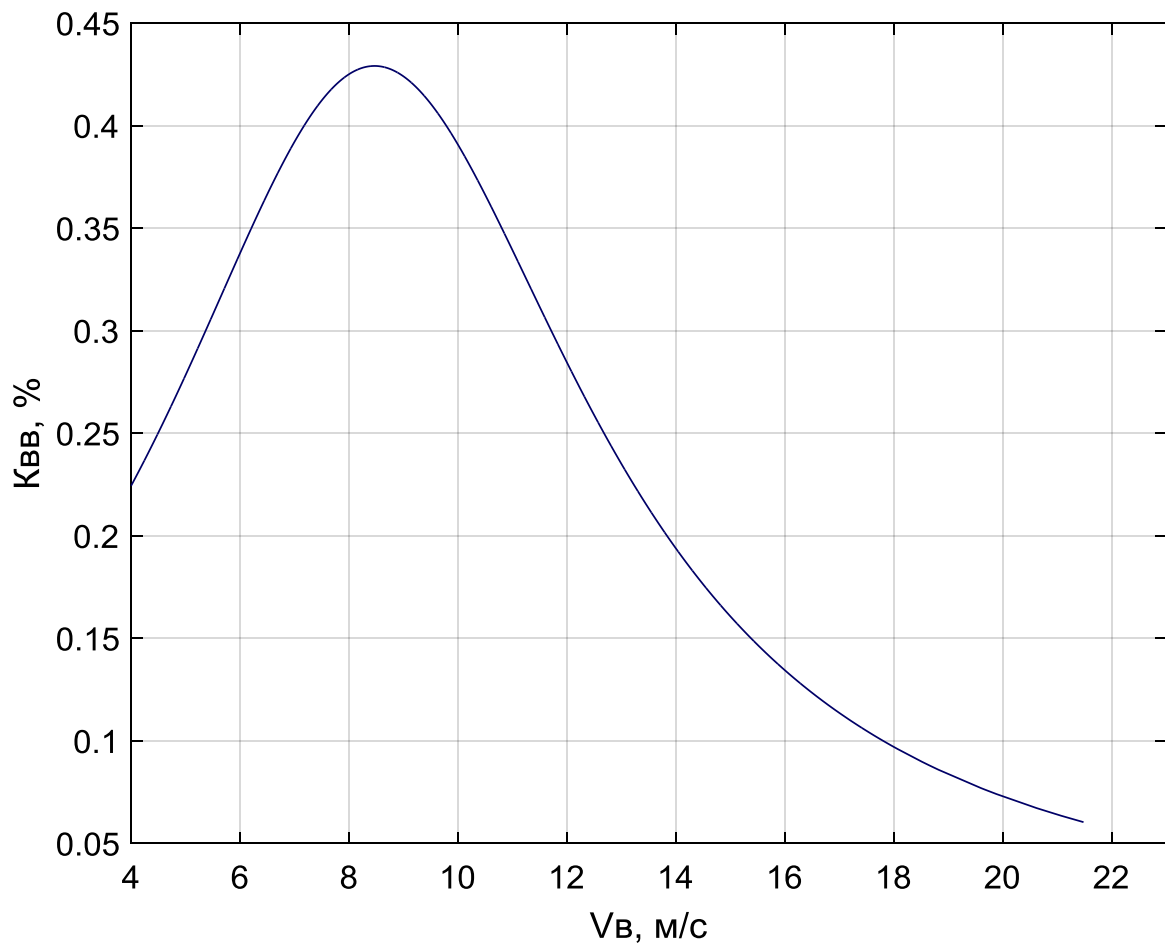


Рис. 4.6. Залежність $\eta(v)$ від швидкості вітру.

Температура фотомодуля теж досить сильно впливає на його потужність (рис. 4.8, 4.9). Якщо орієнтуватися на температуру навколишнього середовища, то можна прийти до неправильного висновку про слабкий вплив температури на функціонування фотомодулів (рис. 4.8), особливо при температурах, вищих -5°C , але врахування нагрівання фотомодулів сонячною радіацією приводить до

суттєвої зміни залежності потужності сонячної радіації від температури фотомодуля, яка в свою чергу визначається саме сонячною радіацією.

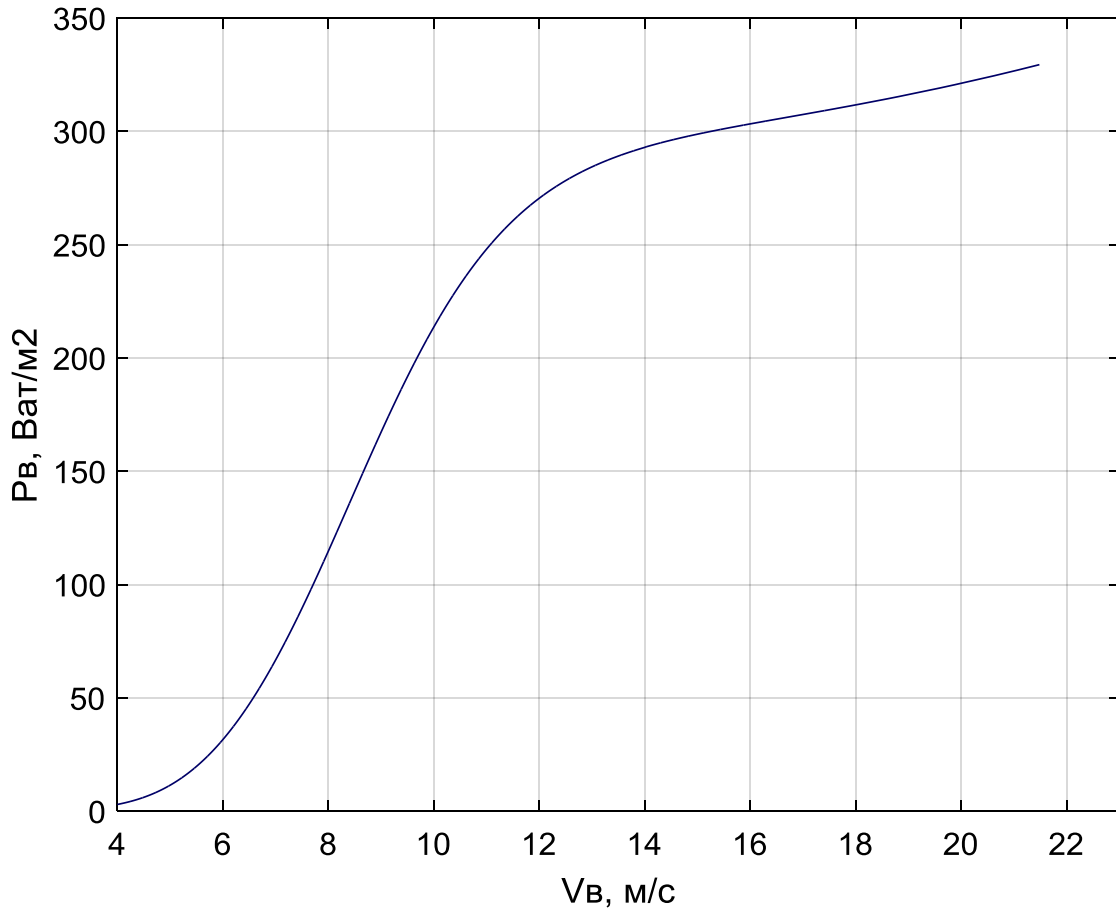


Рис. 4.7. Залежність питомої потужності вітроколеса від швидкості вітру.

Ця залежність, якщо розглядати її на протязі року, є розмитою по питомій потужності від 300 до 1000 Вт/м² прямою (рис. 4.9). Ця різниця в температурних залежностях викликана тим, що інтенсивність сонячної радіації може мати однакові значення при різних температурах навколишнього середовища і різні - при однаковій температурі (рис. 4.9).

В межах розрахункового інтервалу температур фотомодулів від -24°C до 70°C, які на протязі року мають місце у Мелітополі, усереднене значення ККД фотомодулів зменшується на 25% - від 23,2% до 17,4% (рис. 4.10).

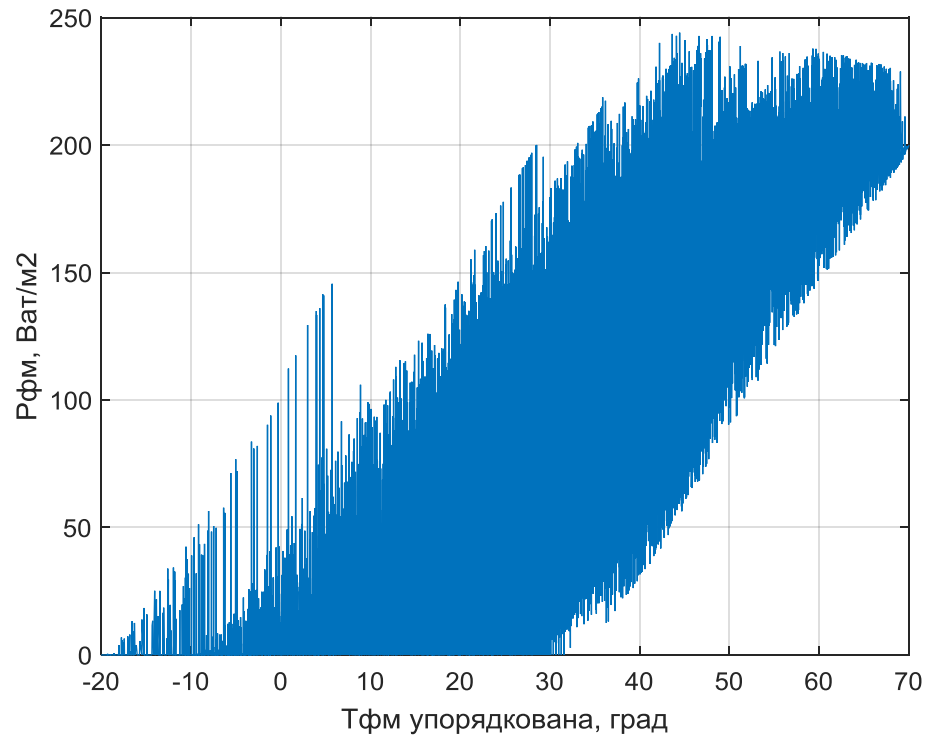


Рис. 4.8. Залежність питомої потужності фотомодуля від його температури.

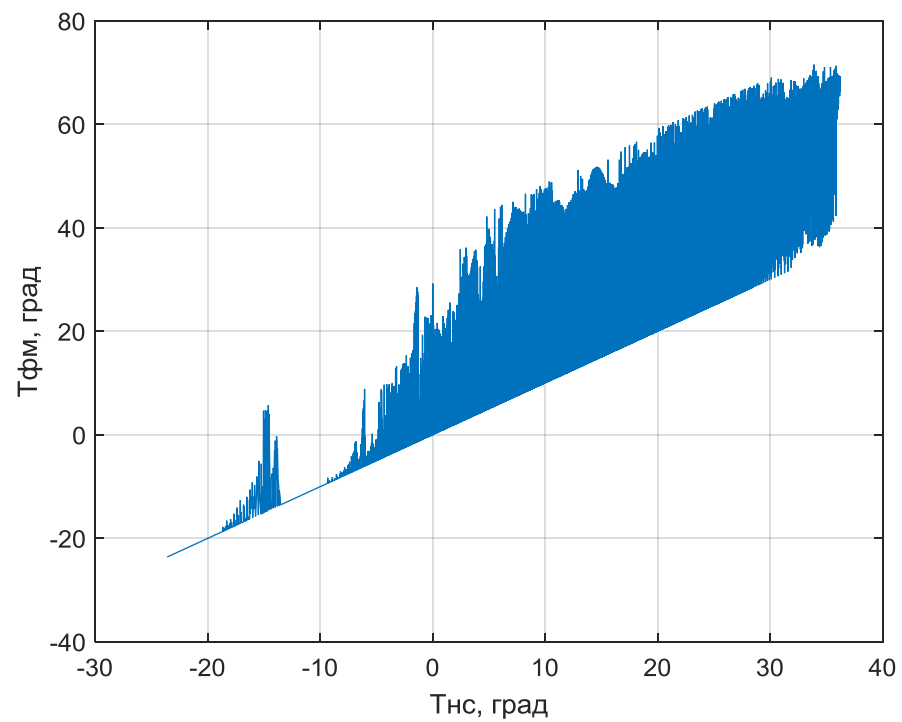


Рис. 4.9. Залежність температури фотомодуля від температури навколишнього середовища.

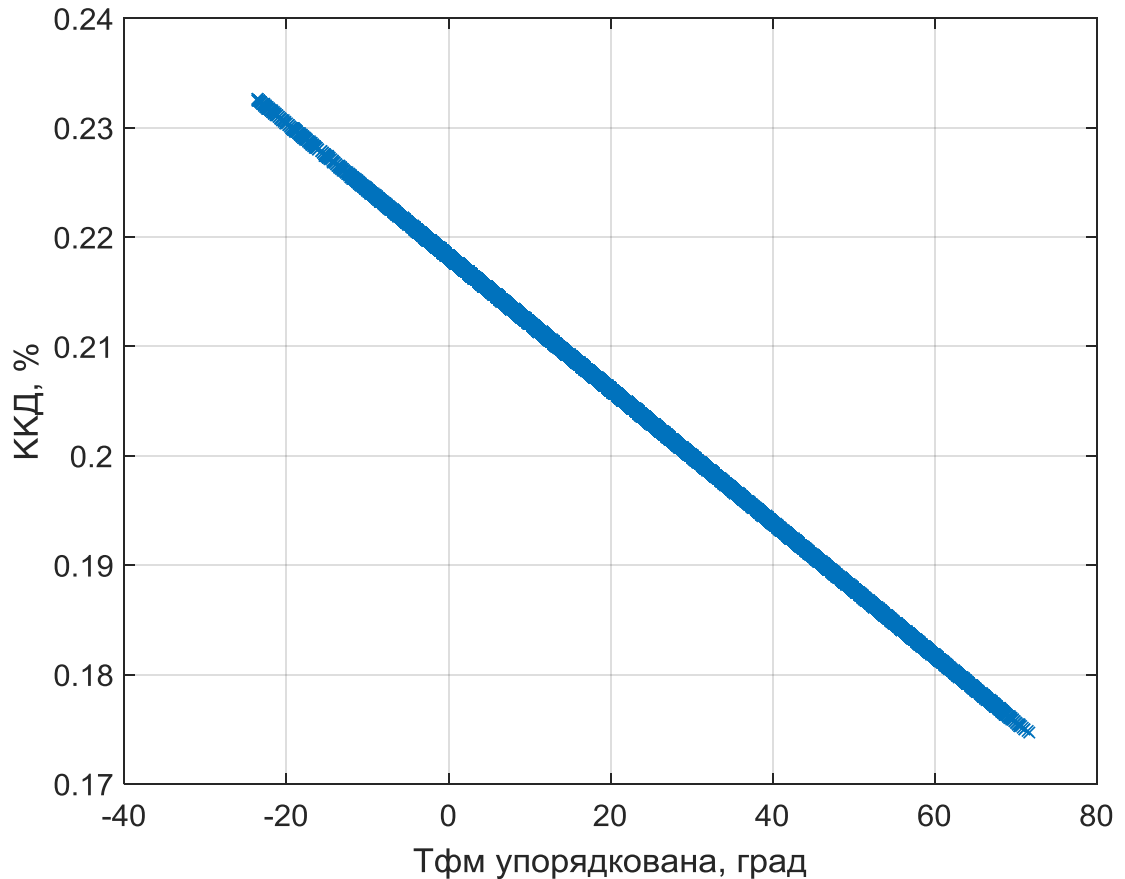


Рис. 4.10. Залежність ККД фотомодуля від його температури.

Звертає на себе увагу значно менше як по амплітуді, так і по частоті змін коливання питомої потужності фотомодуля в однаковому діапазоні температур навколишнього середовища і фотомодуля (рис. 4.11 і 4.12).

Якщо розглядати річне надходження енергії вітру і Сонця (рис. 4.13), то можна бачити, що сумісне їх використання супроводжується вирівнюванням добового надходження енергії за рахунок рознесення річних максимумів надходження енергії вітру і сонця, але добові коливання залишаються досить значними.

При комплексному використанні енергії сонця і вітру дійсно можна значно вирівняти загальне надходження енергії, як показано на рис. 4.13, де наведена енергія, що виробляється комплексним відновлюваним джерелом при однаковій площі по $0,5 \text{ м}^2$ фотопанелі і вітроколеса.

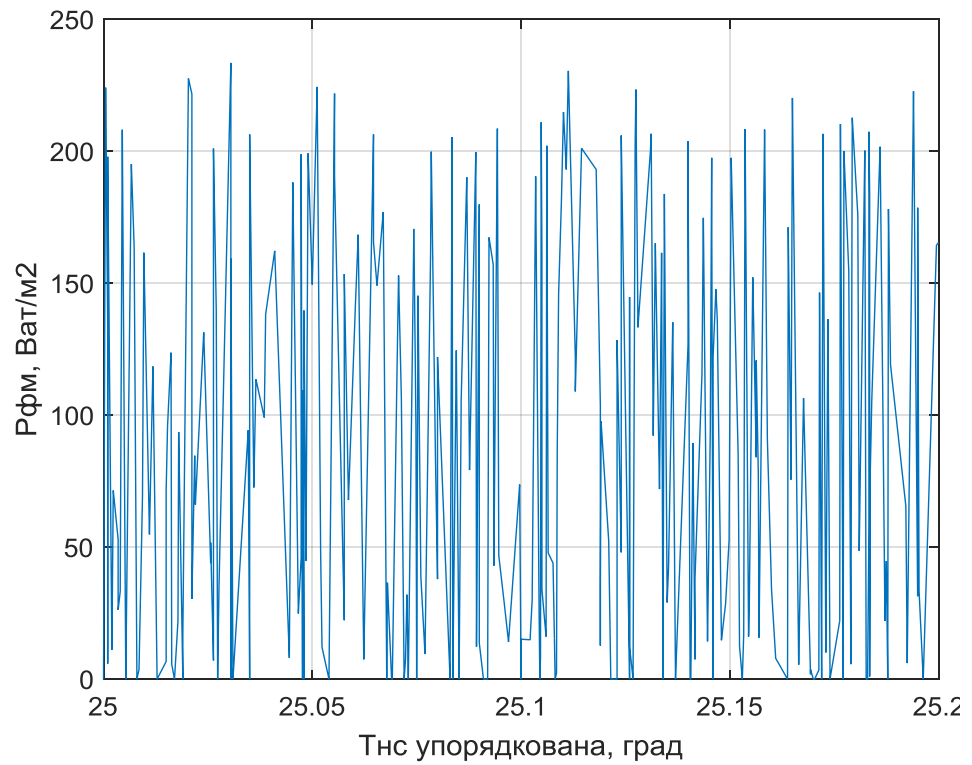


Рис. 4.11. Вплив температури навколишнього середовища на питому потужність фотомодуля.

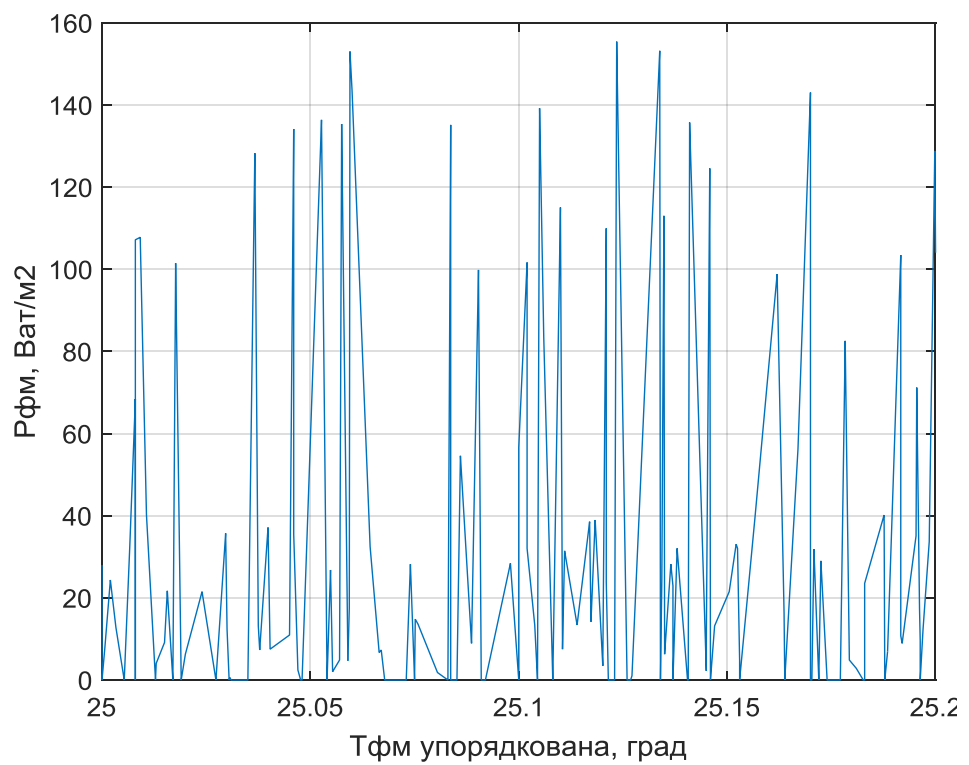


Рис. 4.12. Вплив температури фотомодуля на його питому потужність.

Підрахунок кількості днів, коли відновлювані джерела не виробляють необхідної для заряджання одного електромобіля енергії, показує, що для її мінімізації також необхідно розподілити енергію сонця і вітру як 1 до 1 (рис. 4.14).

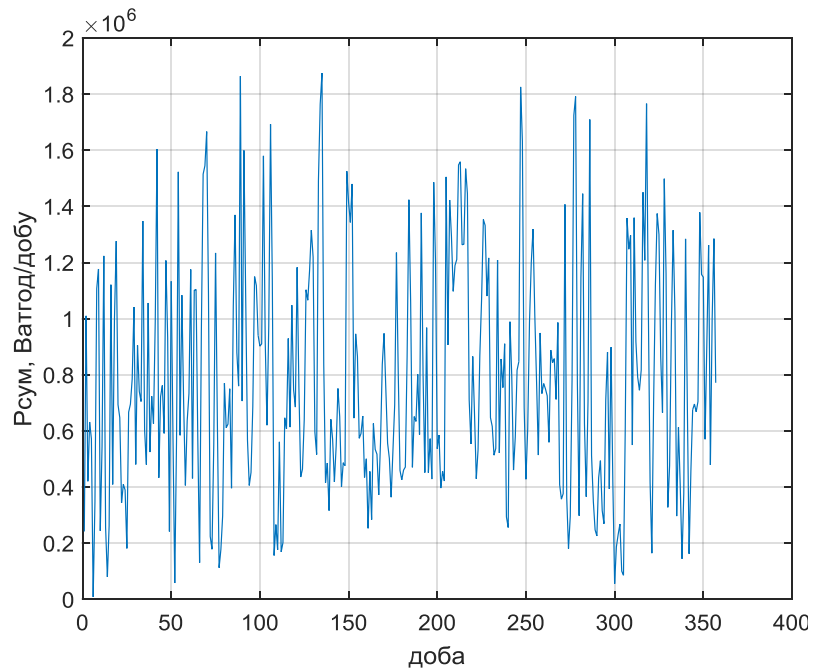


Рис. 4.13. Надходження енергії від комплексного джерела на протязі року.

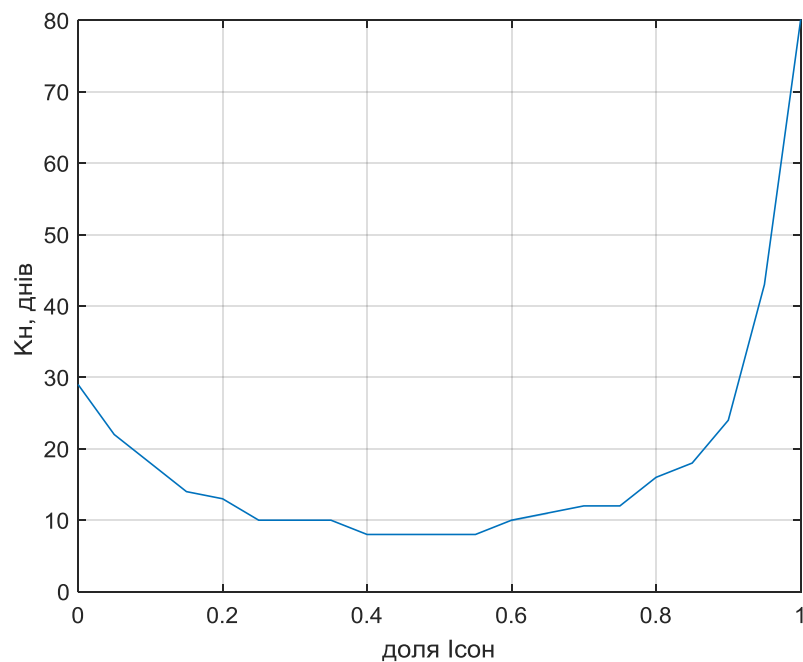


Рис. 4.14. Кількість днів, коли не вистачає енергії, в залежності від вкладу сонячної фотоустановки в загальну енергію.

При цьому для заряду одного електромобіля необхідна площа фотомодуля 250 м^2 і діаметр вітроколеса близько 17 -18 м.

Подобовий залишок енергії після гарантованого заряду одного електромобіля (рис. 4.15) по величині порівняний з енергією, що надходить за день, і може бути успішно використаний для виробництва водню.

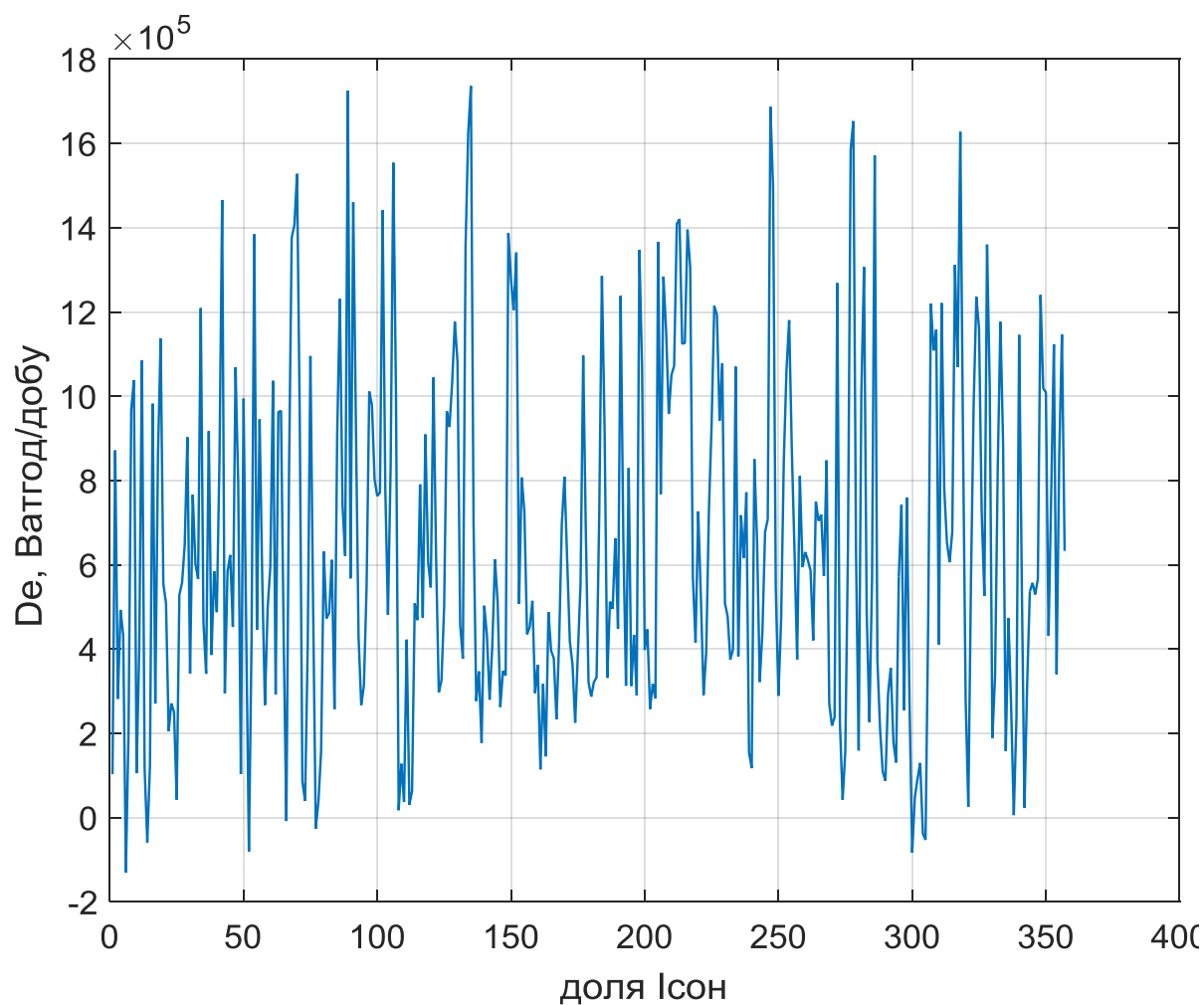


Рис. 4.15. Подобовий залишок енергії після гарантованого заряду одного електромобіля.

Статистична обробка даних показує, що мінімум розсіювання сумарної енергії має місце при долі енергії сонячного випромінювання 0,85 (рис. 4.16). Але при такому співвідношенні енергій сонця і вітру в 2 рази зростає кількість днів, в які сумарна енергія буде недостатньою для заряду електромобіля.

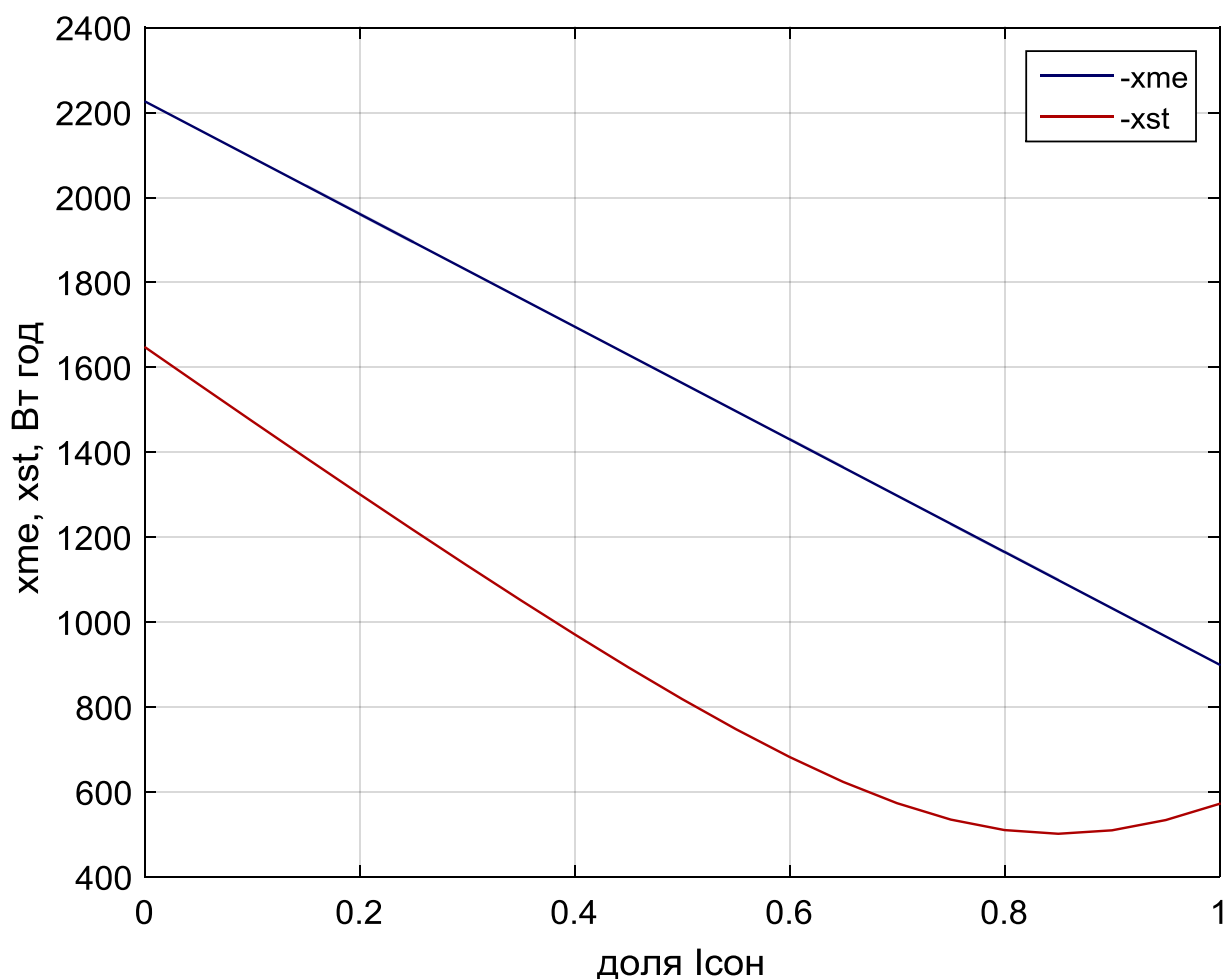


Рис. 4.16. Середнє арифметичне і середнє квадратичне значення для річної енергії на 1 м^2 .

Якщо прийняти до уваги активне використання електрохімічних акумуляторів і підібрати енергію сонця і вітру так, щоб на заряджання електромобіля використовувалася і накопичена в акумуляторах енергія, то мінімальне функціонування АЗСЕ із зарядом одного електромобіля в день можна забезпечити при співвідношенні енергії сонця і вітру 1:9, маючи вітрогенератор з діаметром вітроколеса 10 - 12 м і фотопанелі площею 10 м^2 , що значно легше реалізувати на зарядній станції. При необхідності заряджати більшу кількість електромобілів необхідно площу фотопанелі збільшувати пропорційно, а діаметр вітроколеса, як корінь квадратний з числа електромобілів.

4.5. Заряд електромобілів від відновлюваних джерел енергії

Стандартний заряд змінним струмом.

Потужність генеруючого устаткування на основі ВДЕ, необхідна для зарядження електромобіля визначається за виразом:

$$P_2 = \frac{P_1}{\eta_{инв}}, \quad (4.4)$$

де: P_1 – потужність зарядного пристрою електромобіля, кВт;

P_2 – потужність фотобатарей або вітрогенератора, кВт;

$\eta_{инв}$ – ККД інвертора.

Таким чином, для заряду одного ЕМ необхідно, щоб на практиці потужність ФЕБ або ВЕУ була не менше P_2 .

При одночасному заряді декількох (n) електромобілів потужність ФЕБ і ВЕУ повинна бути не менше $n \cdot P_2$.

На рис. 4.17 показано графік заряду АБ електромобіля стандартним методом (заряд від джерела змінного струму).

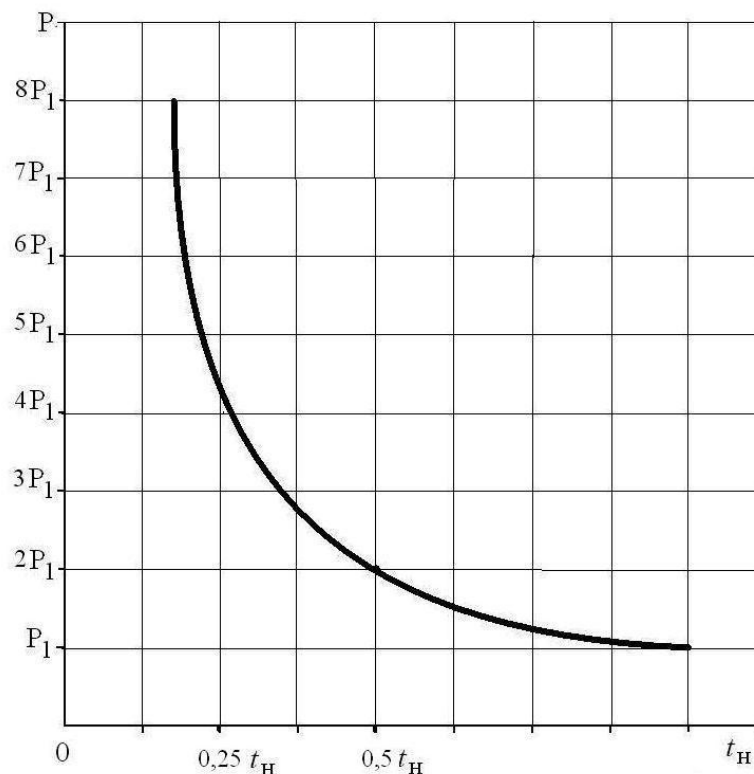


Рис. 4.17. Стандартний заряд змінним струмом:

P_1 - потужність зарядного пристрою електромобіля, необхідна для заряду АБ номінальним струмом $I_H = 0,1 C_H$;
 t_H - номінальний час заряду струмом I_H .

