ISSN 1819-8058

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

ІНСТИТУТ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА

№1 (56) – 2019

НАУКОВО-ПРИКЛАДНИЙ ЖУРНАЛ

ІВЕ НАН України

Київ-2019

Національна академія наук України
Відділення фізико-технічних проблем енергетики
Інститут відновлюваної енергетики
Науково-прикладний журнал

ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА

Заснований у серпні 2004 року

Зареєстровано в Державному комітеті телебачення і радіомовлення України,
реєстраційне свідоцтво КВ№9115 від 1 вересня 2004 року

Журнал входить до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого наказами Міністерства освіти і науки України від 24.05.2018 №527 та 16.07.2018 №775

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР
Кудря С.О. чл.-кор. НАН України, д-р. техн. наук, проф.

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
Рєзцов В.Ф. чл.-кор. НАН України, д-р. техн. наук, проф.

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ
Басок Б.І. чл.-кор. НАН України, д-р. техн. наук, проф.
Бєкіров Е.А. д-р техн. наук, доц.
Васько П.Ф. д-р техн. наук, ст. наук. співр.
Головко В.М. д-р техн. наук, проф.
Гуссв О.Л. гол. ред. міжн. наук. журн. «Альтернативная энергетика и экология» (Росія)
Долінський А.А. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф.
Карп І.М. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф.
Кулик М.М. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф.
Мацевитий Ю.М. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф.
Мислович М.В. д-р техн. наук, проф.
Мхітарян Н.М. чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.
Маегаард П. почесний директор «Nordic Folkecenter for Renewable Energy» (Данія)
Павлов В.Б. д-р техн. наук, ст. наук. співр.
Собчук Г. д-р техн. наук, проф. (Польща)
Стогній Б.С. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф.
Стріугас Н. д-р техн. наук (Литва)
Троціковські Т. д-р техн. наук (Польща)
Фіалко Н.М. чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.
Халатов А.А. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф.
Шидловський А.К. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф.
Шмідт Д. д-р техн. наук, Solarinitiative Mecklenburg Vorpommern MV e.V (Німеччина)
Юрченко О.М. д-р техн. наук, ст. наук. співр.
Яндульський О.С. д-р техн. наук, проф.

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР
Суржик Т.В. вчений секретар Інституту відновлюваної енергетики НАНУ, канд. техн. наук

Науковий редактор: Рєзцов В.Ф.
Редактор випуску: Щокін А.Р.
Редакційна група: Пономаренко О.П., Щокіна В.А., Іванчук О.І.
Верстка: Кушнір І.О., Тефнанц М.А.

КОНТАКТНА ІНФОРМАЦІЯ:
02094 вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна
Інститут відновлюваної енергетики НАН України
тел. /факс: +38 (044) 206-28-09
e-mail: ar.shchek@gmail.com
www.ve.org.ua

Журнал підтримує політику відкритого доступу, прийняту Берлінською директивою в жовтні 2003 р. Комерційне використання статей журналу заборонено. При цитуванні посилання на журнал **«Відновлювана енергетика»** обов'язкове. Надіслані матеріали не повертаються. Думка редакційної ради може не співпадати з поглядами авторів матеріалів. Редакція не несе відповідальності за інформацію, надану авторами. Статті проходять процедуру подвійного «сліпого» рецензування. Редколегія залишає за собою право відхилити друк статті.

National Academy of Sciences of Ukraine

Department of Physical and Technical Energy Problems

Institute of Renewable Energy

Scientific and applied journal

VIDNOVLUVANA ENERGETIKA

Founded in August, 2004
Registered by the State Committee for Television and Radio-Broadcasting of Ukraine, registration certificate «KB№9115», September 1, 2004
According to the «List of scientific professional periodicals of Ukraine», the journal is appropriate for publishing results of thesis (dissertations) for Doctor of Science and Ph.D. degrees in Technical science.
The list is approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine decree №527 from 24.05.2018 and №775 from 16.07.2018.

EDITORIAL BOARD

CHIEF EDITOR

Kudria S.O. corresponding member of NAS of Ukraine, Sc.D., professor

DEPUTY EDITOR

Rieztsov V.F. corresponding member of NAS of Ukraine, Sc.D.

EDITORIAL BOARD MEMBERS

Basok B.I. corresponding member of NAS of Ukraine, Sc.D., professor
Biekirov E.A. Sc.D., docent
Dolinskyi A.A. academician of NAS of Ukraine, Sc.D., professor
Fialko N.M. corresponding member of NAS of Ukraine, Sc.D., professor
Holovko V.M. Sc.D., professor
Husiev O.L. chief editor for the journal «Alternativnaya energetika i ekologiya» (Russia)
Karp I.M. academician of NAS of Ukraine, Sc.D., professor
Khalatov A.A. academician of NAS of Ukraine, Sc.D., professor
Kulyk M.M. academician of NAS of Ukraine, Sc.D., professor
Matsevity Yu.M. academician of NAS of Ukraine, Sc.D., professor
Mkhitarian N.M. corresponding member of NAS of Ukraine, Sc.D., professor
Myslovych M.V. Sc.D., professor
Maegaard P. director emeritus of Nordic Folkecenter for Renewable Energy (Denmark)
Pavlov V.B. Sc.D., senior researcher
Schmidt D. Dr.-Ing., Solarinitiative Mecklenburg Vorpommern MV e.V (Germany)
Shydlovskiy A.K. academician of NAS of Ukraine, Sc.D., professor
Sobchuk H. Sc.D., professor (Poland)
Stohnii B.S. academician of NAS of Ukraine, Sc.D., professor
Striūgas N. Sc.D. (Lithuania)
Vasko P.F. Sc.D., senior researcher
Yandulskyi O.S. Sc.D., professor
Yurchenko O.M. Sc.D., senior researcher
Trocikowski T. Sc.D. (Poland)

EXECUTIVE SECRETARY

Surzhyk T.V. scientific secretary of the Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine

Science editor: Rieztsov V.F.
Issue editor: Shchokin A.R.
Editorial team: Ponomarenko O.P., Shchokina V.A., Ivanchuk O.I.
Layout: Kushnir I.O., Tefnants M.A.

CONTACT INFORMATION:
Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine,
20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv, Ukraine
tel. /fax: +38 (044) 206-28-09
e-mail: ar.shchek@gmail.com
www.ve.org.ua

The journal supports the open access policy adopted by the Berlin Directive in October 2003. Commercial use of journal articles is prohibited. Referring to **«Vidnovluvana Energetika»** is required when quoting. The journal does not returned submitted articles to the authors. The views and opinions expressed in the articles do not necessarily reflect the views or opinions of the editors or the editorial board. Editorial board is not responsible for the information provided herein. Journal follows a procedure of double-blinded peer review. The editorial board has the right to reject the paper.

№ 1 (56) ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА 2019

Науково-прикладний журнал
Виходить чотири рази на рік

З М І С Т

Денисенко Григорій Іванович – фундатор вітчизняної відновлюваної енергетики 6

Комплексні проблеми енергетичних систем на основі НВДЕ

Кузнєцов М.П., Лисенко О.В., Мельник О.А. До оптимального комбінування вітрових та сонячних електростанцій 10

Єршова О.Г., Солонін Ю.М., Добровольський В.Д., Коваль А.Ю. Термічна стійкість та кінетика десорбції водню з гідридної фази MgH_2 механічного сплаву магнію з Si, Ti, Fe 20

Сонячна енергетика

Бордаков М.М. Компенсація реактивної потужності сонячною електростанцією та вплив даного процесу на роботу центральної електричної мережі 31

Студенець В.П., Славінська К.О. Чисельний розрахунок параметрів параболоїдного та параболоциліндричного концентраторів для сонячної енергетичної установки на базі двигуна Стірлінга 36

Вітроенергетика

Будько В.І., Кудря С.О., Войтко С.В., Трофименко О.О. Економічні аспекти реалізації автономних зарядних станцій електромобілів на основі вітроелектричних установок 45

Головко В.М., Коханєвич В.П., Шихайлов М.О., Донець А.М., Перькова І.Ю. Імітаційна модель процесу зарядження ємнісного накопичувача електродинамічного привода насосу автономної вітроелектроустановки 51

Біоенергетика

Рохман Б.Б. Двумерная модель процесса газификации твердого топлива в неподвижном слое под давлением. 1. Исследование конверсии шубаркольского каменного угля в парокислородной смеси при отношении массовых долей H_2O/O_2=45/55 61

Соколовський О.Ф., Ярош Я.Д., Цивенкова Н.М., Кухарець С.М. Обґрунтування каналу електропостачання на основі газогенераторної установки 72

Геотермальна енергетика

Гошовский С.В., Зурьян А.В. Одноконтурные и двухконтурные теплонасосные системы. Взаимосвязь физических процессов и эффективности 83

Інформація

Вимоги до публікацій 96

XX міжнародна науково-практична конференція "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті" 100

© ІНСТИТУТ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НАН УКРАЇНИ, 2019

№ 1 (56) VIDNOVLUVANA ENERGETIKA 2019

Scientific and applied journal
The journal publishes 4 issues per year

C O N T E N T S

Grigory Denisenko - founder of the national renewable energy 6

Complex Problems of Power Systems Based on Renewable Energy Sources

Kuznietsov M., Lysenko O., Melnyk A. To optimal combination of wind and solar electricity 10

Ershova O., Solonin Yu., Dobrovolsky V., Koval A. Thermal stability and kinetics of hydrogen desorption from the hydride phase of the MgH_2 of a mechanical alloy of magnesium with Si, Ti, Fe..... 20

Solar Energy

Bordakov M. Compensation of reactive power by industrial solar power plat and influence of this process on the central electric network..... 31

Stoudenets V., **Slavinska K.** Numerical calculation of parabolic and parabolic through concentrator parameters for the solar power system based on Stirling engine..... 36

Wind Energy

Budko V., Kudria S., Voitko S., Trofymenko O. Economic aspects of realization of autonomous charger stations of electric vehicles on the basis of wind turbine 45

Golovko V., Kohanevich V., Shikhailov M., **Donets A., Perkova I.** Immediative model of the charging process of the emcsential accumulator of the electrodynamic driver pump in alone state windturbine 51

Bioenergy

Rokhman B. Two-dimensional model of the solid fuel gasification in a fixed bed under presser. 1. Investigation of shubarkol coal conversion in a steam-oxygen mixture with the mass part of H_2O/O_2=45/55 61

Sokolovskyi O., Yarosh Y., Tsyvenkova N., Kukharets S. The substantiation of the electrical power supply channel based on the gas-generator installation..... 72

Geothermal energy

Goshovskyi S., Zurian O. Single-circuit and dual-circuit heat pump systems. Interrelation of physical processes and efficiency..... 83

Information

Publication Requirements 96

XX International scientific and practical conference "Renewable energy and energy efficiency of the XXI century" 100

© ІНСТИТУТ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НАН УКРАЇНИ, 2019

ДЕНИСЕНКО ГРИГОРІЙ ІВАНОВИЧ – ФУНДАТОР ВІТЧИЗНЯНОЇ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

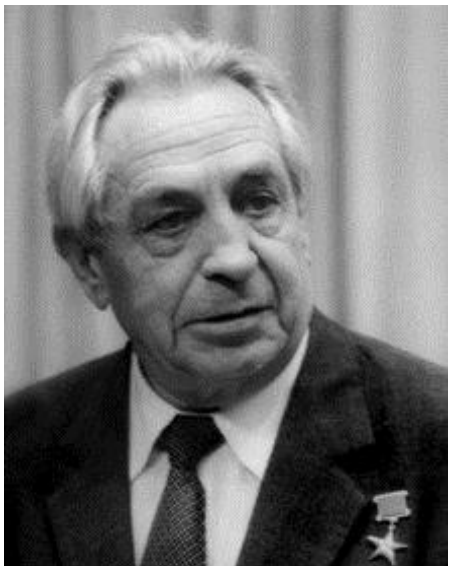
(до 100-річчя з дня народження)

Відновлювану енергетику сучасної України було започатковано у 80-х роках минулого століття в Київському політехнічному інституті (нині − Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського») з ініціативи його ректора, члена-кореспондента АН УССР, професора, доктора технічних наук, заслуженого діяча науки і техніки України Григорія Івановича Денисенка.

Одне із важливих досягнень Григорія Івановича Денисенка полягає в створенні підвалин вітчизняної відновлюваної енергетики. В 1979 році в Київському політехнічному інституті було створено науково-дослідний відділ (НДВ-5), до основних завдань якого входило проведення фундаментальних та прикладних наукових досліджень з метою комплексного використання енергії Сонця, вітру, біомаси, геотермальної енергії та енергії малих рік. Відновлювана енергетика в світі в той час ще тільки починала розвиватись, а в колишньому СРСР це був перший серйозний крок до її всебічного розвитку. При цьому комплексний підхід до використання енергії відновлюваних джерел із застосуванням акумуляторів теплової та електричної енергії і акумулювання на основі водню на ті часи було застосовано вперше в Радянському Союзі.

До роботи були залучені молоді вчені та спеціалісти різних спеціальностей, необхідних для створення нового напряму науки. Крім того, всебічне сприяння надавали всі кафедри інституту.

На сучасному етапі розвитку відновлюваної енергетики необхідно відмітити прозорливість наукової думки Григорія Івановича – практично всі вибрані на той час напрями освоєння енергії відновлюваних джерел виявились найбільш енергоефективними на сьогодні, а комплексне використання енергії відновлюваних джерел з різними системами акумулювання сприяє інтеграції відновлюваної енергетики в централізовані та локальні енергосистеми.



Григорій Іванович Денисенко

Надзвичайна віра в майбутнє відновлюваної енергетики та науково-організаційний талант Григорія Івановича змогли подолати упередженість функціонерів енергетичної галузі, які на той час орієнтувались на збільшення потужностей атомної енергетики. Вважалось, що атомна енергія є невичерпною та безпечною для людини і довкілля. Однак, досвід, набутий при освоєнні “мирного атома” засвідчив, що експлуатація атомних електростанцій з огляду на рівень технічного оснащення, навіть найбільш сучасного, може призвести до аварії не тільки місцевого чи регіонального значення, але й до світової катастрофи. Запаси ядерного палива також не безмежні, а їх видобуток та переробка стають все більш енергоємними і, відповідно, дорожчими. Крім того, в зв’язку з накопиченням відходів ядерного палива все актуальнішою стає проблема їх безпечного зберігання.

Створений Г.І. Денисенком колектив ентузіастів пройшов шлях від теоретичних та експериментальних наукових досліджень, науково-дослідних та конструкторських розробок до створення демонстраційних зразків обладнання в області вітроенергетики, сонячної теплової та фотоенергетики, гідроенергетики, біоенергетики, акумулювання енергії. Особлива увага приділялась підвищенню ефективності роботи енергоустановок на основі відновлюваних джерел енергії завдяки їх комплексному застосуванню з використанням акумуляторів

електричної і теплової енергії, акумулюванню енергії ВДЕ на основі водню та автоматизації управління режимами їх роботи.

Перевірка наукових розробок та відпрацювання робочих режимів проводилась на науково-дослідному полігоні “Десна”, який був розташований на кордоні Київської та Чернігівської областей. Вперше в СРСР на ньому була побудована багатоагрегатна вітроелектростанція потужністю 160 кВт в складі восьми вітроелектричних установок потужністю 20 кВт кожна (рис. 1). В процесі експлуатаційних досліджень проводилась перевірка ефективності вітроустановок при застосуванні різних конструкцій лопатей, редукторів, генераторів, систем акумулювання та допоміжного обладнання. Проводились дослідження режимів функціонування вітростанції за паралельної роботи з промисловою електросистемою та в складі автономних систем електропостачання.



Рис. 1. Вітроелектростанція потужністю 160 кВт на науково-дослідному полігоні "Десна"

На полігоні також проводилися дослідження різних конструкцій геліоприймачів, фотоперетворювачів, теплових насосів, біоустановок, вітроелектричних і вітромеханічних агрегатів, систем акумулювання теплової та електричної енергії. На основі аналізу результатів досліджень з метою отримання оптимальних енергетичних і економічних показників проводилася компоновка комплексних енергосистем та їх випробування. Були побудовані три будинки-лабораторії з різними системами комплексного енергозабезпечення за рахунок відновлюваних джерел енергії та акумуляторів енергії (рис. 2).

Тепличне господарство полігону, енергозабезпечення якого відбувалось за рахунок використання сонячної та вітрової енергії, було оснащено тепловим акумулятором, в якому акумулювалась низькопотенціальна та надлишкова енергія від енергетичного обладнання на основі відновлюваних джерел для використання в періоди відсутності або недостатнього надходження енергії.

