

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

РЕПКІН ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 620.9:621.311.26

ДИСЕРТАЦІЯ

СОНЯЧНО–ВІТРО–ВОДНЕВА СТАНЦІЯ

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

РЕПКІН Олександр

Науковий керівник чл.–кор НАН України, доктор техн. наук, професор
Кудря Степан Олександрович

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Репкін О.О. Сонячно–вітро–воднева станція. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню можливості компенсації енергозатрат на електролітичне виробництво водню сонячними та вітровими електростанціями в Азово–Чорноморському регіоні України.

У світі використання водню постає стратегічно важливим завданням у контексті економіки розвинених країн. З огляду на свої екологічні властивості водень відіграє вирішальну роль у виконанні світових планів щодо зменшення викидів парникових газів, зменшення споживання вуглецю та досягнення енергетичної незалежності країн.

Провідні країни світу розробляють національні стратегії розвитку водневих технологій і готові допомогти іншим країнам, зокрема Україні, у започаткуванні нового ринку відновлюваних газів. Наприкінці травня 2020 року у Брюсселі віцепрезидент Єврокомісії Франс Тіммерманс представив План розвитку водневої галузі до 2030 року, у якому Україні відведено важливу роль промислового постачальника водню на європейський ринок з обов'язковою умовою формування внутрішнього ринку. Водневі технології впроваджуються насамперед у важливі галузі економіки, такі як енергетика, транспорт та житлово–комунальна сфера.

Розвиток водневої галузі в Україні може допомогти оговтатися нашій державі від наслідків економічного спаду через пандемію Covid–19 та повномасштабного російського вторгнення і війни. Плани розвитку передбачають створення робочої системи Водневого Хабу, який міститиме всі

процеси водневої промисловості: виробництво водню, розвиток інфраструктури, створення сховищ для зберігання та розповсюдження водню.

З огляду на наявні проблеми ринку електроенергії України, викликані порушенням зобов'язань держави перед виробниками «зеленої» електроенергії, водневі технології можуть отримати масштабний розвиток як системи, що забезпечують балансування генерації.

У роботі окреслено сучасний стан розвитку відновлюваної енергетики в світі та Україні як ключового сектору глобального енергетичного ринку, зокрема сонячної та вітроенергетики. Світові лідери продовжують інвестувати у цей сектор та розширювати встановлені потужності, що збільшує роль цієї галузі у загальному балансі виробництва електроенергії. Зменшення вартості обладнання та розвиток технологій створює гарні перспективи для розвитку відновлюваної енергетики у промислових масштабах.

Визначено наявні проблеми інтеграції станцій, що генерують електроенергію з відновлюваних джерел енергії до загальної енергомережі України. Реформування енергетичної галузі України за європейськими стандартами та прийняття деяких рішень державними лідерами призвело до накопичення заборгованості учасникам ринку електроенергії, суттєвого зростання тарифу на електроенергію для споживачів та кризової ситуації загалом. Важливою проблемою ринку електроенергії є відсутність установок, які можуть балансувати нерівномірну генерацію або акумулювати надлишкову енергію.

Водень здатен не лише допомогти у балансуванні української енергетичної системи та сприяти досягненню амбітних цілей декарбонізації економіки, а й стати чудовою альтернативою російському паливу для ЄС. Україна має ряд значних переваг для виробництва та експорту водню до Європи, зокрема такі: українська ГТС має підключення до газотранспортних систем ЄС, наявні газові підземні сховища, а також належні умови для створення потужностей з виробництва водню.

Країни Європейського Союзу проявляють велику активність у впровадженні політики декарбонізації та використанні водню як засобу досягнення нульового вуглецевого сліду. Позитивні приклади використання водню в пасажирському транспорті та судноплавстві свідчать про його потенціал у зниженні викидів та поліпшенні якості навколишнього середовища.

Україна має великий технічний потенціал у розвитку водневих технологій і може стати ключовим постачальником «зеленого» водню для країн Європи. На нашій території зосереджений значний потенціал виробництва відновлювальної енергії, розвинена інфраструктура для транспортування водню.