Як видно з графіка, зміна зарядного струму носить нелінійний характер, величина струму збільшується в обернено пропорційній залежності від часу заряду.

Заряд через буферний накопичувач.

Розглянемо швидкий заряд постійним струмом. Структурна схема зарядної станції представлена на рис.4.18 [18].

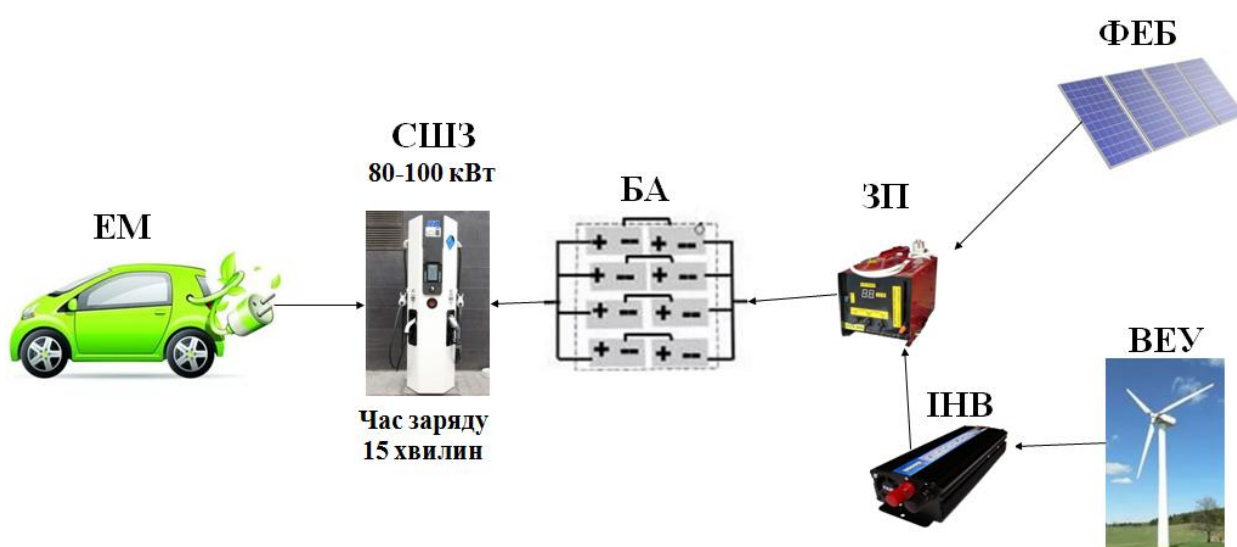


Рис. 4.18. Схема заряду електромобілів постійним струмом через буферний накопичувач від установок на основі відновлюваних джерел енергії:

ФЕБ – фотоелектрична батарея; ВЕУ – вітроелектрична установка; ЗП – зарядний пристрій; БА – буферний акумулятор; ІНВ – інвертор; СШЗ – станція швидкого заряду; ЕМ – електромобіль.

У якості накопичувача можуть бути застосовані акумуляторні батареї (АБ) або суперконденсатори (СК).

При заряді через накопичувач перш за все необхідно визначити його енергоємність, яка забезпечить повний заряд акумуляторної батареї електромобіля.

Енергоємність накопичувача визначається за формулою [18]:

$$Q_H = \frac{Q_{AB}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3}, \quad (4.5)$$

де: Q_H – енергоємність акумуляторної батареї ЕМ, кВт·год;

Q_{AB} – енергоємність накопичувача, кВт·год;

η_1 – ККД накопичувача при розряді;

η_2 – ККД зарядного пристрою ЕМ;

η_3 – ККД акумуляторної батареї ЕМ при заряді.

З іншого боку енергоємність накопичувача можна визначити за формулою:

$$Q_H = \frac{P_2 \cdot t}{\eta_4 \cdot \eta_5}, \quad (4.6)$$

де: t – час заряду накопичувача;

η_4 – ККД зарядного пристрою від фотобатареї або вітрогенератора;

η_5 – ККД накопичувача при заряді.

Тоді потужність фотобатареї або вітрогенератора визначається співвідношенням:

$$P_2 = \frac{Q_H \cdot \eta_4 \cdot \eta_5}{t} = \frac{Q_{AB} \cdot \eta_4 \cdot \eta_5}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot t}. \quad (4.7)$$

Звідси час заряду накопичувача дорівнює:

$$t = \frac{Q_{AB} \cdot \eta_4 \cdot \eta_5}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot P_2}. \quad (4.8)$$

На рис. 4.19 показано приклади швидкого заряду акумуляторних батарей постійним струмом за величиною енергоємності і напрузі найбільш вживаних на сучасних електромобілях.

Графіки швидкого заряду постійним струмом акумуляторних батарей електромобілів енергоємністю (30, 60, 90) кВт·год, напругою (300 і 400) В.

З графіків видно, що при зменшенні часу заряду струм джерела енергії і зарядний струм акумуляторної батареї може досягати значної величини, яка перевищує допустимі значення, що вимагає ретельного конструктивного опрацювання зарядного пристрою і організації режиму прискореного заряду [18].

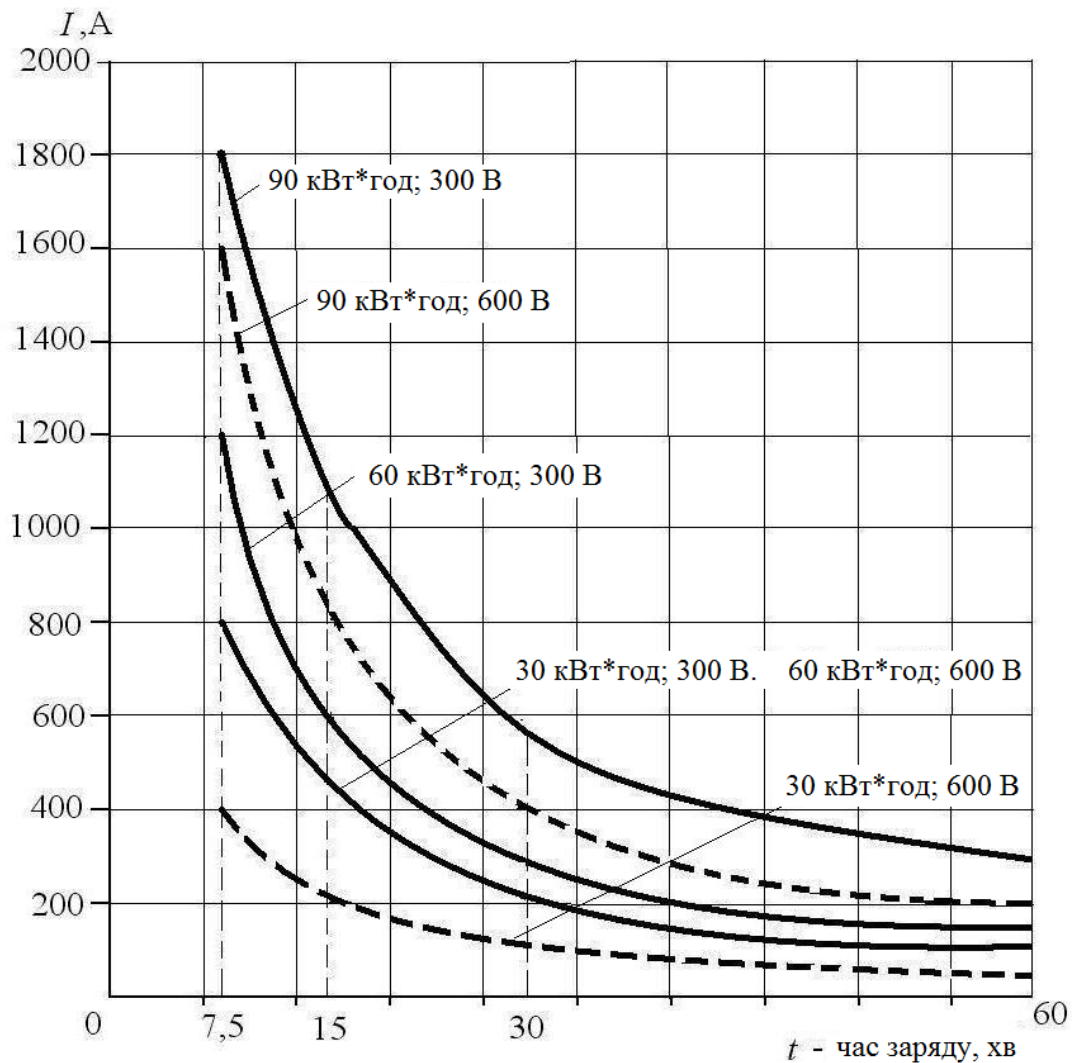


Рис. 4.19. Швидкий заряд акумуляторних батарей електромобілів постійним струмом.

Співвідношення, що визначають енергоємність накопичувача і часу його заряду від відновлюваних джерел енергії, отримані для швидкого заряду постійним струмом одного електромобіля і повинні бути відповідно скориговані

при заряді кількох електромобілів, як показано вище при заряді змінним струмом.

Підсумовуючи, слід відмітити, що аналіз методів заряду АБ електромобілів показав, що в багатьох випадках застосування відновлюваних джерел енергії (фотобатарей і вітрогенераторів) є доцільним, а в певних умовах єдино можливим, для створення розгалуженої інфраструктури зарядних станцій. Отримані співвідношення для визначення потужності первинних джерел енергії, енергоємності накопичувачів і тимчасових показників поповнення енергії акумуляторних батарей електромобілів дозволяють просто визначати ці параметри з відносною точністю. На вказані вище параметри впливають зовнішні умови, в яких працюють відновлювані джерела енергії (географічне розташування, пора року, час доби і т.д.), режими роботи ФЕБ і ВЕУ (окремо чи комплексно) та вплив поповнення зовнішньої енергії під час процесу заряду ЕМ.

Отримання таких інтегральних показників є досить складним завданням, що вимагає подальших теоретичних і практичних досліджень.

Переважна більшість зарядних станцій для автономного електротранспорту функціонує від енергомережі змінного струму. При досить поширеній інфраструктурі електромереж вже зараз виникають проблеми при установці зарядних станцій, їх підключенні і забезпеченні необхідним запасом потужності для заряду більше одного електромобіля.

Уникнути багатьох перерахованих вище проблем дозволяє технологія зарядки електромобілів від відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). На сьогоднішній день робота таких зарядних станцій на основі ВДЕ вивчена не в повній мірі. Одним із завдань, яке необхідно вирішити для ефективної роботи таких зарядних станцій є визначення потужності ФЕБ і ВЕУ, а також буферних накопичувачів в залежності від енергоємності акумуляторної батареї електромобіля і необхідного часу заряду.

Для заряду одного ЕМ необхідно, щоб на практиці потужність ФЕБ або ВЕУ була не менше потужності ЗП. При одночасному заряді декількох (n) електромобілів потужність ФЕБ і ВЕУ повинна бути не менше $n \cdot P_{ЗП}$.

Розглянемо швидкий заряд постійним струмом. У якості накопичувача можуть бути застосовані акумуляторні батареї (АБ) або суперконденсатори (СК). При заряді через накопичувач перш за все необхідно визначити його енергоємність, яка забезпечить повний заряд акумуляторної батареї електромобіля.

Для чотирьох методів заряду, визначених стандартом Європи IEC 62196 [139], а саме:

- метод 1 (Mode 1) – класичний заряд змінним струмом $I = 16 \text{ A}$, напругою $U = 220 \div 240 \text{ V}$ ($P = 3,5 \text{ кВт}$);
- метод 2 (Mode 2) – прискорений заряд струмом $I = 32 \text{ A}$, напругою $U = 220 \div 240 \text{ V}$ ($P = 7 \text{ кВт}$);
- метод 3 (Mode 3) – швидкий заряд змінним 3-фазним струмом $I = 63 \text{ A}$ та напругою $U = 690 \text{ V}$ ($P = 43 \text{ кВт}$, хоча часто встановлюють 22 кВт);
- метод 4 (Mode 4) – швидкий заряд постійним струмом $I = 400 \text{ A}$ та напругою $U = 600 \text{ V}$ (максимальною потужністю 240 кВт)

проведено аналіз співвідношення необхідних потужностей, що забезпечуватимуться ФЕБ та ВЕУ в умовах України. Потужності ВЕУ та ФЕБ вибирались виходячи з умови, що потужність джерел енергії завжди має бути більше потужності споживача (рис. 4.20-4.21) [28]. Тобто: $P_{\text{ген}} > P_{\text{нав}}$.

В результаті проведених досліджень встановлено, що заряд одного ЕМ від ВЕУ та ФЕБ за першою схемою можливий усіма чотирма методами, однак при збільшенні потужності зарядної станції, зростає надлишковий баланс енергії, яка не використовується та не вирішується питання гарантованого заряду через випадковий характер генеруючого устаткування.

Заряд одного ЕМ від ВЕУ та ФЕБ за другою схемою можливий усіма чотирма методами, а буферний акумулятор підвищує надійність заряду.

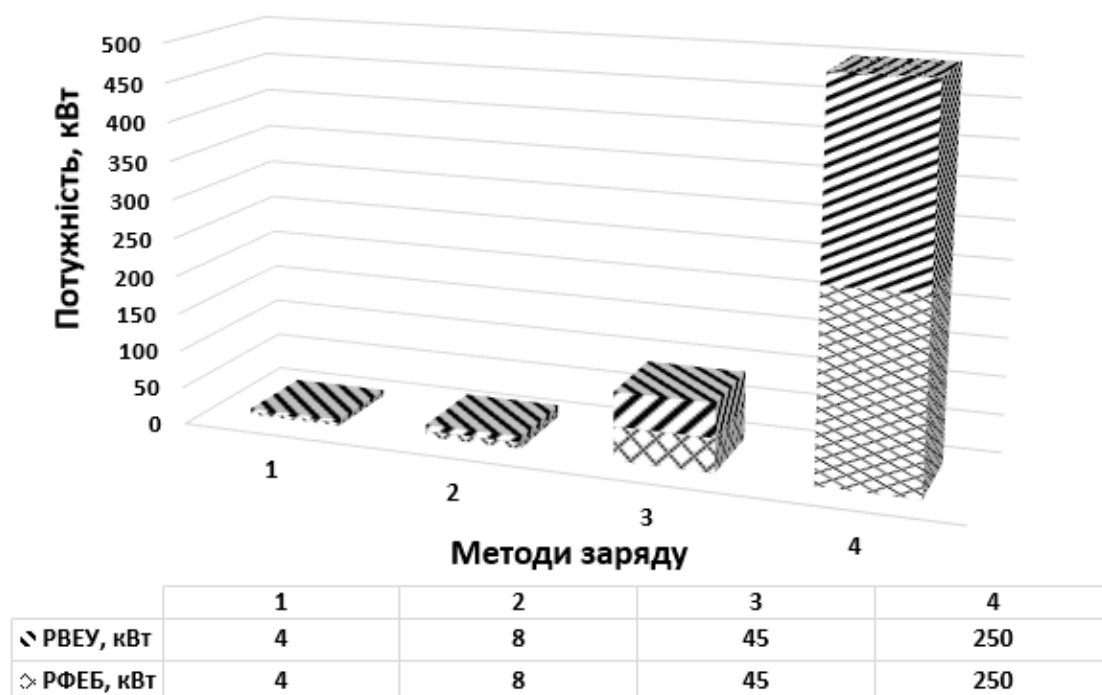


Рис. 4.20. Діаграма необхідних потужностей ВЕУ та ФЕБ для заряду ЕМ чотирма методами.

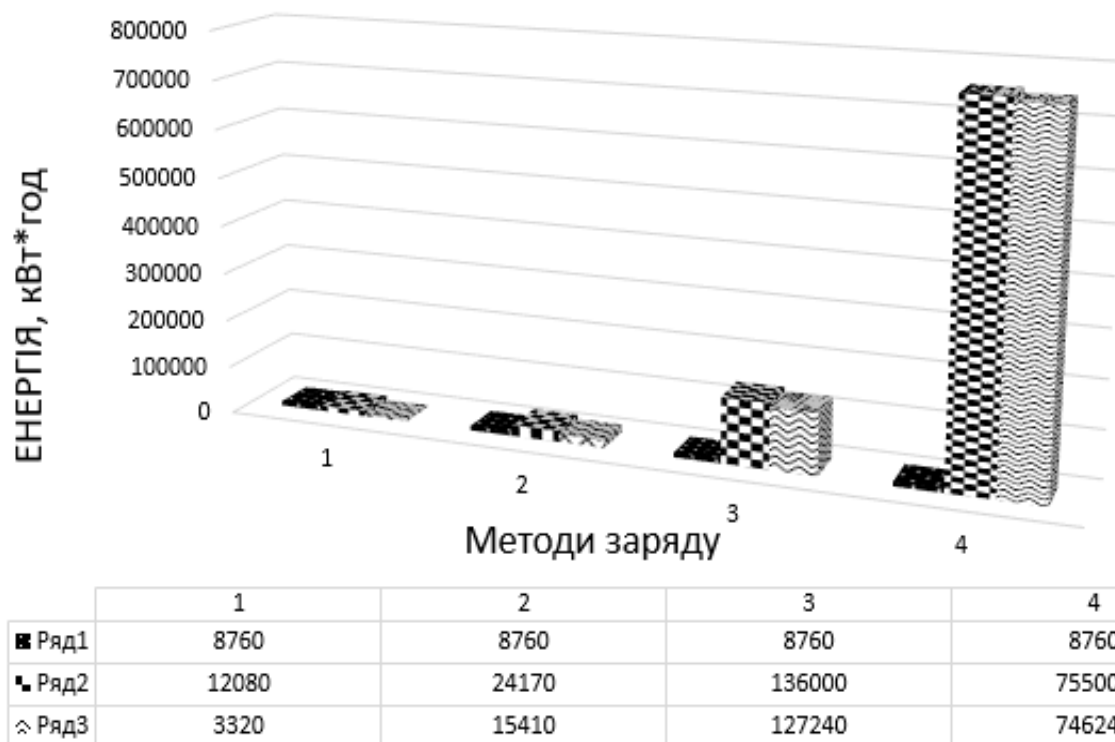


Рис. 4.21. Діаграма виробництва та споживання енергії для заряду ЕМ чотирма методами.

4.6. Аналіз факторів, що впливають на зниження енергоємності тягової акумуляторної батареї та міжзарядного пробігу електромобілів

Чим більше електромобілів (ЕМ) в даний час з'являється на ринку і експлуатується в різних сферах світового господарства, тим більше розмов ведеться про можливість зарядки тягових акумуляторних батарей (ТАБ) в будь-якому місці знаходження такого електротранспорту, включаючи як міські райони, так і міжміські шосе для забезпечення надійного руху електромобілів між містами.

Сьогодні практично всі випущені електромобілі мають заявлений міжзарядний пробіг понад 100 км, що цілком задовольняє споживачів при експлуатації електромобілів в міських умовах або в невеликій віддаленості від міста (наприклад, під час поїздки на дачу). У цьому випадку також не виникає проблем і з зарядкою ТАБ електромобіля, яку можна здійснити як від домашньої розетки, так і від зарядних станцій, інфраструктура яких в містах з кожним роком, в т.ч. і в Україні все більше розширюється.

Інша ситуація складається при експлуатації ЕМ на міжміських трасах, де незважаючи на деякі «екзотичні» проекти (наприклад, безконтактна «швидка зарядка» типу «Supercharger» на окремих ділянках дороги під час руху електромобіля) в даний час єдиним реальним способом забезпечити ефективну зарядку електромобілів є установка станцій «швидкої зарядки» ТАБ по шляху проходження ЕМ.

Зважаючи на відмічене вище проведемо аналіз факторів, що впливають на практичний міжзарядний пробіг електромобіля та визначення оптимальної відстані між станціями швидкої зарядки, що встановлюються на міжміських дорогах загального користування.

Як правило, виробники електромобілів часто вказують «рекламний» міжзарядний пробіг ЕМ без вказівки цілого ряду факторів, що впливають на цей показник. До них можна віднести такі:

- швидкість руху ЕМ;
- ступінь зарядки ТАБ;
- ККД зарядки і розрядки ТАБ;
- температура навколишнього середовища;
- деградація ТАБ у міру зносу;
- маса вантажу екіпажу ЕМ.

Оскільки одним з найбільш істотних факторів є швидкість руху ЕМ, то розглянемо вплив швидкості руху на величину питомої витрати енергії (кВт· год/км) для декількох типів електромобілів.

Опір руху ЕМ (і відповідно витрати питомої енергії) залежить від кількох складових, основна з яких – сила P_k опору коченню.

$$P_k = fG\cos\alpha, \quad (4.9)$$

де: f - коефіцієнт опору коченню;

G – маса ЕМ, кг;

α – кут підйому.

В результаті потужність N_k , яка витрачається на подолання сили опору коченню для горизонтальної дороги ($\cos\alpha = 1$), має вигляд:

$$N_k = \frac{VfG}{1000}, \quad (4.10)$$

де: V - швидкість руху, м/с.

Якісні експериментальні залежності зміни коефіцієнта опору коченню від швидкості руху (α), тиску повітря в шині (β) і моменту, що передається через колесо (ν), показано у вигляді відповідних графіків на рис. 4.22.

Слід зазначити, що сила опору, споживана потужність і питома витрата енергії ЕМ нелінійно залежать від швидкості руху, причому вони значно збільшуються з ростом швидкості. В реальних умовах руху ЕМ за містом його середньостатистичних швидкості коливається в інтервалі 60-120 км/год. Якщо за початковий відлік береться витрата енергії (заявлений виробником ЕМ) при швидкості 40 км/год, тоді до швидкості 120 км/год питома витрата енергії буде нелінійно змінюватися в бік значного збільшення [140] .

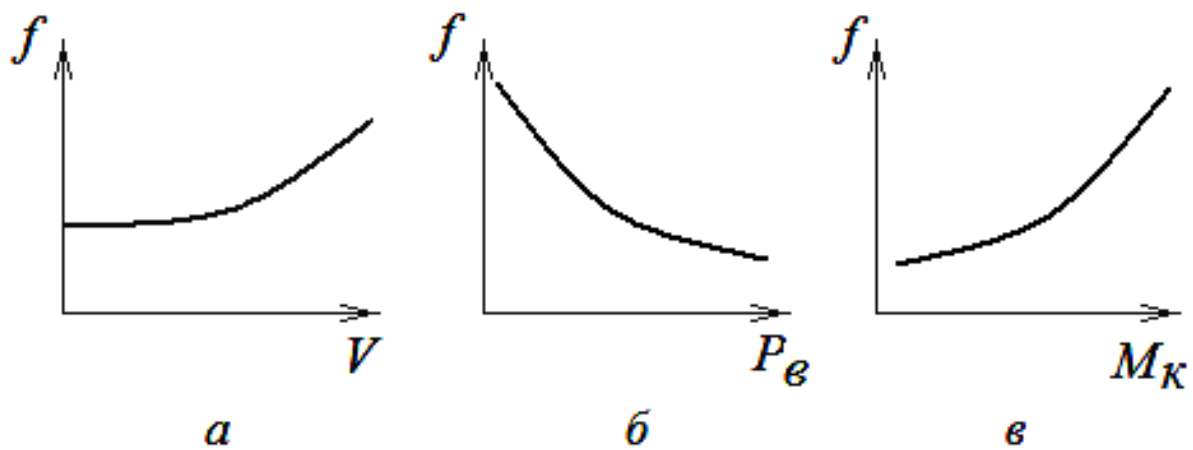


Рис. 4.22. Експериментальні залежності зміни коефіцієнта опору коченню від швидкості руху (а), тиску повітря в шині (б) і моменту, що передається через колесо (в).

На рис. 4.23 показано графіки зміни питомої витрати енергії у зв'язку зі збільшенням швидкості ЕМ для кількох електромобілів з різною енергоємністю ТАБ.

Як видно з графіків (рис.4.23), в міру збільшення швидкості витрати енергії значно зростають і, відповідно, пробіг ЕМ на максимальній швидкості знижується в кілька разів у порівнянні з пробігом при 40 км/год. Цей факт необхідно враховувати при виборі відстаней між зарядними станціями, особливо на міжміських ділянках доріг.

Результати експериментальних пробігів на електромобілі Таврія показано на кривій 5 (рис. 4.23). Основні технічні характеристики наведено в табл. 4.1. Як видно з графіку, експеримент на електромобілі Таврія достатньо показує загальну тенденцію зниження дальності пробігу зі збільшенням швидкості електромобіля, що відповідає розрахунковим даним, наведеним на кривих 1-4 серійних закордонних електромобілів. На рис. 4.24 наведено зовнішній вигляд електромобіля Таврія.

кВт·год/км

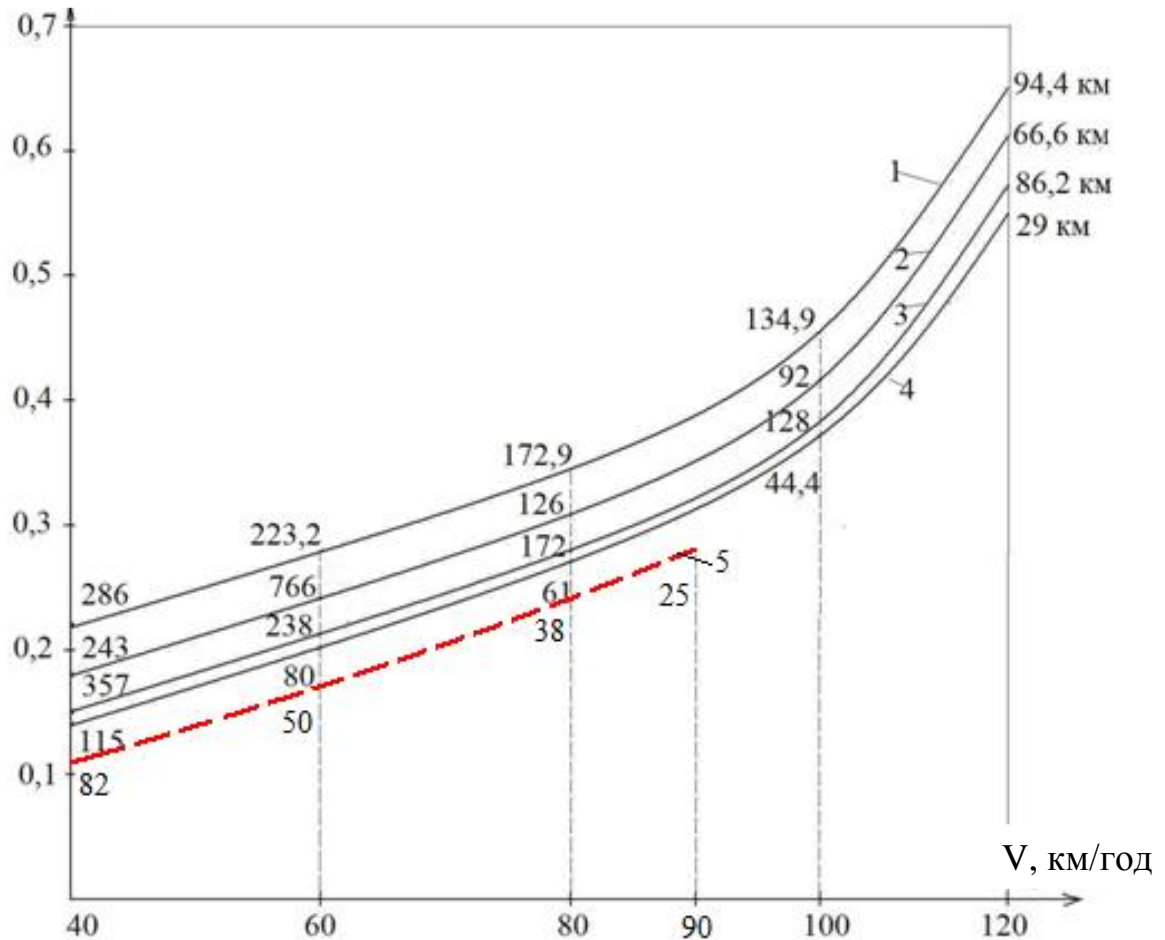


Рис. 4.23. Зміни питомої витрати енергії у зв'язку зі збільшенням швидкості ЕМ для кількох електромобілів з різною енергоємністю тягової акумуляторної батареї:
 1 – Byd E6; 2 – Nissan Leaf 2018; 3 – Tesla Model 3;
 4 – Peugeot iOn5; 5 – Таврія.

Іншим важливим фактором, що впливає на величину енергоємності ТАБ і, відповідно, на пробіг ЕМ, є температура навколишнього середовища [142]. При високій температурі необхідно витратити енергію ТАБ на кондиціонування салону і охолодження відсіку акумуляторної батареї. При низькій температурі енергія витрачається на обігрів салону і, якщо не передбачено термостатування відсіку ТАБ, тобто підтримання середньої температури біля 25 °С, тоді може відбуватися природне зниження енергоємності ТАБ, причому воно різне для

різних типів ТАБ. Як показала практика експлуатації електромобіля, наприклад, марки «Nissan Leaf 2018», у зимовий час його пробіг не перевищував 80 км.



Рис. 4.24. Зовнішній вигляд електромобіля Таврія.

Звернемося тепер до питання ступеня зарядженості ТАБ електромобіля на станціях «швидкої зарядки» і ступеня зарядженості АБ, при якій електромобіль повинен стати на зарядку. Відомо, що ідеологія «швидкої зарядки» передбачає обмежений час стоянки ЕМ у зарядної станції, встановленої на міжміській трасі. Отже ТАБ електромобіля заряджається до 80% максимальної енергоємності, а подальша його дозарядка до 100% передбачає зниження зарядного струму і значне збільшення часу пробігу електромобіля, що неприйнятно при їзді за містом. Разом з тим користувачам електромобілів рекомендується підключатися до станції з ТАБ, що розряджена не менше, ніж 10%.

В табл. 4.1 наведено основні технічні дані деяких сучасних ЕМ.

Основні технічні дані деяких сучасних ЕМ [99-105]

| № п/п | Електро-мобіль | Маса ЕМ, кг | Маса АБ в % маси ЕМ | Питома витрата енергії при швидкості 40 км/год | Енергоємність ТАБ, кВт· год |
|-------|------------------|-------------|---------------------|--|-----------------------------|
| 1 | Byd E6 | 2200 | 27,9 | 0,314 | 61,4 |
| 2 | Nissan Leaf 2018 | 1557 | 25,7 | 0,165 | 40 |
| 3 | Tesla Model 3 | 2000 | 25 | 0,145 | 50 |
| 4 | Peugeot iOn5 | 1195 | 13,9 | 0,139 | 16 |
| 5 | Таврія | 1020 | 10 | 0,11 | 7 |

Згідно з даними в роботі [142], тягова акумуляторна батарея ЕМ має такі показники, як ККД зарядки і розрядки. Якщо перший показник впливає на економічну складову - необхідно «закачати» більше енергії від зарядної станції в ТАБ, ніж накопичиться її в батареї, то в другому випадку ККД розряду безпосередньо впливає на міжзарядний пробіг машини в сторону його зменшення. Як правило виробники ТАБ не публікують таких даних, і користувач ЕМ може визначити значення цих ККД тільки експериментальним шляхом, враховуючи цей фактор в подальшому при експлуатації машини.

Ще одним фактором, що впливає на міжзарядний пробіг, є маса вантажу, що перевозиться, і екіпажу ЕМ. Показники пробігу між зарядками не уточнюються виробником як при повному завантаженні машини, так і в разі, коли в ЕМ буде знаходитися, наприклад, 2-3 людини плюс багаж, або при електромобілі з одним водієм і т.д.

За даними [142-144] питома витрата енергії ТАБ електромобіля на кілометр шляху знаходиться в прямій залежності від його маси. Інтерполюючи наведені в цих роботах дані, отримаємо графіки залежності витрати енергії в кВт·год/км від маси ЕМ, представлені на рис. 4.25 в діапазоні до 3,0 тон. Очевидно, що питомі витрати енергії значно зростають зі збільшенням маси ЕМ, тобто цей фактор також необхідно враховувати при визначенні середнього міжзарядного пробігу ЕМ.

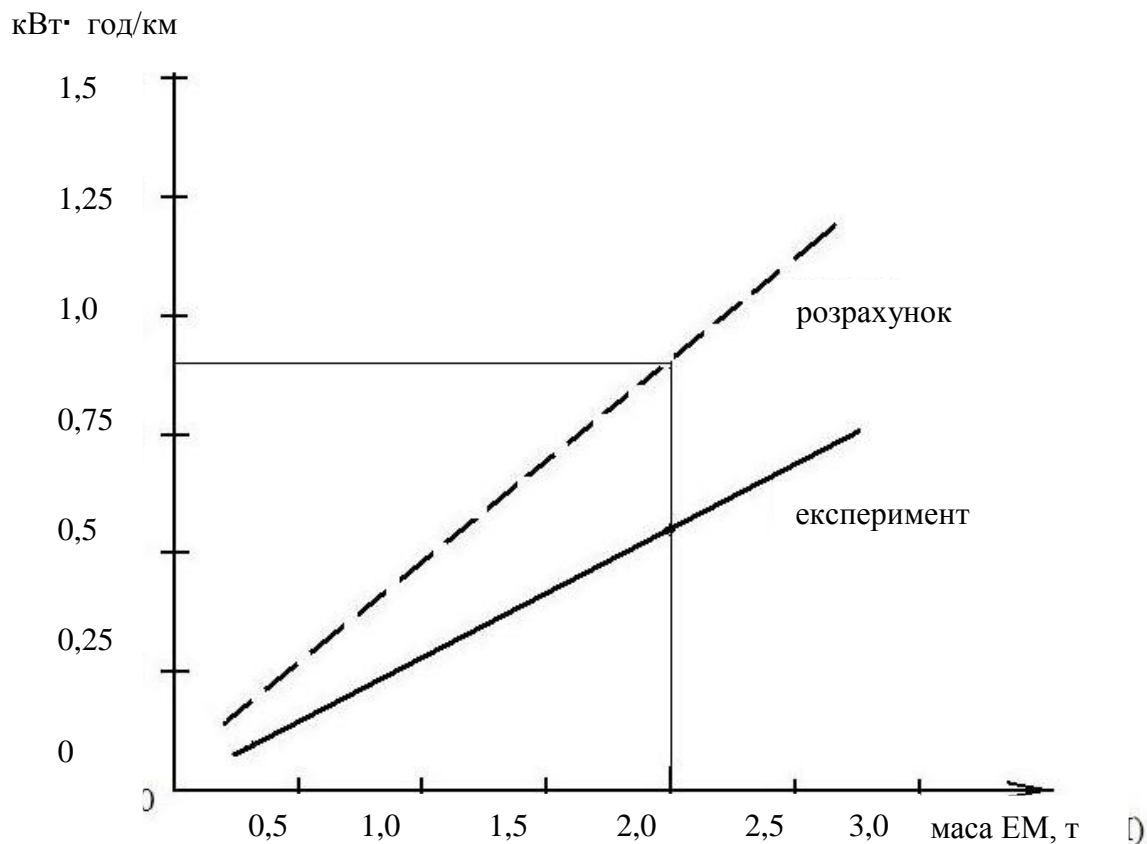


Рис. 4.25. Залежності витрати енергії від маси ЕМ.

Крім того, деградація ТАБ у міру її експлуатації в електромобілі також впливає на зниження її ємності, тим більше при здійсненні «швидкої зарядки», і за даними виробників 80% ємності ТАБ вже має місце через 2-3 роки експлуатації ЕМ.

Таким чином, аналіз впливу на енергоємність тягової акумуляторної батареї електромобіля перерахованих вище факторів показує, що в середньому

практичний міжзарядний пробіг може знижуватися на 20 - 50% в порівнянні з вказаним виробником ЕМ. З цієї причини на сучасному рівні розвитку автономних джерел живлення для зарядки ТАБ електромобілів середня відстань між станціями «швидкої зарядки» на міжміських трасах не повинна перевищувати 75-80 км практично для всіх випущених в даний час в світі електромобілів.