Більш детальний опис технологічних схем та режимів функціонування обладнання науково-дослідного полігону наведено в монографіях Г.І. Денисенка «Возобновляемые источники энергии» (1983) та «Комплексное использование возобновляемых источников энергии» (1984).



Рис. 2. Будинки-лабораторії з системою комплексного енергозабезпечення від відновлюваних джерел енергії

Необхідно відзначити, що ці роботи проводилися в часи, коли відношення до відновлюваної енергетики було досить скептичним, основну надію тоді покладали на традиційну енергетику, оскільки енергетикою майбутнього вважалася атомна енергетика.

Продовження науково-дослідних робіт в цій галузі здійснювалось в Інституті електродинаміки НАН України, де у 1987 році було створено Відділення комплексних енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії. Професору Г.І. Денисенку навіть в тяжкі економічні часи 90-х років минулого століття вдалось зберегти колектив вчених, які продовжували дослідження з перетворювання енергії відновлюваних джерел, в результаті чого було створено в 2003 році Інститут відновлюваної енергетики (ІВЕ) в складі Національної академії наук України.

Основні напрями науково-технічної діяльності ІВЕ НАН України узгоджуються з концептуальними положеннями проф. Денисенка Г.І. стосовно напрямків досліджень відновлюваної енергетики, а саме: технології й системи комплексного використання відновлюваних джерел енергії, фізико-технічні основи процесів перетворення та використання сонячної енергії, наукові основи перетворення та використання енергії вітру, теплофізичні основи використання геотермальної енергії, наукові основи процесів перетворення та використання енергії малих річок і енергії моря, наукові основи перетворення та використання відновлюваних органічних енергоносіїв. Задачі ІВЕ НАН України полягають в здійсненні фундаментальних і прикладних досліджень з метою одержання нових наукових знань в області фізико-технічних проблем відновлюваної енергетики, спрямованих на формування перспективних напрямків освоєння енергії нетрадиційних і відновлюваних джерел, перетворення і стабілізацію параметрів енергії, підвищення ефективності і надійності процесів перетворення енергії, автоматизацію й оптимізацію режимів енергетичних систем на основі відновлюваних джерел.

На сьогодні в Україні наукові дослідження процесів перетворення відновлюваних видів енергії трансформуються в практичну площину реалізації конкретних проектів. Станом на кінець 2018 року введено в експлуатацію 1400 МВт фотоелектричних станцій, 540 МВт вітроелектричних станцій, 99 МВт малих гідроелектростанцій, 97 МВт установок на органічній біомасі. Кабінетом Міністрів України затверджено Національний план дій з відновлюваної енергетики.

УДК 621.311

ДО ОПТИМАЛЬНОГО КОМБІНУВАННЯ ВІТРОВИХ ТА СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

М.П. Кузнєцов[1], докт. техн. наук, **О.В. Лисенко**[2], канд. техн. наук, **О.А. Мельник**[3], аспірант.

[1]Інститут відновлюваної енергетики НАН України
02094 вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ
[2]Таврійський державний агротехнологічний університет
72310 м. Мелітополь, пр-т Б. Хмельницького, 18.
[3]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
03056, м. Київ, пр-т Перемоги 37.

Метою даної роботи є визначення оптимального співвідношення різних джерел відновлюваної енергії в гібридних енергосистемах, базуючись на оцінках випадкової складової потужностей генерації та споживання електроенергії. Для цього розглядаються короткотермінові коливання потужності, спричинені природними змінами сонячної та вітрової енергії в діапазоні менше години. Такі зміни впливають на можливості регулювання частоти й напруги, а також стійкості систем електропостачання. Предметом дослідження є пропорція вітрової та сонячної генерації, а також її загальний рівень у споживанні електроенергії, а предметом оптимізації – варіативність сукупної генерованої потужності. Особливістю роботи є синхронне співставленні рівнів генерації енергії та її споживання різними локальними споживачами. Методи дослідження – математична модель комбінації випадкових процесів та безпосереднє використання статистичних даних в якості експериментальних. Методом оптимізації обрано побудову поверхні відгуку, що забезпечує візуалізацію результатів при задовільній точності. При необхідності результат уточнюється методом дихотомії. Результати дослідження порівнюються за рівнем впливу погодних факторів, для чого розглядаються дані різних пір року. Отримані залежності дозволяють також оцінити вплив енергетичної ефективності вітрової та сонячної енергетики як технологічного фактору. Істотним результатом є оцінка впливу точності прогнозування потужностей генерації і споживання на енергетичний баланс при складанні графіків роботи енергосистеми – так, наявність добового прогнозу дозволяє в півтора рази збільшити потужність ВДЕ при збереженні рівня варіативності. Встановлено наявність оптимальних співвідношень потужності ВЕС та СЕС, при яких мінімізується загальна варіативність енергобалансу. В умовах України це складає приблизно третину номінальної потужності ВДЕ за рахунок ВЕС та дві третини СЕС, однак результати суттєво залежать від сезону. Запропоновано критерії оптимальності, що враховують випадкову природу досліджуваних процесів, це дає можливість імовірнісної оцінки результатів. Бібл. 13, рис. 6.

***Ключові слова**: відновлювані джерела енергії, сонячна електростанція, вітрова електростанція, енергобаланс, випадковий процес, оптимізація.*

TO OPTIMAL COMBINATION OF WIND AND SOLAR ELECTRICITY

M. Kuznietsov, doctor of technical science, **O. Lysenko**, candidate of technical science, **A. Melnyk**, graduate student.

[1]Institute of renewable energy, NAS of Ukraine,
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv.
[2]Tavria State Agrotechnological University,
72310, 18 B.Khmelnitskoho Avenue, Melitopol.
[3]National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute",
03056, 37 Peremohy Av., Kyiv.

The purpose of the paper is to determine the optimal ratio of different sources of renewable energy in hybrid power systems, based on the estimation of the random component of power generation and electricity consumption. For this purpose short-term power fluctuations caused by natural changes in solar and wind energy in the time frame of less than an hour are considered. Such changes affect the performance of frequency and voltage regulation, as well as the stability of power supply systems. The subject of the study is the proportion of wind and solar generation with its overall level of electricity consumption and the point of optimization – the variability of the total generated power. The key feature of the work is the synchronous alignment of the levels of energy generation and consumption by different local consumers. Methods of research are a mathematical model of a combination of random processes and the direct use of experimental statistical data. The chosen method of optimization is the construction of the response surface, which provides the visualization of the results with satisfactory accuracy. If necessary, the result is specified by the method of dichotomy. The outputs of the study are compared with different weather factors, so the data of the different seasons were examines. The obtained dependencies also allow to estimate the influence of energy efficiency of wind and solar power engineering as a technological factor. Among the important results is when drawing up the schedules of the power system it is possible to estimate the influence of the prediction accuracy of generation and consumption capacities on the energy balance: the presence of a daily forecast allows to increase the power of RES in 1.5 times, while maintaining the level of variability. The existence of optimal ratios of the WPP and PV power with the minimum general variability of the energy balance is established. In Ukraine it is about one third of the rated power of the wind power and two thirds of the PV, but the results are significantly dependent on the season. The optimality criteria are considered, taking into account the random nature of the investigated processes, which gives the possibility of probabilistic estimation of the results. References 13, fig. 6.

***Keywords**: renewable energy sources, solar power station, wind power plant, energy balance, random process, optimization.*

© М.П.Кузнєцов, О.В.Лисенко, О.А.Мельник, 2019



М. П. Кузнецов
M. Kuznietsov

Відомості про автора: заступник директора Інституту відновлюваної енергетики НАН України, старший науковий співробітник, доктор технічних наук.
Освіта: Київський державний університет ім. Т. Шевченка, механіко-математичний факультет.
Наукова сфера: математика, відновлювана енергетика.
Публікації: понад 60, у тому числі 3 монографії.
ORCID: 0000-0002-0497-7439
Контакти: **тел./факс:** +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Author information: Deputy Director of the Institute of Renewable Energy at the NASU, Doctor of technical sciences.
Education: Taras Shevchenko Kyiv State University, Faculty of Mechanics and Mathematics.
Research area: mathematics, renewable energy.
Publications: over 60, including 3 monographs.
ORCID: 0000-0002-0497-7439
Conatacts: **tel./fax:** +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net



О. В. Лисенко
O. Lysenko

Відомості про автора: доцент кафедри енергетики та автоматизації Таврійського державного агротехнологічного університету, доцент, кандидат технічних наук.
Освіта: Таврійська державна агротехнічна академія, енергетичний факультет.
Наукова сфера: електропостачання, відновлювана енергетика.
Публікації: понад 40, у тому числі 4 патенти.
ORCID: 0000-0001-7085-7796
Контакти: **тел.:** +38 (061) 942-06-18
факс: +38 (061) 942-24-11
e-mail: office@tsatu.edu.ua

Author information: Associate Professor, Department of Energy and Automation Tavria State Agrotechnological University, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences.
Education: Tavria State Agrotechnical Academy, Energy.
Research area: power supply, renewable energy.
Publications: over 40, including 4 patents.
ORCID: 0000-0001-7085-7796
Contacts: **tel.:** +38 (061) 942-06-18
fax: +38 (061) 942-24-11
e-mail: office@tsatu.edu.ua



О. А. Мельник
O. Melnyk

Відомості про автора: аспірант, інженер-дослідник.
Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім.І.Сікорського», факультет електроенерготехніки та автоматики.
Область наукових інтересів: електроенерготехніка, відновлювана енергетика.
Публікації: 6.
ORCID: 0000-0003-2894-3476
Контакти: **тел./факс:** +38(044) 236-21-49
e-mail: aspirantura@kpi.ua

Author information: graduate student, research engineer.
Education: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Faculty of Electric Power Engineering and Automatics.
Main research interests: electric power engineering, renewable energy.
Publications: 6.
ORCID: 0000-0003-2894-3476
Contacts: **тел./факс:** +38(044) 236-21-49
e-mail: aspirantura@kpi.ua

Перелік використаних позначень та скорочень:

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
ВЕС – вітрова електростанція;
СЕС – сонячна електростанція;
$K_{\text{ввп}}$ – коефіцієнт використання встановленої потужності;
$P\{x\}$ – імовірність події x;
σ – середньоквадратичне відхилення (СКВ);
w – потужність ВЕС (в.о.);
s – потужність СЕС (в.о);
C_v – коефіцієнт варіації;
R – абсолютна потужність ВДЕ (кВт);
r – відносна потужність ВДЕ (в.о.).

Вступ. Змінний і слабо прогнозований в короткостроковій перспективі характер видачі потужності, властивий вітровій та сонячній енергетиці, може привести до негативного впливу на режими роботи енергосистеми. Це, зокрема, стосується стійкості динамічних процесів в системах електропостачання та відповідно організації диспетчерського управління енергосистемами. Крім того, збільшення частки вітрових (ВЕС) і сонячних (СЕС) електростанцій в енергосистемі буде витісняти традиційні електростанції, що ускладнить можливість регулювання частоти. Таким чином, має бути достатньо резерву для регулювання частоти і забезпечення надійного електропостачання в разі втрати генерації або навантаження, що особливо важливо для недостатньо гнучких енергосистем зі значним рівнем впровадження вітрової та сонячної енергетики.

Серед інших проблем важливими і актуальними можна вважати: неоптимальні режими роботи мережі, пов'язані зі стохастичним характером генерації [2]; можливість появи зворотного потоку потужності в електричній мережі, оскільки сучасні ВЕС, як і СЕС, підключаються до розподільних мереж через інвертори, які зазвичай спроектовані для роботи в певних межах напруги і частоти; при небалансі потужності може відбутись відключення від мережі і втрата «зеленої» енергії навіть при сприятливих погодних умовах;

Як бачимо, більшість проблем пов'язано з нерівномірним режимом генерації на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Поєднання різнотипних джерел енергії здатне знизити гостроту проблеми, вирівнявши режим генерації і зменшивши випадкову складову.

Постановка задачі. Вирішенню проблеми оптимізації комбінованих систем електропостачання присвячено ряд робіт українських та зарубіжних вчених. Зокрема, це питання вибору відновлюваних потужностей на основі оцінки їх впливу на балансову надійність [1]. В роботі [2] розглядаються методи моделювання та оптимізації автономних комбінованих систем електропостачання на основі аналізу їх техніко-економічних показників. Робота [3] присвячена аналізу сучасних методів оптимізації, призначених для малих і автономних енергосистем. Відзначено, що вдале математичне моделювання здатне забезпечити оптимізацію системи без значного обсягу метеорологічних даних. Сучасною тенденцією є також управління як генерацією енергії, так і її споживанням [4]. Огляд методів і моделей комбінованих систем електропостачання з точки зору мінімуму приведених витрат наведено в роботі [5]. Крім оптимізації за технічними показниками, опублікований ряд робіт, присвячених економічній оптимізації комбінованих електричних систем на основі ВДЕ [6], яке дозволяє також задовольнити технічні та екологічні обмеження.

Природна вимога при побудові комбінованої енергосистеми на базі відновлюваних джерел (ВДЕ) – мінімізація неконтрольованого розкиду значень генерованої потужності при максимізації виробленої енергії. В економічній постановці задачі оптимізації роль і вага середньої потужності ВДЕ та середньоквадратичного відхилення (СКВ) різна, вона визначається вартістю електроенергії і засобів резервування та/чи акумулювання, але кращий результат забезпечує наявність обох критеріїв.

Потреба оцінювати саме випадкову складову коливань потужності слідує з різних причин [7]. Значне впровадження ВДЕ, якщо воно не супроводжується достатнім акумулюванням енергії, потребуватиме балансування поточних коливань генерованої енергії. Буде потрібен достатній обсяг резерву для регулювання частоти та забезпечення надійного постачання у випадку швидкої зміни генерації чи навантаження. Баланс споживання електроенергії та регулювання частоти – основні технічні проблеми при значному рівні впровадження вітрової та сонячної енергетики [8]. При цьому зміна частоти в мережі пропорційна зміні регулюючої потужності (залежно від крутизни статичної частотної характеристики), що визначає допустиму зміну потужності (див. напр. «Основні вимоги щодо регулювання частоти та потужності в ОЕС України. Настанова» СОУ-Н ЯЕК 04.156:2009). Коливання напруги також пов’язані з небалансом генерації та споживання електроенергії. Це ж стосується і стійкості енергосистеми. Так, відповідно до СОУ-Н МЕВ 40.1.00100227-68:2012 «Стійкість енергосистеми. Керівні вказівки» вплив перепадів потужності на стійкість визначається за таким показником, як коефіцієнт запасу стійкості з активної потужності в контрольованому перетині (вузлі) електромережі, величина якого розраховується в залежності від амплітуди нерегулярних коливань активної потужності; саме розмах нерегулярних змін є визначальним при розрахунку запасу стійкості. Як свідчить аналіз статистичних даних, робота ВЕС і СЕС характеризується наявністю деякої середньої потужності та випадкової складової, що є функціями часу. Середня потужність може вважатися добре прогнозованою на короткотривалу перспективу, і вважатися контрольованим параметром [9]. Тоді обмеження мають бути накладені саме на випадкову складову балансу потужностей, яка й визначає величину запасу стійкості.

Методи і алгоритми розв’язку. Розглянемо спочатку сумісну роботу вітрової та сонячної станцій незалежно від способу споживання їх енергії (умовно на необмеженого споживача). Використаємо статистичні дані про погодні фактори, характерні для умов півдня України [10], та врахуємо нормовані показники потужності ВЕС та СЕС. Отже, позначимо: w – відносна частка номінальної потужності ВЕС, а s – відповідно

СЕС, при цьому прийнято: $w+s=1$. Тоді значення $w=1$ відповідає наявності лише ВЕС у складі блоку відновлюваної енергетики (ВДЕ), а $w=0$ – наявності лише СЕС.

Середньорічні показники генерованої потужності (P_c) та середньоквадратичного відхилення (СКВ) сумарної генерації ВЕС та СЕС при різних комбінаціях їх поєднання зображено на рис.1. Крім потужності та відхилень зображено їх пропорцію – коефіцієнт варіації: $C_v = \frac{\sigma}{P_c}$, де σ – СКВ.