Дисертантом розроблено положення концепції Водневої стратегії України на період до 2050 року, які надають чіткі кроки для розвитку водневої енергетики в різних галузях. Реалізація стратегії передбачає створення відповідної законодавчої бази, приваблення інвестицій та підготовку інфраструктури для транспортування «зеленого» водню. Проєкт української Водневої стратегії передбачає реалізацію європейських планів щодо будівництва 10 ГВт встановленої потужності заводів з виробництва «зеленого» водню в Україні до 2030 року. Розглянуто можливості виробництва, зберігання та транспортування вітчизняного водню, реалізація яких допоможе у відродженні економіки повоєнної України, прискоренні європейської інтеграції та залучення міжнародних інвесторів.

У роботі викладено результати проведених досліджень можливості компенсації енергозатрат на електролітичне виробництво водню сонячними та вітровими електростанціями в Азово–Чорноморському регіоні України. Виконано аналіз фактичних експлуатаційних характеристик сонячної електростанції «Токмак» (Запорізька область), однієї з найбільших на території України. Також отримано та проаналізовано дані заміру швидкості вітру на тестовому майданчику, розташованому на півдні Одеської області, і який розглядається для розміщення потужної вітроелектростанції.

Проведено аналіз періодів введення обмежень генерації СЕС оператором мережі з метою кількісної оцінки втрат виробітку станцій, що входять до

балансуючої групи ДП «Гарантований покупець». Визначено, що найбільший сумарний період обмежень був зафіксований у 2022 році та складав 22 % від загальної кількості робочих годин у році. Зауважено, що кількість обмежень та період введення тотожні для всіх станцій балансууючої групи.

Удосконалено математичні моделі визначення технічних параметрів сонячної та вітроелектростанцій шляхом урахування втрат енергії в процесі експлуатації, які дозволяють підвищити точність енергетичних розрахунків. Було виконано симуляційне моделювання параметрів і енергетичних характеристик досліджуваних електростанцій з урахуванням фактичної метеорологічної інформації, яка отримана на тестових майданчиках.

Враховуючи комплексну роботу сонячної та вітроелектростанцій для виробництва водню, відповідно до розробленої математичної моделі обрано потужність та кількість агрегатів, що увійшли до складу вітроелектростанції. Отримані кількісні показники планового виробітку вітроелектростанції, що відповідають вибраній висоті осі ротора та річного розподілу швидкості вітру.

Відповідно до технічних характеристик досліджуваної сонячної електростанції та обраних характеристик вітроелектростанції розроблено математичну модель енергозабезпечення водневої установки, що дозволило обрати її параметри з урахуванням особливостей південного регіону України та розрахувати річний показник виробництва водню.

Розроблено симуляційну модель комплексу станцій для визначення річного об'єму генерації «зеленого» водню з урахуванням номінальних параметрів електролізної установки, сонячних та вітрових електростанцій. У результаті, встановлена потужність СЕС за інверторами прийнята на рівні 56,97 МВт, потужність вітроелектростанції становила 21 МВт, а для електролізера запропонована потужність складає 10 МВт або 20 МВт.

Для подальшої оцінки економічної привабливості проекту сонячно–вітро–водневої станції запропоновано розглянути два варіанти комплектації комбінованої системи, а саме:

- умовно автономна система, у якій електролізер використовує тільки генеровану енергію сонячною та вітровою станціями. Надлишок електроенергії продається на державний ринок за діючим «зеленим» або загальним тарифом;
- для роботи електролізера максимально використовується енергія, вироблена сонячною та вітроелектростанціями, а у періоди нестачі електроенергії компенсується з ОЕС.