4.7. Методика організації зарядних станцій електромобілів з використанням відновлюваних джерел енергії

Реалізація зарядних станцій електромобілів з використанням відновлюваних джерел енергії як первинних генераторів електроенергії повинна спиратись на принципи, що визначатимуть максимальну ефективність реалізації таких систем. Результати попередніх досліджень та висновків отриманих в розділах 2-4, дозволяють запропонувати рекомендації по реалізації ЗСЕМ в умовах України. Розглянемо більш детально ключові позиції, що дозволятимуть створювати ефективні ЗСЕМ в умовах України.

1. Призначення автономної зарядної станції.

Для прийняття рішення про реалізацію ЗСЕМ з використанням ВДЕ в першу чергу необхідно визначитися з її призначенням, тобто необхідне проведення аналізу потенційних споживачів, а саме можливих типів електричних транспортних засобів, що заїжджатимуть на підзаряд (це можуть бути електроцикли, легкові електромобілі, гібридні підзаряджувані транспортні засоби, електробуси, електротягачі).

2. Вибір місця розташування.

Проводиться аналіз та визначаються найбільш оптимальні місця встановлення ЗСЕМ з максимально зручними під'їзними та від'їзними шляхами, аналізується зручність транспортної інфраструктури. Враховуються особливості місця розташування при виборі генеруючого устаткування. Зокрема, для міської інфраструктури більш раціональним вважається застосування

фотоелектростанцій в складі ЗСЕМ в той час, як на міжміських трасах можливе застосування вітрових, сонячних та комплексних вітро-сонячних енергоустановок в складі зарядних станцій.

3. Визначення необхідної енергоємності буферної акумуляторної батареї.

Статистичний аналіз потенційних споживачів ЗСЕМ з урахуванням специфіки проведення швидкого заряду та врахування власних витрат з використанням алгоритму запропонованого в параграфі 2.5 дозволяє встановити необхідну енергоємність буферної акумуляторної батареї зарядної станції.

4. Визначення необхідної потужності генеруючого устаткування на основі ВДЕ.

На основі аналізу прийнятого варіанту первинного джерела електричної енергії з використанням реальних даних знаходження енергії відновлюваного джерела для даної місцевості встановлюється необхідна потужність генеруючого устаткування. В межах населених пунктів розглядаються варіанти найбільш оптимального варіанту досягнення необхідної розрахункової потужності фотоелектричної станції. За умови розташування ЗСЕМ на міжміських дорогах в результаті аналізу реальних даних по інтенсивності сонячної радіації та швидкості вітру визначається потужність вітрової, сонячної чи комплексної вітро-сонячної енергоустановки в залежності від обраної схеми зарядної станції.

5. Вибір обладнання та устаткування необхідного для реалізації ЗСЕМ з використанням ВДЕ.

На основі розрахунків усіх компонентів системи ЗСЕМ проводиться вибір обладнання з урахуванням його техніко-економічних показників та гарантійних термінів експлуатації.

6. Розробка технічної пропозиції для її розгляду та затвердження органами місцевого самоврядування.

Після проведення технічних розрахунків та визначення найбільш оптимальних варіантів реалізації ЗСЕМ готується технічна пропозиція реалізації проекту та подається для розгляду органами місцевого самоврядування. Для

підсилення позитивних сторін реалізації ЗСЕМ з використанням ВДЕ відмічаються екологічні переваги таких систем та відсутність впливу на місцеві електричні мережі.

4.8. Висновки до розділу

1. Стабільне і безперебійне забезпечення споживачів енергією необхідної якості за рахунок комплексного використання енергії відновлюваних джерел і акумуляторів енергії збільшує шанси розвитку відновлюваної енергетики в різних галузях господарювання, особливо автономної відновлюваної енергетики.

2. На найближчу перспективу найбільшої ефективності можна досягти при впровадженні комбінованих енергосистем на основі відновлюваних джерел енергії у місцях недостатнього забезпечення електроенергією та на об'єктах, віддалених від електромережі. Найбільш ефективним впровадженням комплексних енергосистем на основі ВДЕ на даний час є застосування їх у сільськогосподарських комплексах, індивідуальних фермерських господарствах, індивідуальних житлових та садових будинках, у пансіонатах, дитячих таборах та на віддалених від електромережі об'єктах (житла пастухів, військові об'єкти, окремі населені пункти та ін.).

3. Потреба в системах акумулювання залежить від обсягів впровадження енергетичного обладнання на основі відновлюваних джерел енергії, яке в процесі експлуатації не може досягти необхідних показників без застосування накопичувачів енергії. Так, експлуатація геліотехнічного обладнання недостатньо ефективна без використання акумуляторів тепла або холоду; при експлуатації автономних вітроелектростанцій без акумуляторів електричної енергії використати можна лише 20-30% електроенергії від технічно можливого обсягу її виробництва.

4. Для створення нових ефективних комплексних енергосистем та визначення оптимальних режимів їх експлуатації необхідним є подальший розвиток наукових основ відновлюваної енергетики із застосуванням сучасної

матеріально-технічної бази, методичного та інформаційно-аналітичного забезпечення, що прискорить виконання науково-дослідних, проектно-конструкторських та експериментальних робіт із впровадженням комбінованих енергосистем на основі відновлюваних джерел енергії.

5. Вперше запропонована математична модель процесу зарядження акумуляторних батарей на зарядних станціях електромобілів з комплексним використанням вітро- та фотоелектричних установок, яка дозволяє проводити аналіз взаємовпливу двох джерел енергії та випадкового характеру споживача на роботу ЗСЕМ в цілому і може бути використаним для визначення технічних характеристик компонентів системи в будь-якій місцевості території України, за умови наявності реальних даних надходження енергії сонячного випромінювання та енергії вітру.

6. З використання програмного середовища Matlab проведено аналіз роботи ЗСЕМ з комплексним використанням вітро- та фотоелектричних установок та встановлено, що співвідношення потужності генеруючого устаткування визначається питомими енергетичними показниками місцевості по даним джерелам енергії. Зокрема, для місцевості м. Мелітополь Запорізької області ефективна робота ЗСЕМ з комплексним використанням ВЕУ та ФЕУ по зарядженню протягом року забезпечуватиметься при співвідношенні коефіцієнтів $\omega_3^{BEU}/\omega_3^{FEU}$ як 1:0,7. Дане співвідношення потужностей відновлюваних джерел дозволяє максимально ефективно використовувати генеруючі потужності при заданій енергоємності буферного акумулятора зарядної станції.

7. Аналіз методів заряду АБ електромобілів показав, що в багатьох випадках застосування відновлюваних джерел енергії (фотобатарей і вітрогенераторів) є доцільним, а в певних умовах єдино можливим, для створення розгалуженої інфраструктури зарядних станцій. Отримані співвідношення для визначення потужності первинних джерел енергії, енергоємності накопичувачів і тимчасових показників поповнення енергії

аккумуляторних батарей електромобілів дозволяють просто визначати ці параметри з відносною точністю.

8. Встановлено, що заряд одного ЕМ від ВЕУ та ФЕБ за розглянутою схемою без буферної АБ можливий усіма чотирма методами, однак при збільшенні потужності зарядної станції, зростає надлишковий баланс енергії, яка не використовується та не вирішується питання гарантованого заряду через випадковий характер генеруючого устаткування. Заряд одного ЕМ від ВЕУ та ФЕБ за другою схемою можливий усіма чотирма методами, а буферний аккумулятор підвищує надійність заряду.

9. Аналіз швидкості руху електромобіля на дальність пробігу показав, що в середньому практичний міжзарядний пробіг може знижуватися на 20 - 50% в порівнянні з вказаним виробником ЕМ. З цієї причини на сучасному рівні розвитку автономних джерел живлення для зарядки ТАБ електромобілів середня відстань між станціями «швидкої зарядки» на міжміських трасах не повинна перевищувати 75-80 км практично для всіх випущених в даний час в світі електромобілів.

РОЗДІЛ 5

ОПИСАННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ НА ЗАПРАВНИХ СТАНЦІЯХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ВІТРУ

5.1. Використання енергії відновлюваних джерел для виробництва водню як універсального енергоносія

Як відомо, «чистий» електромобіль – це вид транспорту, який приводиться в рух за рахунок живлення електричного двигуна від автономного джерела електричної енергії, в якості якого можуть виступати акумуляторні батареї (ЕМ), або паливні елементи (ЕМПА). Електромобілі на акумуляторних батареях заряджаються від зовнішнього джерела електричної енергії, тоді як в електромобілях на паливних елементах заправляються воднем (H_2) спеціально вмонтовані баки. При окисленні водню в паливних елементах отримується електричний струм для живлення електродвигуна.

Питання використання відновлюваних джерел енергії для виробництва водню для заправки електромобілів на паливних елементах за допомогою відновлюваних джерел енергії досліджували ряд українських науковців: Кудря С.О., Ткаленко Д.А., Солонін Ю.М. [22-25, 38, 145], а також закордонні науковці: Максвел А. Мур (Maxwell A. Moore), групи науковців на чолі з Мануелем Гьотцем (Manuel Götz), Ф. З. Аулі (F.Z.Aouali), Ф. Дж. Піно Луцена (F.J. Pino Lucena) та ін. [146-149].

Водень може бути отриманий різними шляхами з використанням широкого діапазону технологій. Деякі з них використовують усталені промислові процеси, тоді як інші перебувають ще на стадії лабораторних досліджень; деякі можуть досить швидко реалізовуватись при виникненні потреби створення системи

постачання воднем; інші вимагають значних досліджень і розвитку (табл. 5.1) [150].

Таблиця 5.1

Вартість тони товарного водню при широкомасштабному виробництві різними методами

| Процес виробництва водню | Джерело енергії | ККД, % | Температура, К | Вартість, тис.\$/т (H ₂) |
|-----------------------------------|--|-----------------------|----------------|--------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Парова конверсія | Природний газ | 60-75 | 1100-1300 | 1,2-1,6 |
| Парокиснева конверсія | Природний газ | 67-75 | 1100-1200 | 1,1-1,5 |
| Цільове виробництво на НПЗ | Нафтові фракції, сухі гази НПЗ | 67-70 | 1100-1200 | 2,0-2,6 |
| Із вугілля | Вугілля | 60-80 | 1200-1400 | 2,0-2,4 |
| Лужний електроліз | Електроенергія | 20-30 | 350 | 3,9-5,1 |
| Твердополімерний електроліз (ТПЕ) | | 20-36 | 450 | 2,5-3,2 |
| Лужний електроліз | Електроенергія від ФЕС та ВЕС | ≥ 7 ≥ 10 | 350 | 7-10 10-30 |
| Високотемпературний електроліз | Електрична та теплова енергія від АЕС | 40-42 | 1000-1300 | 2,3-3,5 |
| Термоелектрохімічні цикли | Електрична та теплова енергія від ВТГР | 35-45 | 1100 | 1,6-6,7 |
| Термохімічні цикли | | ≥ 50 | 1100-1300 | 1,5-7,4 |
| Біохімічні цикли | Сонячна енергія | <10 | 310-340 | >12 |

Розглянемо варіанти виробництва водню із використанням відновлюваних джерел, що дозволяє розширити технології освоєння наявного енергетичного потенціалу відновлюваних джерел, відмічені вище. Електрична енергія для

виробництва водню і подальшого заряду електромобілів на паливних елементах (FCEV) може вироблятися сонячними, вітровими, біогазовими, геотермальними та гідроелектростанціями.

У свою чергу, водень також можна отримати декількома шляхами із залученням ВДЕ. Зокрема (рис.5.1):

- 1) з енергії сонячної радіації – термохімічне розчеплення, фотокаталіз;
- 2) з біомаси та біогазу – газифікація води з надкритичним тиском, піроліз та газифікація, анаеробне зброжування, темнова ферментація та конверсія метану водяним паром;
- 3) з електричної енергії, що вироблена за рахунок ВДЕ що витрачається для проходження процесу електролізу.

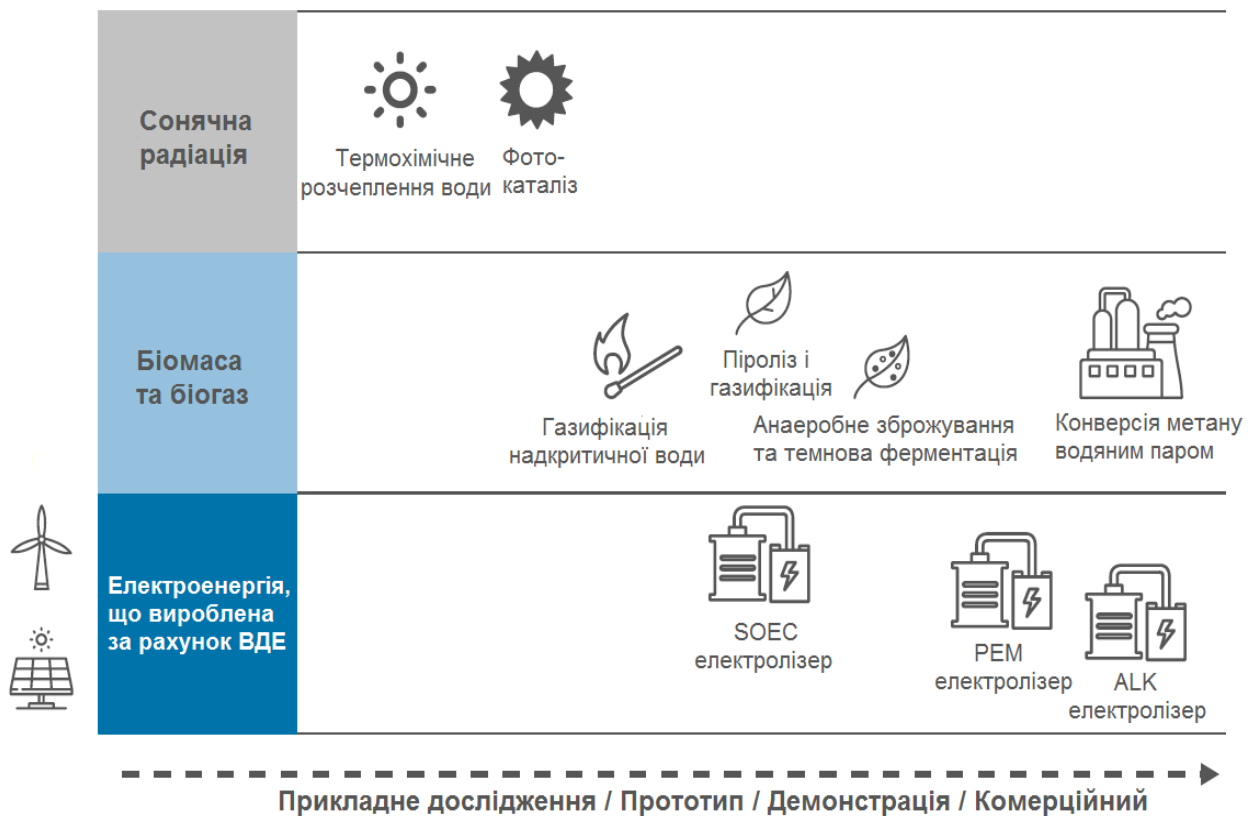


Рис. 5.1. Шляхи виробництва водню з відновлюваних джерел та сучасний їх рівень розвитку [151].

На сьогоднішній день найбільш промислово освоєними шляхами виробництва водню із залученням ВДЕ можна вважати конверсію метану (отриманого з біогазу) водяним паром, електроліз (при залученні

енергоустановок, що перетворюють енергію відновлюваних джерел в електричну) з протонно-обмінною мембраною (PEM) та лужний електроліз (ALK).

На даний час найбільш широко використовуються дві основні комерційно доступні електролізні технології виробництва водню. Перша з них – це лужний електроліз (Alkaline electrolyzers, ALK), що використовується вже близько століття. Друга технологія полягає у застосуванні протонообмінних мембран (Proton exchange membrane, PEM).

Аналіз даних (табл.5.2) показує, що технологія лужного електролізу все ще є кращою за протонообмінний електроліз по витраті електроенергії на одиницю виробленого водню та терміну служби електролізних блоків. Поруч з цим, PEM електролізери є дещо простішими в експлуатації, мають менші розміри при виробництві однієї і тієї ж кількості продукції та видають водень під тиском до 30 бар, що зменшує затрати на заправлення накопичуючих та транспортних ємностей.

Таблиця 5.2

Порівняння технічних характеристик лужного (ALK) та протонообмінного (PEM) електролізу води [150]

| Параметри | Одиниця вимірювання | Лужний електроліз (ALK) | Протонообмінний електроліз (PEM) |
|--|--|-------------------------|----------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Витрата електроенергії на виробництво: | | | |
| 1 кг H ₂ | кВт·год/кг(H ₂) | 51 | 58 |
| 1 м ³ H ₂ | кВт·год/м ³ (H ₂) | 4,55 | 5,178 |
| ККД електролізу | % | 65 | 57 |
| Термін напрацювання електролізних блоків | год | 80 000 | 40 000 |

Продовження табл. 5.2

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-------|-----|------|
| Капіталозатрати на одиницю встановленої потужності | €/кВт | 750 | 1200 |
| Типовий вихідний тиск | бар | 1 | 30 |
| Термін служби системи | роки | 20 | 20 |

Якщо ж говорити про режими роботи установок на основі відмічених технологій (табл. 5.3), то протонообмінний електроліз виглядає значно маневровішим, ніж лужний. Зокрема, PEM електролізери протягом короткого періоду часу (від 10 до 30 хв.) витримують коливання робочої потужності від 0 до 160 % від її номінального значення, приводяться в дію та зупиняються за коротший проміжок часу та витримують більшу швидкодію. Лужні ALK електролізери значно поступаються по даним параметрам.

Таблиця 5.3

Технічні параметри динаміки роботи лужного (ALK) та протонообмінного (PEM) електролізу води [150]

| Параметри | Лужний електроліз (ALK) | Протообмінний електроліз (PEM) |
|---|-------------------------|--------------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Рівень коливань робочої потужності | 15÷100% від $P_{ном}$ | 0÷160% від $P_{ном}$ |
| Час запуску електролізера (теплого - холодного) | 1-10 хвилин | Від 1 секунди до 5 хвилин |
| Допустиме коливання потужності в сторону збільшення / зменшення | 0,2÷20% за секунду | 100% за секунду |
| Час зупинки | 1÷10 хвилин | секунди |

Враховуючи високу швидкодію та широкий допустимий діапазон коливання робочої потужності для акумулювання та передачі енергії

відновлюваних джерел найбільше підходять протонообмінні електролізні технології виробництва водню, на які не впливатиме стохастичний характер виробітку електроенергії вітро- та фотоелектричними установками. З точки зору енергетики, PEM електролізери мають більшу ефективність при їх експлуатації з робочими потужностями нижче номінальної.

Енергоємність водню значна, але на даний момент його використання не має широкого розповсюдження через складності транспортування та зберігання. Причиною цього є його фізичні властивості. Краще за все зберігати такий газ у рідкому стані, але через те, що водень легко розповсюджується, його важко стиснути, що призводить до додаткових затрат електричної енергії та втрати ефективності водневого палива на 40%.

Ефективність використання електромобіля на водневому паливі становить 20-30%. У свою чергу, у електрокарів, які працюють на акумуляторних батареях, ефективність використання сягає 75%.

У залежності від типу палива електричні транспортні засоби «заправляються» від 3-4 хвилин воднем та до 4 годин електричною енергією. Однієї заправки воднем в середньому вистачає на 320-400 км, у той час як електричною енергією на 160-240 км, оскільки енергоємність на кілограм H_2 у 236 разів більша за енергоємність літій-іонних акумуляторів [152].

На сьогоднішній день існує велика кількість промислових технологій виробництва «чистого» водню з відновлюваних джерел енергії. Доцільність їх використання в першу чергу визначається наявністю та доступністю відновлюваного джерела енергії, сучасного технологічного обладнання і устаткування для реалізації таких технологій.

Розглянемо особливості реалізації систем автономних заправних станцій електромобілів на паливних елементах, що використовують в якості первинного джерела енергію вітру, Сонця та їх комплексного поєднання, що є актуальним напрямком розширення областей використання відновлюваних джерел.

5.2. Особливості реалізації заправних станцій електромобілів на паливних елементах з використанням вітроелектричних та фотоелектричних установок як первинних генераторів електроенергії

Використання енергії вітру для виробництва водню методом електролізу є давно відомим. Зокрема, в кінці минулого століття науковцями Інституту електродинаміки НАН України (наукова група, яка пізніше в 2004 році створила Інститут відновлюваної енергетики НАН України) була розроблена схема (рис. 4.5) та по міжнародному контракту реалізований натурний проект вітроводневої станції в Фолькицентрі (Данія) [153]. Випробування та експлуатація даної станції на протязі 5-ти років показали ефективність застосування такого комплексу в цілому.

Існують і закордонні приклади реалізації вітроводневих станцій. Так, зокрема в [149] представлений приклад реалізації системи виробництва водню з використанням надлишкової електроенергії, виробленої ВЕУ. Промодельовані режими роботи такої системи та показано, що реалізація вітроводневих станцій дозволяє максимально використовувати енергію вироблену ВЕС та зменшити її вплив на центральну електромережу шляхом додаткового виробітку електроенергії в паливних елементах та її видачі на мережу в періоди коливання потужності ВЕУ.

Зважаючи на успішний досвід реалізації систем виробництва водню з відновлюваних джерел з метою енергоживлення автономних споживачів та підвищення якості роботи мережевої ВЕУ відмічені вище, розроблена схема реалізації зарядної станції електромобілів на паливних елементах (ЗСЕМПА) з використанням в своєму складі ВЕУ, як первинний генератор електричної енергії (рис. 5.2).

В схемі ЗСЕМПА з ВЕУ використовуються наступні агрегати:

1. Вітроелектрична установка змінного струму для перетворення енергії вітру в електричну енергію.

2. Блок автоматичного управління призначений для перерозподілу виробленої електричної енергії між буферною АБ та електролізером.
3. Протонообмінний електролізер високого тиску для виробництва водню під тиском 30 атм.
4. Система зберігання водню, що складається з ємностей з робочим тиском до 30 атм.
5. Компресорна станція для створення тиску до 700 атм при наповненні ємностей для накопичення водню.
6. Система зберігання водню, що складається з ємностей високого тиску до 700 атм.
7. Буферна акумуляторна батарея призначена для електроживлення власних споживачів ЗС.
8. Зарядний пристрій буферної АБ.
9. Інвертор типу АС/DC перетворення змінного струму від ВЕУ в постійний на електролізер чи буферну АБ та типу DC/АС для перетворення постійного струму в змінний від буферної АБ чи від паливного елемента в змінний струм, необхідний для роботи власних споживачів ЗС.
10. Паливний елемент призначений для виробництва електричної енергії з водню в періоди відмов буферної АБ (розряджена АБ при безвітряній погоді).

Принцип роботи ЗСЕМПА полягає в наступному. Вітроелектрична установка перетворює енергію вітрового потоку в електричну енергію змінного струму. За допомогою АС/DC інвертору змінний електричний струм перетворюється в постійний і в подальшому вироблена енергія йде по двом напрямкам.

В залежності від стану зарядження буферної АБ електрична енергія через зарядний пристрій подається на накопичення та зберігання. В подальшому при підключенні власних споживачів ЗС до АБ через інвертор реалізовуватиметься їх електроживлення.

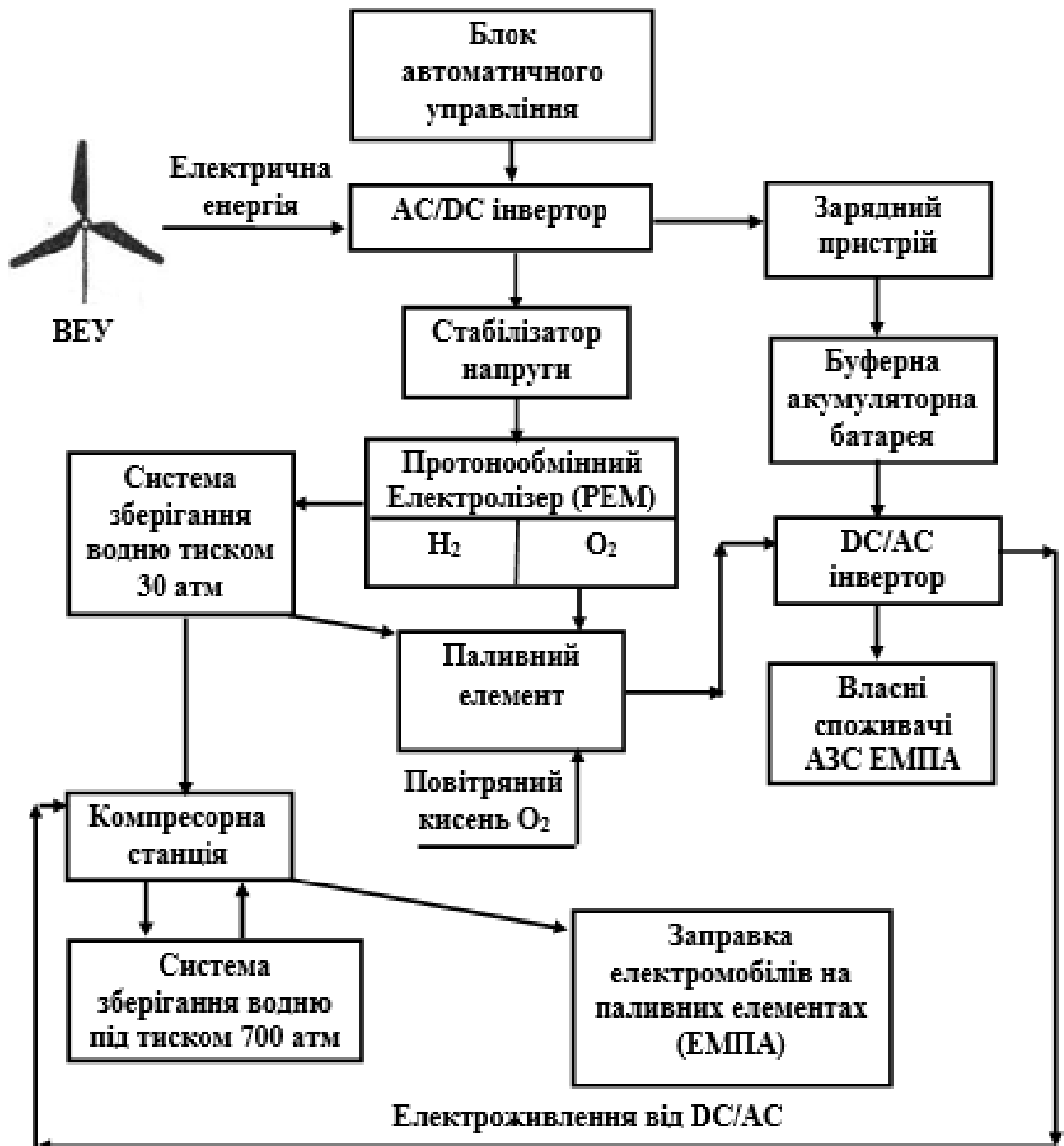


Рис. 5.2. Схема зарядної станції електромобілів на паливних елементах з використанням вітроелектричної установки.

По другій лінії вироблена ВЕУ електроенергія через стабілізатор напруги подається на електролізну установку для виробництва технологічного водню. Сучасні електролізні установки не дозволяють отримувати тиски в 700 атм, тому отриманий водень направляється на компресорну станцію і під необхідним

тиском накопичується в ємностях для зберігання. В момент прибуття ЕМПА на ЗС здійснюється заправка бортових баків електромобіля тривалістю до 5 хв.

У випадку тривалих періодів відсутності вітру і відповідно простою ВЕУ можливі випадки повного розрядження буферної АБ ЗС. В такому разі резервна система паливних елементів, використовуючи попередньо накопичений водень, виробляє електроенергію постійного струму і через DC/AC інвертор забезпечує гарантоване електроживлення власних споживачів ЗС.

Реалізація автономної заправної станції електромобілів на паливних елементах при використанні в якості первинного джерела електроенергії вітроелектричної установки за запропонованою вище схемою (рис. 5.3) при правильному виборі генеруючих потужностей та акумулюючих ємностей (буферного акумулятору та системи зберігання водню) дозволяє реалізовувати гарантований заряд ЕМПА в межах року не зважаючи, як на добові, так і на сезонні коливання енергії вітру.

Для оцінки ефективності роботи запропонованої схеми (рис.5.2) необхідно розробити математичний опис системи «вітроелектрична установка-електролізер-буферний акумулятор енергії» та на основі експериментальних даних швидкості вітру проаналізувати можливість забезпечення заряду електромобілів на паливних елементах.

Враховуючи, що окрім енергетичного потенціалу вітру для території України характерний достатньо високий сонячний фотоелектричний енергопотенціал, аналогічно до попередньої схеми (рис. 5.2) розроблено схему реалізації автономної зарядної станції електромобілів на паливних елементах (ЗСЕМПА) з використанням в своєму складі ФЕУ, як первинний генератор електричної енергії (рис. 5.3).

Принцип роботи ЗСЕМПА від ФЕУ ідентичний попередній схемі, а єдина відмінність полягає у тому, що фотоелектрична батарея перетворює енергію сонячного випромінювання в електричну енергію постійного струму, яка в подальшому використовується тим самим по двом напрямкам.

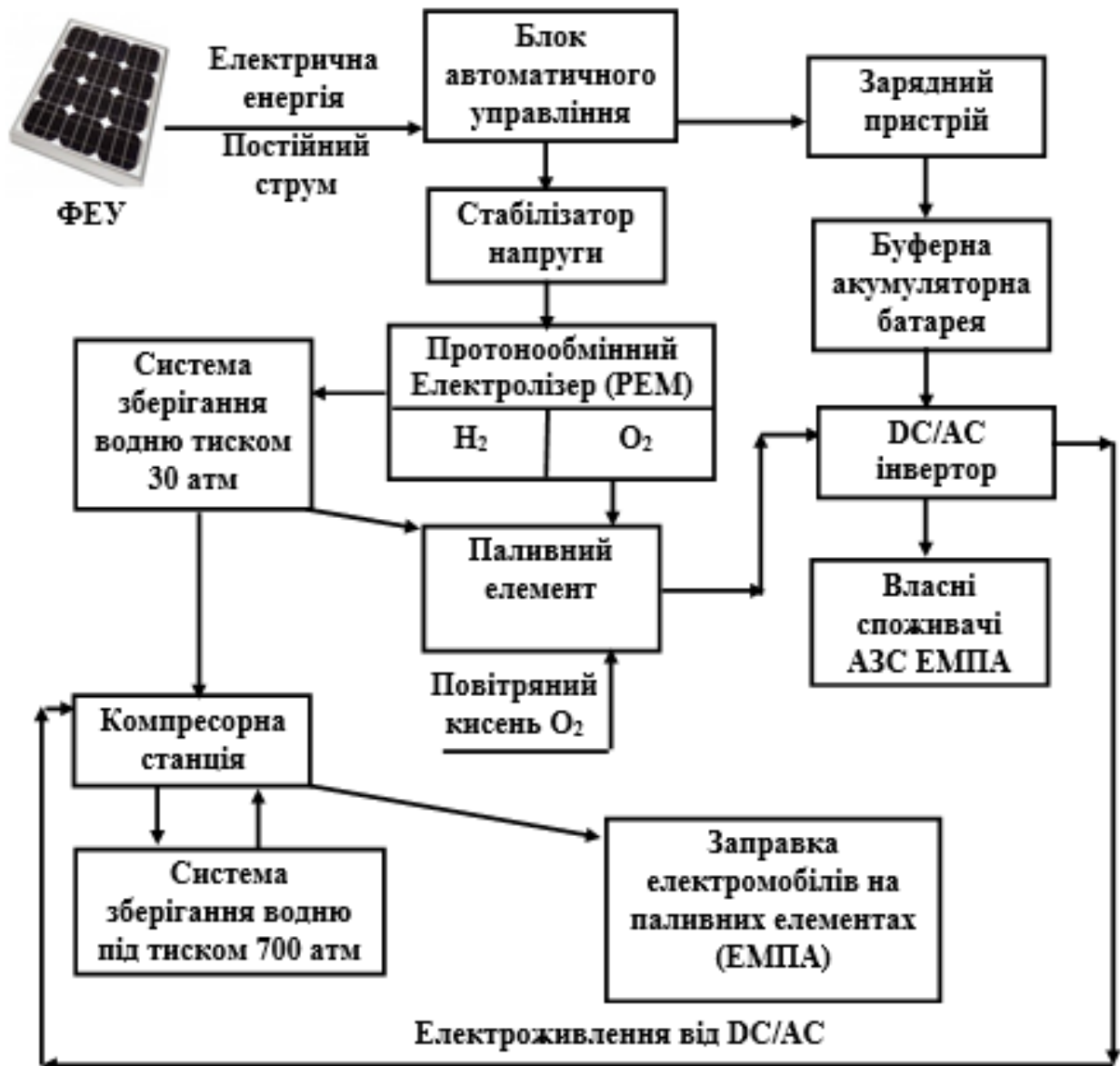


Рис. 5.3. Схема зарядної станції електромобілів на паливних елементах з використанням фотоелектричної установки.

Реалізація зарядної станції електромобілів на паливних елементах при використанні в якості первинного джерел електроенергії фотоелектричної установки за запропонованою вище схемою (рис. 5.4.) при правильному виборі генеруючих потужностей та акумулюючих ємностей (буферного акумулятору та системи зберігання водню) дозволяє реалізовувати гарантований заряд ЕМПА в межах року не зважаючи, як на добові, так і на сезонні коливання інтенсивності сонячного випромінювання.

З врахуванням високої нестабільності відновлюваних видів енергії (швидкості вітру та інтенсивності сонячного випромінювання), з однієї сторони, та необхідності вибору оптимальної ємності буферного накопичувача водню на ЗСЕМПА, з іншої, пропонується схема комплексного використання ФЕУ та ВЕУ (рис. 5.4). Запропонована схема дозволяє поєднати два відновлюваних джерела енергії, які в підсумку дають певну взаємокомпенсацію провалів виробітку електричної енергії та дозволяються підібрати оптимальні ємності баків для зберігання водню.

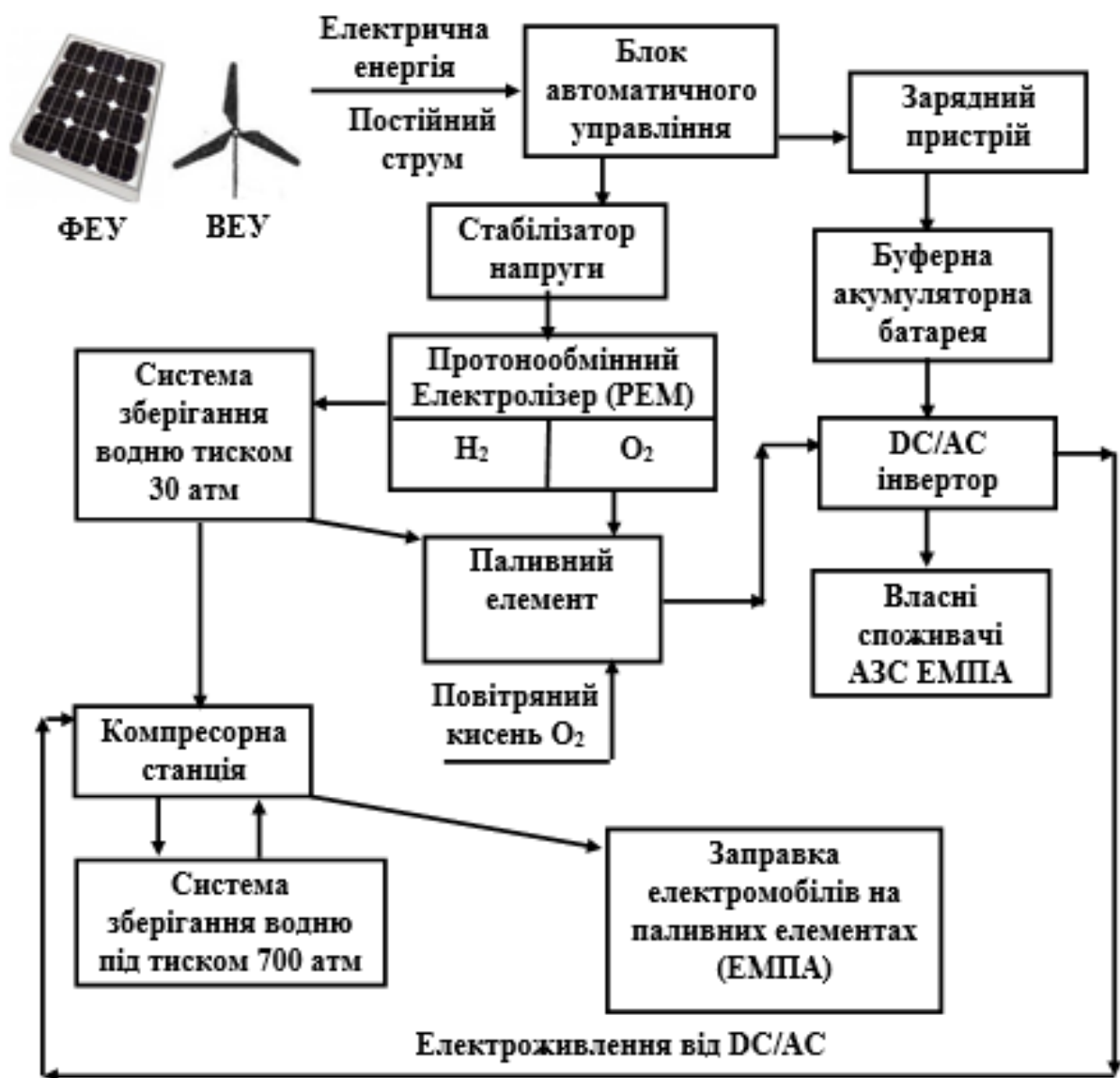


Рис. 5.4. Схема зарядної станції електромобілів на паливних елементах з комплексним використанням фотоелектричних та вітроелектричних установок.