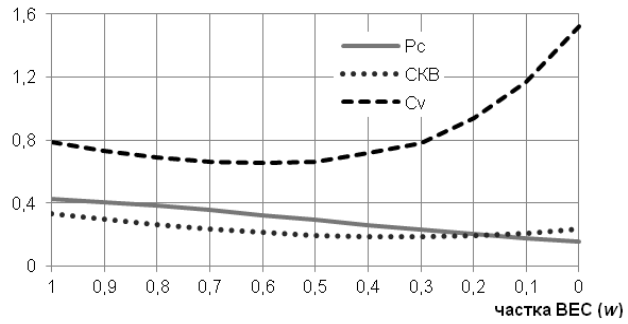


Рис. 1. Сумарна потужність ВЕС та СЕС (відносні величини)

Fig. 1. Total power of WPP and PV (relative values)

Використання встановленої потужності для вітроустановок традиційно вище порівняно з фотомодулями (це особливості їх технологій та клімату). Тому при зменшенні частки ВЕС середня потужність ВДЕ в даному прикладі падає внаслідок меншого загального коефіцієнту використання встановленої потужності ($K_{\text{ввп}}$), а показники мінливості мають нелінійний характер. При врахуванні повної доби мінімальне СКВ середньорічних значень досягається при частці ВЕС на рівні 0,32 загальної потужності ВДЕ, а мінімум коефіцієнта варіації C_v відповідає частці $w=0{,}56$. Якщо враховувати лише робочі години (8.00-18.00), то мінімум по СКВ – коли частка вітру рівна 0,33 (практично без мін); по C_v – 0,38 (бо середня розрахункова потужність СЕС вища). Отже, якщо за критерій брати лише коефіцієнт варіації потужності як комбінований показник відхилень та середньої потужності, то мінімум досягається при частці ВЕС 0,56 від сумарної потужності ВДЕ.

На рис.1 зображено сумарну мінливість власне ВДЕ (вітрової та сонячної енергії). Однак на практиці важливою є стабільність постачання енергії з урахуванням мінливої природи її споживання. Розглянемо сумісні коливання рівнів генерування електричної енергії від ВДЕ та її споживання різними споживачами (приклади споживання наведено в [10, 11]). При цьому вважаємо, що традиційна генерація забезпечує певний, передбачений заздалегідь, графік постачання енергії, а імовірні поточні відхилення від графіка складають небаланс потужності і відповідно енергії.

Рівень поточного споживання електроенергії звичайно має певні відхилення (флуктуації) відносно осередненого графіка. Їх розкид визначає потребу в компенсуючих потужностях (резервних чи акумулюючих), якщо осереднений графік споживання вважати плановим. Наявність ВДЕ з випадковим графіком генерації впливає на загальну варіативність потреб у традиційному постачанні енергії, оскільки випадковим чином змінює небаланс потужності. Поточне споживання за вирахуванням надходжень від ВДЕ іменують «чистим» навантаженням (net base load) в термінології [12]. Порівняємо розкид випадкових відхилень від осередненого графіка споживання для різних споживачів при варіюванні потужностями ВЕС та СЕС (вважається, що графік навантаження складено з урахуванням осередненого добового ходу ВДЕ).

Спочатку припускаємо, що прогнозування рівнів споживання та генерації не передбачено, і осереднення (тобто графік чистого навантаження) виконано по місячному масиву ретроспективних даних. При цьому потужності ВДЕ визначено як проектні за результатами попередніх досліджень. Сумарна номінальна потужність ВДЕ розраховується для різних рівнів впровадження, співмірних з потужністю споживання. Предметом оптимізації є варіативність навантаження (абсолютна та відносна) залежно від частки ВДЕ та пропорції «ВЕС/СЕС».

Формула побудови місячного набору даних про баланс генерації та споживання електроенергії, відповідно до припущення про плановий графік, має вигляд:

$$p_{ij} = (a_{ij} - a_i) - [(w_{ij} - w_i) + (s_{sj} - s_i)], \quad (1)$$

де a_x – рівень споживання електроенергії; w_x та s_x – потужність ВЕС та СЕС відповідно; i – індекс часу (в даних прикладах крок 30 хв.); j – номер доби. Тут p_{ij} – відхилення від графіка навантаження. Показники ВДЕ з одним індексом – осереднені на певну годину дня (добовий хід), зокрема a_i має відповідати плановому графіку споживання. Тоді $p_i = a_i - w_i - s_i$ відповідає плановому «чистому» навантаженню.

Перехід від встановленої (тобто номінальної) до середньої робочої (або ефективної) потужності можливий за допомогою коефіцієнта використання встановленої потужності $K_{\text{ввп}}$. Так, якщо сумарна номінальна потужність ВДЕ рівна R (Renewable), а ефективна – r (relative), то

$$r = R(k_w w + k_s s) = R[k_w w + k_s(1-w)], \quad (2)$$

де k_x – $K_{\text{ввп}}$ відповідного ВДЕ, притаманний досліджуваному регіону та порі року. Тоді розв'язками задачі оптимізації будуть $\mathbf{argmax_{R,w}} r$ та $\mathbf{argmin_{R,w}} D\{p_{i,j}\}$ (двокритеріальна задача) при умові виконання відповідних обмежень, де символом $D=\sigma^2$ позначено дисперсію. Пріоритетність критеріїв визначатиметься залежно від потреб і залежатиме головним чином від вартісних показників традиційної й відновлюваної енергії та засобів забезпечення енергобалансу.

В якості комбінованого одиничного критерію може виступати коефіцієнт варіації $C_V = \sigma / r$ як відношення СКВ до математичного очікування (а не номінального значення, як на рис.1); його мінімум є результатом як зростання ефективної потужності ВДЕ, так і зменшення варіативності.

Якщо визначати відносну варіативність як відношення додаткового СКВ до відповідної робочої потужності ВДЕ, характер залежності дещо зміниться (рис. 3б), хоча оптимальні пропорції збережуться. Так, при зростанні частки ВДЕ в загальній генерації СКВ навантаження зростає прискорено, а відносна варіація (C_{Vr}) – сповільнено.

Для коефіцієнта додаткової варіації прийнято:

$$C_V = (\sigma_R - \sigma_0)/R, \; C_{Vr} = (\sigma_R - \sigma_0)/r \;, \quad (3)$$

де індекс «R» стосується енергосистеми з ВДЕ, а «0» – без ВДЕ.

Результати. Виконаємо дослідження роботи енергосистем з різним рівнем впровадження ВЕС та СЕС при споживанні електроенергії, характерному для певних категорій споживачів. На рис. 2-3 зображено приклади результатів моделювання небалансу потужності для споживача типу невеликого населеного пункту при різних рівнях впровадження ВДЕ. Використано фактичні дані щодо споживання електроенергії та погодних факторів, а потужність ВДЕ змодельована для відповідних енергетичних характеристик. Для пошуку екстремуму в першому наближенні застосовано метод «поверхні відгуку» (response surface), а уточнення – методом дихотомії (dividing search).

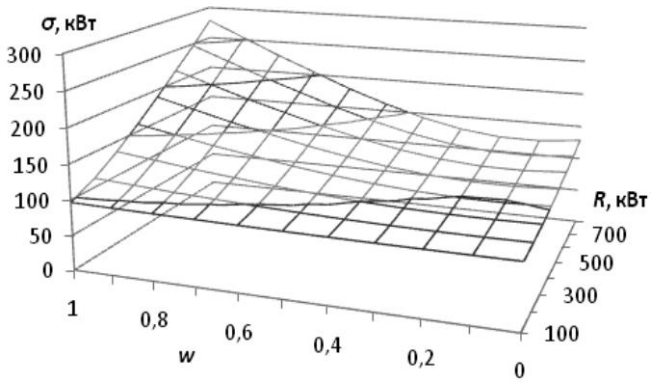


Рис. 2. Залежність СКВ від загальної потужності та складу ВДЕ (січень)

Fig. 2. Dependence of deviation on total capacity and composition of RES (January)

За результатами січня зазначимо, що мінімальна абсолютна дисперсія спостерігається при частці ВЕС w=0,1 (взимку роль сонячної енергії мінімальна). Відносна варіація мінімальна при частці ВЕС в межах від 0,2 до 0,3 (оптимальна частка ВЕС трохи зростає при збільшені рівня впровадження ВДЕ, рис. 3б).

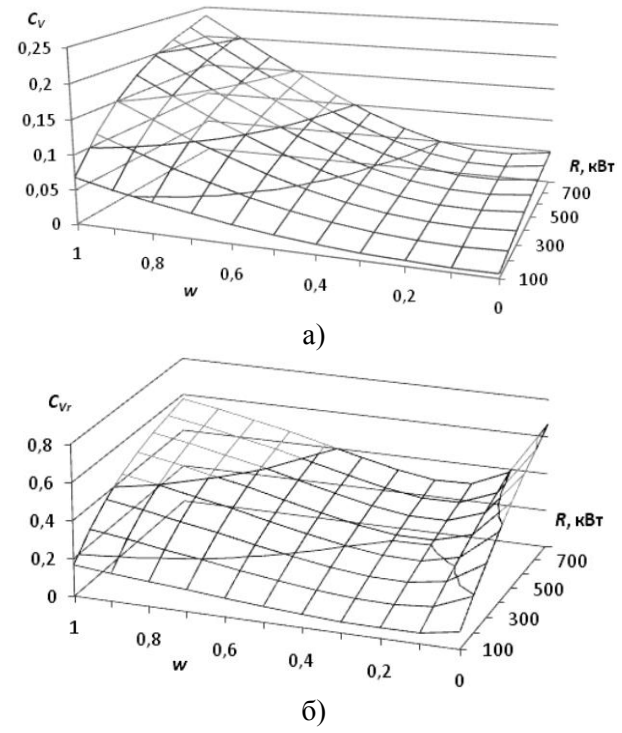


Рис. 3. Залежність додаткової варіативності C_V (а) та C_{Vr} (б) від рівня та складу ВДЕ

Fig. 3. Dependence of additional variability of C_V (a) and C_{Vr} (b) on level and composition of RES

Оптимальність конфігурації ВДЕ в локальній енергосистемі визначатиметься критерієм, обраним при виборі проектних рішень [13]. З розглянутих співвідношень вітрової та сонячної складових генерування електроенергії можна визначити варіанти з мінімальною дисперсією генерації ВДЕ, або з мінімальним відношенням дисперсії до середньої генерованої потужності. При врахуванні мінливого характеру споживання в енергосистемі можна відокремити додаткову мінливість, спричинену заміною частини контрольованої (традиційної, мережевої) генерації на ВДЕ. В цьому випадку можлива деяка кореляція режимів споживання та генерації, тому результуюча варіативність залежатиме від споживача. Однак, як показують дослідження, зокрема наведені вище, поточні флуктуації споживання та генерації на коротких (до години) часових інтервалах практично незалежні, а коефіцієнти кореляції можуть приймати як позитивні, так і негативні значення з малими (до 0,3) абсолютними величинами. Отже, характер додаткової варіативності внаслідок впливу ВДЕ визначатиметься переважно погодними факторами, властивими даному регіону та залежними від пори року.

Якщо в якості критерію обрано мінімізацію сукупної дисперсії або додаткової варіативності навантаження енергосистеми при впровадженні ВДЕ у складі вітрової та сонячної генерації, то оптимальним рішенням буде певна пропорція вітрової та сонячної складової за середньорічними чи сезонними погодними умовами (як правило, частка ВЕС має складати 10-40% сукупної номінальної потужності ВДЕ залежно від загальної частки ВДЕ). Такий розв'язок при наявності достатніх статистичних даних про погодні фактори знаходиться безпосередньо описаним вище шляхом.

В якості обмеження може бути вимога не перевищити певний рівень дисперсії. Тоді арбітражною зоною розв'язків буде крива горизонтального перетину поверхні відгуків (рис. 2, 3) на певній висоті. Однак природнішим виглядає обмеження не по дисперсії (чи СКВ), а по амплітуді випадкових відхилень (флуктуацій) від графіка навантаження. Якщо таке обмеження задано як максимально допустиме відхилення, то з урахуванням імовірнісної природи ВДЕ воно може виконуватися з певною вірогідністю. Відповідно до гіпотези про нормальний розподіл флуктуацій [11] теоретичні відхилення можуть досягати нескінченність, але з нульовою імовірністю. На практиці такі відхилення обмежені. В розглянутих вище прикладах для типових споживачів зафіксовані дані (за винятком екстремальних викидів, кількість яких обмежено як 0,3% випадків) знаходились всередині діапазону (Q_1–1,5·*IQR*; Q_3+1,5·*IQR*), де Q_1 та Q_3 – перший та третій квартилі розподілу; *IQR* – інтерквартильний розмах. В більшості прикладів розмах відхилень не перевищував 2,5σ. В межах цього діапазону розподіл можна вважати нормальним. Тоді обмеження по абсолютній величині відхилень ($p_{ij} \le p_0$) можна перевести в обмеження по величині СКВ:

$$\sigma_{\max} = \arg\{\Phi(p_0/\sigma) = \gamma\}, \qquad (4)$$

де Ф – інтеграл імовірності, γ – довірча імовірність. На графіку СКВ (рис. 2) це обмеження матиме вигляд кривої в горизонтальній площині, область під проекцією якої на координатну площину (*w*, *R*) містить допустимі розв'язки. Нехай рівняння цієї проекції: $R=\varphi(w)$, тоді оптимальним рішенням буде $w_0 = \arg\{r'(w) = 0\}$, або розв'язок рівняння

$$r'(w) = \phi'(w)[(k_w - k_s)w + k_s] + \\ +\phi(w)(k_w - k_s) = 0, \qquad (5)$$

де $r(w) = \varphi(w)[k_w w + k_s(1-w)]$ відповідно до формули (2). В такій постановці задача оптимізації стає детермінованою.

Як приклад розглянемо того ж споживача, для якого середньорічне навантаження становить 800 кВт, СКВ відхилень від графіка навантаження (флуктуацій споживання) по сезонах року: 90, 54, 67, 88 (кВт), а розмах флуктуацій протягом року ±200 кВт. Нехай умови оптимізації: максимум ефективної потужності ВДЕ при обмеженнях на флуктуації навантаження 250 кВт протягом 90% часу, тобто $P\{|p_{ij} - p_i| \le p_0\} \ge 0{,}9$, де p_0=250 кВт. Тут p_0 становить понад 30% середньої річної потужності навантаження. З умови (4) випливає: $\Phi(p_0/\sigma) \ge 0{,}95$ (з урахуванням симетрії розподілу) і звідси отримаємо $\sigma_{\max}$= 150 кВт. Для горизонтальних проекцій з рис.2 отримаємо графічне зображення функцій $R=\varphi(w)$ (рис.4).

Аналогічно, знаючи $\varphi(w)$ та використовуючи (2), можна побудувати залежності $r(w)$. Криві на рис.4 відповідають певним (в даному випадку

фактичним за січень 2016 р.) значенням продуктивності ВЕС та СЕС, тобто їх $K_{ввп}$. При інших значеннях k_w та k_s розташування екстремумів кривих змінюватиметься (рис.5).

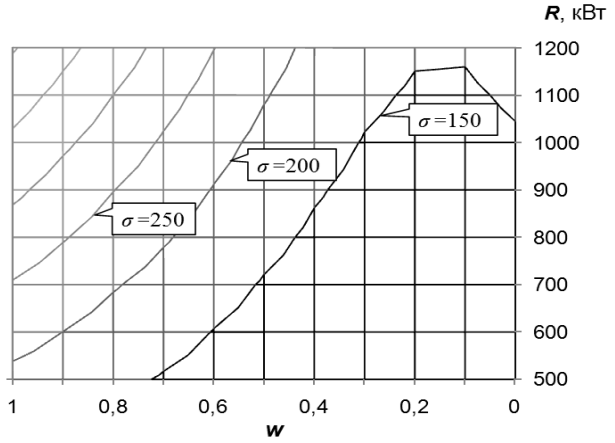


Рис. 4. Залежності *R=φ(w)* при різних значеннях допустимої СКВ (σ_{max})

Fig. 4. Dependence *R=φ(w)* at different values of the permissible deviation (σ_{max})

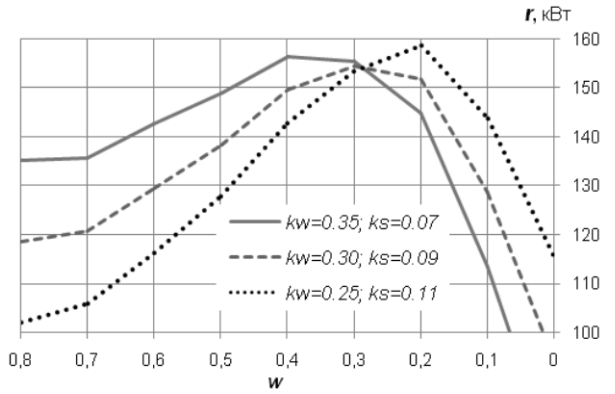


Рис. 5. Залежності *r(w)* при різних значеннях $K_{ввп}$ для ВЕС та СЕС

Fig. 5. Dependence *r(w)* at different values of capacity factor for WPP and PV

Для даних січня (рис.2, 4) область, для якої $\sigma \leq 150$ кВт, обмежена кривою з максимумом R=1150 кВт при частці ВЕС w=0,12. Максимум ефективної потужності ВДЕ досягається при частці ВЕС w_0=0,2-0,4; абсолютне значення залежить від $K_{ввп}$ сонячної та вітрової генерації, і знаходиться на рівні r=155-160 кВт для існуючих типів електроустановок. Для січня більш характерним є перший варіант $K_{ввп}$ з рис.5: k_w=0,35; k_s=0,07. Тоді перевага має надаватись вітровим установкам, приймаючи w_0=0,4. При загальній номінальній потужності ВДЕ 1150 кВт це означає 460 кВт ВЕС та 690 кВт СЕС.