Розраховано економічні показники інвестиційного проєкту сонячно–вітро–водневої станції. Розрахунки проводились згідно з модифікованою математичною моделлю, що враховує особливості використаного обладнання. Проведено розрахунок для різних схем виконання комплексу станцій та для різної вартості виробленого водню. Визначено, що інвестиційний проєкт потребує великих капіталовкладень та залишається привабливим для міжнародних і вітчизняних інвесторів при розрахунковій вартості водню від 3 до 5 євро. У результаті проведених досліджень отримані економічно прийнятні терміни окупності (6–7 років від початку експлуатації) для обох схем реалізації. Часткова та повна компенсація енергозатрат на електролітичне виробництво водню сонячними та вітровими електростанціями економічно вигідна, що доводить необхідність проведення подальших досліджень у цій галузі.

Ключові слова: Азово–Чорноморський регіон, відновлювані джерела енергії, вітроелектростанція, водневі технології, електроенергетична мережа, електролізер, «зелений» водень, «зелений» тариф, комп'ютерне моделювання, комплекс станцій, математична модель, сонячна електростанція, сонячна іррадіація, швидкість вітру.

ANNOTATION

Repkin O.O. Solar-wind-hydrogen station. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in specialty 141 "Electropower, electrical engineering and electromechanics". – Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to the study of the possibility of compensating energy costs for the electrolytic production of hydrogen by solar and wind power plants in the Azov–Black Sea region of Ukraine.

In the world, the use of hydrogen becomes a strategically important task in the context of the economy of developed countries. Given its ecological properties, hydrogen plays a decisive role in the implementation of global plans to reduce greenhouse gas emissions, reduce carbon consumption and achieve energy independence of countries.

The leading countries of the world are developing national strategies for the development of hydrogen technologies and are ready to help other countries, in particular Ukraine, in starting a new renewable gas market. At the end of May 2020, in Brussels, the Vice President of the European Commission, Frans Timmermans, presented the Plan for the Development of the Hydrogen Industry until 2030, in which Ukraine is assigned an important role as an industrial supplier of hydrogen to the European market, with the mandatory condition of the formation of the internal market. Hydrogen technologies are implemented primarily in important sectors of the economy, such as energy, transport, housing and utilities.

The development of the hydrogen industry in Ukraine can help our country recover from the effects of the economic downturn due to the Covid-19 pandemic and a full-scale Russian invasion and war. The development plans provide for the creation of a working system of the Hydrogen Hub, which will contain all the processes of the

hydrogen industry: hydrogen production, infrastructure development, and the creation of hydrogen storage and distribution facilities.

In view of the existing problems of the electricity market of Ukraine, caused by the violation of the state's obligations to the producers of "green" electricity, hydrogen technologies can receive large-scale development as a system that ensures balancing of generation.

The work outlines the current state of development of renewable energy in the world and in Ukraine as a key sector of the global energy market, in particular solar and wind energy. World leaders continue to invest in this sector and expand installed capacity, which increases the role of this sector in the overall balance of electricity production. The decrease in the cost of equipment and the development of technologies create good prospects for the development of renewable energy on an industrial scale.

Existing problems of integration of stations generating electricity from renewable energy sources into the general energy grid of Ukraine are identified. The reform of the energy industry of Ukraine according to European standards and the adoption of some decisions by state leaders led to the accumulation of debts to the participants of the electricity market, a significant increase in the electricity tariff for consumers, and a crisis situation in general. An important problem of the electricity market is the lack of installations that can balance uneven generation or accumulate excess energy.

Hydrogen is able not only to help balance the Ukrainian energy system and contribute to the achievement of ambitious goals of decarbonization of the economy, but also to become an excellent alternative to Russian fuel for the EU. Ukraine has a number of significant advantages for the production and export of hydrogen to Europe, including the following: the Ukrainian gas transmission system is connected to the EU gas transport systems, there are existing underground gas storage facilities, as well as suitable conditions for the creation of hydrogen production capacities.

The countries of the European Union are very active in implementing decarbonization policies and using hydrogen as a means of achieving a zero carbon footprint. Positive examples of the use of hydrogen in passenger transport and shipping

testify to its potential in reducing emissions and improving the quality of the environment.

Ukraine has great technical potential in the development of hydrogen technologies and can become a key supplier of "green" hydrogen for European countries. A significant potential for the production of renewable energy is concentrated in our territory, and the infrastructure for transporting hydrogen is developed.