5.3. Математичний опис систем водневих заправних станцій електромобілів на паливних елементах з використанням відновлюваних джерел енергії

Енергетичний баланс системи автономної заправної станції електромобілів на паливних елементах, де відновлювані джерела енергії виступають первинним енергоресурсом, можливо представити наступним чином:

$$E_{ВДЕ} = E_B + E_{AB}^{BY\Phi}, \quad (5.1)$$

де: $E_{ВДЕ}$ – енергія відновлюваного джерела, кВт· год;

E_B – енергія необхідна для виробництва водню, кВт· год;

$E_{AB}^{BY\Phi}$ – енергія необхідна для заряду буферного акумулятору призначеного для електроживлення власних споживачів ЗСЕМПА, кВт· год.

Математичні описи роботи ВЕУ (2.10) та ФЕУ (3.6), а також опис роботи електрохімічної акумуляторної батареї (2.19), які розглядалися вище, відомі.

Для повного описання енергетичного балансу ЗСЕМПА, доцільно розглянути математичний опис електролізної установки.

В останні роки запропоновано ряд математичних описів роботи електролізних установок по виробництву водню і деякі з цих моделей включені в програми комп'ютерного моделювання і можуть бути використані для дослідження, обґрунтування вибору необхідного устаткування та обладнання і оптимізації водневих енергетичних систем.

Зокрема, в роботі [154] запропонований типовий приклад моделювання електролізу води. Кінетику електродів електролізерної комірки запропоновано моделювати, використовуючи емпіричні співвідношення ампер-вольних характеристик ($I = f(U)$).

Для урахування впливу температури на омичний опір r та коефіцієнти перенапруги s і t деталізована модель описується рівнянням [154]:

$$U = U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I + (s_1 + s_2 T + s_3 T^2) \log \left(\frac{t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2}}{A} I + 1 \right), \quad (5.2)$$

де: U – напруга на комірці електролізної установки, В;

U_{rev} – стандартна напруга на комірці електролізної установки, В;

r_i – складові омичного опору електроліту, ($i = 1 \dots 2$), Ом;

s_i, t_i – складові коефіцієнтів перенапруг на електродах, ($i = 1 \dots 3$);

A – площа електроду, м²;

I – струм, А;

T – температура електролізера, °С.

Інші науковці [155] за умови відомого впливу температури (або відомої температури) запропонували спрощені емпіричні моделі для водневого електролізера, а основна форма кривої ($I = f(U)$), визначається наступним рівнянням:

$$U = U_{rev} + \frac{r}{A} I + s \log \left(\frac{t}{A} I + 1 \right). \quad (5.3)$$

Вищезгадані емпіричні параметри можуть бути обчислені чисельно, використовуючи методи нелінійної регресії. Температуру електроліту електролізера, що впливає на криву ($I = f(U)$) і Фарадеївську ефективність, можна оцінити, використовуючи прості або більш складні теплові моделі. В [154] запропоновано метод, в якому температура T розраховується використанням зосередженої моделі теплової ємності. Загалом, тепла енергія, що генерується в електролізері внаслідок неідеальності комірки, частково зберігається в навколишній масі, а частково передається в навколишнє середовище, або шляхом природних процесів, або шляхом допоміжного охолодження.

Загальний баланс теплової енергії в електролізері може бути виражений лінійним, неоднорідним диференціальним рівнянням першого порядку:

$$\frac{dT}{dt} + bT - a = 0, \quad (5.4)$$

яке має наступне вирішення:

$$T(t) = \left(T_{ini} - \frac{b}{a} \right) \exp(-at) + \frac{b}{a}, \quad (5.5)$$

де: T_{ini} – температура комірки при початкових умовах, °C.

Відповідно, енергія необхідна для роботи водневого електролізера визначається рівнянням:

$$E_{E-p} = U \cdot I \cdot \tau = I \cdot \tau \left[U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I + (s_1 + s_2 T + s_3 T^2) \log \left(\frac{t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2}}{A} I + 1 \right) \right], \quad (5.6)$$

або за умови відомого впливу температури (або відомої температури) в спрощеному вигляді:

$$E_{E-p} = U \cdot I \cdot \tau = I \cdot \tau \left[U_{rev} + \frac{r}{A} I + s \log \left(\frac{t}{A} I + 1 \right) \right]. \quad (5.7)$$

Рівняння (5.6) та (5.7) описують чисті енергозатрати на виробництво водню в електролізній установці за умови, що процеси відбуваються згідно законів Фарадея. В наслідок неідеальності електролізної комірки генерується теплова енергія, яка частково зберігається в навколишній масі, а частково передається в навколишнє середовище шляхом природних процесів, або шляхом допоміжного охолодження. Теплові втрати несуть в собі додаткові втрати енергії, які необхідно враховувати через енергетичний коефіцієнт корисної дії електролізера, тобто через η_{E-p} . Як приклад, відомо [156], що ефективність роботи PEM електролізера від густини струму на електродах має екстремальний характер з чітко вираженим максимумом в точці, що відповідає координатам $\eta_{max} : j_{max}$ (рис. 5.5). При цьому в області густин струмів від $j < j_{max}$ спостерігається сильно виражена залежність $\eta = f(j)$. При подальшому збільшенні густини струму, коли $j > j_{max}$ спостерігається зменшення коефіцієнту корисної дії, але не таке суттєве, як в першому випадку.

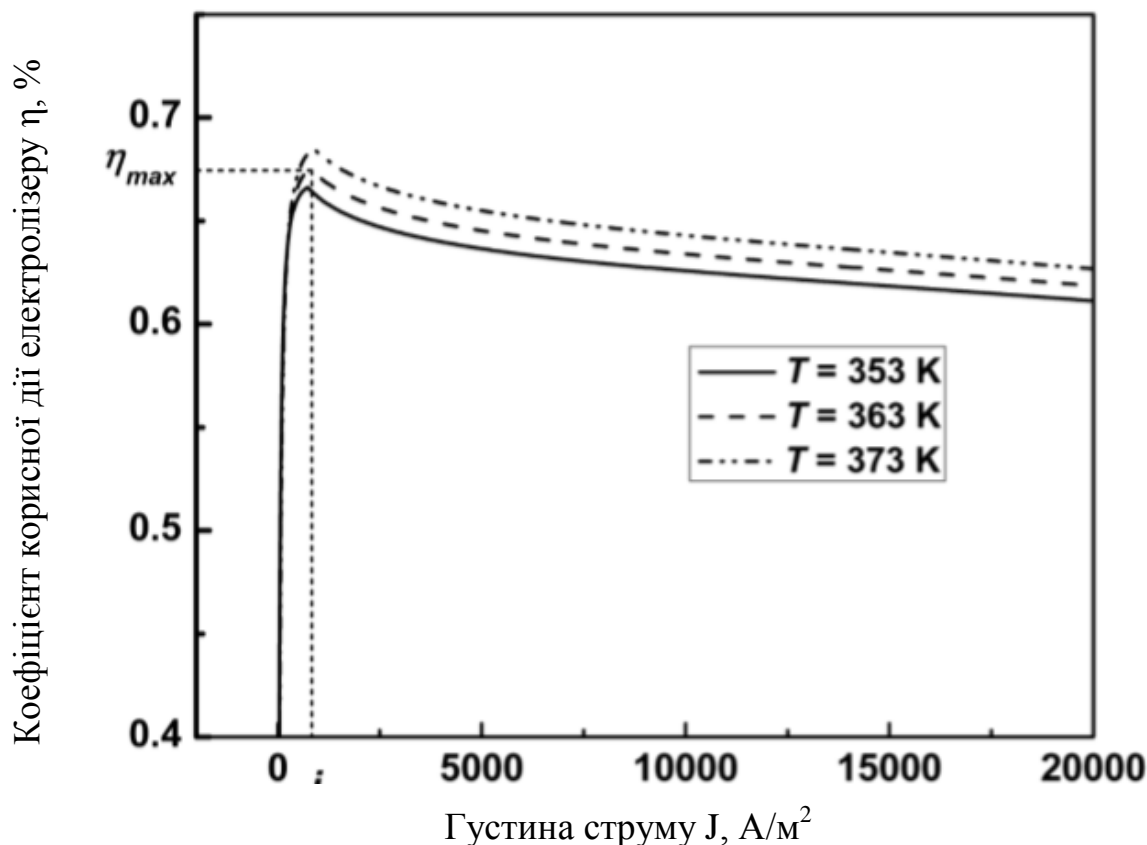


Рис. 5.5. Залежності коефіцієнту корисної дії протонообмінного електролізера від густини струму на електродах при температурі:

1 – 353 К; 2 – 363 К; 3 – 373 К.

Для прив'язки рівняння (5.7) до системи водневої ЗСЕМПА необхідно врахувати фактори, що впливають на загальні енергозатрати роботи системи в цілому. Зокрема, важливий фактор, який необхідно враховувати – це витрати енергії на стиснення водню k_C^B . Класичні закони термодинаміки визначають кількість енергії, необхідної для стиснення газу. Слід враховувати той факт, що за своїми фізичними властивостями водень (а саме, за розмірами це найменший газ та елемент періодичної таблиці Д.І. Менделєєва) найбільш складний для стиснення з усіх існуючих газів.

Аналіз залежностей втрат енергії при стисненні водню різними методами (рис. 5.6) показав [157], що при тиску у 800 бар (789,5 атм) ідеальний одноступінчастий компресор споживає енергію, рівну 16% хімічної енергії

водню. Зменшити втрати до 12% при тиску у 800 бар (789,5 атм.) можливо при застосуванні багатоступінчастого компресору, однак дані компресори мають складнішу конструкцію та більшу вартість. Технологічно досить складно стиснути водень до 800 бар. Більш високий тиск не призводить до значного зменшення об'єму. При високих тисках водень стає менш схожим на газ та, відповідно, більш схожим на рідину.

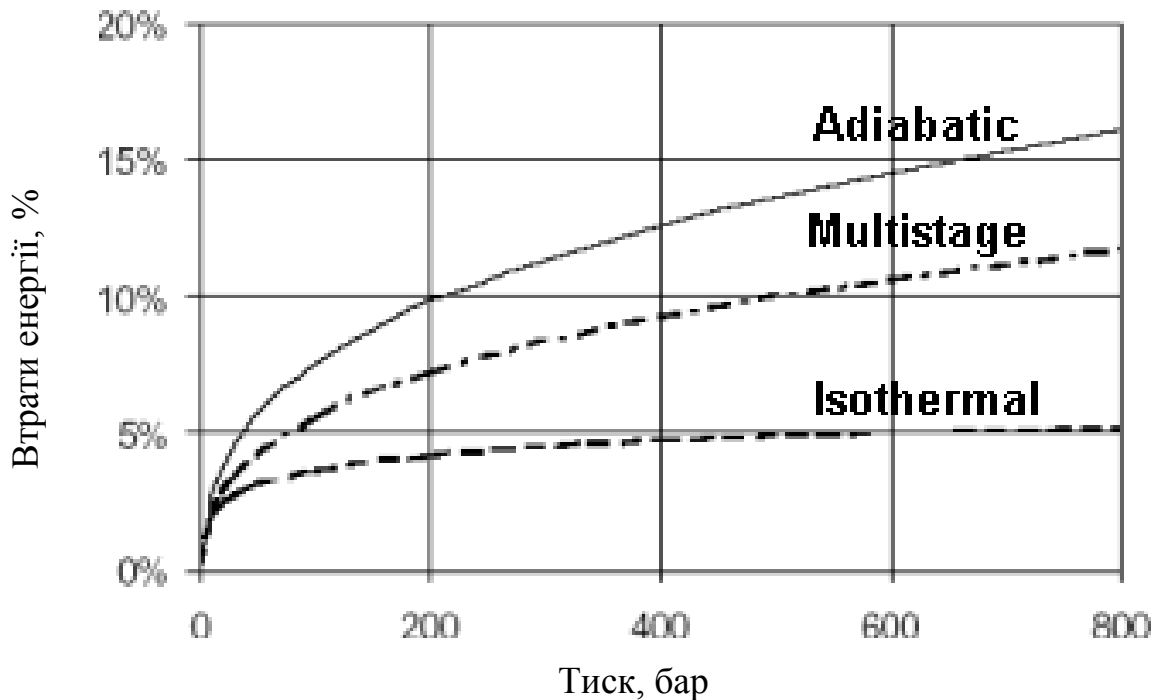


Рис. 5.6. Залежності втрат енергії при стисненні водню:

- 1 – адіабатним (одноступінчастим) методом; 2 – багатоступінчастим методом; 3 – ізотермічним методом.

Згідно законів термодинаміки втрати енергії відбуваються також, коли водень переноситься з резервуара для зберігання в транспортний засіб. Конструкція ліній передачі та арматури під тиском має вирішальне значення для зниження енергетичних втрат. Через це необхідно враховувати фактор витікання водню з ємностей для зберігання в залежності від тривалості зберігання та системи трубопроводів k_B^B .

Можливі випадки використання водню паливними елементами в наслідок повного розряду буферного акумулятору, що обумовлюється періодами тривалої

відсутності відновлюваного енергоносія (енергії вітру чи сонячного випромінювання), через що необхідно враховувати фактор $k_{\Pi E}^B$.

Тоді, коефіцієнт запасу водню K_3^B , який враховуватиме додаткові витрати водню в системі ЗСЕМПА становитиме:

$$K_3^B = k_B^B \cdot k_{\Pi E}^B. \quad (5.8)$$

Відповідно, енергія, необхідна для виробництва водню з використанням електролізної установки за умови відомого впливу температури (або відомої температури), в спрощеному вигляді становитиме:

$$E_B = K_3^B \cdot E_{E-p} = K_3^B \cdot I \cdot \tau \left[U_{rev} + \frac{r}{A} I + s \log \left(\frac{t}{A} I + 1 \right) \right] \quad (5.9)$$

Підсумовуючи, енергетичний баланс і відповідно математична модель процесу виробництва водню на ЗСЕМПА з використанням буферного АБ та вітроелектричної установки, яка виступає первинним джерелом електроенергії можна представити наступним чином:

$$\tau_{BEV} \int_0^{\infty} P(v) \phi(v) dv = K_3^B \cdot I \cdot \tau \left[U_{rev} + \frac{r}{A} I + s \log \left(\frac{t}{A} I + 1 \right) \right] + \frac{k_C^B + k_{DE}}{\eta_{AB}} \cdot U_{AB} \cdot \int_{C_0}^{C_{nom}} C_{AB}^{zap} \cdot dC, \quad (5.10)$$

де: k_{DE} – додаткова енергія буферної АБ водневої ЗСЕМПА, додаткова енергія буферної АБ ЗСЕМ повинна становити не менше 20% від номінального значення, тобто $k_{DE} = 1,2$.

Відповідно, енергетичний баланс і математичну модель процесу виробництва водню ЗСЕМПА з використанням буферного АБ та фотоелектричної установки, яка виступає первинним джерелом електроенергії можна представити наступним чином:

$$\begin{aligned} & \tau_{\Phi EB} \cdot U_{\Phi EB} \left[G(I_{K3} + K_I(T - T_C)) - I_D \left(e^{\frac{q \cdot U_{\Phi EB}}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \right] = \\ & = K_3^B \cdot I \cdot \tau \left[U_{rev} + \frac{r}{A} I + s \log \left(\frac{t}{A} I + 1 \right) \right] + \frac{k_C^B \cdot k_{DE}}{\eta_{AB}} \cdot U_{AB} \cdot \int_{C_0}^{C_{nom}} C_{AB}^{zap} \cdot dC. \end{aligned} \quad (5.11)$$

За умови комплексного використання енергії вітру та Сонця, які виступають первинним енергоносієм, енергетичний баланс і математична модель

процесу виробництва водню ЗСЕМПА з використанням буферного АБ можна представити наступним чином:

$$\begin{aligned} & \tau_{BEY} \cdot \int_0^{\infty} P_{BEY}(v) \cdot \varphi(v) \cdot dv \\ & \sum \tau_{\Phi EB} \cdot U_{\Phi EB} \left(\left(I_{scs} \cdot \frac{G_a}{G_{as}} + \alpha_{scT} \cdot (T - T_s) \right) - I_s \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V_{PV}}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \right) = \\ & = \sum \frac{k_C^B + k_{DE}}{\eta_{AB}} \cdot U_{AB} \cdot \int_{C_0}^1 C_{AB}^{ZAP} \cdot dC \\ & K_3^B \cdot I \cdot \tau \left[U_{rev} + \frac{r}{A} I + s \log \left(\frac{t}{A} I + 1 \right) \right] \end{aligned} \quad (5.12)$$

При введенні в рівняння (5.12) коефіцієнта забезпечення енергопотреб ЗСЕМПА за рахунок ФЕУ та ВЕУ, отримаємо:

$$\omega^{\Phi EV} \cdot W_{\Phi EB} + \omega^{BEY} \cdot W_{BEY} = K_3^6 \cdot W_B + K_{AB}^{BY\Phi} \cdot W_{AB}^{BY\Phi} \quad (5.13)$$

Застосування математичних моделей (5.10-5.12) дозволяє оцінювати раціональність реалізації ЗСЕМПА при наявності об'єктивних даних інтенсивності сонячного випромінювання та енергії вітру при застосуванні ФЕУ та ВЕУ відповідно, або їх комплексного використання в складі даних систем.

5.4. Визначення енергоємності акумулятору водню та буферного електрохімічного акумулятору на автономній зарядній станції електромобілів на паливних елементах

Згідно аналізу модельного ряду комерційних легкових електричних транспортних засобів на паливних елементах (див. додаток Г) [158-160] потреба у водні на один ЕМПА може становити до 120 м³ (наприклад, коли електромобіль Honda Clarity з повністю розрядженими бортовими ємностями для водню доставлений на АЗС за допомогою аварійного канату чи привезений евакуатором). В такому разі при виробництві водню протонообмінним електролізером (РЕМ) з витратою 5,178 кВт·год/м³(H₂) [150] потреба в електроенергії становитиме 621,36 кВт·год.

Згідно прийнятої схеми реалізації водневої ЗСЕМПА з використанням ВЕУ (рис. 5.2) стиснення водню реалізується по двох ступенях з відповідним зберіганням в першій (при 30 атм) та другій (при 700 атм) ємностях і, відповідно до закону Бойля-Маріота:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = P_3 \cdot V_3, \quad (5.13)$$

з розрахунку добової потреби на 1 легковий ЕМПА, яка прийнята на рівні 120 м^3 (H_2), об'єми акумулюючих ємностей становитимуть:

$$120 \text{ м}^3 (1 \text{ атм}) \xrightarrow[\text{електролізері}]{\text{стиснення в}} = 4,025 \text{ м}^3 (30 \text{ атм}) \xrightarrow[\text{компресором}]{\text{стиснення}} = 0,171 \text{ м}^3 (700 \text{ атм}) \quad (5.14)$$

Однак, для вибору необхідних об'ємів з урахуванням діаграми виробітку енергії первинними двигунами (ВЕУ) необхідна оцінка надходження енергоресурсу з виділенням зон максимального виробітку і відповідно відсутності енергоносія (вітру).

Прийmemo максимальну добову потребу для заправки одного ЕМПА на рівні $V_{\text{ДОБ}}^{\text{H}_2} = 120 \text{ м}^3$ та витрату електроенергії на виробництво одного метра кубічного $E_{\text{H}_1} = 5,178 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Тоді добова потреба в електроенергії при прийнятій витраті водню становитиме $E_{\text{H}_1}^{\text{ДОБ}} = 621,36 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ і, відповідно, річна потреба в електроенергії складе $E_{\text{H}_1}^{\text{P}} = 227,4 \text{ МВт} \cdot \text{год}$.

Розглянемо варіант забезпечення електроенергією водневої ЗСЕМПА за рахунок вітроелектричної установки при умові, що $E_{\text{AB}}^{\text{BY}\phi} = \text{const}$. В такому разі:

$$E_{\text{BEV}} = E_{\text{B}} + \text{const} \quad (5.15)$$

Проаналізуємо в програмному середовищі Microsoft Excel забезпечення електроенергією водневої ЗСЕМПА від ВЕУ з врахуванням розподілу швидкостей вітру для м. Мелітополь Запорізької області, Україна, використавши при цьому реальні експериментальні дані вимірювання швидкості вітру (V) для заданої місцевості.

Розрахунок виробітку електричної енергії проводили згідно рівняння:

$$E = P_{\text{III}} \cdot \tau \cdot w \cdot \xi, \quad (5.16)$$

де: E – річне вироблення електроенергії при заданій швидкості вітру, кВт·год;

$\tau = 8760$ – кількість годин у році;

w – повторюваність швидкості вітру, %.

Результати розрахунку виробітку електроенергії 1 м^2 вітроколеса представлено на рис. 5.8, а її сумарне значення за рік складає 997 кВт·год. Відповідно, для забезпечення річної потреби в електроенергії тільки на роботу протонообмінного електролізера в 227,4 МВт·год необхідний діаметр вітроколеса у 17,4 м (стандартизована 18 м), що відповідає класу ВЕУ потужністю 80 кВт.

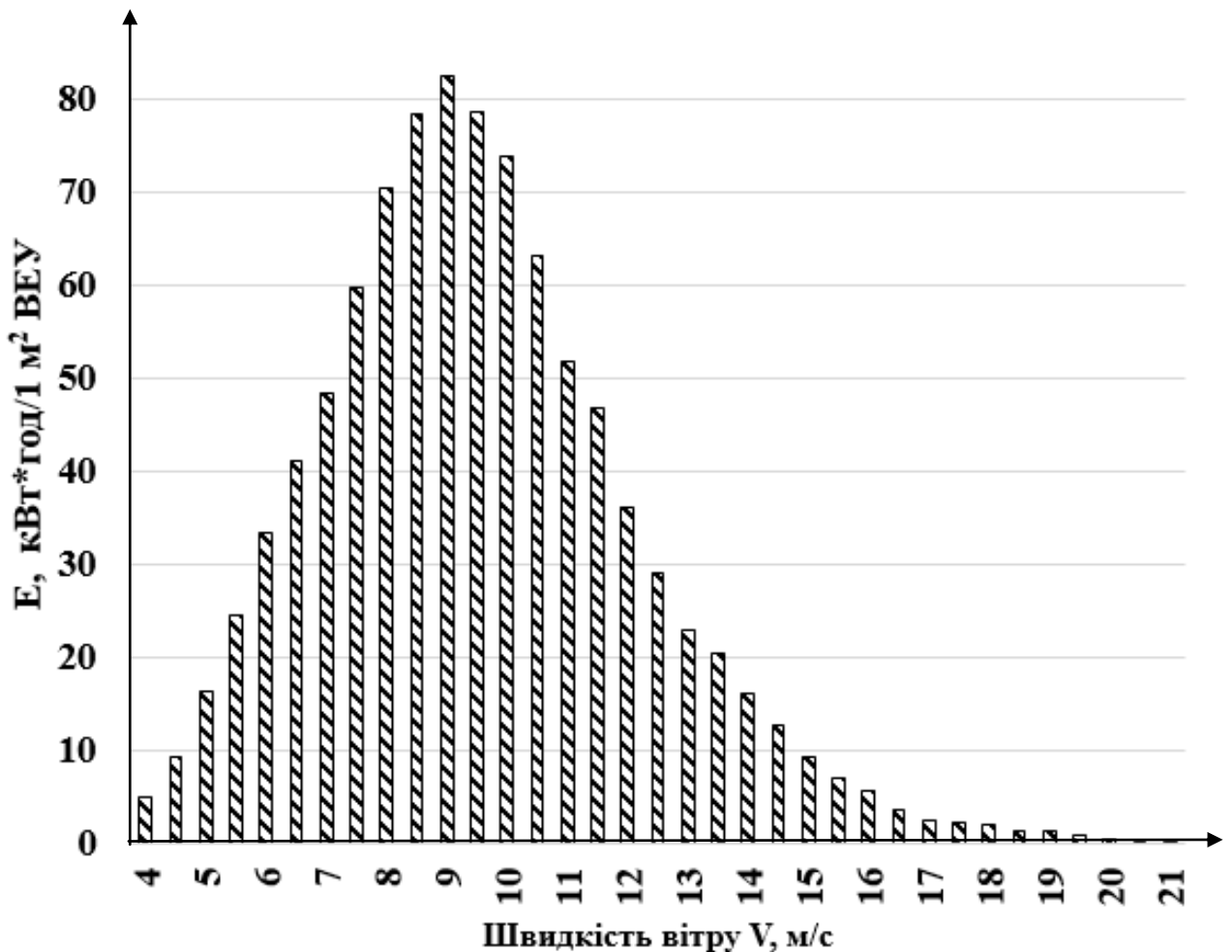


Рис. 5.8. Діаграма виробітку електроенергії 1 м^2 площі вітроколеса згідно експериментальних даних швидкостей вітру для м. Мелітополь Запорізької області, Україна за період 01.11.2015-31.12.2016.

Для порівняння проведено розрахунок виробітку електроенергії 1 м^2 вітроколеса по даним метеоспостережень NASA [162] в результаті якого отримали виробіток за рік в $852 \text{ кВт}\cdot\text{год}$. Результати розрахунку виробітку електроенергії представлено на рис. 5.9. Різниця між першим та другим результатами розрахунків може пояснюватись методикою вимірювань. Якщо перші дані отримані безпосереднім вимірюванням швидкості вітру на метеопості анемометром, то дані NASA отримані за допомогою супутникового спостереження, і, очевидно, що останнє спостереження має певні неточності, які в даному випадку складають біля 8%. Слід також відмітити, що згідно реальних даних вимірювання швидкості вітру максимальний виробіток 1 м^2 вітроколеса спостерігається при 9 м/с , в той час, як по супутниковим даним NASA максимальний виробіток 1 м^2 вітроколеса спостерігається при $8 \div 8,5 \text{ м/с}$.

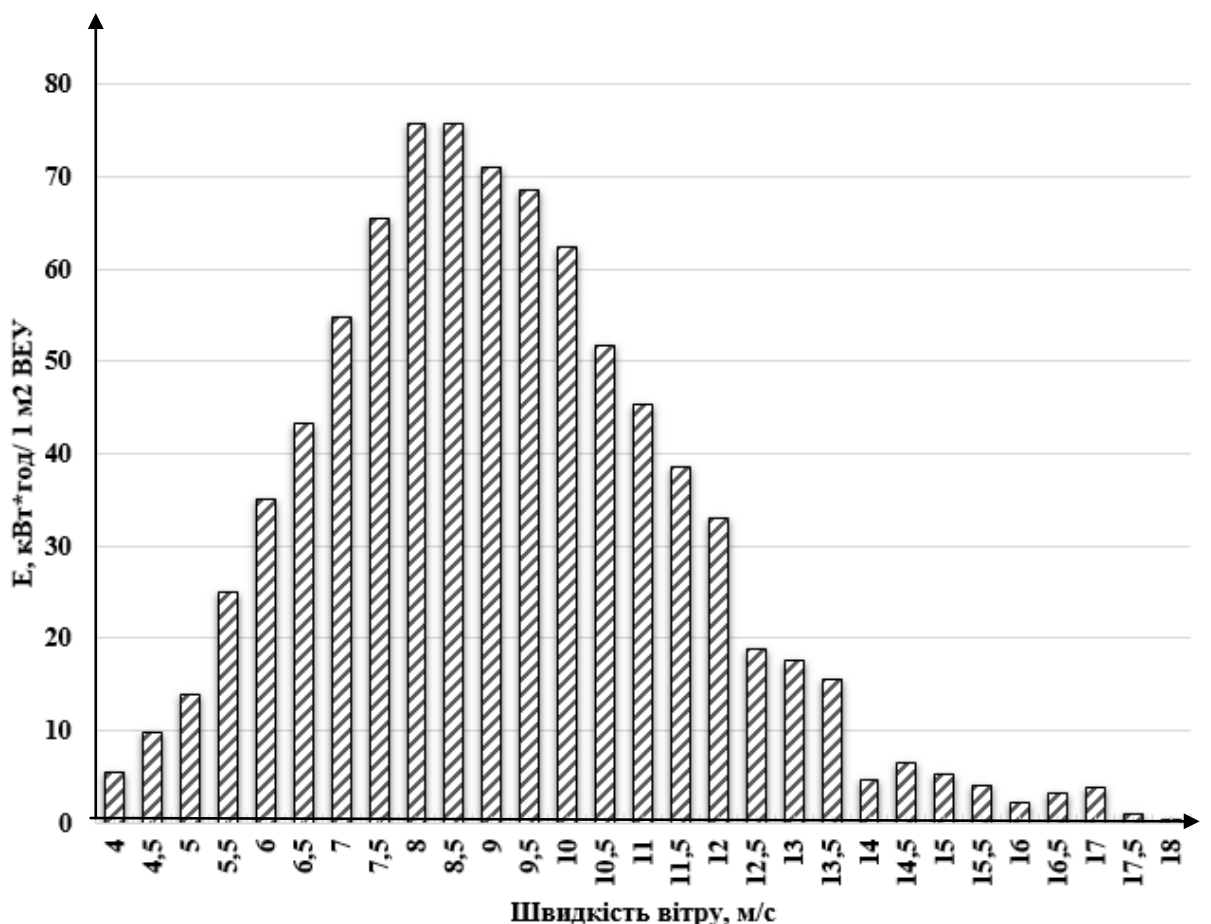


Рис. 5.9. Діаграма виробітку електроенергії 1 м^2 площі вітроколеса згідно даних швидкостей вітру NASA для м. Мелітополь Запорізької області, Україна за період 01.11.2015-31.12.2016.

З використанням програмного середовища Matlab 2015 проаналізовано дані швидкості вітру на інтервали зі швидкістю вітру менше 4 м/с та встановлено, що згідно експериментальних даних вимірювання найдовшим такий інтервал склав 146 вимірів з урахуванням кроку в 10 хв., що відповідає 24,33 год. (близько 1 доби). Аналіз даних НАСА показав найдовшим такий інтервал у 64 виміри з урахуванням кроку в 1 год. це відповідає 64 год. (біля 2,67 доби).

Аналіз характеру виробітку по місяцях показав (рис 5.10) найбільше значення в жовтні місяці 2016 року та найменше значення у травні місяці 2016 року. Даний розподіл по виробітку необхідно враховувати при виборі ємностей для зберігання водню.

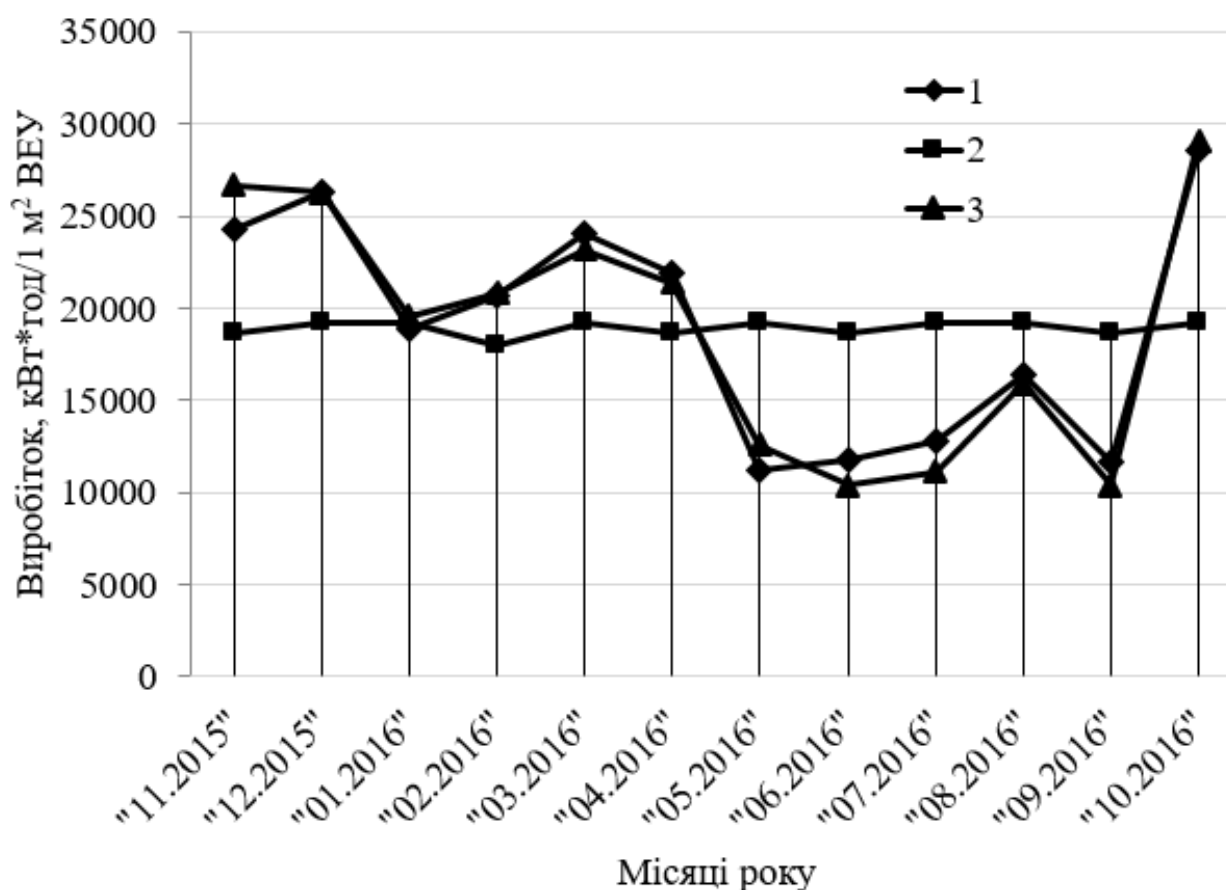


Рис. 5.10. Виробіток електроенергії 1 м² площі вітроколеса по місяцям

на основі даних швидкостей вітру для м. Мелітополь
Запорізької області, Україна:

1 – виробіток енергії за рік по місяцях згідно реальних

вимірів в м. Мелітополь Запорізької області, Україна;

2 – потреба в енергії для виробництва водню по місяцях;

3 – виробіток енергії за рік по місяцях згідно супутникових даних НАСА для м. Мелітополь Запорізької області, Україна.

Оскільки об'єм балону високого тиску залежить від балансу коливань енергій виробітку та споживання, тобто $V_{700} = f(\Delta E)$, або $V_{700} = f(E_{BEY} - E_{E-p})$, проаналізували баланс виробітку та споживання водню для заданої добової потреби в 120 м^3 (рис. 5.11) та встановили, що з жовтня по квітень відбувається накопичення водню до 6088 м^3 (або $\approx 8,7 \text{ м}^3$ при тиску 700 атм) з подальшим його спрацюванням за період з травня по вересень. Вибір ємності високого тиску встановленого об'єму дозволяє реалізовувати ефективну роботу водневої ЗСЕМПА в межах року [9]. Аналогічну картину по динаміці балансу виробітку та споживання водню можна отримати при використанні даних NASA.