Перевіримо таким же чином умови липня. Область, де $\sigma \leq 150$ кВт, обмежена кривою з максимумом R=1480 кВт при частці ВЕС w=0,12. Для значень $K_{ввп}$ липня (k_w=0,28; k_s=0,23) маємо максимум r= 350 кВт при частці ВЕС w_0=0,2. Тоді це означає 300 кВт ВЕС та 1180 кВт СЕС.

Для квітня k_w=0,44; k_s=0,19. Для R=1100 кВт маємо r= 285 кВт при w_0=0,28.

Для жовтня k_w=0,5; k_s=0,12. Для R=1050 кВт маємо r= 286 кВт при w_0=0,44.

Такими є результати оптимізації для окремих місяців. Якщо треба розрахувати оптимальну конфігурацію для всього року, необхідно брати до уваги весь масив даних, оскільки довірчі межі для розкиду флуктуацій навантаження мають стосуватися всього року. При цьому розподіл флуктуацій протягом року може бути нерівномірним, а в окремі місяці їх частка перевищуватиме середньорічний довірчий діапазон. В даному прикладі умова $\Phi(p_0/\sigma) \geq 0{,}95$ була застосована до кожного місяця, інакше мало б бути попередньо обумовлено можливість сезонної зміни конфігурації системи, тобто часткове обмеження роботи ВДЕ при варіації погодних умов. Отже, в загальному випадку область допустимих значень (w, R) буде обмежена найбільш жорсткими умовами. В даному прикладі це стосується внутрішньої області кривої σ =150 для січня (рис.4) на ділянці ($w \geq 0{,}2$). Оптимум по критерію максимуму ефективної потужності ВДЕ знаходиться на обмежувальній кривій. Для інтервалу ($0<w<0{,}2$) жорсткішими будуть обмеження жовтня, але цей інтервал не є оптимальним в кожному місяці (рис. 6).

Приведена оцінка не враховує питому вагу окремих місяців, які характеризуються різною ефективною потужністю ВДЕ. Коректніше було б представити повний набір річних даних шляхом складання частоти певних відхилень та визначення інтегральної функції їх розподілу. В цьому випадку осереднюються також значення $K_{ввп}$.

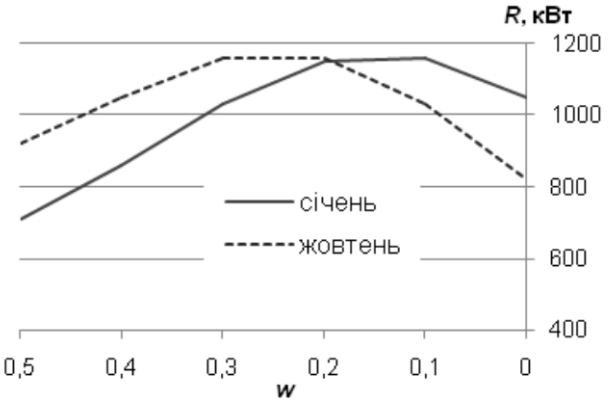


Рис. 6. Ізолінії *R* для σ =150 кВт в різні місяці

Fig. 6. Isolines R for σ = 150 kW in different months

Оцінка оптимальності виконувалася в припущенні, що графік навантажень побудовано за середньомісячними даними. Наскільки зміниться результат, якщо графік складатиметься з урахуванням прогнозу на кожну добу, причому прогноз стосуватиметься лише середньодобових значень? Для цього до середньомісячного добового ходу вносимо поправку на середньодобове значення розрахункової доби.

Максимальна допустима потужність ВДЕ при добовому прогнозуванні і при тих же обмеженнях: R=1550 кВт при w_0=0,25, а оптимальна 1450 кВт при w_0=0,35. При цьому максимум споживання ВДЕ рівний 361 кВт, річний $K_{ввп}$ ВДЕ становитиме 0,25. Отже, наявність прогнозування споживання та генерації за добу (з забезпеченням середньодобового значення) дозволить на 40% збільшити використання енергії ВДЕ при збереженні обмежень на розкид відхилень від графіка навантаження. Рівень $K_{ввп}$ також дещо зросте за рахунок збільшення частки ВЕС. Якщо ж потужність ВДЕ збережеться на тому ж рівні, то довірчий інтервал відхилень від графіка зменшиться з 250 КВт до 200 кВт, відповідно зменшиться потреба в компенсуючих потужностях.

Для перспективного моделювання можливих ситуацій потрібно встановити характер розподілу випадкових величин (метеофакторів і рівня споживання) та розрахувати параметри розподілу. Далі оптимізація виконується аналогічно, тільки замість відомого набору даних p_{ij} використовується їх імітація та статистична обробка методом Монте-Карло.

Якщо умовою оптимізації є обмеження на розкид відхилень від осередненого графіка споживання і можна аналітично оцінити оптимальні співвідношення різних видів ВДЕ (вітру та Сонця) за статистичними даними, які не обов'язково є синхронними; важливо оцінити параметри розподілу імовірності випадкових складових.

Якщо в якості обмеження виступає розмах відхилень (p_0) або відповідне СКВ ($\sigma_{\max}$), які пов'язані умовою (4): $\Phi(p_0/\sigma_{\max}) = \gamma$, то оцінку мінливості «чистого» навантаження можна здійснити за параметрами розподілу потужності ВДЕ. Нехай прогнозоване значення споживання, як осереднений добовий хід вважається відомим і є заданим графіком навантаження, який враховує і осереднені значення ВДЕ. Тоді дисперсія навантаження з урахуванням ВДЕ визначається як сума окремих складових:

$$\sigma_p^2 = D(p_{ij}) = D(a_{ij}) + D(w_{ij}) + D(s_{ij}) + \\ +2[\mathrm{cov}(a,w) + \mathrm{cov}(a,s) + \mathrm{cov}(w,s)]. \quad (6)$$

Вважаючи випадкові величини незалежними, як зазначено вище, приймаємо їх коваріації рівними нулю. Виходячи з фізичних обмежень на розмах флуктуацій потужностей ВЕС та СЕС, вважаємо їх СКВ пропорційними номінальній потужності:

$$\sigma_w = \alpha_w wR,\ \sigma_s = \alpha_s sR = \alpha_s(1-w)R. \quad (7)$$

Тоді граничні обмеження флуктуацій матимуть вигляд:

$$\sigma_p^2 = \sigma_{\max}^2 = \sigma_a^2 + \sigma_w^2 + \sigma_s^2 = \sigma_a^2 + \\ +R^2[\alpha_w^2 w^2 + \alpha_s^2(1-w)^2]. \quad (8)$$

Оскільки дисперсія потужності споживача не залежить від рівня впровадження ВДЕ і вважається відомою, то умову щодо обмежень на потужність ВДЕ можна представити у вигляді:

$$R\sqrt{\alpha_w^2 w^2 + \alpha_s^2(1-w)^2} = \sqrt{\sigma_{\max}^2 - \sigma_a^2} = const, \quad (9)$$

а критерієм оптимізації максимум ефективної потужності r (2). Шукаючи точку екстремуму r, як раціональної функції від w, отримаємо:

$$w_0 = \frac{\alpha_s^2 k_w}{k_s\alpha_w^2 + k_w\alpha_s^2}. \quad (10)$$

До даного розв'язку входять нормовані імовірнісні параметри лише ВДЕ незалежно від споживача, які визначаються типом обладнання та потенціалом ВДЕ, притаманним даному регіону та порі року. При цьому вигляд функції щільності розподілу не враховується, важливі лише показники дисперсії, що є певним спрощенням задачі. Самі дисперсії розраховуються за статистичними даними, що охоплюють декілька років (до трьох).

Якщо означений критерій застосувати до розглянутих вище прикладів, отримаємо для річного обсягу даних w_0=0,28 (при значеннях коефіцієнтів k_w=0,40; k_s=0,15; α_w=0,33; α_s=0,13). Це досить близько до результатів, отриманих ретроспективним аналізом для різних споживачів; деякі відхилення можуть бути спричинені наявністю кореляції складових балансу, хоч і загалом незначної. Значення для окремих місяців можуть

мати більші відмінності внаслідок імовірної кореляції на коротких часових інтервалах, проте річні значення досить стійкі, що важливо, адже проектна експлуатація має тривати роками.

Висновки. При масштабному впровадженні вітрової та сонячної генерації важливим є питання забезпечення балансу потужностей та відповідного виробництва і споживання електроенергії. За рахунок комбінування потужностей ВЕС та СЕС в певних пропорціях можливо зменшити випадкову складову генерації і тим самим уникнути значного небалансу. Оптимальне співвідношення вітрової та сонячної генерації залежить від кліматичних умов та енергетичних характеристик, зокрема коефіцієнта використання встановленої потужності. Крім того, оптимальність визначатиметься обраним критерієм, який може стосуватися як варіативності, так і сукупної продуктивності, економічної ефективності, тощо. Важливим фактором є також можливість прогнозування поточного споживання електроенергії та інтенсивності вітрової і сонячної енергії. Так, наявність прогнозу хоча б середньодобового рівня потужностей дозволяє в півтора рази збільшити обсяг впровадженої відновлюваної енергії при тому ж рівні стабільності енергопостачання.

1. *Лежнюк П., Комар В., Собчук, Д.* Оцінювання впливу джерел відновлюваної енергії на забезпечення балансової надійності в електричній мережі. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2013. 6. С. 45-47. URL: https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1005.

2. *Bernal-Agustín J.L., Dufo-Lopez R.* Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13. No. 8. Pp. 2111-2118. doi:10.1016/j.rser.2009.01.010.

3. *Bhandari B.* et al. Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review. International journal of precision engineering and manufacturing-green technology. 2015. Vol. 2. No. 1. Pp. 99-112.

4. *Wang X., Palazoglu A., El-Farra N.* Operational optimization and demand response of hybrid renewable energy systems. Applied Energy. 2015. Vol. 143. Pp. 324-335. doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.004

5. *Siddaiah R., Saini R.* A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 58. Pp. 376-396. doi:10.1016/j.rser.2015.12.281

6. *Bahramara S., Moghaddam M., Haghifam M.* Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 62. Pp. 609-620. doi:10.1016/j.rser.2016.05.039.

7. *Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Гончаренко І.С., Захаров А.М.* Обмеження потужності відновлюваних джерел енергії за умовами приєднання до електричної мережі. Праці ІЕД НАНУ. 2016. вип. 43. С. 18-23.

8. *Кузнєцов М.П., Ужейко С.О.* Імовірнісні аспекти використання відновлюваних джерел енергії в зоні відчуження Чорнобильської АЕС. Відновлювана енергетика. 2016. №3. С. 6-12.

9. *Кузнєцов М.П.* Вплив вітрової енергетики на статичну стійкість енергосистеми. Відновлювана енергетика. 2015. №3. С. 5-9.

10. *Лисенко О.В.* Оцінка випадкових властивостей рівнів споживання електроенергії. Відновлювана енергетика. 2018. № 1. С. 26-35.

11. *Кузнєцов М.П.* Побудова математичної моделі режиму споживання електроенергії. Відновлювана енергетика. 2017. № 4. С. 33-42.

12. *Olsson M., Perninge M., Soder L.* Modeling real-time balancing power demands in wind power systems using stochastic differential equations. Electric Power Systems Research. 2010. № 80. Pp. 966-974.

13. *Кузнєцов М.П., Лисенко О.В., Мельник О.А.* Особливості стохастичної оптимізації гібридних енергосистем на базі ВДЕ. Відновлювана енергетика. 2018. № 2. С. 6-15.

К ОПТИМАЛЬНОМУ КОМБИНИРОВАНИЮ ВЕТРОВОЙ И СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

М.П. Кузнецов[1], доктор технических наук, **О.В. Лисенко**[2], кандидат технических наук, **А.А. Мельник**[3], аспирант.

[1]Институт возобновляемой энергетики НАН Украины
02094 г. Киев, ул. Г.Хоткевича, 20А.
[2]Таврический государственный агротехнологический университет
72310 г.Мелитополь, ул. Б.Хмельницкого, 18.
[3]Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского».
03056, г. Киев, пр-т Победы, 37.

Целью данной работы является определение оптимального соотношения различных источников возобновляемой энергии в гибридных энергосистемах, основываясь на оценках случайной составляющей мощностей генерации и потребления электроэнергии. Для этого рассматриваются кратковременные колебания мощности, вызванные природными изменениями солнечной и ветровой энергии в диапазоне менее часа. Такие изменения влияют на возможности регулирования частоты и напряжения, а также устойчивости систем электроснабжения. Предметом исследования является пропорция ветровой и солнечной генерации, а также ее общий уровень в потреблении электроэнергии, а предметом оптимизации - вариативность совокупной генерируемой мощности. Особенностью работы является синхронное сопоставлении уровней генерации энергии и ее потребления различными локальными потребителями. Методы исследования - математическая модель комбинации случайных процессов и непосредственное использование статистических данных в качестве экспериментальных. В качестве метода оптимизации избрано построение поверхности отклика, что обеспечивает визуализацию результатов при удовлетворительной точности. При необходимости результат уточняется методом дихотомии. Результаты исследования сравниваются по уровню влияния погодных

факторов, для чего рассматриваются данные различных времен года. Полученные зависимости позволяют также оценить влияние энергетической эффективности ветровой и солнечной энергетики как технологического фактора. Существенным результатом является оценка влияния точности прогнозирования мощностей генерации и потребления на энергетический баланс при составлении графиков работы энергосистемы – так, наличие суточного прогноза позволяет в полтора раза увеличить мощность ВИЭ при сохранении уровня вариативности. Установлено наличие оптимальных соотношений мощности ВЭС и СЭС, при которых минимизируется общая вариативность энергобаланса. В условиях Украины это составляет примерно треть номинальной мощности ВИЭ за счет ВЭС и две трети СЭС, однако результаты существенно зависят от сезона. Предложены критерии оптимальности, учитывающие случайную природу исследуемых процессов, что дает возможность вероятностной оценки результатов. Библ. 13, рис. 6.

***Ключевые слова**: возобновляемые источники энергии, солнечная электростанция, ветровая электростанция, энергобаланс, случайный процесс, оптимизация.*

REFERENCES

1. *Lezhniuk, P., Komar, V. i Sobchuk, D.* Otsiniuvannia vplyvu dzherel vidnovliuvanoi enerhii na zabezpechennia balansovoi nadiinosti v elektrychnii merezhi. [Assessment of the impact of renewable energy sources on the reliability of the electrical network]. Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute. 2013. No. 6 Pp. 45-47. Retrived from https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1005. [in Ukrainian].

2. *Bernal-Agustín J.L., Dufo-Lopez R.* Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13. No. 8. Pp. 2111-2118. doi:10.1016/j.rser.2009.01.010. [in English].

3. *Bhandari B.* et al. Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review. International journal of precision engineering and manufacturing-green technology. 2015. Vol. 2. No. 1. Pp. 99-112. [in English].

4. *Wang X., Palazoglu A., El-Farra N.* Operational optimization and demand response of hybrid renewable energy systems. Applied Energy. 2015. Vol. 143. Pp. 324-335. doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.004 [in English].

5. *Siddaiah R., Saini R.* A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 58. Pp. 376-396. doi:10.1016/j.rser.2015.12.281 [in English].

6. *Bahramara S., Moghaddam M., Haghifam M.* Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. vol. 62. Pp. 609-620. doi:10.1016/j.rser.2016.05.039. [in English].