The doctoral candidate developed the provisions of the concept of the Hydrogen Strategy of Ukraine for the period until 2050, which provide clear steps for the development of hydrogen energy in various sectors. The implementation of the strategy involves the creation of an appropriate legislative framework, attracting investments and preparing the infrastructure for the transportation of "green" hydrogen. The project of the Ukrainian Hydrogen Strategy envisages the implementation of European plans for the construction of 10 GW of installed capacity of factories for the production of "green" hydrogen in Ukraine by 2030. The possibility of production, storage and transportation of domestic hydrogen was considered, the implementation of which will help in the revival of the economy of post-war Ukraine, the acceleration of European integration and the attraction of international investors.

The paper presents the results of research into the possibility of compensating energy costs for the electrolytic production of hydrogen by solar and wind power plants in the Azov–Black Sea region of Ukraine. An analysis of the actual operating characteristics of the solar power plant "Tokmak" (Zaporizhia region), one of the largest in Ukraine, was performed. Wind speed measurement data at a test site located in the south of Odesa region, which is being considered for the location of a powerful wind power plant, was also obtained and analyzed.

An analysis of the periods of introduction of SPP generation restrictions by the network operator was carried out in order to quantify the production losses of stations that are part of the balancing group of state-owned enterprise "Guaranteed Buyer". It was determined that the largest total period of restrictions was recorded in 2022 and was 22% of the total number of working hours in the year. It is noted that the number

of restrictions and the period of introduction are identical for all stations of the balancing group.

Mathematical models for determining the technical parameters of solar and wind power plants by taking into account energy losses during operation have been improved, which allow increasing the accuracy of energy calculations. Simulation modeling of the parameters and energy characteristics of the studied power plants was carried out, taking into account the actual meteorological information obtained at the test sites.

Taking into account the complex operation of solar and wind power plants for the production of hydrogen, the power and number of units included in the wind power plant were selected according to the developed mathematical model. Quantitative indicators of the planned production of the wind power plant corresponding to the selected height of the rotor axis and the annual wind speed distribution were obtained.

According to the technical characteristics of the studied solar power plant and the selected characteristics of the wind power plant, a mathematical model of the energy supply of the hydrogen plant was developed, which made it possible to choose its parameters taking into account the characteristics of the southern region of Ukraine and calculate the annual hydrogen production rate.

A simulation model of the plant complex was developed to determine the annual volume of "green" hydrogen generation, taking into account the nominal parameters of the electrolysis plant, solar and wind power plants. As a result, the installed capacity of the SPP according to the inverters was accepted at the level of 56.97 MW, the capacity of the wind power plant was 21 MW, and the proposed capacity for the electrolyzer is 10 MW or 20 MW.

In order to further assess the economic attractiveness of the solar-wind-hydrogen plant project, it is proposed to consider two options for the configuration of the combined system, namely:

- conditionally autonomous system, in which the electrolyzer uses only the energy generated by solar and wind stations. Surplus electricity is sold to the state market at the current "green" or general tariff;

- for the operation of the electrolyzer, the energy produced by solar and wind power plants is used as much as possible, and in periods of shortage, electricity is compensated from the united energy system.

The economic indicators of the solar-wind-hydrogen plant investment project were calculated. Calculations were carried out according to a modified mathematical model that takes into account the features of the used equipment. The calculation was carried out for different schemes of execution of the complex of stations and for different costs of produced hydrogen. It was determined that the investment project requires large capital investments and remains attractive for international and domestic investors at the estimated cost of hydrogen from 3 to 5 euros. As a result of the conducted research, economically acceptable payback periods (6–7 years from the start of operation) were obtained for both implementation schemes. Partial and full compensation of energy costs for the electrolytic production of hydrogen by solar and wind power plants is economically beneficial, which proves the need for further research in this field.

Keywords: Azov–Black Sea region, renewable energy sources, wind power plant, hydrogen technologies, electric power network, electrolyzer, "green" hydrogen, "green" tariff, computer modeling, complex of stations, mathematical model, solar power plant, solar irradiation, wind speed.