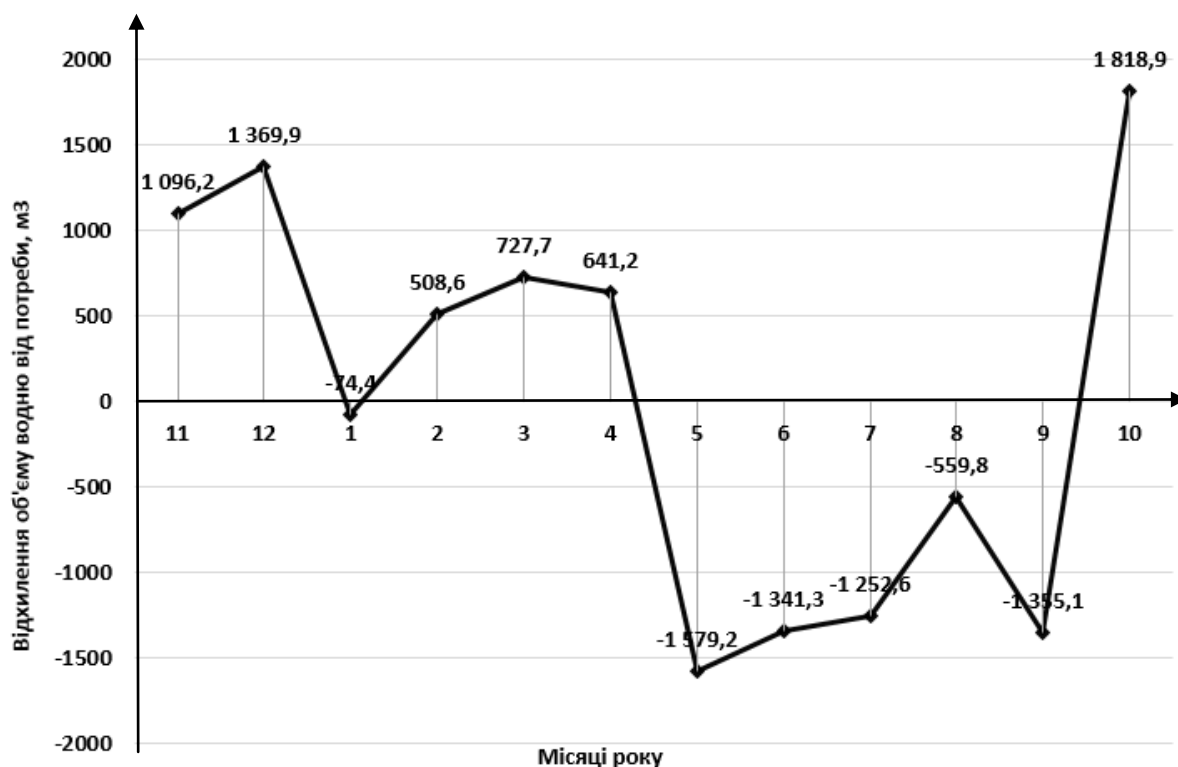


Рис. 5.11. Позабалансовий виробіток та споживання водню для заданої потреби по реальним даним швидкості вітру для м. Мелітополь Запорізької області, Україна.

Зважаючи на відмічене вище, об'єм балону високого тиску для зберігання водню, що входить в склад ЗСЕМПА для періоду року, коли відбуватиметься накопичення при виконанні умови $E_{BEU} > E_{H_2}^{занр}$, визначатиметься за наступним алгоритмом:

$$V_{H_2}^{\max} = \frac{E_{BEU} - E_{H_2}^{занр}}{E_{1\text{м}^3(H_2)}^{\text{вироб}}} \cdot k_{ст}, \quad (5.17)$$

де: $E_{H_2}^{занр}$ – енергія водню, що витрачається на заправку ЕМПА, кВт·год;

$E_{1\text{м}^3(H_2)}^{\text{вироб}}$ – енергія, що витрачається на виробництво $1 \text{ м}^3 \text{ H}_2$,

кВт·год/ $\text{м}^3(\text{H}_2)$, $k_{ст}$ – коефіцієнт стиснення водню.

Для визначення енергобалансу системи водневої ЗСЕМПА з використанням ВЕУ як первинного джерела електроенергії слід приймати:

1) власні потреби в електричній енергії ЗСЕМПА (освітлення та ін.) $E_{ВП}^{ЗСЕМ}$ на рівні 3 кВт·год на день;

2) фактор витрати енергії на стиснення водню змінюється в діапазоні $k_C^B = 1 \div 1,15$. При цьому $k_C^B = 1$ за умови коли отримуваний водень виходить з електролізера під тиском 700 атм, і відповідно $k_C^B = 1,15$ за умови коли отримуваний водень виходить з електролізера під тиском 1 атм;

3) фактор витікання водню з ємностей для зберігання в залежності від тривалості зберігання та системи трубопроводів водню змінюється в діапазоні $k_B^B = 1 \div 1,05$. При цьому $k_B^B = 1$ за умови коли отримуваний водень зберігається малий період часу (дні), і відповідно $k_B^B = 1,05$ за умови коли накопичений водень зберігається 1 рік.

4) фактор використання водню паливними елементами в наслідок повного розряду або періодичного недозаряду буферного акумулятора $k_{ПЕ}^B$. Величина даного показника обумовлюється періодами тривалої відсутності відновлюваного енергоносія (енергії вітру чи сонячного випромінювання), або його слабкою інтенсивністю. Враховуючи незначну складову витрат енергії на роботу побутових приладів ЗС ($E_{ВП}^{ЗСЕМПА}$) у порівнянні з витратами на виробництво

та стиснення водню, фактор використання водню паливними елементами знаходиться в діапазоні від 1 до 1,008.

Розглянемо рівняння 5.1. за умови, що в якості ВДЕ виступає ВЕУ. Тоді:

$$E_{BEV} = K_3^B \cdot E_{E-p} + \frac{k_C^B \cdot k_{DE}}{\eta_{AB}} \cdot E_{AB}. \quad (5.18)$$

Розглянемо крайовий випадок при потребі добового вироблення $120 \text{ м}^3 \text{ H}_2$, при умові, що стиснення водню відбувається в межах від 1 до 700 атм ($k_C^B = 1,15$), фактор витікання водню $k_B^B = 1,05$, додаткова енергія АБ $k_{DE} = 1,2$, коефіцієнт корисної дії АБ $\eta_{AB} = 0,8$, фактор використання водню паливними елементами в наслідок повного розряду або періодичного недозаряду буферного акумулятору $k_{PE}^B = 1,008$. Тоді, необхідний виробіток енергії ВЕУ становитиме:

$$E_{BEV} = 1,008 \cdot 1,05 \cdot 621,36 + \frac{1,15 \cdot 1,2}{0,8} \cdot (3 + 67) = 657,65 + 120,75 = 778,39 (\text{кВт} \cdot \text{год}). \quad (5.19)$$

Якщо позначити $K_{3E}^{3C} = \frac{E_{BEV}}{E_{E-p}}$, то для роботи системи водневої ЗСЕМПА необхідний запас енергії в заданих умовах складає $K_{3E}^{3C} = 1,25$.

5.5. Висновки до розділу

1. Проаналізовано існуючі підходи до використання енергії відновлюваних джерел з метою отримання водню як універсального енергоносія та акумулятора енергії та встановлено, що для об'єктів відновлюваної електрогенерації зі стохастичним характером виробітку потенційно перспективним слід вважати електрохімічне отримання водню.

2. За умови розвитку в Україні ринку електромобілів на паливних елементах потенційно перспективними слід вважати водневі заправні станції електромобілів з використанням вітрових, сонячних та вітро-сонячних електроустановок як первинними генераторами електричної енергії.

3. Враховуючи високу швидкодію та широкий допустимий діапазон коливання робочої потужності для акумуляування та передачі енергії

відновлюваних джерел найбільше підходять протонообмінні електролізери для виробництва водню, на які не впливатиме стохастичний характер виробітку електроенергії вітро- та фотоелектричними установками. З точки зору енергетики, PEM електролізери мають більшу ефективність при їх експлуатації з робочими потужностями нижче номінальної.

4. На основі позитивного досвіду реалізації комплексних вітроводневих станцій вітчизняними науковцями запропоновано схемні рішення водневих ЗСЕМПА з використанням ВЕУ, ФЕУ та комплексного застосування ВЕУ з ФЕУ, які можуть ефективно працювати для заправки електромобілів екологічно чистим водневим паливом.

5. На основі існуючих підходів до математичного опису роботи ВЕУ, ФЕУ та воднево-кисневого електролізера вперше запропоновані математичні моделі виробництва водню на заправних станціях електромобілів на паливних елементах з використанням вітрових, сонячних та комплексних вітро-сонячних енергоустановок як первинних генераторів електроенергії, які дозволяють оцінювати раціональність реалізації ЗСЕМПА при наявності об'єктивних даних інтенсивності сонячного випромінювання та енергії вітру для потенційного місця встановлення станції.

РОЗДІЛ 6

ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

6.1. Економічні аспекти реалізації зарядних станцій електромобілів на основі вітроелектричних установок

Виробіток електроенергії за 2018 рік в Україні склав 146,11 млрд кВт·год. У загальному обсязі виробництва електроенергії 1,9 % (2,78 млрд кВт·год) було вироблено об'єктами відновлюваної енергетики, а її частка у вартості склала 8,61 % [162]. За останній рік суттєвих змін не сталося. Зросли тільки обсяги виробництва електроенергії на 2,7 % порівняно з 2017 роком, проте співвідношення обсягів споживання населенням і промисловістю практично не змінилося.

Відновлювана енергетика поступово збільшує свою частку в загальному енергобалансі країни, про що свідчить динаміка нарощування потужностей ВДЕ (рис. 6.1) [163]. Зокрема, за 2018 рік введено 813 МВт нових відновлюваних потужностей, основна частка яких припала на сонячну (716 МВт) та вітрову (68 МВт). Потужність решти потужностей відновлюваної енергетики, введених у 2018 році, склала 29 МВт. Значні темпи приросту об'єктів сонячної енергетики пояснюються, у першу чергу, найбільшим коефіцієнтом «зеленого тарифу», що робить їх найбільш економічно привабливими для інвестора. Однак, фотоелектричний потенціал енергії Сонця в 2,95 млн. т н.е. значно поступається енергетичному потенціалу вітру в 15 млн. т н.е. [38]. Це, у свою чергу, свідчить про недооцінку вітроенергетики, яка може суттєво збільшити виробництво чистої електричної енергії.

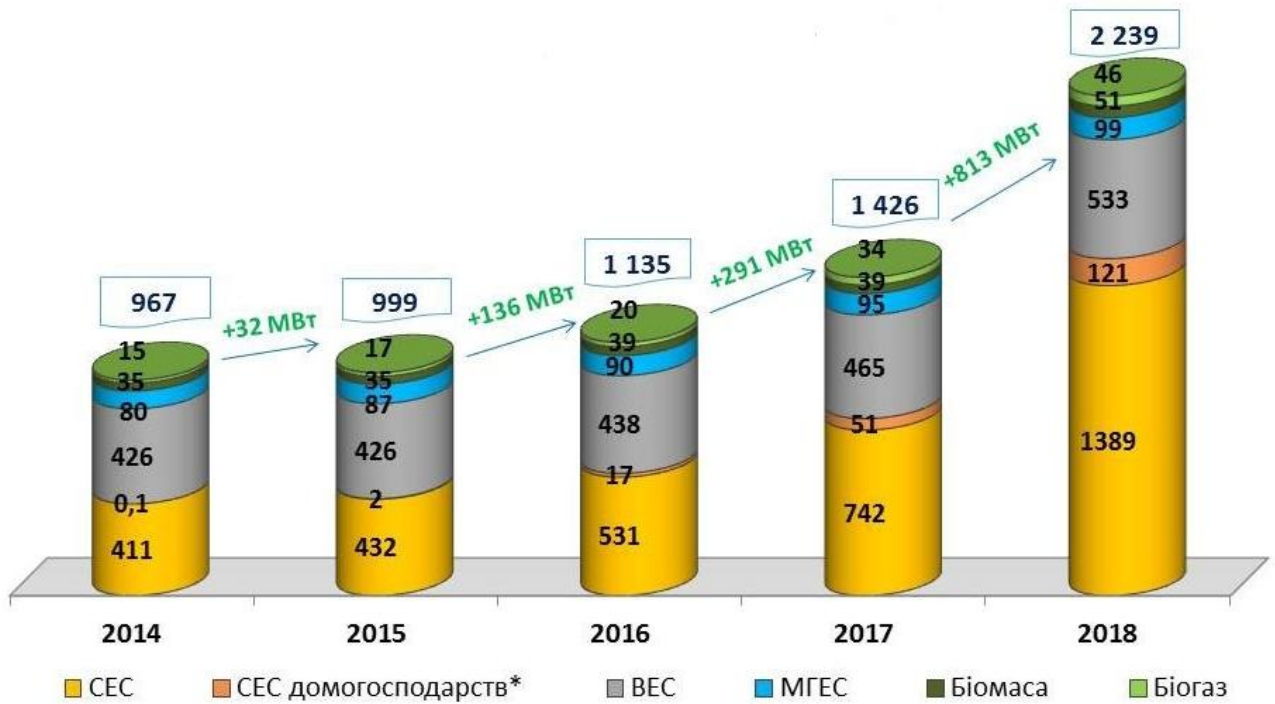


Рис. 6.1. Динаміка нарощування встановленої потужності об'єктів відновлюваної електроенергетики за останні 5 років.

Одним з варіантів швидшого освоєння енергетичного потенціалу вітру та, відповідно, отримання додаткового виробітку екологічно чистої енергії є використання ВЕУ для заряду різних типів електромобілів (як повністю електричних, так і гібридів, що здатні підзаряджатись). Розглянемо економічні питання використання енергії вітру при застосуванні в складі зарядної станції електромобілів (ЗСЕМ) вітроелектричних установок.

Статистика показує [164], що ринок електромобілів в Україні продовжує бути таким, що швидко зростає. Станом на 01.11.2018 року в Україні нараховується вже понад 11,5 тисяч електромобілів (рис. 6.2), більше 9,5 тис. чисто електричних (BEV) та більше 2 тис. підзаряджуваних гібридів (PHEV), тоді як в 2014 році їх було лише 95. На сьогодні в Україні вже є понад 2000 зарядних станцій, однак практично всі вони приєднані до об'єднаної енергосистеми країни (ОЕС). Зростання потужних одиничних зарядних станцій

електромобілів (від 100 кВт і більше) та їх кількості може призводити до значного впливу на роботу ОЕС України.

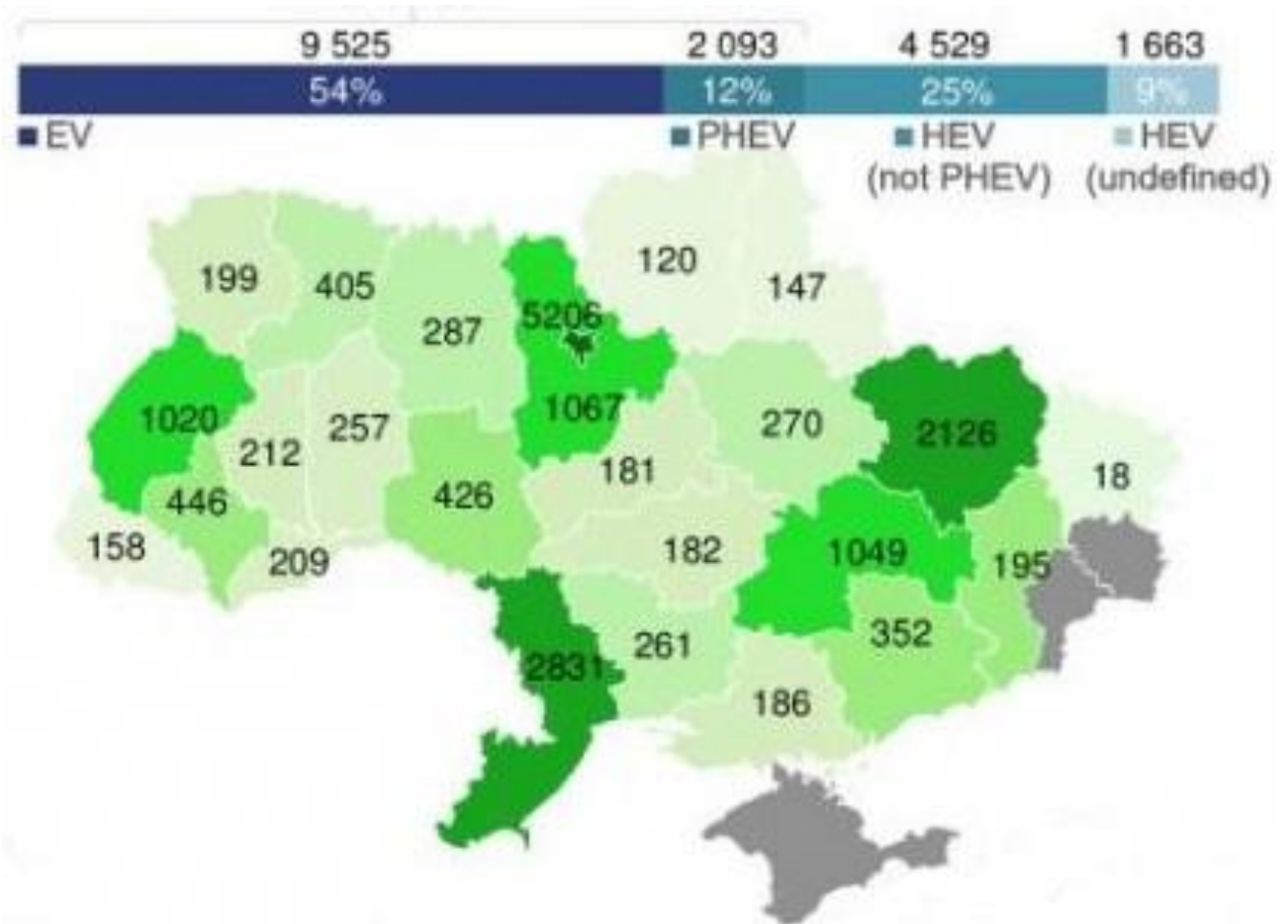


Рис. 6.2. Розподіл зареєстрованих електромобілів по регіонам України (без врахування АР Крим та тимчасово окупованих територій Донецької та Луганської областей).

Для розрахунків приймемо середнє споживання електроенергії одним електромобілем на рівні близько 80 кВт·год на день (близько 30 МВт·год на рік). Також у розрахунок будемо включати техніко-економічні характеристики станцій швидкого заряду (технології Chademo або SSC – з режимами швидкої підзарядки (100 кВт за 10–30 хвилин)). Ставимо задачу забезпечити зниження негативного впливу на роботу ОЕС шляхом створення автономних зарядних станцій електромобілів на основі вітроелектричних установок, які

розміщуватимуться на основних автошляхах досить далеко від ліній електропередачі.

Встановлення ЗСЕМ на основі ВЕУ має передбачатись у місцях з наявним попитом електромобілів на підзаряд при забезпеченні умов гарантованого заряду та зручності для під'їзду електромобілів. Лише за умови максимально можливої експлуатації встановленої потужності генеруючого та перетворювального устаткування можуть бути досягнуті мінімальні терміни окупності витрат власника станції підзарядки на її проектування, монтаж і експлуатацію.

Аналіз динаміки вартості ВЕУ [165] показує, що середня вартість 1 кВт встановленої потужності станом на 2018 рік становить близько 1000 дол. США (рис. 6.3). Для розрахунків приймаємо вартість в 1,0 дол. США за 1 Вт встановленої потужності ВЕУ.

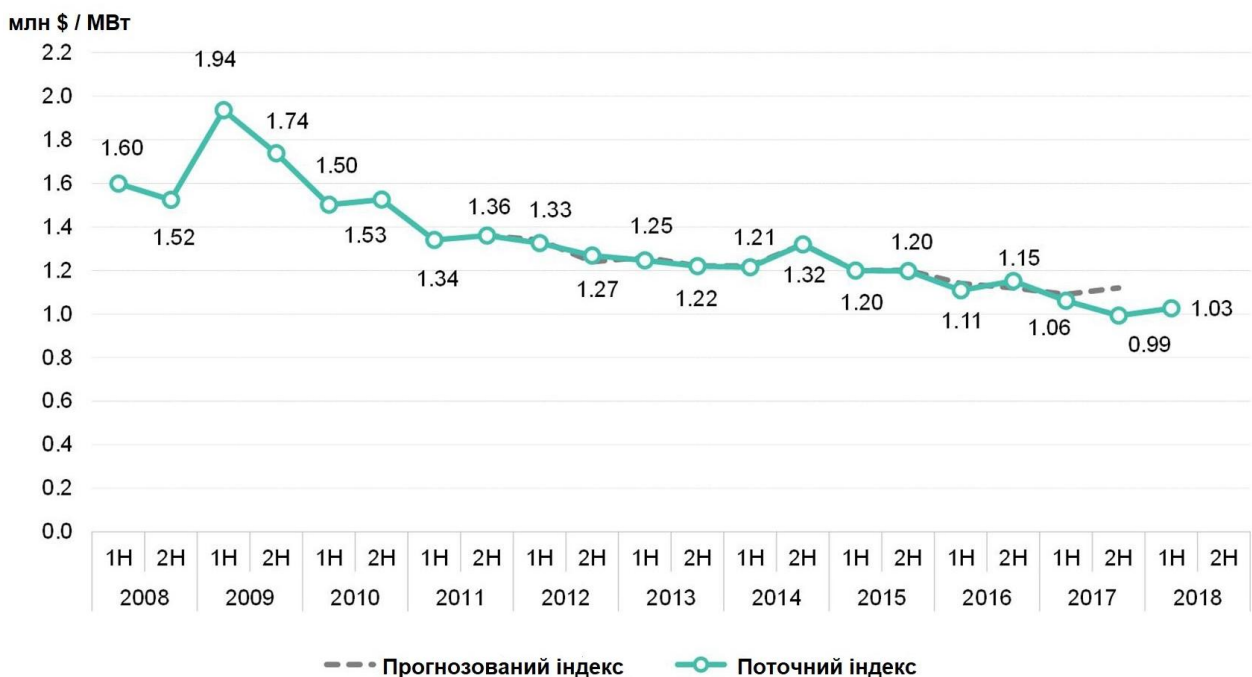


Рис. 6.3. Динаміка зміни індексу вартості ВЕУ за останні 10 років.

Очікувано, що основний обсяг споживання енергії на ЗСЕМ буде спостерігатися у світлу пору доби, адже трафік у день набагато більший, ніж вночі. Зважаючи на це, автономна зарядна станція електромобілів на основі ВЕУ передбачає в своєму складі буферний акумулятор, який буде заряджатись у

період наявності вітру. Незалежно від того, коли прибуде електромобіль на заряд, має бути достатньо енергії для його підзарядки. Згідно [38] ККД кращих вітрових коліс знаходиться у межах $0,3 \div 0,35$. Приймаючи ККД 0,3 ВЕС встановленою потужністю 20 кВт у середньому за рік, приміром, для регіону, наприклад, м. Мелітополь, Запорізької області, Україна при висоті опори 66 м можливо отримати виробіток $50 \div 60$ МВт·год електроенергії на рік.

Для розрахунку необхідної потужності обираємо зарядну станцію на два підключення потужністю 100 кВт.

При потребі виробітку в 137,83 кВт·год щодоби (або 50,3 МВт·год на рік), необхідна встановлена потужність ВЕС має складати близько 20 кВт. При цьому, на продаж для заряду ЕМ використовуватиметься 89 кВт·год на день, або 32485 кВт·год на рік. Решта, 17885 кВт·год витратиметься на власні потреби ЗСЕМ, а також це будуть втрати при перетворенні та передачі енергії від ВЕУ до кінцевого споживача.

Якщо врахувати випадковий характер виробітку електроенергії ВЕУ як протягом доби, так і в сезонному розрізі, то для літньої пори року необхідно збільшувати потужність ВЕУ, оскільки в ці місяці року спостерігаються дещо менші швидкості вітру. Тобто, для літнього періоду року встановлена потужність ВЕУ, необхідна для забезпечення щоденного заряду електромобіля і власних потреб ЗСЕМ, зростає в $1,5 \div 2$ рази.

Орієнтовна вартість ВЕУ для ЗСЕМ, при рівномірному розподілі швидкості вітру (в ідеальному випадку) буде становити:

$$\begin{aligned} B_{BEU} &= 1000 \cdot 20 = 20000\$ \\ \text{або} & \\ B_{BEU} &= 20000 \cdot 28 = 560000 \text{грн} \end{aligned} \tag{6.1}$$

Окрім вартості ВЕУ, необхідно врахувати вартість зарядних пристроїв і акумуляторів. Згідно [166] приведена вартість пристрою швидкого заряду становить 200 \$/кВт, або 5600 грн/кВт. Відповідно, зарядну станцію на 100 кВт можна оцінювати в 20000\$, або в 560 тис. грн.

Аналіз динаміки вартості літєвих акумуляторних батарей в період з 2010 по 2017 роки включно показує стабільну динаміку зменшення вартості 1 кВт·год від 1000\$ до 209\$ відповідно (рис. 6.4) [167]. Якщо прийняти вартість 1 кВт·год у 209\$, або 5852 грн, то вартість буферної АБ для ЗСЕМ енергоємністю 138 кВт·год складає 807,576 тис. грн.

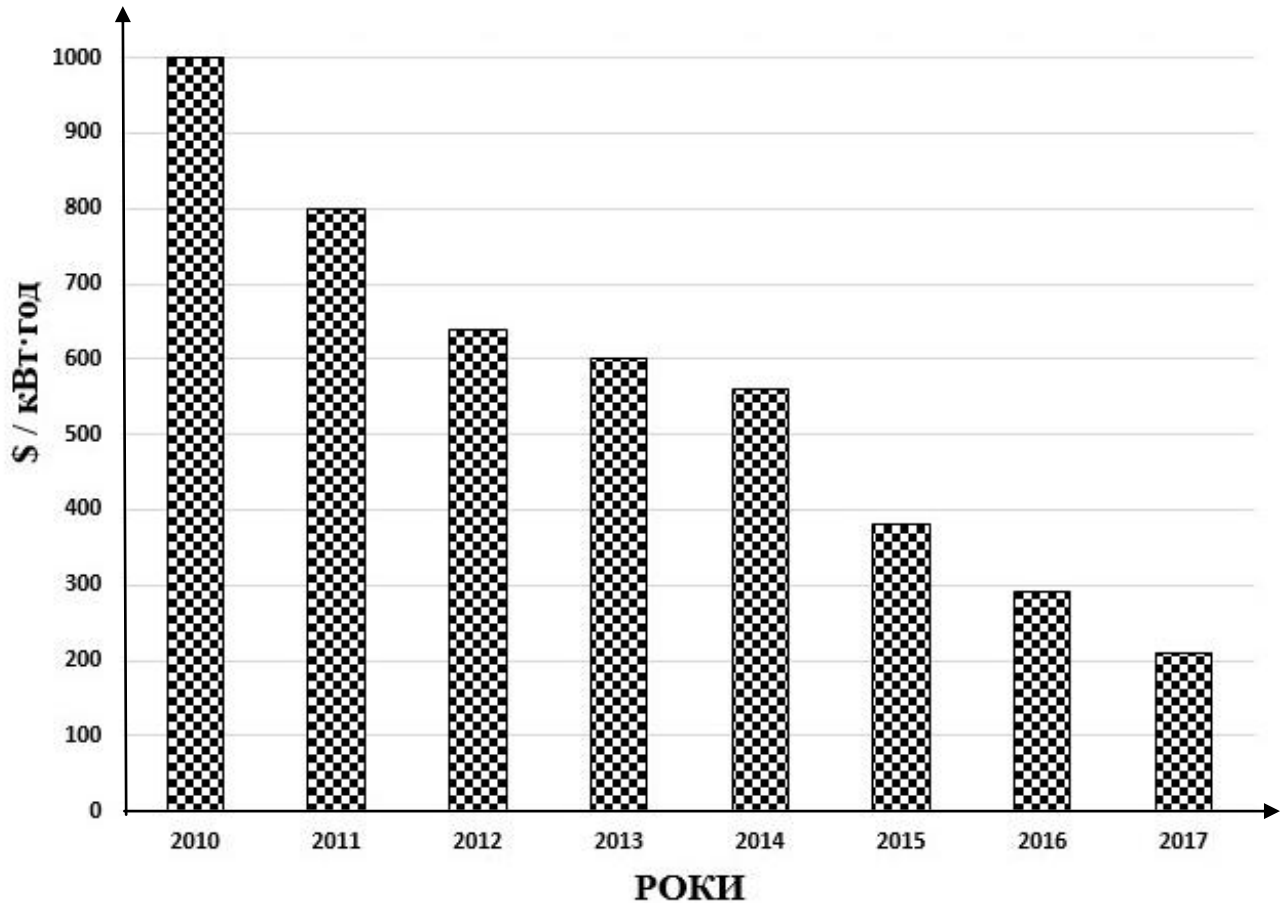


Рис. 6.4. Динаміка зменшення вартості літєвих акумуляторних батарей за останні 7 років.

Для забезпечення заряду електромобіля у 80 кВт·год та забезпечення власних потреб зарядної станції необхідна буферна акумуляторна батарея енергоємністю в 137,8 кВт·год.

Враховуючи основні витрати на реалізацію ЗСЕМ на основі ВЕУ з буферним акумулятором енергії, маємо загальну вартість близько 1,927 млн. грн. До цього варто додати вартість землі, монтаж, налагодження і експлуатацію зарядної станції в межах 25% від капітальних вкла-день. Тобто, повна реалізація

ЗСЕМ на основі ВЕУ з буферним акумулятором енергії з розрахунку на гарантований заряд одного електромобіля з максимальною енергоємністю 80 кВт·год складе біля 2,5 млн. грн.

При реалізації електроенергії на швидкий заряд електромобілів за нічним тарифом по 4 грн. за 1 кВт·год [168] термін окупності ЗСЕМ на основі ВЕУ складе біля 19÷20 років.

Якщо реалізовувати електроенергію на станціях швидкого заряду за денним тарифом по 8 грн. за 1 кВт·год швидкого заряду [168], то термін окупності станції в цілому скорочується до 9,5÷10 років, що представляє дані зарядні станції достатньо привабливою сферою інвестицій, однак за даним показником вони (ЗСЕМ на основі ВЕУ), поки що, поступаються зарядним станціям, під'єднаним до ОЕС, що пояснюється додатковими витратами на ВЕУ та буферний акумулятор. Також зазначимо, що витрати на інфраструктуру, яка потрібна для зарядних станцій на ВЕУ приймаємо такими ж як і для традиційних ЗС (під'їзд, освітлення, розмітка, знаки, вказівники тощо) [20].

6.2. Економічні аспекти реалізації зарядних станцій електромобілів на основі фотоелектричних батарей

Розглянемо економічні питання використання енергії сонячного випромінювання при застосуванні в складі автономної зарядної станції електромобілів (ЗСЕМ) фотоелектричних установок.

Впровадження зарядних станцій на основі ВДЕ, розташованих вздовж шляхів з інтенсивним автомобільним потоком (автобани, магістралі, дороги регіонального та державного значення), більш доцільне з режимами швидкої підзарядки (40–80 кВт за 10–30 хвилин). Однак, реалізація таких станцій передбачає обов'язкове застосування буферних накопичувачів електроенергії через стохастичний виробіток електроенергетичними установками на основ ВДЕ (ВЕУ та ФЕУ).

На сьогодні в Україні присутні такі виробники зарядних пристроїв, як «Тока» (Україна), Schneider Electric (Франція), Efaces (Португалія), Tilon Energy (Китай) та інші. Технологічно, монтаж цих пристроїв може здійснюватися у підлоговому, настінному та підвісному варіантах. Одночасно можлива зарядка до трьох автомобілів, рекомендована вихідна потужність складає від 3 до 100 кВт (можливий однофазний чи трьохфазний підвід електроенергії).

Аналіз динаміки вартості ФЕУ показує, що індекс вартості 1 Вт встановленої потужності як в багаторічному масштабі (рис.6.5) [169], так і протягом минулого 2018 року (рис. 6.6) постійно зменшувався. Наприклад, кремнієві фотоелементи найвищої якості зменшились в ціні від 0,5 €/Вт на кінець 2017 року до 0,36 €/Вт на кінець 2018 року. Така сама динаміка спостерігалась і з фотоелементами нижчої якості (більш бюджетний варіант, але з меншою гарантією чи взагалі безгарантійні фотоелементи) їх вартість зменшувалась від 0,27 €/Вт на кінець 2017 року до 0,19 €/Вт на кінець 2018 року.

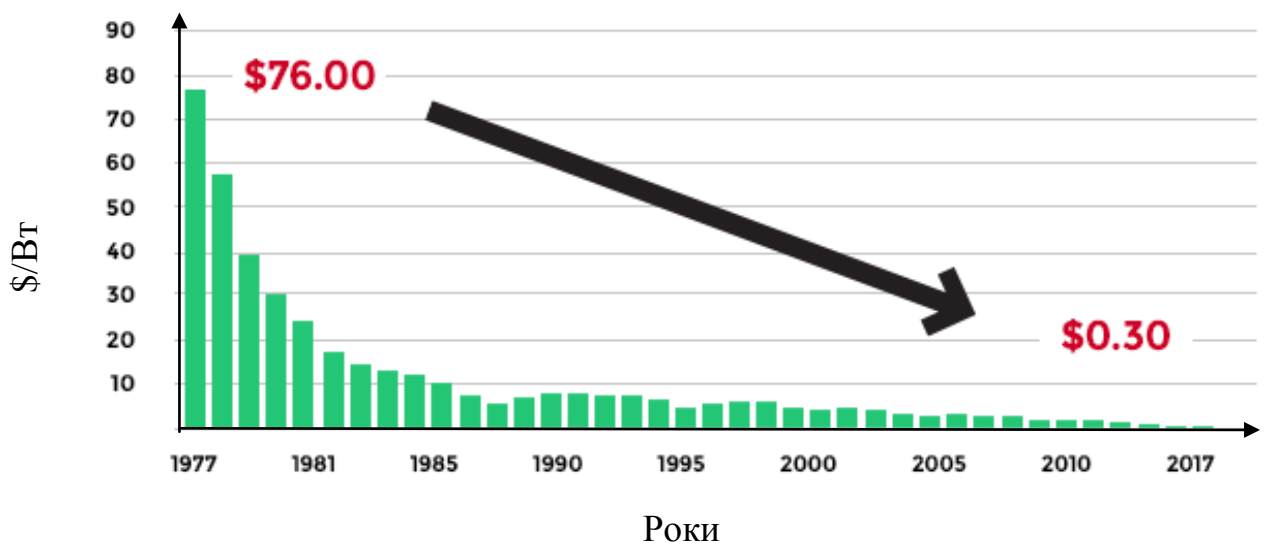


Рис. 6.5. Динаміка зміни індексу вартості 1 Вт ФЕБ за багаторічний період (1977-2017 р.р.).

В подальшому для розрахунків приймаємо вартість в 1,0 \$ США за 1 Вт встановленої потужності ФЕС (ФЕУ, інвертор, зарядний пристрій, система кріплення та монтажу, комутаційні та з'єднувальні елементи).

Очікувано, що основний обсяг споживання енергії на ЗСЕМ буде спостерігатися у світлу пору доби, а звичайний заряд буде здійснюватися вдома у власника авто від центральної електромережі.