7. *Pavlovskyi V.V., Lukianenko L.M., Goncharenko I.S., Zaharov A.M.* Obmezhennya potuzhnosti vidnovlyuvanykh dzherel enerhiyi za umovamy pryyednannya do elektrychnoyi merezhi. [Limitation of res power under the terms of connection to electric network]. Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2016. No. 43. Pp.18-23. [in Ukrainian].

8. *Kuznietsov M., Uzheyko S.* Imovirni aspekty vykorystannya vidnovlyuvanykh dzherel enerhiyi v zoni vidchuttya Chornobylskoyi AES. [Probabilistic aspects of renewable energy using in the Chernobyl zone]. Vidnovluvana Energetika. 2016. No. 3(46). Pp. 6-12. Retrived from http://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/128[in Ukrainian]

9. *Kuznietsov M.P.* Vplyv vitrovoi enerhetyky na statychnu stiikist enerhosystemy [Influence of wind energy on the static stability of the grid]. Vidnovliuvana enerhetyka. 2015. No.3. Pp. 5-9 [in Ukrainian].

10. *Lysenko, O.* Otsinka vypadkovykh vlastyvostei rivniv spozhyvannia elektroenerhii. [Estimation of random properties of electricity consumptionlevels]. Vidnovluvana Energetika. 2018. No. 1(52). Pp.26-35. Retrieved from http://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/8 [in Ukrainian].

11. *Kuznietsov M.* Pobudova matematychnoi modeli rezhymu spozhyvannia elektroenerhii. [Construction of a mathematical model of electricity consumption mode]. Vidnovluvana Energetika. 2017. No. 4(51). Pp. 33-42. Retrieved from http://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/19 [in Ukrainian].

12. *Olsson M., Perninge M., Soder L.* Modeling real-time balancing power demands in wind power systems using stochastic differential equations. Electric Power Systems Research. 2010. No. 80. Pp. 966-974. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.01.004. [in English].

13. *Kuznietsov M.P., Lysenko O.V., Melnyk O.A.* Osoblyvosti stokhastychnoi optymizatsii hibrydnykh enerhosystem na bazi VDE. [Features of stochastic optimization for hybrid power systems with the renewable sources]. Vidnovluvana Energetika. 2018. No.2. Pp. 6-15. [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції: 08.01.19
Остаточна версія: 12.03.19

УДК 544.522:541.138:621

ТЕРМІЧНА СТІЙКІСТЬ ТА КІНЕТИКА ДЕСОРБЦІЇ ВОДНЮ З ГІДРИДНОЇ ФАЗИ MgH_2 МЕХАНІЧНОГО СПЛАВУ МАГНІЮ З Si, Ti, Fe

О.Г. Єршова, старш. наук. співр., канд. техн. наук., **Ю.М. Солонін,** академік НАН України, докт. фіз.-мат. наук,
В.Д. Добровольський, старш. наук. співробітник, канд. фіз.-мат. наук, **А.Ю. Коваль,** старш. наук. співр., канд. фіз.-мат. наук.

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України,
м. Київ, 03680, вул. Кржижановського, 3

Незважаючи на те, що вчені приділяють велику увагу гідриду магнію, методам його отримання і дослідження властивостей, останній все ще не знайшов широкого застосування в якості акумулятора водню для автомобільної промисловості через труднощі двох основних недоліків: високу температуру (300 ° С при 0, 1МРа H_2) і його повільної кінетики дисоціації. У даній роботі з метою зниження температури, поліпшення кінетики розкладу стехиометрического гідриду MgH_2 була досліджена можливість його комплексного легування Si, Ti, Fe з використанням методу реактивного механохімічного легування (РМС). Механічний сплав (МС) Mg + 10% ваг. Si + 2% ваг. Ti + 2% ваг. був синтезований і його фазовий склад, мікроструктура, водородосорбціонние властивості, термічна стабільність і кінетика десорбції водню були досліджені з використанням методів рентгенівської дифракції (XRD), скануючої електронної мікроскопії (SEM) і термодесорбціонної спектроскопії (TDS). Для оцінки впливу комплексного легування Ti, Fe, Si на температуру розкладання і термостабільність, ізобари десорбції водню з фази MgH_2 отримані при першому нагріванні після РМС зразків МС і після подальшого циклічного гідрування з газової фази. Всі ізобари були отримані при тиску водню в реакторі 0,1 МПа і швидкості нагріву зразка 3 ^{O}/хв. Вони були використані для визначення як температури початку десорбції водню (Тн.) з гидридной фази MgH_2 МС, так і температури $T_{мак.}$, що відповідає максимальній швидкості виділення водню. Кінетичні криві десорбції водню з механічного сплаву-композиту отримані при постійному тиску водню 0,1 МПа в реакторі і температурах 310 і 330 °С. Їх використовували для визначення часу виділення половини кількості водню ($\tau_{1/2}$) і загальної кількості водню (τ_n) для МС. Виявлено, що добавки Si, Ti, Fe до магнію значно покращують кінетику десорбції водню з гидридной фази MgH_2 отриманих МС. Однак ефект зниження термодинамічної стабільності гидридной фази MgH_2 в результаті її комплексного легування не спостерігається. Розроблені матеріали дозволяють використовувати їх в стаціонарних умовах застосування. Бібл. 23, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: *механічний сплав, мікроструктура, термодесорбційна спектроскопія, воденьсорбційні властивості, термічна стійкість, кінетика десорбції водню.*

THERMAL STABILITY AND KINETICS OF HYDROGEN DESORPTION FROM THE HYDRIDE PHASE OF THE MgH_2 OF A MECHANICAL ALLOY OF MAGNESIUM WITH Si, Ti, Fe

O.G. Ershova, senior researcher, candidate of technical science, **Y.M. Solonin,** academician of the NAS of Ukraine, doctor phys.-math. sciences, **V.D. Dobrovolsky,** senior researcher, candidate phys.-math. sciences, **A.Y. Koval,** senior researcher, candidate phys.-math. sciences.

Frantsevych Institute for Problems of Materials Science, National Academy of Sciences of Ukraine
3, Krzhyzhanivsky Street, UA-03142 Kyiv, Ukraine

Despite much attention of scientists paid to magnesium hydride, methods of its obtaining and properties investigation, the latter still has not found wide applications as a hydrogen material-accumulator for automotive industry because of the difficulty of two major drawbacks: high temperature (300 ^{0}C at 0,1MPa H_2) and its slow dissociation kinetics. In this work, with the aim of lowering the temperature, improvement the kinetics of the decomposition of stoichiometric MgH_2 hydride the possibility of its complex doping by Si, Ti, Fe using the method of reactive mechanochemical alloying (RMA) has been investigated. Mechanical alloy (MA) Mg + 10 % wt. Si + 2 % wt. Ti + 2 % wt. Fe have been synthesized and its phase composition, microstructure, hydrogen-sorption properties, thermal stability and hydrogen desorption kinetics have been investigated employing the X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and thermodesorption spectroscopy (TDS) methods. To evaluate the influence of complex alloying by Ti, Fe, Si on decomposition temperature and thermal stability of MgH_2 phase hydrogen desorption isobars have been obtained at the first heating after RMA synthesis of MA samples and after the next cyclic hydrogenation from gas phase. All isobars were obtained at hydrogen pressure in the reactor 0.1 MPa and sample heating rate of 3 °/min. They were used to determine both the hydrogen desorption beginning temperature ($T_{beg.}$) from hydride phase MgH_2 of MA and temperature T_{max}, that corresponds to the maximum speed of hydrogen release. The kinetic curves of hydrogen desorption from mechanical alloy-composite has been obtained at the constant hydrogen pressure of 0,1 MPa in the reactor and temperature 310 and 330 ^{0}C. They were used to determine both the hydrogen time release of half of hydrogen quantity ($\tau_{1/2}$) and total hydrogen quantity release (τ_t) for MA. It is found that Si, Ti, Fe additives to magnesium significantly improve hydrogen desorption kinetics from MgH_2 hydride phase of obtained MAs. However, the effect of thermodynamic stability reducing of MgH_2 hydride phase as a result of its complex doping was not observed. The developed materials allow their use at stationary application conditions. Ref. 23, tab. 2, fig. 7.

Keywords: *mechanical alloy, microstructure, thermodesorption spectroscopy, hydrogen-sorption properties, thermal stability, kinetics of hydrogen desorption.*

© О.Г.Єршова, Ю.М.Солонін, В.Д.Добровольський, А.Ю.Коваль, 2019



О.Г. Єршова
O. Ershova

Відомості про автора: старш. наук. співр., канд. техн. наук. відділу структурна хімія твердого тілу інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.
Освіта: Дніпропетровський металургійний інститут, за спеціальністю «металознавство, устаткування та технологія термічної обробки металів.
Наукова сфера: Розробка водневометалогідридних технологій, матеріалів для потреб водневої енергетики. Дослідження механізмів взаємодії металів з воднем в залежності від характеру хімічних зв'язків та структурного стану. Рентгеноструктурний аналіз, рентгенівська абсорбційна спектроскопія. Вплив електронної структури, хімічного стану поверхні гідридних сполук на їх термодинамічні характеристики.
Публікації: 116
ORCID: 0000-0003-1812-862 X
Контакти: +38 0952434763
Fax: +38 044 390 87 51
E-mail: dobersh2017@ukr.net

Author information: senior researcher, candidate of technical scienceof the departmen of structural chemistry of solids state of Frantsevycha Institute for problems of materials science of NAS of Ukraine.
Education: Dnipropetrovsk Steel Institute, degree in "metallurgy, equipment and technology for heat treatment of metals."
Research area: The development of hydrogen-metal- hydride technology for the needs of hydrogen energy. Revrsidle Hydrogen Storage Materials Investigation of the mechanisms of interaction of metals with hydrogen, depending on the nature of the chemical bond and the structural state. X-ray diffraction, X-ray absorption spectroscopy. Influence of the electronic structure, chemical state of the surface of hydride compounds on their thermodynamic properties.
Publications: 116
ORCID: 0000-0003-1812-862 X
Contacts: +38 0952434763
Fax: +38 044 390 87 51
E-mail: dobersh2017@ukr.net



Ю.М. Солонін
Yu. Solonin

Відомості про автора: Директор інституту проблем матеріалознавства НАН України, проф., академік НАН України.
Освіта: Київський політехнічний інститут, інженер-металург, фізика металів.
Наукова сфера: матеріалознавство і хімія твердого тіла, передові матеріали, спечені матеріали на основі тонких порошків, метастабільні та нанокристалітні фази, інтерметали,що створюють гідриди; металгідридни технології, нікель метал- гідридни акумуляторні батареї.
Публікації: 305
ORCID: 0000-0002-8068-1023
Контакти: +380969645253

Author information:
Director of IPMS NAS of Ukraine, prof., academician of the NAS of Ukraine.
Education: Kyiv polytechnic institute, engineer-metallurgist, physics of metals.
Reasearch area: materials science & solid state chemistry, advanced materials, sintered materials based on fine powders, metastable & nanocrystalline phase, hydride-forming intermetallics, metal hydride technology, nickel-metal hydride rechargeable batteries.
Publications: 305
ORCID: 0000-0002-8068-1023
Contacts: +380969645253



В.Д. Добровольський
V. Dobrovolsky

Відомості про автора: старш. наук. співр., канд. фіз.-мат. наук. відділу структурна хімія твердого тілу інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.
Освіта: Київський національний університет ім.Т. Шевченка за спеціальністю «фізик».
Наукова сфера: Дослідження атомної та електронної будови методами рентгенівської фотоелектронної, абсорбційної спектроскопії, хімія поверхні, воденьсорбційні та термодинамічні властивості гідридів інтерметалідів та РЗМ, гідридних фаз механічних сплавів на основі Mg, Ti., Дослідження в напрямку водневого матеріалознавства, зокрема рентгеноспектроскопічні дослідження електронної структури та природи хімічних зв'язків метал–водень в гідридах інтерметалічних,кісеньстабілізованих сполук.
Публікації: 219
ORCID: 0000-0002-7325-4103
Контакти: +380951347537

Author information: senior researcher, candidate phys.-math. sciences, departmen of structural chemistry of solids state of Frantsevycha Institute for problems of materials science of NAS of Ukraine.
Education: National Shevchenko University, Kiev, by specialty physicist.
Research area: The main scientific interests are devoted to researches of atomic and electronic structure by the method of X-ray photoelectron absorption spectroscopy, surface chemistry, hydrogen sorption and thermodynamic properties of intermetallide hydrides and REM, hydrated phases of mechanical alloys on the basis of Mg, Ti. Research in the direction of hydrogen material science, in particular X - ray spectroscopic studies of the electronic structure and the nature of the metal - hydrogen chemical bond in the hydrides of intermetallic, oxygen stabilized compounds.
Publications: 219
ORCID: 0000-0002-7325-4103
Contacts: +380951347537



О.Ю. Коваль
O. Koval

Відомості про автора: старш. наук. співр., канд. фіз.-мат. наук. відділу фізики міцності та пластичності Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевіча НАН України.
Освіта: Московський Фізико-Технічний Інститут за фахом автоматика та електроніка, інженер-фізик.
Наукова сфера: Дослідження впливу температури на механізми руйнування, крихко-в'язкого переходу та механічних властивостей матеріалів методом скануючої електронної мікроскопії.
Публікації: 117
ORCID: 0000-0002-1328-9566
Контакти: +380674418790

Author information: senior researcher, candidate phys.-math. sciences., departmen physics strength and plasticity, Institute of material science NAS Ukraine.
Education: Moscow Physical-Technical Institute, by specialty automatic and electronic, engineer-physic.
Reasearch area: Investigation influence of temperature on fracture micromechanisms, brittle-to-ductile tansition, mechanical behavior by method of scanning electron microscopy.
Publications: 117
ORCID: 0000-0002-1328-9566
Contacts: +380674418790

Вступ. Чисті енерготехнології, які використовують в якості енергоносія водень, можуть гармонійно поєднуватись з системами, що базуються на відновлюваних джерелах енергії (ВДЕ), в першу чергу сонячної, вітрової, геотермальної та ін. Якщо послідовно стояти на позиції використання водню як найбільш ефективного, технологічного і чистого енергоносія, то і отримувати його треба використовуючи також чисте первинне джерело енергії, а саме, в першу чергу, Сонце або вітер. Таким чином, маючи на увазі таке органічне поєднання відновлюваної енергетики та водневих технологій, можна говорити про відновлювально-водневу енергетику. Для широкого застосування транспортних засобів на паливних елементах з водневим паливом мають важливе значення розробки прийнятного бортового сховища водню [1-3]. Розв'язання фундаментальних задач розробки систем і технологій зберігання молекулярного водню, зокрема зручного і безпечного зберігання водню на борту транспортних засобів, потребує створення нових воденьсорбційних матеріалів. Безпечне та компактне зберігання водню в твердому середовищі є найбільш прийнятним з точки зору потреби водневої економіки стосовно до мобільних та стаціонарних прикладань.

Властивості великої кількості систем метал-водень сьогодні добре відомі. Однак широкомасштабне використання гідридів металів і сплавів для зберігання водню стримується тим, що більшість з них повністю або частково не задовольняють вимогам, які пред'являє до матеріалів-сорбентів водню практика і зокрема воднева енергетика. Деякі сплави магнію, композити на його основі виявились найбільш перспективними з точки зору оптимального поєднання таких властивостей, як висока воднева ємність, високі кінетичні характеристики, прийнятна вартість. Не дивлячись на велику увагу вчених, яку за останні рокі було приділено дигідриду магнію [4-23], методам його отримання та дослідженню властивостей, останній все ще не знаходить широкого практичного застосування в якості матеріала - акумулятора водню, зокрема для автомобільної промисловості, із-за труднощів з усунення двох істотних недоліків: високої температури ($\geq$300 ^{0}C при 1 bar H_2) та повільної кінетики дисоціації. Головна проблема полягає в тому, що одночасно із зниженням температури розкладу треба досягти збільшення швидкості цього процесу при збереженні високої водневої ємності та циклічної стійкості гідридної фази MgH_2. Роль окремо кожного з легуючих елементів Al, Ti, Mn, Fe, Ni у зниженні температури розкладу стехіометричного гідриду MgH_2, отриманого методом реактивного механічного сплавлення (РМС), досліджена нами раніше [7, 8, 10, 19] так само, як і роль парного легування Al + Ti, Al + Fe, Al + Ni [9, 11, 20, 21]. Дане дослідження, а саме дослідження можливості комплексного легування гідриду магнію MgH_2 одночасно Si, Fe, Ti з метою зниження температури та покращення кінетики його дисоціації, є логічним продовженням вищевказаних попередніх наших досліжень, а також досліджень [22, 23].