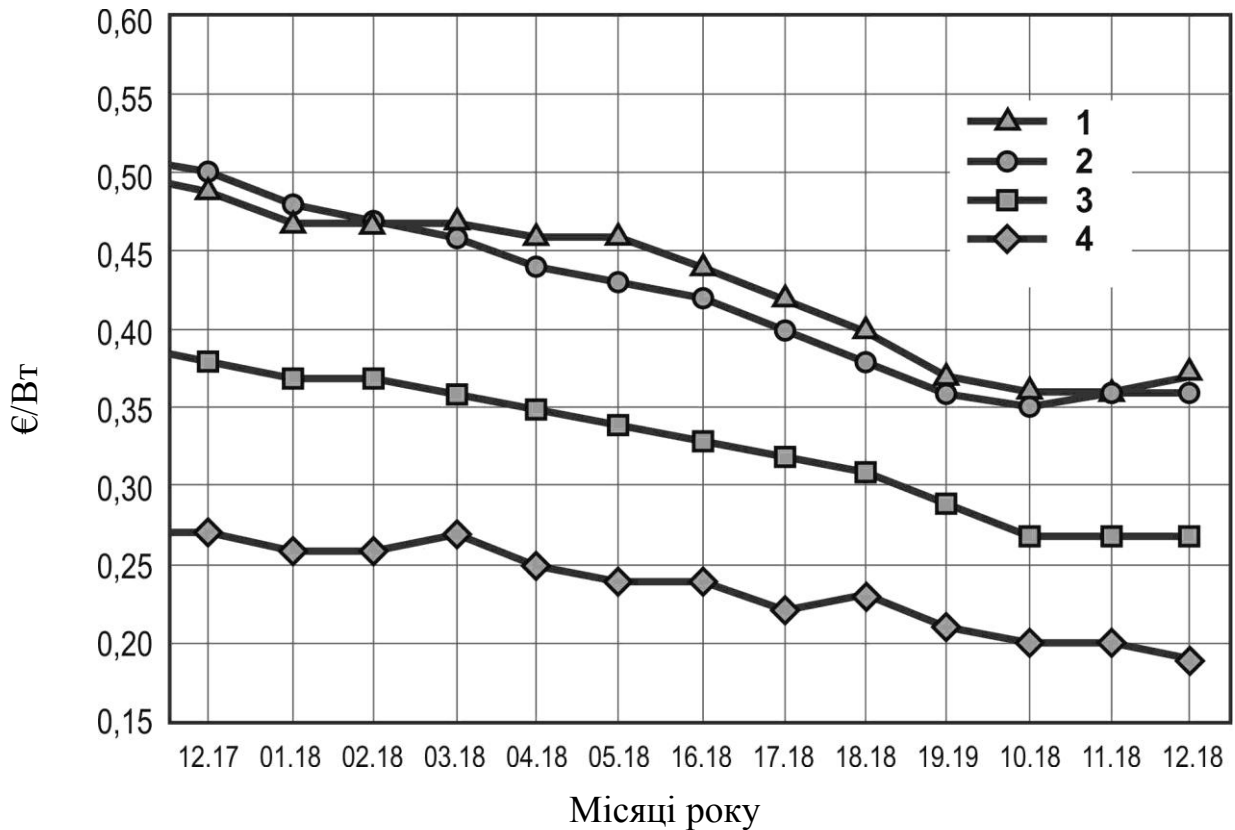


Рис. 6.6. Динаміка зміни індексу вартості ФЕБ за 2018 рік:

1 – високоефективні фотобатареї з одиничною потужністю від 285 Вт; 2 – фотомодулі з чорними накладками та рамками з потужністю від 200 Вт до 320 Вт; 3 – фотомодулі на 60 комірок з алюмінієвими рамками потужністю від 260 Вт до 280 Вт; 4 – низьковартісні та низькосортні фотомодулі з лімітованим або безгарантійним виробництвом.

У випадку реалізації зарядних станцій електромобілів на основі ФЕУ, сонячні модулі будуть заряджати буферний акумулятор енергією лише у світлу пору доби незалежно від того, коли прибуде електромобіль на заряд (заправку).

Згідно розрахунків прогнозованого виробітку з використанням електронного додатку [170] фотоелектрична станція (на основі

монокристалічних кремнієвих фотоелементів з ККД 14 %) встановленою потужністю 1 кВт у середньому за рік для регіону м. Мелітополь Запорізької області дає виробіток близько 1190 кВт·год електроенергії. Якщо аналізувати середньодобовий помісячний виробіток (рис. 6.7), то найменше його значення спостерігається в грудні місяці на рівні 1,07 кВт·год електроенергії, і відповідно максимальний середньодобовий помісячний показник в липні 4,75 кВт·год електроенергії.

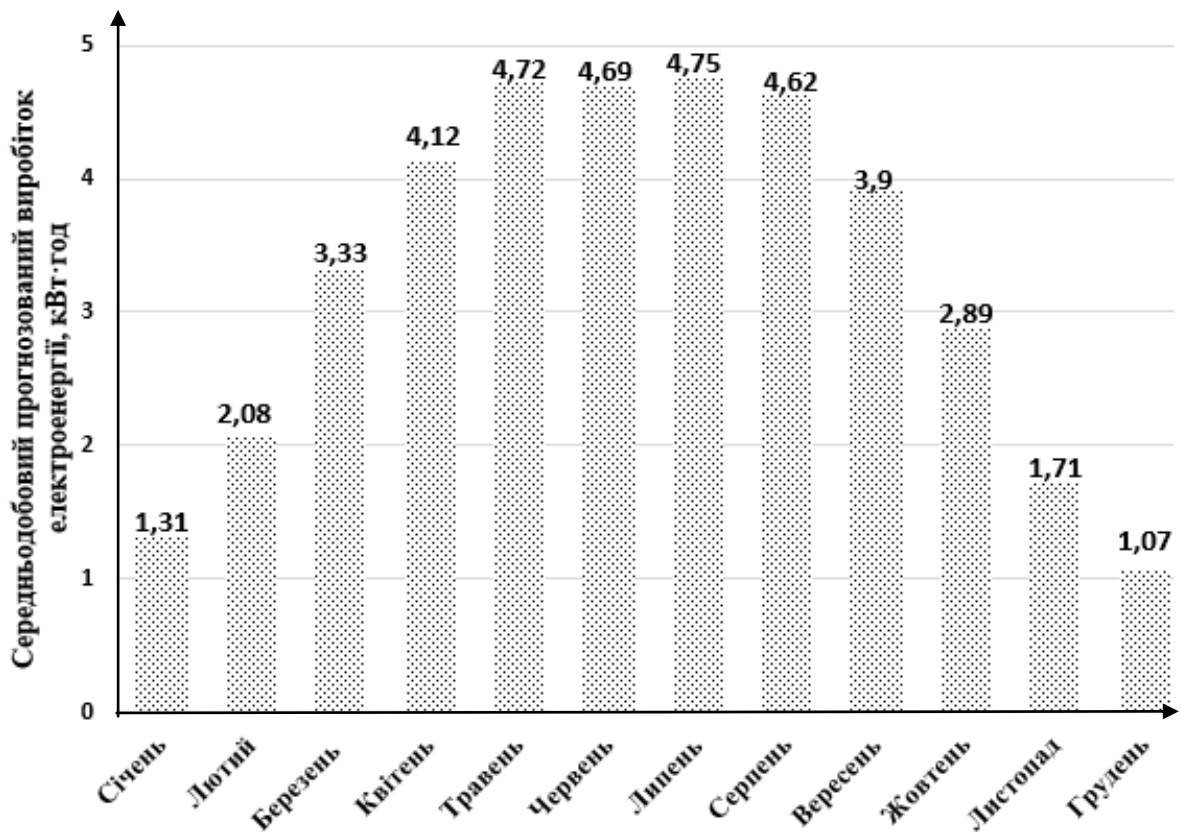


Рис. 6.7. Прогнозований середньодобовий виробіток електроенергії ФЕУ 1 кВт в м. Мелітополь, Запорізької області.

У відповідності до прийнятих попередніх умов реалізації заряду ЕМ на АЗСЕМ відмічених в пункті 6.1, а також рівнянні (6.1), що визначає необхідну кількість електроенергії, яка має вироблятися, в даному випадку, ФЕУ проведемо розрахунок основних техніко-економічних показників реалізації ЗСЕМ на основі ФЕУ.

При потребі виробітку 137,83 кВт·год щодоби (або 50,37 МВт·год на рік) необхідна встановлена потужність ФЕУ має складати близько 129 кВт (по даним найменшого середньодобового прогнозованого виробітку, тобто для грудня місяця). При цьому на продаж для заряду ЕМ використовуватиметься 89 кВт·год на день, або 32485 кВт·год на рік. Решта, 17885 кВт·год витратиметься на власні потреби АЗСЕМ, а також це будуть втрати при перетворенні та передачі енергії від ФЕУ до кінцевого споживача.

Якщо врахувати випадковий характер виробітку електроенергії ВЕУ як протягом доби, так і в сезонному розрізі, то для літньої пори року необхідно зменшувати потужність ФЕС, оскільки в ці місяці року спостерігаються значно вищі показники інтенсивності сонячної радіації і відповідно, виробіток електроенергії. Тобто, для літнього періоду року встановлена потужність ФЕУ необхідна для забезпечення щоденного заряду електромобіля і власних потреб ЗСЕМ зменшиться в 4÷4,5 рази [19].

Орієнтовна вартість ФЕУ для ЗСЕМ, при мінімальних показниках приходу сонячної радіації, що характерні для грудня місяця, буде становити:

$$\begin{aligned}
 B_{\text{ФЕУ}} &= 1000 \cdot 129 = 129000\$. \\
 \text{або} & \\
 B_{\text{ФЕУ}} &= 20000 \cdot 28 = 3612000 \text{ грн}
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

Вартість зарядних пристроїв і акумуляторів визначена в попередньому пункті. Тобто, зарядну станцію на 100 кВт можна оцінювати в 20000\$, або в 560 тис. грн, а вартість буферної АБ для ЗСЕМ енергоємністю 138 кВт·год складає 807,576 тис. грн.

Враховуючи основні витрати на реалізацію ЗСЕМ на основі ФЕБ з буферним акумулятором енергії, маємо загальну вартість близько 4,173 млн грн. До цього варто додати вартість землі, монтаж, налагодження і експлуатацію зарядної станції в межах 25% від капітальних вкладень. Тобто, повна реалізація ЗСЕМ на основі ФЕБ з буферним акумулятором енергії з розрахунку на гарантований заряд одного електромобіля з максимальною енергоємністю 80 кВт·год складе біля 5,216 млн грн.

При реалізації електроенергії на швидкий заряд електромобілів за нічним тарифом по 4 грн. за 1 кВт·год термін окупності ЗСЕМ на основі ФЕБ складе біля 40 років.

Якщо реалізовувати електроенергію на станціях швидкого заряду за денним тарифом по 8 грн. за 1 кВт·год швидкого заряду [19], то термін окупності станції в цілому скорочується до 20 років.

Для підвищення економічної привабливості проектів даного типу необхідно розглянути варіант можливості продажу надлишкової електроенергії в мережу по «зеленому тарифу». Зокрема, для ФЕС встановленою потужністю 129 кВт прогнозований виробіток для заданої місцевості складає 154 МВт·год, з яких 50,37 йде на роботу ЗСЕМ, а решта 103,63 154 МВт·год при реалізації по «зеленому тарифу» дозволять отримати додатково 490 тис. грн. і скоротити термін окупності до 8,5 років за першим (нічним) тарифом швидкого заряду ЕМ і, відповідно до 7 років за другим (денним) тарифом заряду ЕМ.

В такому випадку термін окупності ЗСЕМ на основі ФЕБ є достатньо привабливою сферою інвестицій, хоча і поступаються зарядним станціям, під'єднаним до ОЕС, що пояснюється додатковими витратами на ФЕБ та буферний акумулятор. Також зазначимо, що витрати на інфраструктуру, яка необхідна для зарядних станцій на основі ФЕБ приймаємо такими ж як і для традиційних ЗС (під'їзд, освітлення, розмітка, знаки, вказівники тощо).

6.3. Економічні аспекти реалізації автономних зарядних станцій електромобілів на основі комплексного використання вітроелектричних установок сонячних фотоелектричних батарей

Крім технічних переваг комплексного використання вітро-сонячних установок в складі ЗСЕМ відмічених в розділі 4, необхідно проаналізувати економічні показники реалізації станції даного типу, що дозволить підсилити доцільність реалізації таких систем як на даний момент, так і в майбутньому.

Серед експоненціальної, лінійної, логарифмічної, полімінальної, степеневій функцій для апроксимації даних нами обрано полімінальну, а саме квадратичну залежність. Квадратична функція показала достатньо високу величину достовірності апроксимації (коефіцієнт детермінації) для СЕС $R^2 = 0,9788$ та ВЕС $R^2 = 0,9887$, що є достатньо для прогнозування (напрямок ВДЕ чи розвитку ЗСЕМ).

Функція апроксимації для ВЕС:

$$y = 10,786 \cdot x^2 - 43463 \cdot x + 4 \cdot 10^7, \quad (6.3)$$

для СЕС:

$$y = 97,429 \cdot x^2 - 392605 \cdot x + 4 \cdot 10^8. \quad (6.4)$$

З метою уникнення абсолютних дат для визначення значень при прогнозуванні показника пропонується працювати з відносними значеннями років. Виберемо 2018 рік за нульове значення осі X.

Тоді функція апроксимації для ВЕС буде мати вигляд:

$$y = 10,786 \cdot x^2 + 68,443 \cdot x + 529,77; \quad (6.5)$$

для СЕС:

$$y = 97,429 \cdot x^2 + 616,31 \cdot x + 1349,1. \quad (6.6)$$

Такий вигляд рівняння надає змогу здійснити аналіз функції. На рис. 6.8 приведено прогноз зростання встановленої потужності сонячних та вітрових електростанцій на 5 років (до 2024 року).

Важливою ланкою для станцій зарядки електромобілів є акумуляторні батареї. Аналіз середньої ціни по рокам надав змогу визначити функцію залежності ($R^2 = 0,971$):

$$y = 198,25 \cdot e^{-0,207x}. \quad (6.7)$$

Прогноз на 2024 рік показує, що вартість акумуляторної батареї знизиться до 60 дол. за 1 кВт·год, що є досить оптимістичним прогнозом, адже з 2010 по 2018 рік (9 повних років) вартість вже знизилася у 5 разів.

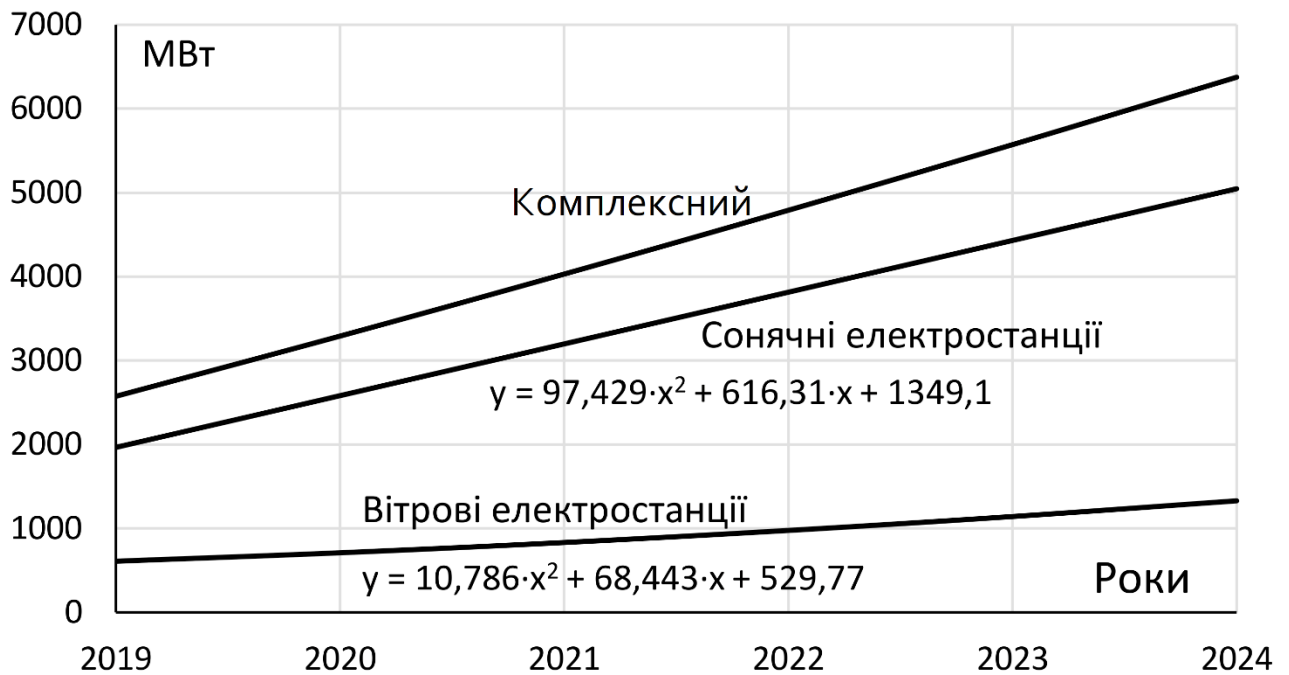


Рис. 6.8. Прогноз зростання встановленої потужності для вітрових і сонячних електростанцій.

Стосовно вартості сонячних батарей, то політико-економічні процеси зумовили зниження ціни на них. Аналіз динаміки цін з 2016 року показав залежність (при $R^2 = 0,9352$):

$$y = 0,5501 \cdot e^{-0,169x}. \quad (6.8)$$

Стосовно вартості вітрогенераторів, то маємо також зниження ціни, хоча й не значне. Аналіз динаміки цін з 2009 року показав залежність (при $R^2 = 0,8899$):

$$y = 0,9905e^{-0,055x}. \quad (6.9)$$

За розрахунками побудови автономної зарядної станції електромобілів на основі вітроелектричних установок окремо і на сонячних панелей окремо пропонується здійснити розрахунок комплексного використання енергії Сонця та вітру. Маємо такі вихідні дані:

Максимально необхідно за нашими розрахунками мати встановлену потужність 20 кВт ВЕУ або 129 кВт ФЕУ. Можлива комбінація, щоб при наявних умовах комплекс надав на буферні акумулятори 138 кВт·год.

Для узгодження потреб автономної зарядної станції електромобілів в енергії маємо таке.

Прийmemo за одиницю потребу в енергії та рахуємо, що цю одиницю забезпечує 20 кВт ВЕУ або 129 кВт ФЕУ.

Тобто має забезпечуватися така рівність:

$$(P_{\text{ВЕУ}}/20) + (P_{\text{ФЕУ}}/129) = 1. \quad (6.10)$$

З цього рівняння можна визначити необхідну потужність одного джерела, знаючи потужність іншого джерела.

Прийmemo для розрахунку комплекс, у якому співвідношення

ВЕУ та ФЕУ 50% на 50%, тобто здійcнимо прогноз вартості автономної зарядної станції за таких умов:

- потужність ВЕУ 10 кВт і ФЕУ 65 кВт;
- акумуляторна батарея 138 кВт·год.

Формула розрахунку має вигляд:

$$C = 10 (0,9905e^{-0,055x}) + 65 (0,5501 \cdot e^{-0,169x}) + 138 \cdot (0,1983 \cdot e^{-0,207x}). \quad (6.11)$$

Результат моделювання (у тис. дол. США) приведені на рис. 6.9.

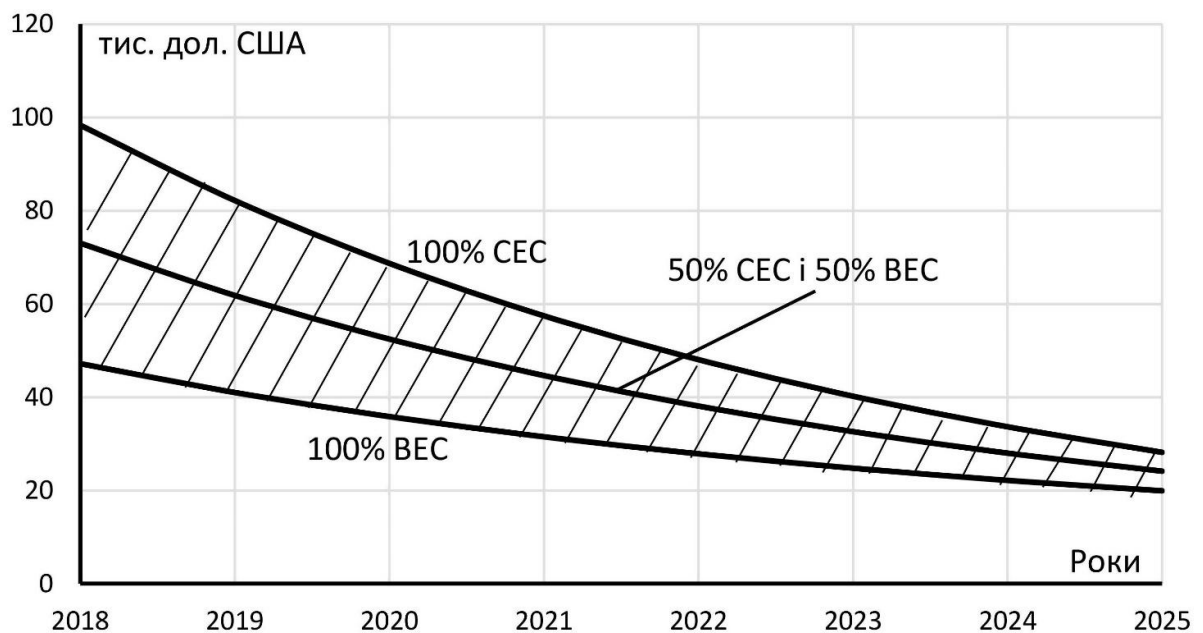


Рис. 6.9. Динаміка зменшення ціни на комплексне використання сонячної енергії та енергії вітру з врахуванням вартості акумуляторів.

Аналіз свідчить про те, що більш вигідно використовувати до 2025 року буде вітрогенерацію. На 2018 рік різниця реалізації автономної зарядної станції електромобілів на ВЕС та СЕС складала понад двох разів (2,09 рази), для 2025 року вже ця різниця склала 1,4 рази.

При аналізі на більш тривалі проміжки часу (рис. 6.10) маємо те, що у 2030 році комплекс 50% ВЕС та 50% СЕС буде більш вигідним, ніж вітроелектростанції. Так, вже після 2029 року різниця у використанні ВЕС та СЕС наблизиться до 1,0, а вже в 2033 році буде СЕС в 1,45 рази буде вигідніше використовувати, ніж ВЕС.

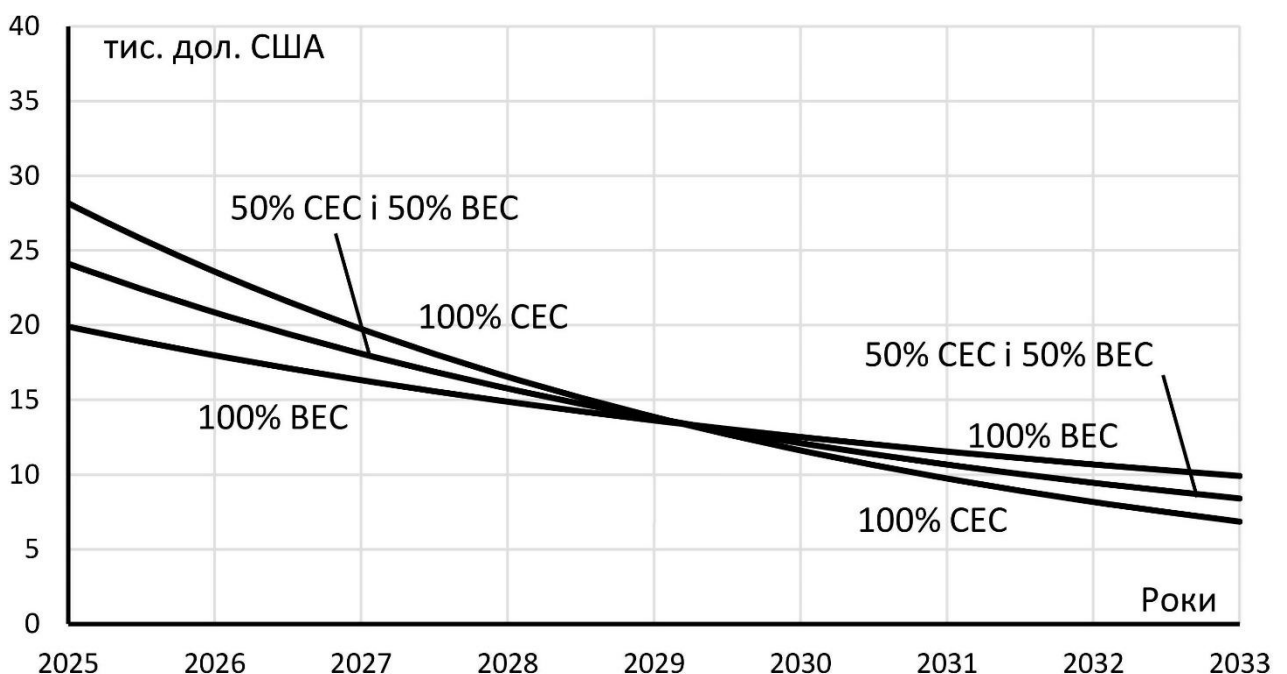


Рис. 6.10. Динаміка зменшення ціни на комплексне використання сонячної енергії та енергії вітру.

Отже, щороку для комплексу ВЕС+СЕС зниження вартості становить близько 15% на 2019 рік та на 11% на 2033 рік. Для ВЕС зниження не таке значне – від 13% (2019р.) до 7% (2033р.). От для сонячної енергетики маємо практично на всьому періоді зниження на 16%.

6.4. Сценарії розвитку зарядних станцій електромобілів на основі відновлюваних джерел енергії

Співробітниками Інституту відновлюваної енергетики НАН України розроблено прогноз розвитку об'єктів відновлюваної енергетики до 2040 року [171], згідно з яким вітроенергетика збільшиться за встановленою потужністю до 18 ГВт (рис. 6.11), що дозволить отримувати 55 тис. ГВт· год екологічно чистої електричної енергії (рис. 6.12). Поруч з цим прогноз розвитку фотоенергетики оцінюється у зростання до 6 ГВт (рис. 6.11), що дозволить отримувати 7,5 тис. ГВт· год електричної енергії (рис. 6.12).

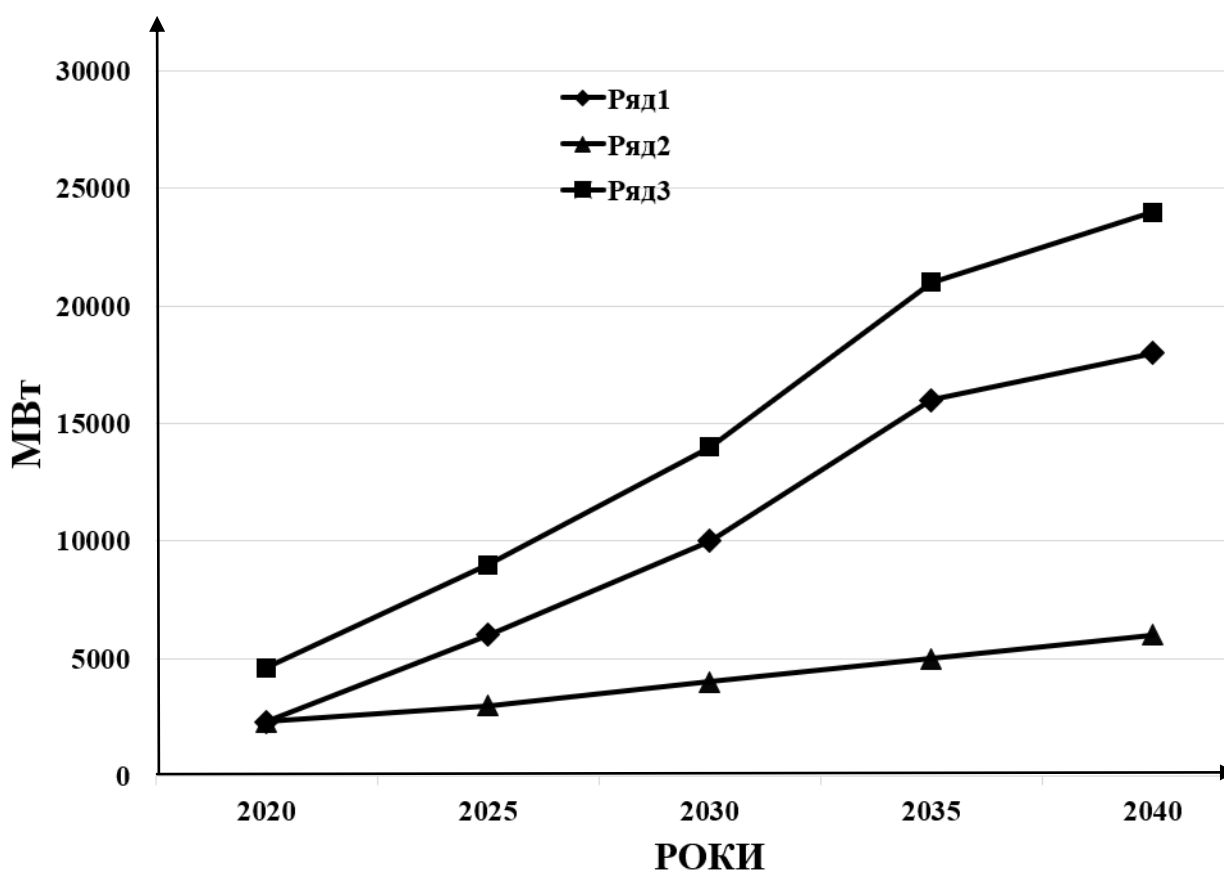


Рис 6.11. Прогноз розвитку вітро- та фотоенергетики в Україні згідно даних ІВЕ НАН України до 2040 року, МВт встановленої потужності:

ряд 1 – вітроелектричних станцій (ВЕС); ряд 2 – фотоелектричних станцій (ФЕС); ряд 3 – сумарний показник вітро- та фотоелектричних станцій (ВЕС+ФЕС).

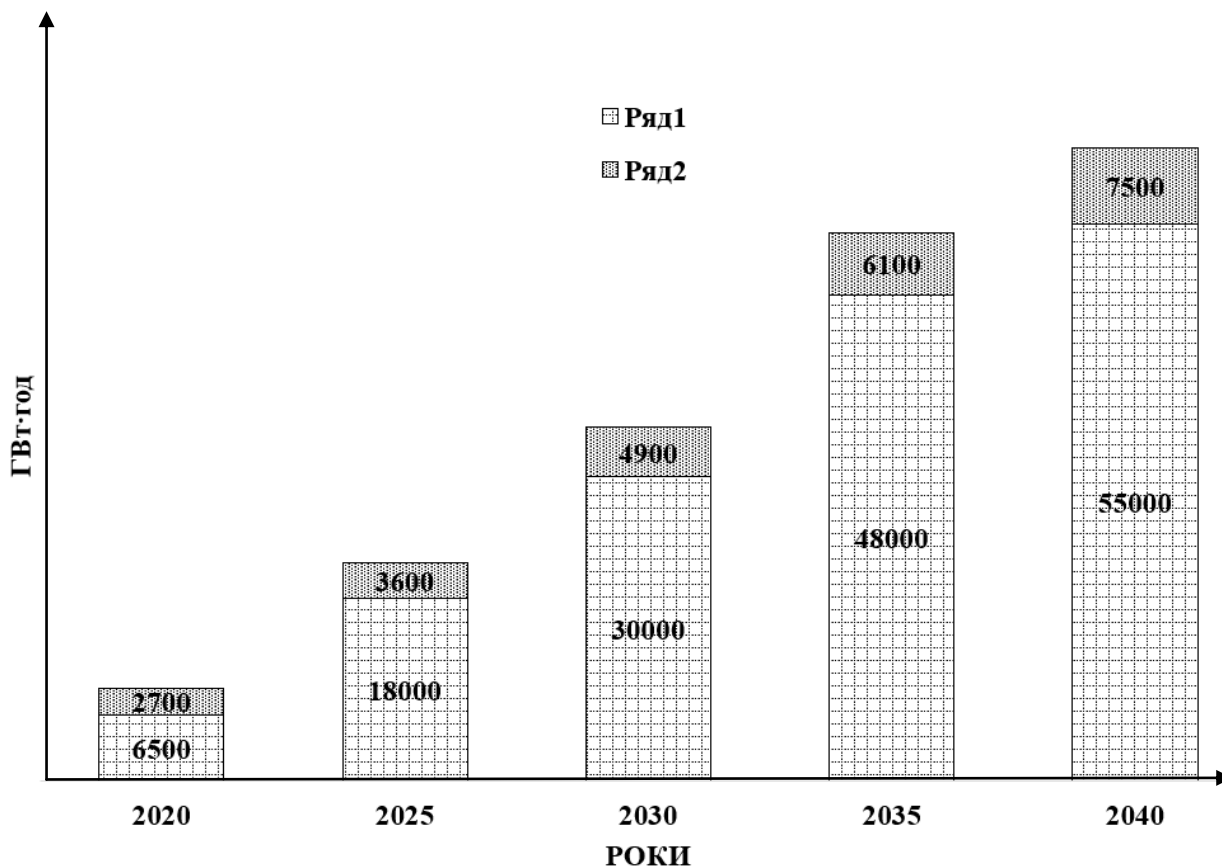


Рис 6.12. Прогноз виробітку електроенергії вітро- та фотоелектростанціями в Україні згідно прогнозу ІВЕ НАН України до 2040 року, ГВт· год:
ряд 1 – вітроелектричних станцій (ВЕС);
ряд 2 – фотоелектричних станцій (ФЕС).

При розробці даного прогнозу розвитку об'єктів відновлюваної енергетики до 2040 року враховувалась динаміка нарощування потужності ВДЕ за попередні роки, динаміка зміни вартості традиційних енергоносіїв, стан ліній електропередачі та роботу об'єднаної енергосистеми України при підключенні нестабільних джерел генерації, а також темпи зростання попиту на електроенергію.

Прийняті прогнози постійного зростання встановленої потужності ВЕС та ФЕС з однієї сторони говорять про зростання частки генерації за рахунок ВДЕ, а з іншої – про зростання потреби в маневрових потужностях з метою забезпечення якісної роботи об'єднаної енергосистеми.

Розширити можливості використання енергії вітру та Сонця, без негативного впливу на ОЕС України можливо за рахунок реалізації мереж зарядних станцій електромобілів.

За інформацією Міністерства інфраструктури України на даний час автомобільна транспортна система України налічує більше 9,2 млн. транспортних засобів, у тому числі: 6,9 млн. легкових автомобілів, біля 250 тис. автобусів, близько 1,3 млн. вантажних автомобілів та понад 840 тис. од. мототранспорту [172].

При цьому, абсолютно увесь класичний автотранспорт слід вважати потенційним на заміну відповідними електричними транспортними засобами, що можна пояснити загальносвітовою динамікою стабільного зростання електромобілів, яка спостерігається протягом останніх 5 років в тому числі і в Україні.

Згідно аналізу прогнозу розвитку ринку електромобілів в світі (рис. 6.13), з урахуванням динаміки за останні 5 років розроблено прогноз розвитку легкових електричних засобів в Україні (рис. 6.14).

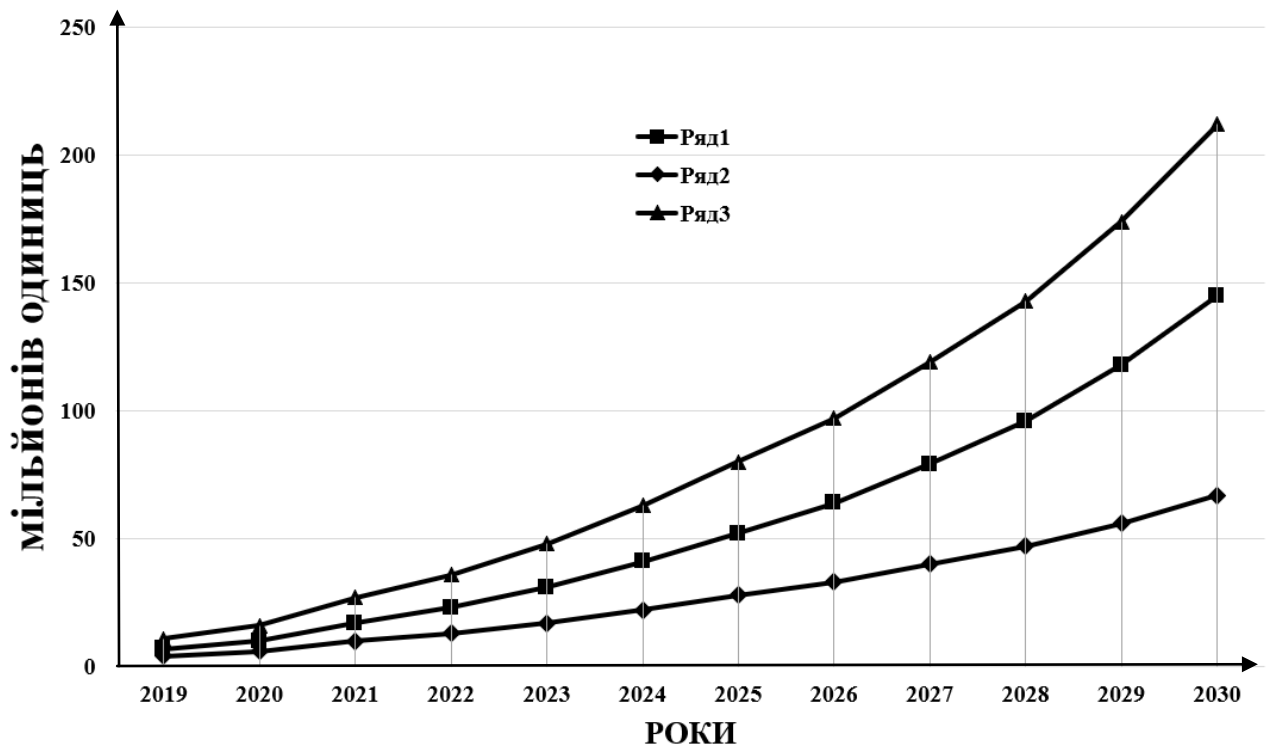


Рис. 6.13. Прогноз розвитку легкових електромобілів в світі з 2019 до 2030 року:

ряд 1 - чисто електричних (EV); ряд 2 - підзаряджуваних гібридів (PHEV); ряд 3 – сумарний показник чисто електричних (EV) та підзаряджуваних гібридів (PHEV).

При розробці даного прогнозу розвитку ринку електромобілів в Україні враховувалась також загальносвітова прогнозована динаміка. Зважаючи на приведені прогнози до 2030 року ринок електромобілів збільшиться до більше 0,5 млн. одиниць, що паралельно з цим вимагатиме розвитку інфраструктури станцій швидкого заряду, розміщених як поруч з дорогами державного значення (міжміських ділянках), так і безпосередньо в містах та на їх околицях.

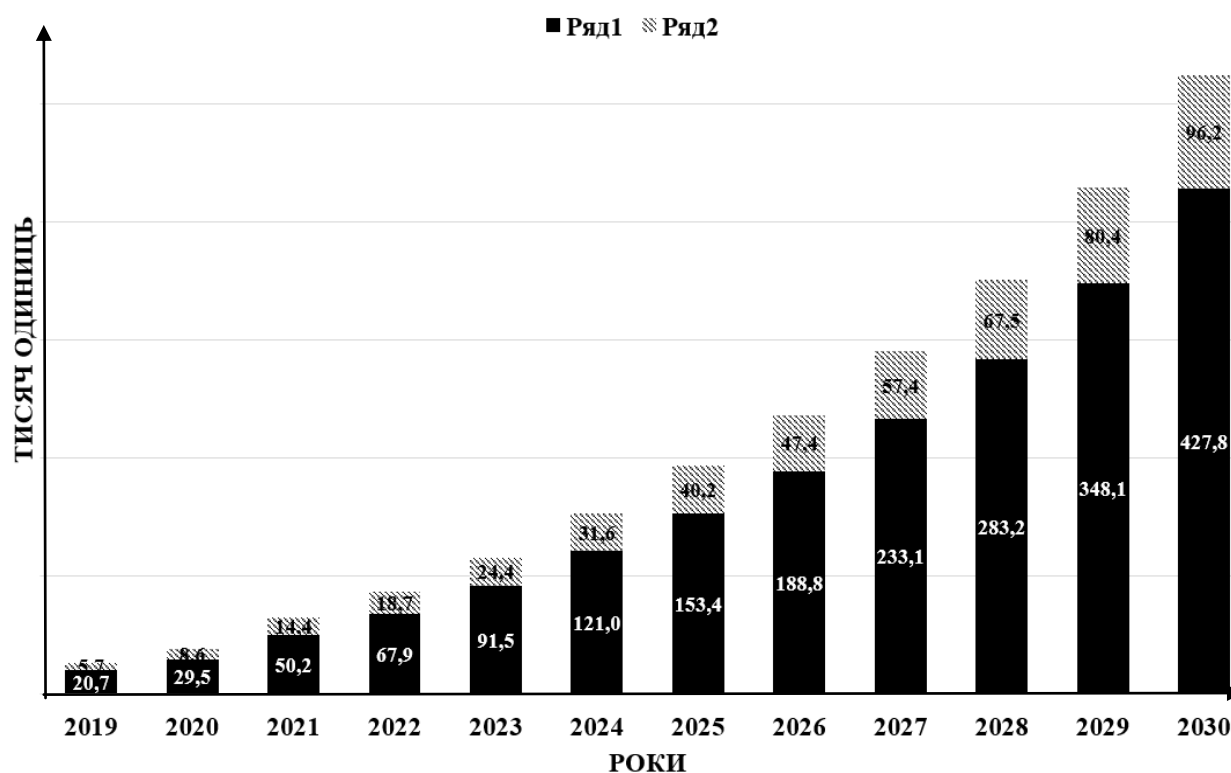


Рис. 6.14. Прогноз розвитку легкових електромобілів в Україні до 2030 року:

ряд 1 - чисто електричних (EV); ряд 2 - підзаряджуваних гібридів (PHEV); ряд 3 – сумарний показник чисто електричних та підзаряджуваних гібридів (EV + PHEV).

Згідно [173] глобальний автомобільний ринок до 2030 року, за прогнозами світових аналітиків, може досягти 125-130 млн. одиниць (на 40-45% більше порівняно з 2015 роком), з яких 75% – це легкові автомобілі та 25% – комерційні.

В багаторічній перспективі до 2050 року прогноз розвитку ринку електромобілів в Україні має логістичний характер і представлений на рис. 6.15.

При прийнятому прирості кількості легкових автомобілів в Україні в 3,6% на рік від загальної кількості, до 2050 року можливо замінити увесь класичний автопарк легкових транспортних засобів в кількості 8 млн. одиниць відповідними електричними або гібридні.

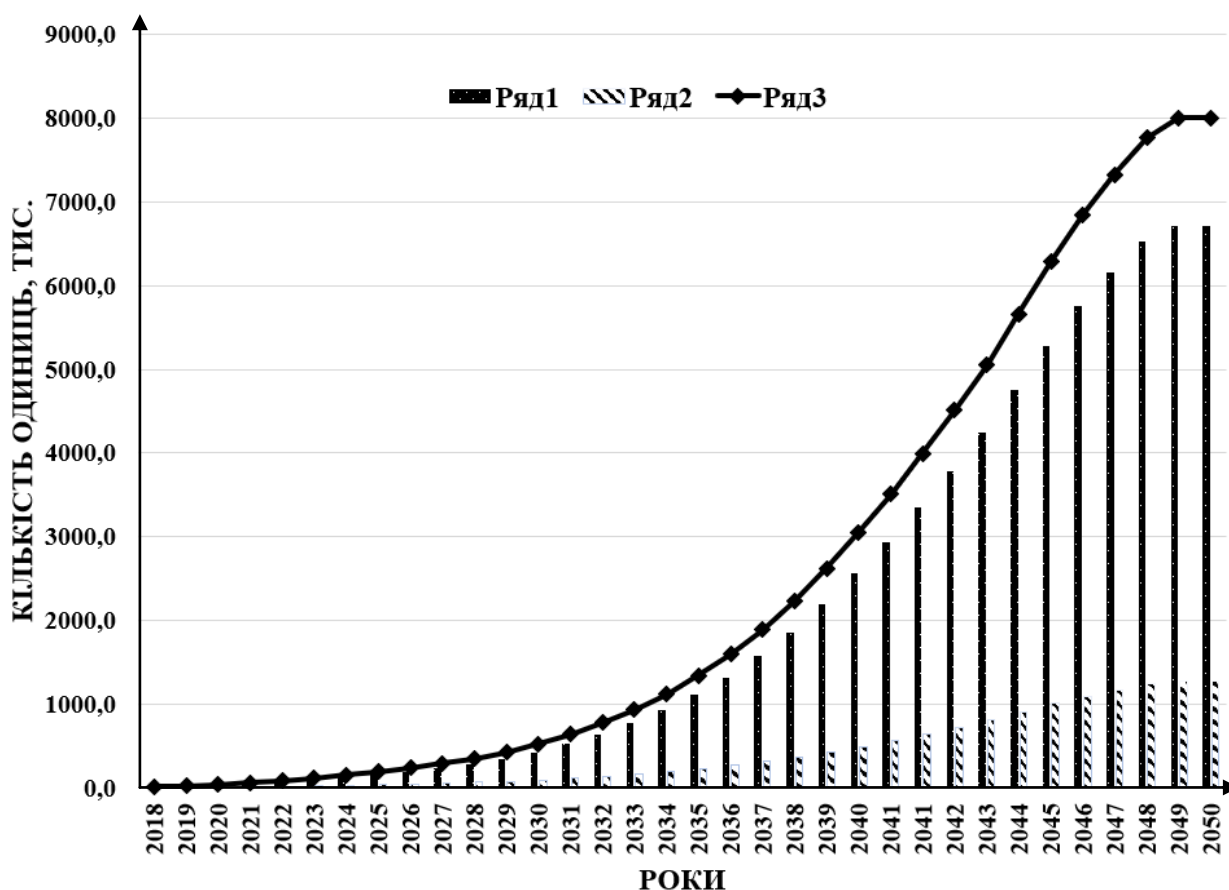


Рис. 6.16. Довгостроковий прогноз розвитку та повного переходу до використання легкових електромобілів до 2050 року: ряд 1 - чисто електричних (EV); ряд 2 - підзаряджуваних гібридів (PHEV); ряд 3 – сумарний показник чисто електричних та підзаряджуваних гібридів (EV + PHEV).

Приведені на рис. 6.15 темпи розвитку електротранспорту вимагатимуть суттєвого збільшення станцій швидкого заряду. При розвитку інфраструктури ЗСЕМ з використанням ВЕУ та ФЕУ як первинних генераторів електроенергії можливо розшири можливості використання енергетичного потенціалу вітру та Сонця на території України.

Прийmemo реалізацію ЗСЕМ з комплексним використанням ВЕУ та ФЕУ як необхідну складову для розвитку інфраструктури електромобілів. В найближчій перспективі, до 2030 року, при збільшенні автопарку ЕМ до 0,5 млн. одиниць потреба в СЗЕМ складе близько 14 тисяч. За умови повного переходу на легкові електромобілі потреба в СЗЕМ становитиме біля 220 тисяч.

Враховуючи постійне зростання вимог до дальності пробігу електромобілів і як наслідок збільшення енергоємності бортової тягової акумуляторної батареї прийmemo для базового розрахунку необхідної кількості електроенергії, ЕМ фірми Tesla Model X з бортовою АБ енергоємністю 100 кВт·год та дальністю пробігу до 500 км. При цьому припускаємо, що транспортний засіб мінімум один раз на тиждень приїжджатиме для заправки з потребою у 80 кВт·год. В такому разі річна потреба в первинній електроенергії до 2030 року складе 3,75 ТВт·год, а до 2050 року – становитиме 57,3 ТВт·год, що можна вважати потенційним показником розширення використання енергетичного потенціалу вітру та Сонця на території України.

6.5. Висновки до розділу

1. Проаналізовано динаміку нарощування встановленої потужності об'єктів відновлюваної енергетики та встановлено, що динаміка використання вітроенергетичного потенціалу України значно поступається освоєнню сонячного енергопотенціалу, що пояснюється більшою інвестиційною привабливістю фотоелектричних станцій через високий «зелений тариф» на продаж електроенергії від них, однак за питомими показниками енергетичний

потенціал вітру більш ніж на порядок перевищує фотоелектричний сонячний потенціал.

2. Проведено попередню вартісну оцінку зарядної станції електромобілів на основі вітроелектричних установок і встановлено, що сумарна вартість системи може становити близько 2,5 млн. грн, або 89,3 тис. дол. США (за курсом початку 2019 року). Термін окупності ЗСЕМ на основі ВЕУ з буферним акумулятором енергії може коливатись від 9-10 років до 19-20 років залежно від вартості електроенергії, яка реалізовуватиметься для заряду електромобілів.

3. Проаналізовано динаміку збільшення кількості електричних транспортних засобів на території України та відмічено, що зростання кількості електромобілів у населення буде майже пропорційно збільшувати обсяги споживання електроенергії власне населенням.

4. Проведено попередню вартісну оцінку зарядної станції електромобілів на основі фотоелектричних установок і встановлено, що сумарна вартість системи може становити близько 5,12 млн грн, або 183 тис. дол. США (за курсом початку 2019 року). Термін окупності ЗСЕМ на основі ВЕУ з буферним акумулятором енергії може коливатись від 20 років до 40 років залежно від вартості електроенергії, яка реалізовуватиметься для заряду електромобілів. За умови реалізації надлишкового виробітку електроенергії за «зеленим тарифом» термін окупності можна зменшити до 7-8,5 років.

5. Запропонований багаторічний прогноз розвитку ринку електромобілів в Україні до 2050 року, який має логістичний характер, згідно з яким можливо замінити увесь класичний автопарк легкових транспортних засобів в кількості 8 млн. одиниць відповідними електричними та гібридними.

6. При прийнятому прогнозі розвитку ринку електромобілів річна потреба в первинній електроенергії складе 57,3 ТВт·год, що слід вважати потенційно можливим показником розширення використання енергії вітру та Сонця на території України без негативного впливу на ОЕС та суттєво покращуючи екологічний стан навколишнього середовища через значне скорочення викидів парникових та інших шкідливих газів.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-прикладна проблема науково-технічного обґрунтування параметрів мереж зарядних станцій з буферними акумуляторами енергії при використанні енергії сонячного випромінювання та вітру для реалізації швидкого зарядження класичних та гібридних електромобілів.

В роботі одержані наступні наукові та практичні результати:

1. Обґрунтовано умови створення мереж зарядних станцій електромобілів з використання вітроелектричних та фотоелектричних установок, що визначаються довжиною пробігу електромобіля, енергозабезпеченістю станції від відновлюваних джерел, нормованим часом зарядження електромобіля, критичними часом очікування на виконання заявки по обслуговуванню та площею під встановлення енергогенеруючого устаткування.

2. Розроблено математичну модель процесу зарядження електрохімічних акумуляторних батарей від вітроелектричних установок, що входять до складу зарядних станцій електромобілів, яка дозволяє враховувати вплив типу електрохімічної системи, власні потреби станції та забезпеченість енергією вітру для визначення енергоємності буферного акумулятора.

3. Розроблено математичну модель процесу зарядження електрохімічних акумуляторних батарей від фотоелектричних установок, що входять до складу зарядних станцій електромобілів, яка дозволяє враховувати вплив типу електрохімічної системи, власні потреби станції та забезпеченість енергією сонячного випромінювання для визначення енергоємності буферного акумулятора.

4. Розроблено математичну модель процесу зарядження електрохімічних акумуляторних батарей від комплексних вітро-сонячних енергоустановок, що входять до складу зарядних станцій електромобілів з урахуванням вагових коефіцієнтів енергозабезпечення споживачів станції. Так, для умов місцевості м. Мелітополь, Запорізької області ефективна робота ЗСЕМ з комплексним

використанням енергії вітру та Сонця по зарядженню протягом року забезпечуватиметься при співвідношенні енергій ВЕУ та ФЕУ як 9:1.

5. Обґрунтовано параметри буферних акумуляторів енергії та енергетичного обладнання та устаткування відновлюваної енергетики в залежності від енергобалансових потреб зарядної станції електромобілів, що вперше дозволило проаналізувати фактори, які впливають на міжзарядний пробіг електромобілів, показують реальну величину даного показника в сторону зменшення, тобто в середньому практичний міжзарядний пробіг може знижуватися на 20-50% в порівнянні з вказаним виробником ЕМ. З цієї причини на сучасному рівні розвитку автономних джерел живлення для зарядження тягових АБ ЕМ середня відстань між станціями «швидкої зарядки» на міжміських трасах не повинна перевищувати 75-80 км практично для всіх електромобілів, що мають серійне виробництво.

6. Вперше запропоновані математичні моделі процесів перетворення енергії на водневих заправних станціях електромобілів на паливних елементах при використанні вітрових, сонячних та комплексних вітро-сонячних електроустановок як первинних генераторів електричної енергії, які дозволяють враховувати фактор використання водню паливними елементами, фактор витікання водню з ємностей при зберіганні та фактор витрати енергії на стиснення водню.

7. Проаналізовано економічні аспекти реалізації систем ЗСЕМ з використанням вітрових, сонячних та комплексних вітро-сонячних енергоустановок та встановлено, що найбільш економічно-доцільними є станції з використанням ВЕУ, що пояснюється найменшим терміном окупності по приведеній вартості від 9-10 до 19-20 років в залежності від тарифу на продаж електроенергії при зарядженні електромобіля.

8. В результаті аналізу динаміки розвитку ринку електромобілів в Україні та запропонованого прогнозу розвитку встановлено, що потреба в їх енергозабезпеченні, яка може забезпечуватись за рахунок енергії вітру та Сонця на території України до 2050 року складе 57,3 ТВт· год.

9. Результати роботи використані в Інституті відновлюваної енергетики НАН України, Інституті електродинаміки НАН України, в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при виконанні НДР: «Комплексні системи енергозабезпечення автономних об'єктів на базі використання енергії вітру та сонячної енергії» (номер державної реєстрації ДР №0117U004325), «Підвищення ефективності системи теплозабезпечення адміністративної будівлі за рахунок використання місцевих відновлюваних джерел енергії» (номер державної реєстрації ДР №0115U002408), «Підвищення ефективності режимів паралельної роботи тягових джерел живлення екомобіля з урахуванням інтенсивності сонячної радіації та параметрів біодизеля» (номер державної реєстрації ДР №0113U001641), «Оптимізація режимів експлуатації гібридного екомобіля на базі фотоелектричних батарей та біодизельного палива» (номер державної реєстрації ДР №0111U002500), а також в приватних підприємствах ТОВ «Атмосфера-Технології природи» та KB Energy.

Отримані результати впроваджено в навчальний процес кафедри Відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при підготовці фахівців за освітньо-професійною та освітньо-науковою програмами «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії» при трирівневій підготовці «бакалавр-магістр-доктор філософії».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Будько В.І. Особливості зарядження акумуляторної батареї електромобілю від стаціонарної вітроелектричної станції / В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2014. – №2. – С.16–19.
2. Будько В.І. Дослідження режимів паралельної роботи тягових джерел живлення екомобілю / В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2014. – №4. – С.31–34.
3. Будько В.І. Автономні енерговузли на основі відновлюваних джерел енергії з різними системами акумуляування енергії / В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2015. – №2. – С.21–25.
4. Будько В.І. Аналіз доцільності впровадження зарядних станцій електромобілів на основі відновлюваних джерел енергії в Україні / В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2016. – №4. – С.32–41.
5. Будько В.І. Аналіз особливостей роботи та специфіки роботи зарядних режимів свинцево-кислотних та нікель-залізних акумуляторних батарей / В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2017. – №1. – С.17–24.
6. Будько В.І. Аналіз особливостей роботи та специфіки роботи зарядних режимів нікель-металогідридних та літєвих акумуляторних батарей / В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2017. – №2. – С.17–25.
7. Будько В.І. Розроблення математичної моделі роботи автономної зарядної станції електромобілів від вітроелектричних установок / В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2017. – №3. – С.6–13.
8. Будько В.І. Застосування теорії черг для описання процесу заряду електромобілів на автономних заправочних станціях на основі відновлюваних джерел енергії / В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2017. – №4. – С.27–32.
9. Будько В.І. Визначення енергоємності акумулятору водню при використанні вітроелектричних установок як первинних генераторів електроенергії в складі автономної заправної станції електромобілів на паливних

елементах / В.І. Бурдько // East European Scientific Journal. – 2019 – №45, part 1. – С.21–27.

10. Бурдько В.І. Комплексне використання ВДЕ в складі зарядних станцій акумуляторних батарей електромобілів / В.І. Бурдько // XV Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Київ, 2014.– С.112–114.

11. Бурдько В.І. Аналіз можливостей використання сонячної енергії як додаткового енергоджерела в НТУУ «КПІ» / В.І. Бурдько // XII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим, 2011.– С.216–217.

12. Бурдько В.І. Пілотний проект сонячної станції в НТУУ «КПІ» для часткового покриття потреби в електричній енергії навчальних корпусів, задіяних в роботі приймальної комісії / В.І. Бурдько // XIII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим, 2012.– С.229–232.

13. Бурдько В.І. Можливості використання відновлюваних джерел енергії на підприємствах агропромислової та харчової галузей України / В.І. Бурдько, Р.А. Климюк // Відновлювана енергетика. – 2013. – №4. – С.26–30.

14. Мхитарян Н.М. Комплексное использование энергии возобновляемых источников / Н.М. Мхитарян, С.А. Кудря, Л.В. Яценко, Л.Я. Шинкаренко, М.Д. Ткаленко, В.И. Бурдько // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – №17. – С.14–22.

15. Бурдько В.І. Концепція зарядження акумуляторної батареї електромобіля від фотоелектричної станції / В.І. Бурдько, С.О. Кудря, В.Б. Павлов // Відновлювана енергетика. – 2014. – №1. – С.14–21.

16. Головка В.М. Вплив параметрів системи орієнтації ротора з використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі" на статичні характеристики вітроустановки / В.М. Головка, В.П. Коханевич, М.О. Шихайлов, В.І. Бурдько // Відновлювана енергетика. – 2016. – №1. – С.45–54.

17. Будько В.И. Современное состояние и развитие возобновляемой энергетики / В.И. Будько, С.А. Кудря, А.В. Пепелов, // Альтернативная энергетика и экология. – 2017. – №4-6. – С.130–141.

18. Павлов В.Б. Зарядження електромобілів від відновлюваних джерел / В.Б. Павлов, В.І. Будько // Технічна електродинаміка. – 2017. – №6. – С.32–35.

19. Будько В.І. Економічні аспекти реалізації автономних зарядних станцій електромобілів на основі фотоелектричних батарей / В.І. Будько, С. В. Войтко, О. О.Трофименко // Відновлювана енергетика. – 2018. – №1. – С.19–25.

20. Будько В.І. Економічні аспекти реалізації автономних зарядних станцій електромобілів на основі вітроелектричних установок / В.І. Будько, С.О. Кудря, С.В. Войтко, О.О.Трофименко // Відновлювана енергетика. – 2019. – №1. – С.45–50.

21. Павлов В.Б. Особливості роботи автономних зарядних станцій електромобілів з використанням вітроелектричних установок та буферних акумуляторів енергії / В.Б. Павлов, С.О. Кудря, В.І. Будько, В.М. Кириленко, В.Ю. Іванчук // Технічна електродинаміка. – 2019. – №4. – С. 70-76.

22. Ткаленко Д.А. Зависимость перенапряжения катодного выделения водорода на металлах от их свободной поверхности энергии и ψ -фактора / Д.А. Ткаленко, С.А.Кудря, М.Д. Ткаленко, Ю.П. Вишневская, В.И. Будько // Відновлювана енергетика. – 2012. – №4. – С.28–31.

23. Ткаленко Д.А. О коррозионной устойчивости электродов электрохимических преобразователей энергии с расплавленными электролитами / Д.А. Ткаленко, С.А.Кудря, М.Д. Ткаленко, Ю.П. Вишневская, В.И. Будько // Відновлювана енергетика. – 2012. – №1. – С.5–10.

24. Ткаленко Д.А. Моделирование кислородного электрода высокотемпературных электрохимических генераторов энергии / Д.А. Ткаленко, С.А.Кудря, М.Д. Ткаленко, Ю.П. Вишневская, В.И. Будько // Відновлювана енергетика. – 2012. – №2. – С.5–10.

25. Ткаленко Д.А. Транспортные стадии и топология токообразующих процессов в высокотемпературных топливных элементах / Д.А. Ткаленко,

С.А.Кудря, М.Д. Ткаленко, Ю.П. Вишневская, В.И. Будько // Відновлювана енергетика. – 2012. – №3. – С.17–20.

26. Патент на корисну модель №129991 Україна, МПК F03D9/00 H02j7/00. Пристрій для зарядження акумуляторних батарей / В.Б. Павлов, В.М. Головка, В.П. Коханевич, М.О. Шихайлов, В.Є. Павленко, В.І. Будько.; заявник та правовласник Інститут відновлюваної енергетики НАН України, – №u201804673 ; заявл. 27.04.18 ; опубл. 26.11.18 ; Бюл. №22.

27. Sydorenko K. Flying of the UAV by the solar energy / K. Sydorenko, V. Budko // 2-nd International Conference "Methods and Systems of Navigation and Motion Control", 09.10.2012., p.159-160.

28. Будько В.І. Методи заряду електромобілів від відновлюваних джерел енергії / В.І. Будько, В.Б. Павлов // Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана та воднева енергетика - 2018», – 2018 р.– Київ, – С. 54 – 59.

29. Кудря С.О. Проблеми створення вітроводневих систем / С.О. Кудря, Л.В. Яценко, Л.Я. Шинкаренко, В.І. Будько // XIV Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим, 2013.– С.133–135.

30. Кудря С.О. Використання вітрової та сонячної енергії для опріснення / С.О. Кудря, М.А. Ткаленко, Л.В. Яценко, Л.Я. Шинкаренко, В.І. Будько // XVII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Київ, 2016.– С.229–231.

31. Остапчук О.В. Перспективи використання джерел розподіленої генерації в енергосистемі України / О.В. Остапчук, В.І. Будько // Міжнародна науково-практична конференція “Енергозбереження та енергоефективність - 2018”, Дніпро, 2018р. – С.36–38.

32. Electricity access database - International Energy Agency. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iea.org/energyaccess/database/>

33. Робота ОЕС. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua.energy/diyalnist/dyspetcherska-informatsiya/roбота-oes-ukrayiny-zatyzhden/>

34. ДСТУ 3466-96 Якість електричної енергії. Терміни та визначення. Київ, 1998. 22 с.
35. Тарифи на електроенергію для домогосподарств України [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.nerc.gov.ua/data/filearch/catalog1/Prezentatsia_optymizatsia_taryfiv_na_electro.pdf
36. Закон України «Про електроенергетику»: редакція від 01.01.2019. / Верховної Ради України [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua>
37. Денисенко Г.И. Возобновляемые источники энергии / Г.И. Денисенко – Киев: КПИ, 1983. – 220 с.
38. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : Підручник / С.О. Кудря. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.
39. Резцов В.Ф., Суржик Т.В. Синергетичний метод аналізу причин виникнення автоколивальних режимів у процесах перетворення енергії відновлюваних джерел / В.Ф. Резцов, Т.В. Суржик // Відновлювана енергетика. – 2017. – №1. – С.14–17.
40. Лежнюк П.Д., Бартецький А.А., Бартецька І.А. Оптимізація роботи фотоелектричних станцій для забезпечення балансової стійкості енергосистеми // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки. – Том 29, №5, частина 2. – 2018. – С. 114–118.
41. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В., Котилко І. В., Прокопенко І. О. Оцінювання якості електропостачання в локальних електричних системах з різнотипними відновлюваними джерелами енергії // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Серія «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – №195. – 2018. – С. 23–25.
42. Каплун В.В. Структурно-параметричний синтез комбінованих систем електроживлення: монографія / В.В.Каплун – К.: КНУТД, 2017. – 187с.

43. Каплун В.В. Удосконалення перетворювального агрегату комбінованої системи електроживлення з поновлюваними джерелами енергії / Каплун В.В., Шавьолкін О.О. // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2016. - №22(98). – С.165-169. <http://etks.opu.ua/core/getfile.php?id=1810>

44. Новський В.О., Павлов В.Б. Попов В.А., Палачов С.О. Застосування зарядних станцій електромобілів в міських електричних мережах / В.О. Новський, В.Б. Павлов, В.А. Попов, С.О. Палачов // Технічна електродинаміка. - 2018. - № 6. - С.77-80. <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.077>

45. Васько П.Ф., Ибрагимова М.Р., Пазыч С.Т. Гидроаккумулирующие электростанции на морской воде - технологическая основа крупномасштабного использования ветровой и солнечной энергии в электроэнергетической системе Крыма / П.Ф. Васько, М.Р. Ибрагимова, С.Т. Пазыч // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – №15. – С.38–49.

46. Науково-технічні засади підвищення енергоефективності фотоелектричних джерел електропостачання : автореф. дис... д-ра техн. наук / Е. А. Бекіров; НАН України. Ін-т відновлюв. енергетики. - К., 2008. - 32 с. - укр.

47. Невичерпна енергія : підруч. для студ. спец. «Нетрадиційні джерела енергії» вищ. навч. закл. Кн. 1. Вітроелектрогенератори / В. С. Кривцов, О. М. Олейников, О. І. Яковлев. – Х. : ХАІ, 2004. – 396 с.

48. Неисчерпаемая энергия : учеб. для студентов специальности «Нетрадиционные источники энергии» высш. учеб. заведений. Кн. 2. Ветроэнергетика / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Х. : ХАИ, 2004. – 519 с.

49. Шидловський А.К., Жарків А.Ф., Павлов В.Б., Новський В.О. Вплив розвитку зарядної інфраструктури електромобільного і гібридного транспорту на режими електричних мереж / А.К. Шидловський, А.Ф. Жарків, В.Б. Павлов, В.О. Новський // Технічна електродинаміка. - 2018. - № 3. - С.74-81. <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.074>

50. Неисчерпаемая энергия : учеб. для студентов специальности «Нетрадиционные источники энергии» высш. учеб. заведений. Кн. 4. Ветроводородная энергетика / В. И. Кривцова, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Х. : ХАИ, 2007. – 606 с.

51. Кузнецов М. П., Ужейко С. О. Імовірнісні аспекти використання відновлюваних джерел енергії в зоні відчуження Чорнобильської АЕС / М. П. Кузнецов, С. О. Ужейко // Відновлювана енергетика. - 2016. - № 3. - С. 6-12.

52. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020: редакція від 01.10.2014. / Кабінету Міністрів України [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80>

53. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Трач І.В. Проблеми інтеграції відновлюваних джерел електроенергії в слабкі електричні мережі. / О.В. Кириленко, В.В. Павловський, Л.М. Лук'яненко, І.В. Трач // Технічна електродинаміка. 2012, - №3, с. 25-26.

54. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України / Інститут відновлюваної енергетики НАН України. – К. : ВІОЛ-Принт, 2012. – 55 с.

55. Global EV Outlook 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iea.org/gevo2019/>

56. Full-Service Fulfillment House. [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.ctcf-inc.com

57. Statistics Time Series. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>

58. Ринок електромобілів зростає. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://news.finance.ua/ua/news/-/384511/rynok-elektromobiliv-zrostaye>

59. Химические источники тока: Справочник / Под редакцией Н.В. Коровина и А.М. Скудина. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 740с.

60. Нефедов В.Г., Поліщук Ю.В. Електрохімічна енергетика. Свинцеві акумулятори: улаштування, виробництво, розрахунки: навчальний посібник. / В.Г. Нефедов, Ю.В. Поліщук – Дніпропетровськ.: ДВНЗ УДХТУ, 2013. – 298 с.

61. Будько В. І. Кочков І. С., Кочков О. І. Зарядно-тренувальний пристрій для свинцево-кислотних акумуляторів / В. І. Будько, І. С. Кочков, О. І. Кочков // Відновлювана енергетика. – 2008. – № 2. – С. 9 – 14.

62. BU-1002: Electric Powertrain, then and now. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://batteryuniversity.com/learn/article/batteries_for_transportation_aerospace

63. Справочник химика. Химическое равновесие и кинетика, свойства растворов, электродные процессы / ред. Б.П. Никольский. М.-Л.: Химия, 1965. Том 3. 1005 с.

64. ГОСТ 26500-85. Аккумуляторы щелочные никель-железные тяговые общие технические условия. Москва 1985, 28 с.

65. Каусс Я. Я. Выбор режимов заряда щелочных никель-железных тепловозных батарей: дис. ... канд. техн. наук : 05.05.01– Ленинград, 1984. – 138 с.

66. IEC 61436:1998 Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Sealed nickel-metal hydride rechargeable single cells. 1998, 25с.

67. Методы заряда NiMH аккумуляторов и принципы работы «умных» зарядных устройств. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://2a3a.ru/charge_nimh/

68. International Standards and Testing Applicable to Batteries. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.mpoweruk.com/standards.htm#lithium>

69. Chao-Yang Wang and other. A Fast Rechargeable Lithium-Ion Battery at Subfreezing Temperatures / Journal of The Electrochemical Society. 2016, №163 (9). Режим доступу: <http://jes.ecsdl.org/content/163/9/A1944.full.pdf+html>

70. Types of Lithium-ion. [Електронний ресурс] – Режим доступу http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion

71. Elena M. Krieger, John Cannarella, Craig B. Arnold. A comparison of lead-acid and lithium-based battery behavior and capacity fade in off-grid renewable charging applications / *Energy* / 2013, №60. P. 492 –500.

72. Будько В. І. Кудря С. О., Головка В. М., Павлов В. Б. Моделювання паралельної роботи сеперконденсаторів та електрохімічних акумуляторних батарей на зовнішнє навантаження / В. І. Будько, С. О. Кудря, В. М. Головка, В. Б. Павлов // *Відновлювана енергетика*. 2010, № 3. С. 12 – 18.

73. Кузнецов В., Панькина О., Мачковская Н., Шувалов Е., Востриков И. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы) / В. Кузнецов, О. Панькина, Н. Мачковская, Е. Шувалов, И. Востриков // *Компоненты и технологии*. 2005, № 6. С. 12 – 16.

74. Смирнов О. П., Панікарський О. С., Боженів В. С., Смирнова А. О. Використання конденсаторів великої ємності для забезпечення оптимальних параметрів роботи акумуляторних батарей гібридних автомобілів / О. П. Смирнов, О. С. Панікарський, В. С. Боженів, А. О. Смирнова // *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. 2009, № 3. С. 50 – 55.

75. Слипченко Н. И., Письменецкий В. А., Гуртовой М. Ю. Исследование режимов работы АКБ и суперконденсатора в системе энергообеспечения электромобиля / *Энергосберегающие технологии и оборудование / Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012, №58. С. 31 – 35.

76. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте / [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ied.org.ua/anted/anr408.s7.html>

77. IEC 62196-1. Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements. 2014. 176p. Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/publication/6582>

78. What to Expect in New Connectors. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.fveaa.org/fb/Level3Charging_279.pdf

79. Solar parking lot with electric car charging stations opens in Tennessee. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.autoblog.com/2010/08/23/solar-parking-lot-with-electric-car-charging-stations-opens-in-t/>

80. Solar electric vehicle charging station. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.facilities.uiowa.edu/uem/renewable-energy/solar-energy.html>

81. Solar tree. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://envisionsolar.com/products/solar-tree/>

82. Giraffe 2.0 is a Hybrid Wind-Solar Power Station & Carport. 40. Solar tree. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.innoventum.se/giraffe-2-0/>

83. <http://xsunx.com/systems-we-offer/solar-canopies>. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://xsunx.com/systems-we-offer/solar-canopies/>

84. Tesla solar charger: How much does it cost to charge a Tesla using solar energy? [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://news.energysage.com/what-does-it-cost-to-charge-a-tesla-with-solar-energy/>

85. Chargers. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.chademo.com/>

86. Renewable Hydrogen Roadmap. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://static1.squarespace.com/static/58e8f58d20099ea6eb9ab918/t/5afd25a9f950b7543abe21ba/1526539702668/EIN_RH2_Paper_Lowres.pdf

87. The global electric-vehicle market is amped up and on the rise. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-global-electric-vehicle-market-is-amped-up-and-on-the-rise>

88. Україна. Атлас автомобільних шляхів, 40 планів міст, нові назви населених пунктів. Київ, 2016. 176 с.

89. За 2018 год в Украине куплено больше электромобилей, чем за все предыдущие годы. Интернет ресурс. Режим доступу: <https://ecotechnica.com.ua/transport/3828-za-2018-god-v-ukraine-kupleno-bolshe-elektromobilej-chem-za-vse-predydushchie-gody.html>

90. Кудря С.О., Будько В.І. «Вступ до спеціальності. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії»: електронний курс лекцій / С.О. Кудря, В.І. Будько // – Київ: Національний технічний університет України («КПІ»), 2013. – 360 с.

91. Портал відкритих даних. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://data.gov.ua>

92. Diaf S., Belhamel M., Haddadi M., Louche A., "A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system", / S. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, A. Louche // Energy Policy, Volume 35, Issue 11, pp. 5708-5718, 2007.

93. Методи прогнозування вітрового енергетичного потенціалу регіону : автореф. дис... канд. техн. наук / З. У. Рамазанова; НАН України. Ін-т відновлюв. енергетики. - К., 2007. - 19 с.