В даній роботі ставилась задача отримати механічний сплав (МС) складу **Mg + 10 % ваг. Si + 2 % ваг. Fe + 2 % ваг. Ti** методом РМС, дослідивши саме при тиску водню в реакторі 0,1 МПа процеси десорбції водню з його гідридної фази MgH_2 методом термодесорбційної спектроскопії (ТДС); визначити воденьсорбційні властивості і термічну стійкість отриманого МС і дослідити кінетику процесу десорбції водню з нього. Ставилась також задача встановити, чи відбувається завдяки вибраному складу легуючих елементів і методу отримання МС зниження ентальпії утворення гідридної фази MgH_2 і, як наслідок, рівноважної температури її розкладу. На зразках МС після їх циклічного гідрування – дегідрування простежити, як змінюється мікроструктура та фазовий стан МС; як змінюється ефект впливу добавок Ti, Si і Fe на термічну стійкість і температуру розкладу гідридної фази MgH_2 в результа-

ті циклічного гідрування з газової фази. Очікувалось, що результати вказаних досліджень сприятимуть визначенню складу легуючих елементів і умов отримання механічного сплаву, які можуть забезпечити максимально низьку термічну стійкість і температуру розкладу його гідридної фази MgH_2 з одночасним покращенням кінетики сорбції – десорбції водню з неї.

Методи досліджень. Для виготовлення механічних сплавів використовували вихідні технічні порошки Mg, Si, Ti, Fe чистотою 99,98 %, які мали середній розмір частинок 100; 3; 6,7; 10 мкм відповідно. Механічне сплавлення реактивним помелом суміші порошків Mg + 10 % ваг. Si + 2 % ваг. Fe + 2 % ваг. Ti проводили в кульовому млині фірми "Retch" із сталевими кулями в середовищі водню (тиск водню 1,0 МПа, швидкість обертання 450 об./хв., час помелу 20 год.). Пряме гідрування із газової фази зразку МС проводили при тиску водню в реакторі 6,0 МПа і температурі 400 ^{0}C. Співвідношення маси металевих куль до маси оброблюваної суміші порошків складало 20:1. Рентгенофазовий аналіз зразку отриманого МС виконували на автоматичному комп'ютеризованому дифрактометрі типу ДРОН-3М. Дифрактограми отримували в мідному випромінюванні з графітовим монохроматором на дифрагованих променях. З'йомку профілю дифракційних ліній виконували по точкам з кроком сканування $0,1^0$ і часом витримки в кожній точці спектру 20 с. Для дослідження морфології порошків сплаву була застосована скануюча електронна мікроскопія. Дослідження виконували на електронному мікроскопі високої роздільної здатності марки JEOL-JMS-7000M.

Результати та їх обговорення. На рис.1 приведено дифрактограму від зразку механічного сплаву МС (Mg + 10 % ваг. Si + 2 % ваг. Fe + 2 % ваг. Ti) після його синтезу методом РМС. Аналіз отриманої дифракційної картини дозволяє зробити висновок, що в результаті реактивного механічного сплавлення отримано композит. Так, на дифракційному спектрі МС зареєстровано дифракційні рефлекси, які належать гідридній фазі MgH_2 та гідридній фазі γ-MgH_2 (з тетрагональною та орторомбічною структурою відповідно), фазам чистого кремнію та заліза, фазі сполуки Mg_2Si з кубічною структурою. На цьому дифракційному спектрі також зареєстровано рефлекси фази TiH_2, яка утворилася під час помелу вихідної суміші в атмосфері водню, і рефлекси оксиду $(Mg)_{0.91}$ $(Fe0)_{0.09}$ в області подвійного кута Брегга $42,79^0$ та $62,12^0$. Дифракційні лінії всіх фаз механічного сплаву-композиту МС помітно розширені, що є наслідком суттєвого механічного диспергування під час синтезу та накопичення великої кількості дефектів і спотворень кристалічної гратки. Визначені повнопрофільним методом Рітвельда параметри кристалічної гратки гідридної фази MgH_2 отриманого композиту і об'єм V її елементарної комірки виявились рівними: a = 4,5123 Å; c = 3,0345 Å; V = 61,684 Å^3. Існування впливу циклічного гідрування-дегідрування на фазовий склад МС перевіряли на зразку, який було прогідровано в 5-му циклі. З дифрактограми від цього зразку, яка приведена на рис. 2, видно, що в результаті перших 5 циклів дегідрування-гідрування відбулися зміни у фазовому складі цього механічного сплаву-композиту: не виявлено рефлексів фази γ-MgH_2 та фази кремнію. Судячи по інтенсивності дифракційних ліній фази Mg_2Si, її кількість в зразку МС після 5 циклів гідрування з газової фази помітно збільшилась. На дифракційному спектрі виявлено рефлекси, які належать гідридним фазам MgH_2 та TiH_2, оксиду$(MgO)_{0,91}$ $(Fe0)_{0,09}$ і залізу.

Для дослідження морфології порошків сплаву **МС (Mg + 10 % ваг. Si + 2 % ваг. Fe + 2 % ваг. Ti),** так само як і порошків сплавів МС (Mg+5% ваг. Si +2% ваг. Fe+5% ваг. Ti) та МС (Mg+5% ваг. Si+5% ваг. Fe+2% ваг. Ti), які вже були нами досліджені [22,23], була застосована скануюча електронна мікроскопія. На рис.3 представлена мікроструктура трьох вищевказаних МС. Морфологія порошків механічного сплаву с 10 % ваг. Si представлена на рис.3 а,б. Добре видно, що після механічного диспергування порошки уявляють собою суміш часток з їх розміром від 0,1 мкм до 0,5 мкм и агломератів з розмірами від 2 до 5 мкм (рис.3, а). Виходячи з отриманих нами експериментальних даних, середній розмір часток, який в свою чергу складається з нанозерен (середній розмір котрих дорівнює 9-12 нм), у МС с 10 % ваг. Si складає 0,3 мкм. Після неодноразового гідрування-дегідрування порошків із газової фази, як показали дослідження їх мікроструктури, середній розмір часток зменшується (рис.3, б), а середній розмір зерен внаслідок циклічного нагрівання-охолодження збільшується до 50–70 нм. Ці дані корелюють з даними рентгенофазового аналізу. Порівнюючи дифракційні рефлекси від зразку МС до та після циклювання, можна спостерігати в останньому випадку їх помітне звуження (рис.1 та рис.2).

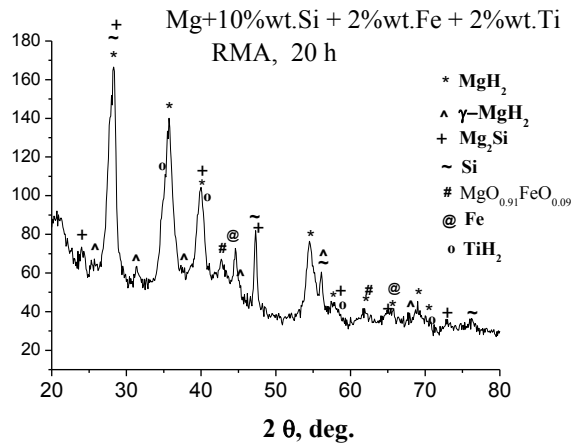


Рис. 1. Дифракційна картина від зразку механічного сплаву МС після його синтезу методом РМС протягом 20 годин.

Fig 1- X-ray diffraction pattern for a specimen of the mechanical alloys MA obtained by reactive mechanical alloying 20h.

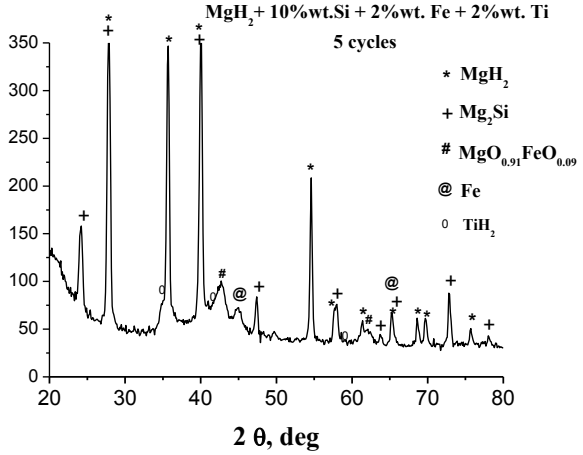


Рис. 2. Дифрактограма від зразку механічного сплаву МС після його гідрування в 5-му циклі.

Fig. 2. X-ray diffraction pattern for a specimens of the mechanical alloys MA after hydrogenation from the gaseous phase in 5-th cycle.

Порівнюючи мікроструктури всіх трьох механічних сплавів з різним вмістом домішки Si, Ti, Fe, можна побачити, що порошки після РМС мають частки неправильної форми, які агломеруються разом, з типовою для порошкоподібних структур морфологією. Має місце широкий розподіл часток за розмірами в діапазоні від 0,1 мкм до 8 мкм. Встановлено, що однорідність часток за розміром підвищується для зразків з більшим вмістом кремнію. Доля часток з середнім розміром 0,1-0,5 мкм у сплаві з 10% ваг. Si складає 70% (рис.3, а, б), в той час, як у сплавів з 5% ваг. Si доля таких часток складає приблизно 30% (рис.3, в-е). Кремній в композитах в процесі помелу допомагає подрібненню часток утворюваного гідриду магнію в наслідок своєї природної міцності. У порошків сплаву з 10% ваг. Si після перших циклів їх гідрування-дегідрування (рис.3 б) спостерігається менша кількість крупних агломератів, в той час як в зразках механічних сплавів з 5 % ваг. Si (рис.3 г, е) таких агломератів більше.

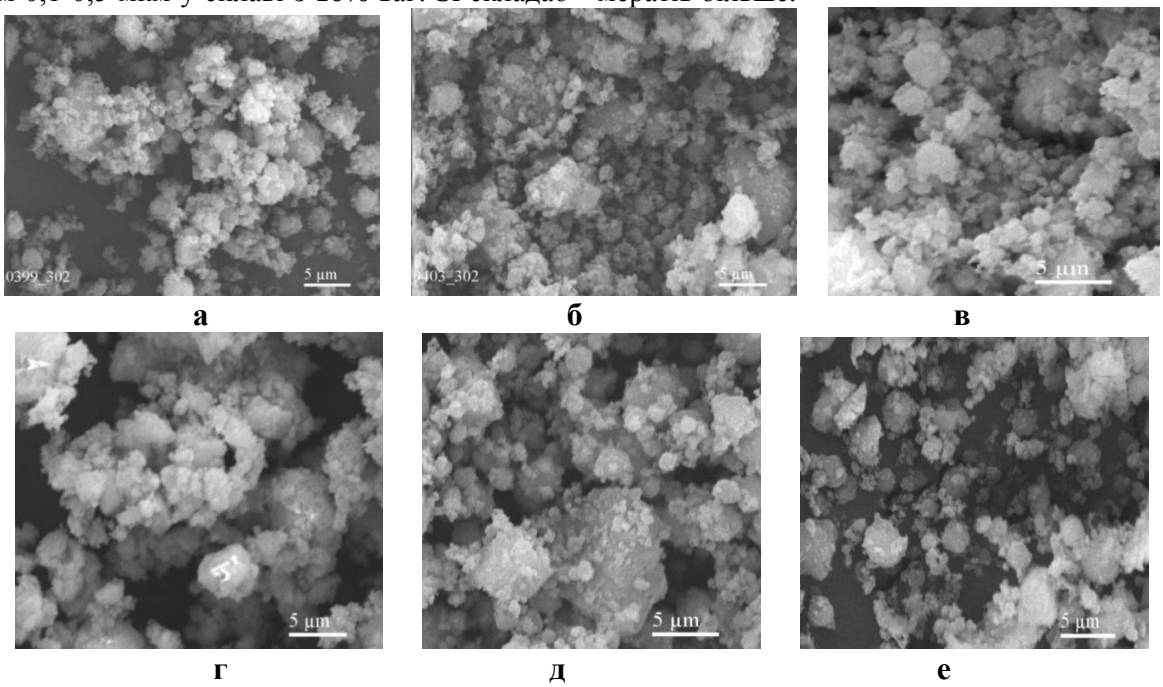


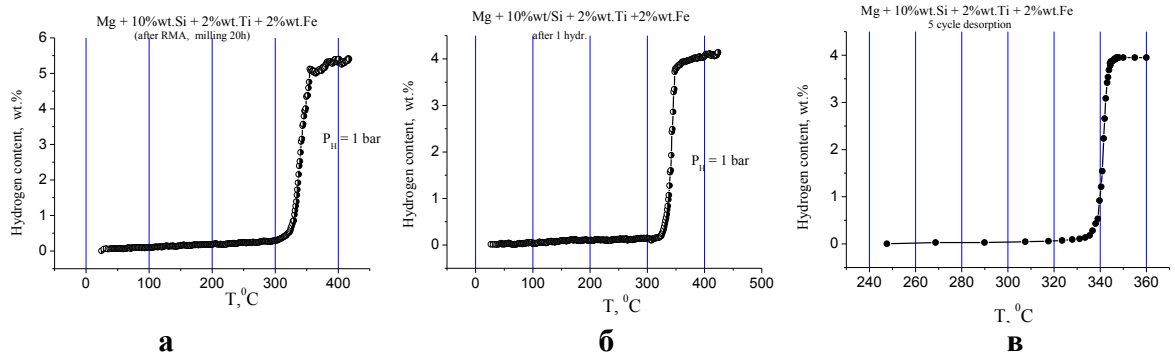
Рис. 3 Мікроструктури механічних сплавів: *а,б – Mg + 10 ваг. % Si + 2 ваг.% Fe + 2 ваг. % Ti; в,г – Mg + 5 ваг. % Si + 5 ваг. % Fe +2 ваг. % Ti; д,е – Mg + 5 ваг. % Si + 5 ваг. % Ti +2 ваг. % Fe.*

а, в, д - після синтезу методом РМС 20 год.; б,г,е - після 4-х циклів гідрування з газової фази.

Fig. 3 Microstructures of mechanical alloys: a, b - Mg + 5 wt.% Si + 5 wt.% Ti + 2 wt % Fe; c, d - Mg + 5 wt.% Si + 5 wt.% Fe + 2 wt.% Ti; e, f - Mg + 10 wt.% Si + 2wt.% Fe + 2 wt.% Ti.

a, c, e - after synthesis by RMA method 20 h.; b, d, f – after first cycles of hydrogenation from the gas phases.

Дослідження впливу легуючих елементів **Si, Ti, Fe** на воденьсорбційні властивості, термічну стійкість і кінетику процесу десорбції водню з гідридної фази MgH_2 отриманого МС проводили методом термодесорбційної спектроскопії (ТДС) на автоматичній комп'ютерізованій установці. Її оригінальна конструкція дозволяє отримувати криві і спектри термодесорбції водню із гідриду волюмометрично – ізобаричним методом, тобто вимірювати об'єм десорбованого водню із зразку, що нагрівається із заданою швидкістю в середовищі водню при його постійному тиску [10]. Ізобарична крива десорбції водню із зразку МС, що отримана при першому його нагріванні після синтезу, приведена на рис. 4, а. Маса зразку складала 0,15 г, швидкість нагрівання 3 град/хв. Постійний тиск водню в реакторі складав 0,1 МПа. Видно, що температура початку виділення водню з гідридної фази MgH_2 механічного сплаву-композиту складає 290 ^{0}C, а інтенсивне виділення водню починається при температурі 310 ^{0}C, досягаючи максимальної швидкості при температурі 340 ^{0}C. Визначена воднева ємність дорівнює 5,4 % ваг.



а **б** **в**

Рис. 4. Крива десорбції водню із зразку МС: *а- отримана при першому нагріванні після синтезу РМС; б - після 1-го гідрування, в -після 5-го гідрування із газової фази.*

Fig 4. Isobars of hydrogen desorption from a specimens of the MA: a- after of its first heating at reactive mechanical alloying; b-after 1-th hydrogenation; c-after 5-th cycle from the gaseous phase.

Після отримання кривої першої десорбції водню із зразку МС останній з реактору не виймався, при температурі 400 ^{0}C напускався в реактор водень до тиску 6 МПа і при охолодженні зразку разом з піччю здійснювалось його перше пряме гідрування із газової фази. Ізобару десорбції водню з гідридної фази MgH_2, що утворилася після вказаного першого прямого гідрування із газової фази МС наведено на рис. 4, б. З наведеної кривої видно, що температура початку десорбції водню з гідридної фази MgH_2 механічного сплаву дорівнює 310 ^{0}C. Інтенсивне виділення водню відбувається при температурі 320 ^{0}C, а максимальній швидкості виділення водню відповідає температура 340 ^{0}C. Воднева ємність, що визначена з наведеної кривої десорбції водню, дорівнює 4,1 % ваг. В порівнянні з попереднім випадком можна констатувати зниження водневої ємності і незначне підвищення температури початку десорбції водню (з 290 до 310 ^{0}C), яке може бути обумовлене, на наш погляд, відсутністю фази чистого кремнію (який володіє ефектом дестабілізації MgH_2 і сприяє зниженню температури розкладу останього) і суттєвим збільшенням кількості фази Mg_2Si в складі МС після його гідрування з газової фази. В той же час слід відзначити, що гідрування МС із газової фази, не дивлячись на інші умови (температура, тиск), не привело до суттєвих змін характеру кривої десорбції на рис. 4,б і її положення в шкалі температур, що може свідчити про зворотність процесу гідрування-дегідрування отриманого МС. Криву десорбції водню гідридної фази MgH_2 механічного сплаву після його 5-го гідрування із газової фази приведено на рис. 4, в. Ця крива за своїм характером практично не відрізняється від приведеної кривої на рис. 4, б, яка отримана після 1-го гідрування МС із газової фази, що дозволяє зробити висновок про відсутність помітної деградації воденьсорбційних властивостей отриманого механічного сплаву і його основних характеристик після перших циклів сорбції-десорбції водню. Воднева ємність механічного сплаву, яка була визначена з приведеної на рис. 4, в кривої, виявилась рівною 3,95 % ваг. Близьке значення водневої ємності (4,1 % ваг.) спостерігали і після 1-го гідрування з газової фази. Для порівняння і визначення впливу комплексного легування кремнієм, титаном та залізом на температуру розкладу і термічну стійкість гідридної фази MgH_2 нами при тиску водню в реакторі 0,1 МПа отримана також ізобара десорбції водню з гідридної фази MgH_2 (без легуючих елементів), яка отримана тим же методом РМС і в тих же умовах, що і МС (Mg + 10 % ваг. Si + 2 % ваг. Fe + 2 % ваг. Ti). Ця крива десорбції водню приведена на рис.5.

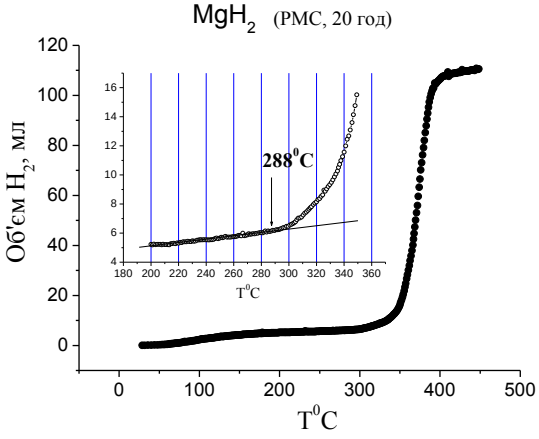
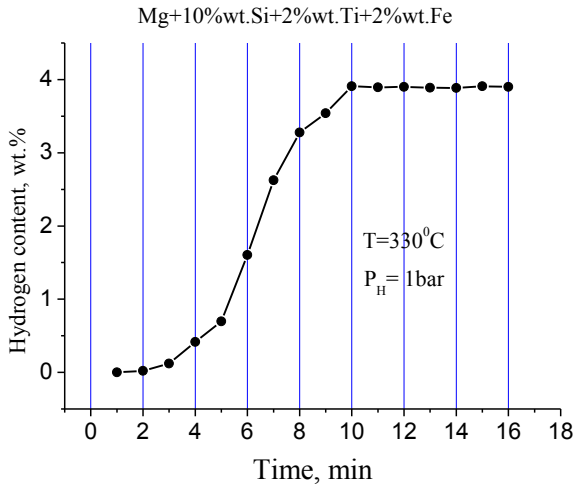
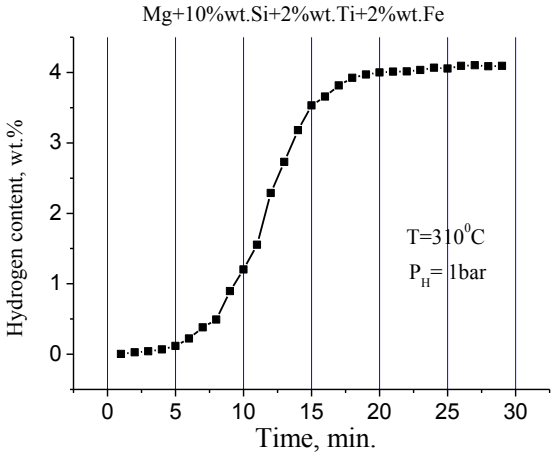


Рис. 5. Ізобара десорбції водню з гідридної фази MgH_2 (без легуючих елементів), отриманої методом РМС.
Fig. 5. Isobars of hydrogen desorption from the MgH2 hydride phase (without additives) after its synthesis RMA

Співставлення кривих десорбції, які приведені на рис. 4, а і рис. 5, дозволяє зробити висновок, що додавання до магнію Si, Ti, Fe практично не призводить до зниження термічної стійкості отриманої РМС гідридної фази MgH_2 і, як наслідок, до зниження температури початку десорбції водню. Ми не спостерігали також і зниження рівноважної температури розкладу гідридної фази MgH_2 механічного сплаву при тиску водню 0,1МПа (288 ^{0}C), яке свідчило би про зниження саме термодинамічної стабільності MgH_2 за рахунок вказаного механічного легування. На наш погляд, поясненням того, що в нашому випадку не відбулося зниження термодинамічної стабільності MgH_2 за рахунок механічного легування Si, Ti, Fe може бути той факт, що в умовах нашого способу отримання MgH_2 не відбувається утворення твердого розчину в магнії Si, Ti, Fe, гідрид якого $Mg(Si,Ti,Fe)H_2$ за теоретичним прогнозом [6] повинен мати суттєво нижчу ентальпію утворення за ентальпію утворення MgH_2, а відтак і більш низьку його термодинамічну стабільність і температуру розкладу. Свідченням того, що в умовах синтезу МС методом РМС принаймні гідрид $Mg(Si,Ti,Fe)H_2$ практично не утворився, або утворився в дуже незначній кількості, може бути, як показав рентгенофазовий аналіз, присутність у складі отриманого МС фази TiH_2, помітної кількості фази чистого Si та фази чистого Fe (на утворення яких пішла значна кількість додаваємих до магнію легуючих елементів Si, Ti, Fe), а також відсутність очікуваного зменшення об'єму елементарної комірки (V= 61,684 Å^3) гідридної фази MgH_2 в порівнянні з таким гідридної фази MgH_2 без легуючих елементів (V=61,671 Å^3). Кінетику десорбції водню з гідридної фази MgH_2 МС після його гідрування із газової фази досліджували в умовах постійного тиску водню в реакторі 0,1 МПа і при температурах 310 та 330 ^{0}C.



а



б

Рис.6. Кінетична крива десорбції водню з гідридної фаз MgH_2 МС при температурі: а-310^{0}C; б - 330 ^{0}C і постійному тиску водню 0,1 МПа.

Fig. 6. Kinetic curves of isothermal hydrogen desorption from the MgH2 hydride phase of MA: a-310 0C; b-330 0C at constant hydrogen pressure of 0.1 MPa.

Кінетичні криві десорбціїї наведено на рис. 6. Як видно з приведених кривих десорбції, час виділення половини $\tau_{1/2}$ і всього водню $\tau_п$ при температурі 310 ^{0}C і постійному тиску водню в реакторі 0,1 МПа відбувається відповідно за 11,5 і 20 хвилин, а при температурі 330 ^{0}C – за 6,3 і 10 хв. Якщо порівняти приведені на рис. 6 криві з кінетичною кривою десорбції водню з гідридної фази MgH_2 без легуючих елементів (рис.7), яка отримана тим же методом і в тих же умовах, то можна помітити суттєву різницю в часі, який виявився необхідним для виділення половини і всього водню при температурі 330 ^{0}C: 6,3 і 10 хв. у випадку MgH_2 механічного сплаву і 30 та 80 хв. у випадку MgH_2 без легуючих елементів. Приведене порівняння вказує на те, що додавання до магнію10 % ваг. Si, 2 % ваг. Ti і 2 % ваг. Fe суттєво покращує кінетику процесу десорбції водню

з гідридної фази MgH_2 у складі МС. Проте можна констатувати відсутність сумарного впливу вказаних легуючих елементів на термодинамічну стабільність цієї гідридної фази, так як в проведених нами експериментах не зафіксовано зниження рівноважної температури розкладу гідридної фази MgH_2 при тиску водню в реакторі 0,1 МПа.

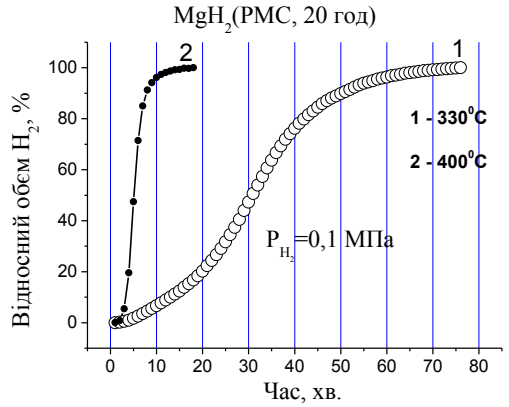


Рис. 7. Кінетичні криві десорбції водню з гідридної фази MgH_2 без легуючих елементів.

Fig. 7. Kinetic curves of isothermal hydrogen desorption from the MgH2 hydride phase without additives

Вибираючи в якості легуючих елементів кремній, титан і залізо ми виходили з того, що кремній, наприклад, за даними [4,12,13,15,17] володіє суттєвим дестабілізуючим ефектом і може сприяти зниженню термічної стійкості і температури початку розкладу гідридної фази MgH_2. Вибір нами титану та заліза [7,8,11,19-21] був обумовлений тим, що ці перехідні метали володіють каталітичними властивостями і в процесі реактивного механічного синтезу, виконуючи роль диспергаторів, можуть суттєво покращити кінетику гідрування магнію. Зведені в таблицях 1-2 результати проведеного дослідження впливу легуючих елементів **Si, Ti, Fe** на воденьсорбційні властивості, термічну стійкість і кінетику десорбції водню з гідридної фази MgH_2 отриманих механічних сплавів дозволяють зрозуміти, яку роль відіграє кожний з легуючих елементів. Так, аналізуючи приведені в таблиці 1 дані про температуру початку виділення водню з гідридної фази MgH_2 механічних сплавів і з гідридної фази MgH_2, яка не була легована Si, Ti, Fe, можна зробити висновок, що додавання до магнію одночасно трьох вищевказаних легуючих елементів не призводить до зниження ***термодинамічної стабільності*** і температури розкладу отриманої методом реактивного механічного сплавлення на протязі 20 год. помелу гідридної фази MgH_2. Причиною такого становища може бути той факт, що в умовах синтезу методом реактивного механічного сплавлення не відбувається утворення твердого розчину Fe і Ti в магнії, необхідного для зниження термодинамічної стабільності MgH_2. Очікуваний вплив Si на ***термічну стійкість*** і температуру розкладу гідридної фази MgH_2 МС при швидкості нагрівання зразку 3 град./хв. виявився досить малим, щоб його зафіксувати в умовах нашого експерименту, очевидно, із-за малої концентрації кремнію в сплавах (5 і 10 % ваг.), а також із-за досить повільної кінетики процесу десорбції водню з МС при температурах нижче 300 ^{0}C.

Як видно з таблиці 2, в покращенні кінетики процесу десорбції водню з гідридної фази MgH_2 МС (Mg + 5 ваг. % Si + 5 % ваг. Ti + 2 ваг. % Fe) і МС (Mg + 5 ваг. % Si + 5 % ваг. Fe + 2 ваг. % Ti) головну роль зіграли Fe і Ti, які, володіючи високими каталітичними властивостями, сприяли рекомбінації водню на поверхні часток гідридної фази, і, як наслідок, зниженню також її термічної стійкості. В покращенні кінетики процесу десорбції водню з гідридної фази MgH_2 механічного сплаву з 10 % ваг. Si суттєву роль, на наш погляд, зіграв також і кремній, концентрація якого в домішці до магнію в цьому випадку механічного сплаву в 5 разів перевищувала концентрацію титану або заліза. Кремній не володіє такими високими каталітичними властивостями як титан та залізо, і не впливає, як останні, на хімічний стан поверхні часток. Але він в процесі реактивного помелу виконує роль ефективного диспергатора, сприяє зменшенню середнього розміру зерен гідридної фази MgH_2 механічного сплаву і, як наслідок, покращенню кінетики процесу десорбціїї водню з нього. Підтвердженням такому заключенню можуть бути приведені в таблиці 1 результати мікроструктурних досліджень зразків всіх механічних сплавів, які засвідчили найменший середній розмір зерен гідридної фази MgH_2 саме у випадку МС (Mg + 10 % ваг. Si + 2 % ваг. Fe + 2 % ваг. Ti), де концентрація кремнію найвища, а кінетика процесу десорбції водню найкраща (табл.1 і 2).

Таблиця 1. Температура початку виділення водню з гідридної фази MgH_2 механічних сплавів-композитів.

Table 1. Beginning temperature of hydrogen desorption from hydride phase MgH2 of mechanical alloys - composite

Механічний сплав-композит	ПісляРМС		Після ГГФ		Dчаст. μm
	T, ^{0}C	C_{H2}, %ваг.	T, ^{0}C	C_{H2}, %ваг.	РМС
МС(Mg + 5 ваг.% Si + 5 % ваг.Ti +2 ваг% Fe)	288	5,7	288	5,3	0,6
МС(Mg + 5 % ваг. Si + 5 % ваг. Fe+2 ваг% Ti)	**290**	5,6	**313**	5,5	0,4
МС(Mg + 10 ваг.% Si +2 ваг% Fe + 2 ваг% Ti)	290	5,4	310	4,1	0,3
МС (Mg)	288	5,1	320	6,3	0,7

Таблиця 2. Час (хв.) виділення половини($\tau_{1/2}$) і всього водню ($\tau_п$) з гідридної фази MgH_2 композитів при температурах 310 ^{0}C, 330 ^{0}C.

Table 2. Time (min.) of desorption half (τ1/2) and full (τf) hydrogen amount from MgH2 hydride phase at 310 0C, 330 0C .

Механічний сплав-композит	310 ^{0}C		330 ^{0}C	
	$\tau_{1/2}$	$\tau_п$	$\tau_{1/2}$	$\tau_п$
МС (Mg+ 5ваг.%Si +5%ваг.Ti+ 2ваг%Fe)	48	90	14	30
МС (Mg+ 5ваг.%Si + 5%ваг.Fe +2ваг%Ti)	24	48	12	28
МС(Mg +10ваг.% Si +2ваг%Fe+2ваг%Ti)	11,5	20	6,3	10
МС(Mg)			30	80

Висновки. З аналізу результатів проведених досліджень термічної стійкості та кінетики розкладу гідридної фази MgH_2 механічного сплаву МС (Mg +10 % ваг. Si +2 % ваг. Fe +2 % ваг. Ti), отриманого методом реактивного механічного сплавлення, можна зробити висновок, що додавання до магнію Si, Fe, Ti призводить до суттєвого покращення кінетики процесу десорбції водню з механічного сплаву, проте очікуваного зниження рівноважної темперпатури початку десорбції водню при його постійному тиску в реакторі 1 бар, яке свідчило би про зниження термодинамічної стабільності MgH_2 за рахунок вказаного легування МС кремнієм, залізом, титаном, не відбувається. Результати даних досліджень можуть бути використанні при розробці нових воденьсорбуючих матеріалів для водневої енергетики.

1. *Zuttel A., Remhof A., Borgschulte A., Friedrichs O.* Hydrogen: thefutureenergycarrier. Philos Trans RSoc A. 2010. 368. Pp. 3329-3342.

2. *Dalebrook A.F., Gan W., Grasemann M., Moret S., Laurenczy G.* Hydrogen storage: beyond conventional methods Chem Commun. 2013. 49. Pp. 8735-8751.