94. Матаналіз. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://sites.znu.edu.ua/bank/public_files/2009/10/matanaliz/7.pdf

95. Olsson M., Perninge M., Suder L. Modeling real-time balancing power demands in wind power systems using stochastic differential equations / Olsson M., Perninge M., Suder L. // Electric Power Systems Research 80 (2010) 966–974.

96. Головка В.М., Душина Г.П. Визначення енергетичних характеристик режиму вітру для автономних систем / В.М. Головка, Г.П. Душина // Відновлювана енергетика. – 2005. – №2. – С.45–47.

97. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://nissan-elektro.com.ua/>

98. Carta J.A., Ramírez P. Use of finite mixture distribution models in the analysis of wind energy in the Canarian Archipelago / J.A. Carta, P. Ramírez // Energy Conversion and Management V.48, Is.1, 2007, P.281-291.

99. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.smart.com/en/en/index/smart-eq-fortwo-453/technical-data.html>

100. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.vw.com/>

101. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://hev cars.com.ua/toyota/rav4-ev/>

102. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.tesla.com/models>

103. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.peugeot.co.uk/>
104. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://int-media.opel.com/>
105. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www-europe.nissan-cdn.net/>
106. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.kia.com/>
107. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.jaguar.com>
108. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://electricrevs.com/2018/04/21/audi-e-tron-vs-jaguar-i-pace-battery-pack-comparison/>
109. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.hyundaiusa.com/>
110. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://automobiles.honda.com/clarity-electric#how-long>
111. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ford.com/>
112. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.fiatusa.com/500e.html>
113. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://info.citroen.co.uk>
114. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://hevcars.com.ua/>
115. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://byd.iproaction.com/ua/vehicle/e6.htm>
116. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.bmw.ua/uk/all-models/bmw-i/i3/2017/at-a-glance.html?bmw=sea:UA--BMW-i3-Brand-Product:I01>
117. Пятилетка: какие электромобили мы ждем к 2024 году [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://www.autocentre.ua/ua/news/novinka/pyatiletka-kakie-elektromobili-my-zhdem-k-2024-godu-768315.html>
118. John Sun «Car Battery Efficiencies» [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/sun1/>
119. 5KW Wind Turbine. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.windgenerator.cn/eproducts/61.html>
120. Справочник по климату СССР. Украинская ССР : вып. 10. – Л. : Гидрометеорологическое издание, 1967. – (Ветер). – Ч. 3. – 696 с.

121. Вентцель Е.С. Теория вероятности: Учеб. для вузов. – 7-е изд. стер. / Е.С. Вентцель // М.: Высшая школа. 2001, 575с.

122. Сабірзянов Т.Г., Кубкін М.В., Солдатенко В.П., Козловський О.А. Математична модель фотобатареї як джерела електричної енергії / Т.Г. Сабірзянов, М.В. Кубкін, В.П. Солдатенко, О.А. Козловський // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, 2012, вип. 25, ч.1. С. 331-335.

123. Wasynczuk O., Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems / O. Wasynczuk // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 102 (1983) 3031-3037.

124. Phang J.C.H., Chan D.S.H., Philips J.R. Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters / J.C.H. Phang, D.S.H. Chan, J.R. Philips // Electronics Letters 20 (1984) 406-408.

125. Solar Panel LG365Q1C-A5. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://www.lg.com/us/business/solar-panels/lg-LG365Q1C-A5>

126. Мхитарян Н.М., Кудря С.А., Головкин В.М., Павлов В.Б., Мостовьяк И.В. Определение величины межзарядного пробега гибридных электромобилей с солнечной батареей / Н.М. Мхитарян, С.А. Кудря, В.М. Головкин, В.Б. Павлов, И.В. Мостовьяк // Відновлювана енергетика. – 2007. – №2. – С. 27–30.

127. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Юрченко О.Н. «Гибридный электромобиль» / А.К. Шидловский, В.Б. Павлов, О.Н. Юрченко // Технічні термодинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність» - Київ, 2002. – №2. – С. 21–28.

128. Справочник по климату СССР, выпуск 10, Украинская ССР, часть 1, «Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние», - Ленинград, Гидрометеорологическое издательство, 1966, 124 с.

129. ГОСТ 28133-89 Батареи аккумуляторные свинцовые тяговые. Технические требования и методы испытаний, М.: Стандартинформ, 2007. 7с.

130. Photovoltaic Modules [Електронний ресурс] – Режим доступу : https://www.mitsubishielectricsolar.com/images/uploads/documents/specs/MLU_spec_sheet_250W_255W.pdf

131. Кудря С.О., Головка В.М., Павлов В.Б. Будько В.І., Підвищення ефективності акумулювання енергії вітру в автономних системах / С.О. Кудря, В.М. Головка, В.Б. Павлов, В.І. Будько // Відновлювана енергетика. – 2009. – №2. – С. 25–31.

132. Шидловський А.К., Павлов В.Б., Попов А.В., Кудря С.О., Головка В.М., Яндутьський О.С., Будько В.І. "Електромобіль з комбінованою енергоустановкою" – Матеріали ІХ міжнародної конференції "Відновлювана енергетика ХХІ століття", – АР Крим, 2008. – С. 30.

133. Bolger John G. The significance of inductive roadway power systems to dual mode transit. – Hybrid Dual Mode and Track Syst. Elec. Veh. Dev. Group // 4-th Int.Conf., London, Sept. 1981. – P. 167–171.

134. INTERNATIONAL STANDARD “IEC 62196-1” Plugs, socket-outlets, vehicle couplers and vehicle inlets – Conductive charging of electric vehicles / Typeset and printed by the IEC Central Office GENEVA, SWITZERLAND. - ICS 29.120.30; 43.120

135. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <http://news.energysage.com/>

136. Мхитарян Н.М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. / Н.М. Мхитарян // К., Наукова думка, 1999. – 314 с.

137. Кудря С.О. Системи акумулювання і перетворення енергії відновлюваних джерел: дис. ... докт. техн. наук : 05.14.08– Київ, 1996. – 548 с.

138. Энергоефективність та відновлювані джерела енергії. Під заг. ред. Шидловського А.К. – Київ: Українські енциклопедичні знання, 2007. – 559 с.

139. IEC 62196-1:2014. Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://webstore.iec.ch/publication/6582>

140. Силы сопротивления движению и мощности, затрачиваемые на их преодоление. [Электронный ресурс] – Режим доступа : lib.kstu.kz:8300/tb/books/Bazov@ie_shassi.../lekz3-3.htm

141. Keller A. scot, Whitehead Gerald. Termal characteristics of electric vehicle batteries / Keller A. scot, Whitehead Gerald // SAE Techn. Pap. Ser.. – 1991.- № 911916.- С.- 37-47.

142. DeLuca W.H., Gillie K.R., Kulaga J.E., Smaga J.A., Tummillo A.F., Webster C.E. Performance and life ealuation of advanced battery technologies for electric vehicle appalications / DeLuca W.H., Gillie K.R., Kulaga J.E., Smaga J.A., Tummillo A.F., Webster C.E.// SAE Techn. Pap. Ser.. – 1991.- № 911634.- P. 25-34.

143. Bolger John G. The significance of inductive roadway power systems to dual mode transit. “Hybrid Dual Mode and Track. Syst. Elec. Veh. Dev. Group 4 th Ivt. Conf., London. Sept., 1981”. Stevenage, 1981, ISBN 0 906 048656, 167 – 171.

144. Stavarache P., Mincinopschi G. Experimenari privind intro decerea electronicii in actionarea vehiculelor electrice de transport uzinal / P. Stavarache, G. Mincinopschi // “Electrotehn., electron. Si autom. electro tehn.”, 1986, 34, № 8, P. 317 – 320.

145. Solonin Yu.M., Dan’ko D.B., Galiy O.Z., Kossko I.A., Kolbasov G.Ya., Rusetskii I.A. Hydrogen storage in metal hydride under action of sunlight / Yu.M. Solonin, D.B. Dan’ko, O.Z. Galiy, I.A. Kossko, G.Ya. Kolbasov, I.A. Rusetskii // NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, 2005, #202, P.193-198.

146. Maxwell A. Moore. Feasibility Study of a Solar Photovoltaic to Hydrogen Electrolyzer System at the Richmond Field Station / Study of a PV to Hydrogen System at the RFS [Электронный ресурс] – Режим доступа : https://nature.berkeley.edu/classes/es196/projects/2015final/MooreM_2015.pdf

147. Manuel Götz, Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review / M. Götz, J. Lefebvre, F. Mörs, A. McDaniel Koch, F. Graf, S. Bajohr, R. Reimert, T. Kolb // Renewable Energy. Volume 85, January 2016, Pages 1371-1390.

148. Aouali F. Modelling and experimental analysis of a PEM electrolyser powered by a solar photovoltaic panel / F. Aouali, M.Becherifb, A.Tabanjatb, M.Emzianec, K.Mohammedia , S.Krehid, A.Khellafe // The International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-14, Energy Procedia 62 (2014) P. 714 – 722.

149. F.J. Pino Lucena, Felipe Rosa, A. Iranzo Paricio, Luis Valverde-Isorna,, Eduardo López, P. Bermejo Morillo HYDROGEN AS ENERGY STORAGE FOR WIND ENERGY // Conference Paper (PDF Available) · July 2008 with 26 Reads Conference: I Simposium Ibérico de Hidrógeno, Pilas de Combustible y Baterías Avanzadas (HYCELTEC 2008), At Bilbao.

150. Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В. Водород в энергетике : учеб. пособие / Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. — 229 с.

151. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition 2018, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://www.irena.org/publications/2018/Sep/Hydrogen-from-renewable-power>

152. Field K. Clean Technica: Hydrogen Fuel Cell & Battery Electric Vehicles — Technology Rundown August 2018 [Electronic resource] / Kyle Field // [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://www.cleantechnica.com/2018/08/11/hydrogen-fuel-cell-battery-electric-vehicles-technology-rundown/>

153. Мхітарян Н.М. Проблеми створення вітроводневих систем / Н.М. Мхітарян, С.О.Кудря, Л.В.Яценко, Л.Я.Шинкаренко В.І. Будько // IX Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим, 2008.– С.24–29.

154. ULLEBERG Ø. Stand-alone power systems for the future: optimal design, operation & control of solar-hydrogen energy systems / Ph. D. dissertation, Department of Thermal Energy and Hydropower, Norwegian University of Science and Technology Trondheim, December 1998. 210 p.

155. Griesshaber W., Sick F, Simulation of hydrogen-oxygen systems with PV for the self-sufficient solar house. FhG-ISE, Freiburg in Breisgau, Germany. 1991. P. 193-200.

156. Zhang H. Efficiency Calculation and Configuration Design of a PEM Electrolyzer System for Hydrogen Production / H. Zhang, S. Su, G. Lin, J. Chen. // Int. J. Electrochem. Sci., 7 (2012) 4143 – 4157, <http://www.electrochemsci.org/papers/vol7/7054143.pdf>

157. Hydrogen for transport and the B&E report. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://planetforlife.com/h2/h2swiss.html>

158. Clarity Full Cell. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://automobiles.honda.com/clarity-fuel-cell#>

159. Toyota Mirai. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://pressroom.toyota.com/vehicle/2019-mirai/>

160. Tucson Fuel Cell [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://www.hyundainews.com/models/>

161. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://www.nasa.gov/>

162. Результати роботи ринку електроенергії в 2018 році. [Електронний ресурс] – Режим доступу : https://biz.censor.net.ua/resonance/3106395/rezultati_roboti_rinku_elektroenerg_v_2018_rots

163. У 2018 р. введено майже у 3 рази більше нових потужностей відновлюваної електроенергетики, ніж у 2017 році. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <http://saee.gov.ua/uk/news/2731>

164. Аналіз ринку електромобілів. . [Електронний ресурс] – Режим доступу : <http://irsgroup.com.ua/ecars>

165. Wind Turbine Price Index. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://about.bnef.com/blog/2h-2017-wind-turbine-price-index/>

166. Rogozhin, Alex & Gallaher, Michael & Helfand, Gloria & McManus, Walter, 2010. "Using indirect cost multipliers to estimate the total cost of adding new

technology in the automobile industry," International Journal of Production Economics, Elsevier, vol. 124(2), pages 360-368, April.

167. Lithium-ion battery pack costs worldwide between 2010 and 2018 (in U.S. dollars per kilowatt hour). [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://www.statista.com/statistics/883118/global-lithium-ion-battery-pack-costs/>

168. Електрика для електромобілів в Україні стає платною. [Електронний ресурс] – Режим доступу : https://auto.24tv.ua/elektryka_dlia_elektromobiliv_v_ukraini_staie_platnoiu_n3167

169. Module Price Index. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://www.pv-magazine.com/features/investors/module-price-index/>

170. Photovoltaic geographical information system. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <http://re.jrc.ec.europa.eu>

171. Кудря С.О. Стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 7 жовтня 2015 р.) / С. О. Кудря // Вісник Національної академії наук України. - 2015. - № 12. - С. 19-26. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2015_12_6

172. Статистичні дані по галузі автомобільного транспорту. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-po-galuzi-avtomobilnogo-transportu.html?PrintVersion>

173. Ковалевський Л.Г., Коровайченко Н.Ю. Світовий автомобільний ринок: сучасний стан, особливості та перспективи розвитку. Науковий журнал. Зовнішня торгівля: економіка, фінанси, право. Серія: Економічні науки. ISSN 1028-7507 №5-6 (82-83) 2015. С. 60-67. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <file:///C:/Users/VDE/Desktop/ринок%20автотранспорту.pdf>

ДОДАТКИ
ДОДАТОК А

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Ткаленко Д.А. О коррозионной устойчивости электродов электрохимических преобразователей энергии с расплавленными электролитами / Д.А. Ткаленко, С.А.Кудря, М.Д. Ткаленко, Ю.П. Вишневская, В.И. Будько // Відновлювана енергетика. – 2012. – №1. – С.5–10.

2. Ткаленко Д.А. Моделирование кислородного электрода высокотемпературных электрохимических генераторов энергии / Д.А. Ткаленко, С.А.Кудря, М.Д. Ткаленко, Ю.П. Вишневская, В.И. Будько // Відновлювана енергетика. – 2012. – №2. – С.5–10.

3. Ткаленко Д.А. Транспортные стадии и топология токообразующих процессов в высокотемпературных топливных элементах / Д.А. Ткаленко, С.А.Кудря, М.Д. Ткаленко, Ю.П. Вишневская, В.И. Будько // Відновлювана енергетика. – 2012. – №3. – С.17–20.

Наукові праці які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

4. Будько В.І. Аналіз можливостей використання сонячної енергії як додаткового енергоджерела в НТУУ «КПІ» / В.І. Будько // XII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика ХХІ століття». – Крим, 2011.– С.216–217.

5. Будько В.І. Пілотний проект сонячної станції в НТУУ «КПІ» для часткового покриття потреби в електричній енергії навчальних корпусів, задіяних в роботі приймальної комісії / В.І. Будько // XIII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика ХХІ століття». – Крим, 2012.– С.229–232.

6. Кудря С.О. Проблеми створення вітроводневих систем / С.О. Кудря, Л.В. Яценко, Л.Я. Шинкаренко, В.І. Будько // XIV Міжнародна науково-

практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим, 2013.– С.133–135.

7. Кудря С.О. Використання вітрової та сонячної енергії для опріснення / С.О. Кудря, М.А. Ткаленко, Л.В. Яценко, Л.Я. Шинкаренко, В.І. Будько // XVII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». – Київ, 2016.– С.229–231.

8. Остапчук О.В. Перспективи використання джерел розподіленої генерації в енергосистемі України / О.В. Остапчук, В.І. Будько // Міжнародна науково-практична конференція “Енергозбереження та енергоефективність - 2018”, Дніпро, 2018р. .– С.36–38.

ДОДАТОК Б

Технічні характеристики комерційних електромобілів [99-116]

| Марка електромобіля | Тип електродвигуна | Потужність ел.-двигуна | | Тип бортової АБ | Напруга АБ, В | Енергія бортової АБ, кВт·год | Дальність пробігу | | Максимальна швидкість, км/год | Звичайний заряд від АС мережі 220В, год | Звичайний заряд від АС мережі 380В, год | Прискорений заряд від мережі DC до 0,8Сн, год | Питома витрата енергії, кВт·год/км |
|-----------------------|---|------------------------|-----|-----------------|---------------|------------------------------|-------------------|------|-------------------------------|---|---|---|------------------------------------|
| | | к.с. | кВт | | | | ЕРА | NEDC | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| SMART ForTwo | Трифазний синхронний двигун змінного струму | 77 | 54 | Літій-іон | 93 | 17,6 | 110 | 154 | 130 | 6 | 3,5 | 0,75 | 0,16 |
| Volkswagen e-Golf 201 | Синхронний електродвигун змінного струму | 136 | 100 | Літій-іон | | 35,8 | 200 | - | 150 | 7-10 | 4-5 | 1 | 0,179 |
| Tesla Model S 75D | Асинхронний електродвигун змінного струму з рідким охолодженням із змінним частотним приводом | 315 | 235 | Літій-іон | 300 | 75 | 400 | 480 | 225 | 25 – 35 | 5 – 7 | 0,5 | 0,187 |
| Tesla Model S 75D | Асинхронний електродвигун змінного струму з рідким охолодженням із змінним частотним приводом | 330 | 245 | Літій-іон | 300 | 75 | 420 | 490 | 225 | 25 – 35 | 5 – 7 | 0,5 | 0,178 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|--------------------------|---|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------|------|-------|
| Tesla Model 3 | Асинхронний електродвигун змінного струму з рідким охолодженням із змінним частотним приводом | 238 | 175 | Літій-іон | 300 | 50 | 354 | - | 210 | 20-40 | 8 | 0,5 | 0,14 |
| | Асинхронний електродвигун змінного струму з рідким охолодженням із змінним частотним приводом | 261 | 192 | Літій-іон | 300 | 75 | 499 | - | 210 | 20-40 | 8 | 0,5 | 0,15 |
| Tesla Model X P100D | Асинхронний електродвигун змінного струму з рідким охолодженням із змінним частотним приводом | 720 | 576 | Літій-іон | 350 | 100 | 462 | 542 | 250 | 35-50 | 6-9 | 0,5 | 0,216 |
| Tesla Model X 100D | Асинхронний електродвигун змінного струму з рідким охолодженням із змінним частотним приводом | 423 | 310 | Літій-іон | 350 | 100 | 472 | - | 248 | 40 | 6-9 | 0,5 | 0,212 |
| Renault ZOE Z.E. 40 2017 | Електродвигун | 92 | 68 | Літій-іон | 400 | 41 | 300 | 400 | 140 | 7,5 | 2,67 | 1,67 | 0,137 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|--------------------------|---|-----|-----|-----------|-----|------|-----|-----|-----|-------|-------|--------|-------|
| Renault Kangoo Z.E. 2017 | Синхронний двигун змінного струму | 60 | 44 | Літій-іон | 400 | 33 | 200 | 270 | 130 | 6 | - | - | 0,165 |
| Peugeot iOn | Електро-двигун | 64 | 47 | Літій-іон | 330 | 16 | 115 | 150 | 130 | 6 | - | 0,5 | 0,139 |
| Peugeot Partner Electric | Асинхронний двигун змінного струму | 67 | 49 | Літій-іон | 310 | 22,5 | 130 | 170 | 110 | 7 – 8 | 3 – 4 | 0,5 | 0,173 |
| Opel Ampera-e | Синхронний трьохфазний електродвигун з постійними магнітами | 204 | 150 | Літій-іон | 360 | 60 | 380 | 520 | 145 | 9 | - | 0,5 | 0,158 |
| Nissan Leaf 2018 | Електричний двигун EM57 | 150 | 110 | Літій-іон | 360 | 40 | 243 | 378 | 144 | 16 | 8 | 0,67 | 0,165 |
| Nissan e-NV200 | Синхронний двигун змінного струму | 109 | 80 | Літій-іон | 360 | 40 | 220 | 280 | 122 | 21,5 | 7,5 | 0,67-1 | 0,18 |
| Kia Soul EV 2018 | Синхронний двигун змінного струму | 110 | 90 | Літій-іон | 360 | 30 | 173 | 220 | 145 | 5 – 6 | - | 33 хв. | 0,173 |
| Kia Niro EV 2018 | Синхронний двигун змінного струму | 204 | 150 | Літій-іон | 360 | 64 | 385 | - | | | | 0,9 | 0,166 |
| Jaguar I-Pace | 2 синхронних двигуна EV400 | 400 | 294 | Літій-іон | 390 | 90 | 480 | - | 200 | - | 1,5 | 0,67 | 0,187 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|--------------------------|---|-----|-----|-----------|-----|------|-----|-----|-----|------|----|-----|-------|
| Hyundai Ioniq Electric | Електричний двигун з постійними магнітами | 120 | 88 | Літій-іон | 360 | 28 | 177 | 250 | 165 | 8-14 | - | 0,5 | 0,158 |
| Hyundai Cona Long-range | Електричний двигун з постійними магнітами | 204 | 150 | Літій-іон | 356 | 64 | 420 | - | 167 | 9,67 | - | 0,9 | 0,152 |
| Hyundai Cona Short-range | Електричний двигун з постійними магнітами | 136 | 100 | Літій-іон | 356 | 39 | 263 | - | 167 | 6,1 | - | 0,9 | 0,148 |
| Honda clarity electric | Асинхронний електродвигун змінного струму | 161 | 120 | Літій-іон | 348 | 25,5 | 142 | - | | 3,5 | - | 0,5 | 0,179 |
| Ford Focus Electric 2017 | Електродвигун | 143 | 107 | Літій-іон | - | 33,5 | 185 | - | 135 | 5 | - | 0,5 | 0,189 |
| Fiat 500e | Електродвигун | 111 | 83 | Літій-іон | 364 | 24 | 135 | - | 141 | 4 | - | - | 0,178 |
| Citroen C-Zero | Електродвигун | 64 | 47 | Літій-іон | 330 | 16 | 115 | 150 | 130 | 6 | - | 0,5 | 0,139 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---------------------------|--|-----|-----|-----------|-----|------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
| Citroen Berlingo Electric | Асинхронний двигун змінного струму | 67 | 49 | Літій-іон | 310 | 22,5 | 130 | 170 | 110 | 7 – 8 | 3 – 4 | 0,5 | 0,173 |
| Chevrolet Bolt EV | Електро-двигун | 200 | 150 | Літій-іон | 350 | 60 | 380 | - | 160 | 9 | - | 0,5 | 0,158 |
| Byd E6 | Синхронний електродвигун з постійними магнітами | 121 | 91 | Літій-іон | - | 75 | 350 | 400 | 140 | 6 – 8 | - | 0,67 | 0,214 |
| BMW i3 | Технологія BMW eDrive: гібридний синхронний двигун | 170 | 125 | Літій-іон | 353 | 33,2 | 250 | 300 | 150 | 9,5 | 2,75 | до 67 | 0,133 |
| BMW i3s 2018 | Технологія BMW eDrive: гібридний синхронний двигун | 184 | 135 | Літій-іон | 353 | 33,2 | 230 | 280 | 160 | 9,5 | 2,75 | до 67 | 0,143 |

ДОДАТОК В

Технічні показники електромобілів [99-116]

| Марка електро- мобіля | Енергія боргової АБ, кВт*год | Дальність пробігу по ЕРА | Напруга АБ ЕМ, В | Маса ЕМ, кг | Питома витрата енергії, кВт*год/км | Потреба енергії для заряду від 0,2 до 0,8Сн, кВт*год/км | Ємність АБ ЕМ А*год |
|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------|-------------|---|---|---------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| SMART ForTwo | 17,6 | 110 | 370 | 940 | 0,16 | 10,56 | 50 |
| Volkswagen e-Golf 2017 | 35,8 | 200 | 323 | 1567 | 0,179 | 21,48 | 110 |
| Tesla Model S 75D | 75 | 400 | 300 | 2110 | 0,187 | 45 | 250 |
| Tesla Model S 75D | 75 | 420 | 300 | 2110 | 0,178 | 45 | 250 |
| Tesla Model 3 | 50 | 354 | 300 | - | 0,14 | 30 | 167 |
| | 75 | 499 | 300 | - | 0,15 | 45 | 250 |
| Tesla Model X P100D | 100 | 462 | 350 | 2396 | 0,216 | 60 | 286 |
| Tesla Model X 100D | 100 | 472 | 350 | 2396 | 0,212 | 60 | 286 |
| Renault ZOE Z.E. 40 2017 | 41 | 300 | 400 | 1470 | 0,137 | 24,6 | 102,5 |
| Renault Kangoo Z.E. 2017 | 33 | 200 | 400 | 1426 | 0,165 | 19,8 | 82,5 |
| Peugeot iOn | 16 | 115 | 330 | 1195 | 0,139 | 9,6 | 49 |
| Peugeot Partner Electric | 22,5 | 130 | 310 | 2225 | 0,173 | 13,5 | 72,5 |
| Opel Ampera-e | 60 | 380 | 360 | 1691 | 0,158 | 36 | 167 |
| Nissan Leaf 2018 | 40 | 243 | 360 | 1557 | 0,165 | 24 | 111 |
| Nissan e-NV200 | 40 | 220 | 360 | 2250 | 0,18 | 24 | 111 |
| Kia Soul EV 2018 | 30 | 173 | 375 | 1513 | 0,173 | 18 | 75 |
| Kia Niro EV 2018 | 64 | 385 | 375 | 1737 | 0,166 | 38,4 | 171 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Jaguar I-Pace | 90 | 480 | 390 | 2133 | 0,187 | 54 | 230 |
| Hyundai Ioniq Electric | 28 | 177 | 360 | 1420 | 0,158 | 16,8 | 77,78 |
| Hyundai Cona Long-range | 64 | 420 | 356 | 1685 | 0,152 | 38,4 | 180 |
| Hyundai Cona Short-range | 39 | 263 | 356 | 1535 | 0,148 | 23,4 | 110 |
| Honda clarity electric | 25,5 | 142 | 348 | 1826 | 0,179 | 15,3 | 73,2 |
| Ford Focus Electric 2017 | 33,5 | 185 | - | 1661 | 0,189 | 21 | - |
| Fiat 500e | 24 | 135 | 354 | 1005 | 0,178 | 14,4 | 68 |
| Citroen C-Zero | 16 | 115 | 320 | 1120 | 0,139 | 9,6 | 50 |
| Citroen Berlingo Electric | 22,5 | 130 | 310 | 1391 | 0,173 | 13,5 | 72,5 |
| Chevrolet Bolt EV | 60 | 380 | 350 | 1625 | 0,158 | 36 | 171 |
| Byd E6 | 61,4 | 350 | 317 | 2020 | 0,214 | 45 | 194 |
| BMW i3 | 33,2 | 250 | 353 | 1245 | 0,133 | 19,92 | 94 |
| BMW i3s 2018 | 33,2 | 230 | 353 | 1365 | 0,143 | 19,92 | 94 |

Додаток Г

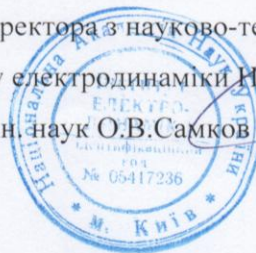
Технічні показники комерційних електромобілів на паливних елементах [158-160]

| Марка електромобіля | Тип електродвигуна | Потужність електродвигуна | | Тип бортової АБ | Вартість електромобіля FCEV, | Потужність паливних елементів, кВт | Дальність пробігу | Максимальна швидкість, км/год | Тривалість заправки, хв | Споряджена маса, кг | Тиск в ємності з воднем, атм | Місткість ємності для водню, л | Тип паливних елементів |
|---------------------|--|---------------------------|-----|----------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------------|--------------------------------|--|
| | | к.с. | кВт | | | | | | | | | | |
| Honda Clarity | Синхронний електродвигун на постійних магнітах змінного струму | 174 | 128 | Літій-іон | 59,4 | 103 | 589 EPA | 160 | 3-5 | 1890 | До 700 | 171 | На протоно-обмінних мембранах (PEMFC) |
| Toyota Mirai | Синхронний електродвигун на постійних магнітах змінного струму | 154 | 113 | Нікель-металогідрид | 57,5 | 114 | 502 EPA | 175 | 3-5 | 1850 | До 700 | 112,4 | На протоно-обмінних мембранах (FC stack) |
| Hyundai Nexo | Синхронний електродвигун на постійних магнітах | 161 | 120 | Літій-іон полімерний | 59,8-62,3 | 95 | 600 EPA 800 NEDC | 177 | 5 | 1870 | До 700 | 156 | На протоно-обмінних мембранах |
| Hyundai ix35 FCEV | Синхронний електродвигун на постійних магнітах | 134 | 100 | Літій-іон полімерний | 69,8 | 100 | 426 EPA | 160 | 5 | 1830 | До 700 | 144 | На протоно-обмінних мембранах |

Додаток Г
Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора з науково-технічної роботи
Інституту електродинаміки НАН України
докт. техн. наук О.В.Самков



А К Т

використання наукових результатів дисертаційної роботи
Будько Василя Івановича

Даний акт підтверджує, що результати дисертації В.І. Будько, «Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для зарядження електромобілів», зокрема запропонованої методології та алгоритму розрахунку енергоємності буферного накопичувача електричної енергії АЗСЕМ, що дозволяє реалізовувати гарантований заряд автономною зарядною станцією при правильному виборі генеруючого устаткування з урахуванням специфіки надходження енергії відновлюваного джерела, використано при виконанні НДР № ДР 0111U009253 «Розвиток теоретичних засад і розроблення рекомендацій по створенню високоефективних систем заряду накопичувачів енергії електромобільного транспорту з урахуванням вимог забезпечення електромагнітної сумісності з системою електроживлення» (шифр «Параметр-5»). У подальшому отримані результати планується впроваджувати при розробці математичних моделей систем акумулявання з акумуляторними батареями, що використовуються для електроживлення електромобілів, за рахунок урахування випадкового характеру залишкової ємності, яка в подальшому впливає на необхідну енергоємність буферного накопичувача автономної зарядної станції.

Відповідальний виконавець НДР,
головний н.с. від №2, д.т.н.

Павлов В.Б.

Виконавець НДР, мол.н.с. від. № 2

Павленко В.С.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник директора

Інституту відновлюваної енергетики

НАН України,

чл.-кор. НАНУ, д.т.н., професор

В.Ф. Рєзцов



АКТ

використання наукових і практичних результатів дисертаційної роботи на тему «Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для зарядження електромобілів»


к.т.н., доц. Бутька Василя Івановича

Акт складено в тому, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи «Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для зарядження електромобілів» доцента КПІ ім. Ігоря Сікорського, к.т.н. доц. Бутька В.І. використано в Інституті відновлюваної енергетики НАН України при виконанні НДР «Розробити схемо-технічні рішення модернізації існуючих та перспективних гібридних систем електро- та теплопостачання з використанням відновлюваних джерел енергії», шифр «Комплекс-М» (ДР № 0117U000703).

В.І. Бутьком вперше отримані залежності впливу типу електрохімічної системи акумуляторної батареї на енергоємність буферного накопичувача, що дозволяє встановити енергетичні показники зарядної станції електромобілів. Розроблено алгоритм розрахунку енергоємності буферного накопичувача електричної енергії зарядної станції електромобілів, що дозволяє реалізовувати гарантоване зарядження заданої кількості електромобілів при виборі генеруючого устаткування з урахуванням специфіки надходження енергії сонячного випромінювання та вітру. Також

розвинуто математичну модель процесу зарядження електрохімічних акумуляторних батарей для живлення електромобілів, яка враховує випадковий характер її залишкової ємності, що дало можливість визначити вплив на енергоємність буферного накопичувача зарядної станції. Запропоновано схемні рішення реалізації зарядних станцій електромобілів, в яких як первинний генератор електричної енергії використовуються фотоелектричні та вітроелектричні енергоустановки.

Завідувач відділу комплексних
енергосистем ІВЕ НАНУ,
докт. техн. наук



М.П. Кузнецов

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан факультету
електроенерготехніки та автоматики
Національного технічного
університету
України "Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського",
д.т.н., професор

О.С. Яндульський



АКТ

**використання наукових і практичних результатів дисертаційної роботи
на тему «Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для
зарядження електромобілів»**

к.т.н., доц. Бутька Василя Івановича

Акт складено в тому, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи «Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для зарядження електромобілів» доцента КПІ ім. Ігоря Сікорського, к.т.н. доц. Бутька В.І. використано на кафедрі відновлюваних джерел енергії факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" при виконанні НДР "Комплексні системи енергозабезпечення автономних об'єктів на базі використання відновлюваних джерел енергії" (тема №2037, № ДР 0117U004325).

В.І. Бутько розробив математичні моделі процесу зарядження буферної акумуляторної батареї зарядної станції та тягових акумуляторів електромобілів при використанні енергії сонячного випромінювання та вітру, що дало можливість узгодити співвідношення енергетичних параметрів зарядних станцій та джерел енергії. Розроблено алгоритм розрахунку енергоємності буферного накопичувача електричної енергії зарядної станції електромобілів, що дозволяє реалізовувати гарантоване зарядження заданої

кількості електромобілів при виборі генеруючого устаткування з урахуванням специфіки надходження енергії сонячного випромінювання та вітру.

Будько В.І. вперше розробив математичні моделі процесу виробництва водню на заправних станціях електромобілів на паливних елементах при використанні енергії сонячного випромінювання та вітру, які дозволяють узгодити енергетичний баланс між виробленням та споживання електричної енергії на станції. Розроблені схемні рішення реалізації водневих заправних станцій електромобілів на паливних елементах, де як первинні генератори електричної енергії виступають фотоелектричні та вітроелектричні енергоустановки.

Отримані В.І. Будьком наукові результати використано в курсі навчальної дисципліни "Перетворення та акумулювання енергії відновлюваних джерел", зокрема в розділі "Використання електрохімічних акумуляторів енергії для ефективного застосування відновлюваних джерел" при підготовці бакалаврів за спеціальністю 141-Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, згідно освітньої-професійної програми підготовки бакалаврів «Нетрадиційні та відновлювані джерел енергії».

Зав.каф. ВДЕ,

чл.-кор. НАН України

докт. техн. наук, професор



С.О. Кудря

Доц. каф. ВДЕ

канд. техн. наук, доцент



В.М. Кириленко

Україна

Адреса: 02096, Україна, м. Київ, вул. Сіверопольська, 13-А
(район ст. м. Харківська)
Телефон/факс: +380(044) 545-71-04
Мобільні телефони:
+380 93 426-37-10, +380 67 445-45-98, +380 50 440-01-74 Web:
atmosfera.ua
E-mail: info@atmosfera.ua



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Технічний директор
ТОВ «Атмосфера-Технології
природи»

О. Ковпак

АКТ

**використання наукових і практичних результатів дисертаційної роботи
на тему «Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для
зарядження електромобілів»**

к.т.н., доц. Будька Василя Івановича

Акт складено в тому, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи «Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для зарядження електромобілів» доцента КПІ ім. Ігоря Сікорського, к.т.н. доц. Будька В.І. використано в компанії ТОВ «Атмосфера-Технології природи» при розробці систем гарантованого електроживлення промислових та побутових об'єктів від відновлюваних джерел енергії.

В.І. Будько розробив математичні моделі процесу зарядження буферної акумуляторної батареї при використанні енергії сонячного випромінювання, що дає можливість узгодити співвідношення енергетичних параметрів споживачів та джерел енергії. Розроблено алгоритм розрахунку енергоємності буферного накопичувача електричної енергії, що дозволяє реалізовувати гарантоване електроживлення споживачів при виборі генеруючого устаткування з урахуванням специфіки надходження енергії сонячного випромінювання.

Сервіс-інженер



Д. С. Делєв

Вих. №: 0609

Дата: 06.09.2019

Всього ст.: 1

ст.: 1

**ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Директор KB Energy

О. С. Бурлаков

АКТ

**використання наукових і практичних результатів дисертаційної роботи на
тему «Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для
зарядження електромобілів»**

к.т.н., доц. Будька Василя Івановича

Акт складено в тому, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи «Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для зарядження електромобілів» доцента КПІ ім. Ігоря Сікорського, к.т.н. доц. Будька В.І. використано в компанії KB Energy при розробці буферних блоків акумуляування енергії для автономних станцій електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії.

Запропонований Будьком В.І. алгоритм розрахунку енергоємності буферного накопичувача електричної енергії зарядної станції електромобілів, дозволяє оптимально підбирати енергоємність акумуляторів та потужність фотоелектричного генеруючого устаткування. Запропоновані схемні рішення реалізації зарядних станцій електромобілів поширені на реалізацію автономних станцій електроживлення локальних об'єктів.

Головний інженер-проектувальник _____ А.В. Гамарко