3. *Lototskyy M.V., Tolj I., Pickering L., Sita C., Barbir F., Yartys V.* The use of metal hydrides in fuel cell applications: Review. Progress in Natural Science: Materials International. 2017. 27. Pp. 3-20.

4. *Paskevicius D.A., Sheppard A.-L., Chaudhary C.J., Webb E., Gray E., Mac A., Tian H.Y., Peterson V.K., Buckley C.E.* Kinetic limitations in the Mg-Si-H system. J. of Hydrogen Energy. 2011. 36. Pp. 10779 -10786.

5. *Motoki Shimada, Hisashi Tamaki, Eiji Higuchi, Hiroshi Inoue.* Kinetic Analysis for Hydrogen Absorption and Desorption of MgH_2-Based Composites. J. of Materials and Chemical Engineering. 2014. vol. 2. Iss. 3. Pp. 64-71.

6. *Shang C.X., Bououdina M., Song Y., Guo Z.X.* Mechanical alloying and electronic simulations of (MgH_2+M) systems (M = Al, Ti, Fe, Ni, Cu, Nb) for hydrogen storage. *Int.* J. Hydrogen Energy. 2004. 29. Pp. 73-80.

7. *Ershova O.G., Dobrovolsky V.D., Solonin Yu.M., Khyzhun O.Yu., Koval A.Yu.* Influence of Ti, Mn, Fe, Ni addition upon thermal stability & decomposition temperature of the MgH2 phase of alloys synthesized by reactive mechanic alalloys. J. Alloys Compds. 2008. v. 464. Pp. 212-218.

8. *Ershova O., Dobrovolsky V., Solonin Yu.* Thermal stability and hydrogen sorption properties of the MgH2 hydride derived by the reactive milling of the Mg +10 % wt. Ti mixture. Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems (fourth ed. NATO Science for Peace and Security Programme) Springer. 2008. Pp. 467 - 472.

9. *Dobrovolsky V.D., Ershova O.G., Solonin Y.M.* Thermal resistance and the kinetics of hydrogen desorption from hydrides of the Mg–Al–Ni–Ti mechanical alloy. J. Materials Science. 2016. 51(4). Pp. 457-464.

10. *Ershova O.G., Dobrovolsky V.D., Solonin Yu.M., Khyzhun O.Yu., Koval A.Yu.* The effect of Al on thermal stability and kinetics of decomposition of MgH_2 prepared by mechanochemical reaction at different conditions. Materials Chemistry and Physics. 2015. 62. Pp. 408-416.

11. *Dobrovolsky V.D., Ershova O.G., Solonin Yu.M., Khyzhun O.Y.* Influence of titanium and iron additives to magnesium upon hydrogen-sorption properties, thermal stability and kinetics of hydrogen desorption from MgH_2 phase of mechanical alloy. Powder Metallurgy & Metal Ceramics. 2016. V. 55. v. 7. Pp. 477-488.

12. *Chaudhary A.-L., Paskevicius M., Sheppard D.A., Buckley C.E.* Thermodynamic destabilisation of MgH_2 and

NaMgH3 using Group IV elements Si, Ge or Sn. J. Alloys Compd. 2015. v. 623. Pp.109-116.

13. *Zhou C., Fang Z.Z, Lu J., Luo X., Ren C., Fan P., Ren Y., Zhang X.* Thermodynamic Destabilization of Magnesium Hydride Using Mg-Based Solid Solution. J.Phys.Chem.C. 2014. V. 118. Pp. 11526-11535.

14. *Garroni S., Santoru A., Cao H., Dornheim M., Klassen T., Milanese C., Gennari F., Pistidda C.* Recent Progress and New Perspectives on Metal Amide and Imide Systems for Solid-State Hydrogen Storage. Energies. 2018. 11. Pp. 1027-1031.

15. *Vajo J., Mertens F., Channing C., Bowman R., Brent F.* Altering Hydrogen Storage Properties by Hydride Destabilization through Alloy Formation: LiH and MgH2 Destabilized with Si. J. Phys. Chem. B. 2004. 108. Pp. 13977-13983.

16. *Sadhasiva T., Kim Hee-Tak, Jung S., Sung-Hee Roh, Park J.-H., Jung Ho Young.* Dimensional effects of nanostructured Mg/MgH2 for hydrogen storage applications: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. 72. Pp. 523-534.

17. *Polanski M., Bystrzycki J.* The influence of different additives on the solid-state rection of magnesium hydride (MgH_2) with Si. Int. J. Hydrogen Energy. 2009. 34. Pp. 7692-7699.

18. *Yahya M.S., Ismail M.* Synergistic catalytic effect of SrTiO3 and Ni on the hydrogen storage properties of MgH2. Int. Journal of Hydrogen Energy. 2018. 43. Pp. 6244-6250.

19. *Єршова О.Г., Добровольський В.Д., Солонін Ю.М.* Механічні сплави Mg-Me (Me = Al, Ti, Fe): дослідження воденьсорбційних властивостей, термічної стійкості та кінетики процесу десорбції водню. Фізика і хімія твердого тіла. 2013. т.14. № 1. С. 101-107.

20. *Єршова О.Г., Добровольський В.Д., Солонін Ю.М., Коваль А.Ю.* Вплив домішок Al та Fe на термодинамічну стабільність та кінетику десорбції водню з гідридної фази MgH_2 механічного сплаву. Фізика і хімія твердого тіла. 2015. т.16. № 3. С. 576-585.

21. *Добровольський В.Д., Єршова О.Г., Солонін Ю.М., Коваль А.Ю.* Термічна стабільність та кінетика десорбції водню з гідридної фази MgH_2 механічного сплаву Mg +10 % ваг. Al +10 % ваг.Ti. Відновлювана енергетика IBE. 2015. № 3. С. 5-13.

22. *Єршова О., Добровольський В., Солонін Ю., Коваль О.* Вплив домішок Si, Fe, Ti, на температуру та кінетику дісоціації MgH_2, отриманого реактивним механічним сплавленням. Металлофизика и новейшие технологии. 2017. т. 39. № 11. С. 1557-1571.

23. *Єршова О.Г., Солонін Ю.М., Добровольський В.Д., Коваль А.Ю.* Воденьсорбційні властивості, термічна стійкість та кінетика розкладу гідридної фази MgH_2 механічного сплаву магнію з Si, Ti, Fe. Відновлювана енергетика. 2017. № 2. С. 26-33.

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ И КИНЕТИКА ДЕСОРБЦИИ ВОДОРОДА ИЗ ГИДРИДНОЙ ФАЗЫ MgH_2 МЕХАНИЧЕСКОГО СПЛАВА МАГНИЯ С Si, Ti, Fe

О.Г. Ершова, ст.н.сотр.,к.т.н.; **Ю.М. Солонин,** академик НАН Украины, д.ф.-м.н.; **В.Д. Добровольский,** ст.н.сотр., к.ф.-м.н; **А.Ю. Коваль,** ст.н.сотр.,к.ф.-м.н.

Институт проблем материалознавства им. И.Н. Францевича НАН Украины, г. Киев- 03680, ул. Кржижановского, 3

Несмотря на то, что ученые уделяют большое внимание гидриду магния, методам его получения и исследованию свойств, последний все еще не нашел широкого применения в качестве аккумулятора водорода для автомобильной промышленности из-за трудности двух основных недостатков: высокой температуры (300 °С при 0,1MPa H_2) и его медленной кинетики диссоциации. В данной работе, с целью понижения температуры, улучшения кинетики разложения стехиометрического гидрида MgH_2, была исследована возможность его комплексного легирования Si, Ti, Fe с использованием метода реактивного механохимического легирования (РМС). Механический сплав (МС) Mg + 10% вес. Si + 2% вес. Ti + 2% вес. был синтезирован и его фазовый состав, микроструктура, водородосорбционные свойства, термическая стабильность и кинетика десорбции водорода были исследованы с использованием методов рентгеновской дифракции (XRD), сканирующей электронной микроскопии (SEM) и термодесорбционной спектроскопии (TDS). Для оценки влияния комплексного легирования Ti, Fe, Si на температуру разложения и термостабильность, изобары десорбции водорода фазы MgH_2 получены при первом нагреве после РМС образцов МС и после последующего циклического гидрирования из газовой фазы. Все изобары были получены при давлении водорода в реакторе 0,1 МПа и скорости нагрева образца 3 ^{O} / мин. Они были использованы для определения как температуры начала десорбции водорода (Тн.) из гидридной фазы MgH_2 МС, так и температуры $T_{мак.}$, что соответствует максимальной скорости выделения водорода. Кинетические кривые десорбции водорода из механического сплава-композита получены при постоянном давлении водорода 0,1 МПа в реакторе и температурах 310 и 330 °С. Их использовали для определения времени выделения половины количества водорода ($\tau_{1/2}$) и полного количества водорода (τ_n) для МС. Обнаружено, что добавки Si, Ti, Fe к магнию значительно улучшают кинетику десорбции водорода из гидридной фазы MgH_2 полученных МС. Однако эффект снижения термодинамической стабильности гидридной фазы MgH_2 в результате ее комплексного легирования не наблюдался. Разработанные материалы позволяют использовать их в стационарных условиях применения. Библ. 23, табл.2, рис. 7.

Ключевые слова: *механический сплав, микроструктура, термодесорбционная спектроскопия, водородсорбционные свойства, термическая стойкость, кинетика десорбции водорода.*

REFERENCES

1. *Zuttel A., Remhof A., Borgschulte A., Friedrichs O.* Hydrogen: the future energy carrier. Philos Trans RSoc A. 2010. 368. Pp. 3329-3342. [in English].

2. *Dalebrook A.F., Gan W., Grasemann M., Moret S, Laurenczy G.* Hydrogen storage. beyond conventional methods. Chem Commun. 2013. 49. Pp. 8735-6751. [in English].

3. *Lototskyy M.V., Tolj I., Pickering L., Sita C., Barbir F., Yartys V.* The use of metal hydrides in fuel cell applications. Review. Progress in Natural Science: Materials International. 2017. 27. Pp. 3-20. [in English].

4. *Paskevicius D.A., Sheppard A.-L., Chaudhary C.J., Webb E., Mac A., Gray E., Tian H.Y., Peterson V.K., Buckley C.E.* Kinetic limitations in the Mg-Si-H system. J. of Hydrogen Energy. 2011. 36. Pp. 10779-10786. [in English].

5. *Motoki Shimada, Hisashi Tamaki, Eiji Higuchi, Hiroshi Inoue.* Kinetic Analysis for Hydrogen Absorption and Desorption of MgH2-Based Composites // J. of Materials and Chemical Engineering. – 2014. -vol.2. - Iss. 3. -p. 64-71. [in English].

6. *Shang C.X., Bououdina M., Song Y., Guo Z.X.* Mechanical alloying and electronic simulations of (MgH2+M) systems (M = Al, Ti, Fe, Ni, Cu, Nb) for hydrogen storage. Int. J. Hydrogen Energy. 2004. 29. Pp. 73-80. [in English].

7. *Ershova O.G., Dobrovolsk V.D., Solonin Yu.M., Khyzhun O.Yu., Koval A.Yu.* Influence of Ti, Mn, Fe, Ni addition upon thermal stability & decomposition temperature of the

MgH2 phase of alloys synthesized by reactive mechanic alalloys. J. AlloysCompds. 2008. v.464. Pp. 212-218. [in English].

8. *Ershova O., Dobrovolsky V., Solonin Yu.* Thermal stability and hydrogen sorption properties of the MgH2 hydride derived by the reactive milling of the Mg +10 % wt. Ti mixture. Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems (fourth ed. NATO Science for Peace and Security Programme) Springer. 2008. Pp. 467-472. [in English].

9. *Dobrovolsky V.D.Ershova O.G., Solonin Y.M.* Thermal resistance and the kinetics of hydrogen desorption from hydrides of the Mg–Al–Ni–Ti mechanical alloy. J. Materials Science. 2016. 51(4). Pp. 457-464. [in English].

10. *Ershova O.G., Dobrovolsky V.D, Solonin. Yu.M., Khyzhun O.Yu., Koval A.Yu.* The effect of Al on thermal stability and kinetics of decomposition of MgH_2 prepared by mechanochemical reaction at different conditions. Materials Chemistry and Physics. 2015. 62. Pp. 408-416. [in English].

11. *Dobrovolsky V.D., Ershova O.G., Solonin Yu. M., Khyzhun O.Y.* Influence of titanium and iron additives to magnesium upon hydrogen-sorption properties, thermal stability and kinetics of hydrogen desorption from MgH_2 phase of mechanical alloy. Powder Metallurgy & Metal Ceramics. 2016. V.55. v. 7. Pp. 477-488. [in English].

12. *Chaudhary A.-L., Paskevicius M., Sheppard D.A., Buckley C.E.* Thermodynamic destabilisation of MgH2 and NaMgH3 using Group IV elements Si, Ge or Sn. J. Alloys Compd. 2015. v. 623. Pp.109-116. [in English].

13. *Zhou C., Fang Z.Z., Lu J., Luo X., Ren C., Fan P., Ren Y., Zhang X.* Thermodynamic Destabilization of Magnesium Hydride Using Mg-Based Solid Solution. J.Phys.Chem.C. 2014. V. 118. Pp. 11526-11535. [in English].

14. *Garroni S., Santoru A., Cao H., Dornheim M., Klassen T., Milanese C., Gennari F., Pistidda C.* Recent Progress and New Perspectives on Metal Amide and Imide Systems for Solid-State Hydrogen Storage. Energies. 2018. 11. Pp. 1027-1031. [in English].

15. *Vajo J., Mertens F., Channing C., Bowman R., Brent F.* Altering Hydrogen Storage Properties by Hydride Destabilization through Alloy Formation: LiH and MgH_2 Destabilized with Si. J. Phys. Chem. B. 2004. 108. Pp. 13977-13983. [in English].

16. *Sadhasiva T., Kim Hee-Tak, Jung S., Sung-Hee Roh, Park J.-H., Jung Ho Young.* Dimensional effects of nanostructured Mg/MgH_2 for hydrogen storage applications: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews . 2017. 72. Pp. 523-534. [in English].

17. *Polanski M., Bystrzycki J.* The influence of different additives on the solid-state rection of magnesium hydride (MgH_2) with Si. Int. J. Hydrogen Energy. 2009. 34. Pp. 7692-7699. [in English].

18. *Yahya M.S., Ismail M.* Synergistic catalytic effect of $SrTiO_3$ and Ni on the hydrogen storage properties of MgH_2. Int. Journal of Hydrogen Energy. 2018. 43. 6244-6250. [in English].

19. *Ershova O.G., Dobrovolsky V.D., Solonin Yu.M.* Mekhanichni splavy Mg-Me (Me = Al, Ti, Fe): doslidzhennya vodensorbtsiynykh vlastyvostey, termichnoyi stiykosti ta kinetyky protsesu desorbtsiyi vodnyu. [Mechanical Mg–Me (Me = Al, Ti, Fe) alloys: study of hydrogen- sorption properties, thermal resistance, and the kinetics of the process of hydrogen desorption]. Fizyka i khimiya tverdoho tila. 2013. 14. No. 1. Pp. 101-107. [in Ukrainian].

20. *Ershova O.G., Dobrovolsky V.D, Solonin.,Yu.M., Koval A.Yu.* Vplyv domishok Al ta Fe na termodynamichnu stabilnist i kinetyka desorbtsiyi vodnyu z hidrydnoyi fazy MgH_2 mekhanichnoho splavu. [Effect of Al, Fe addition on thermodynamic stability and hydrogen desorption kinetics from MgH_2 phase of mechanical alloy]. Fizyka i khimiya tverdoho tila. 2015. 16. No. 3. Pp. 576-585. [in Ukrainian].

21. *Dobrovolsky V.D., Ershova O.G., Soloni,Yu.M., Koval A.Yu.* Termichna stabilnist ta kinetyka desorbtsiyi vodnyu z hidrydnoyi fazy MgH_2 mekhanichnyy splav Mg +10% vah. Al +10% vah. Ti. [Thermal stability and kinetics of hydrogen desorption from the hydride phase of the MgH_2 of a mechanical alloy Mg +10 % wt. Al+10% wt. Ti]. Vidnovlyuvana energetika. 2015. Vol. 3. Pp. 5-12. [in Ukrainian].

22. *Ershova O.G., Dobrovolsky V.D, Solonin Yu.M., Koval A.Yu.* Vplyv domishok Si, Fe, Ti, na temperaturu i kinetyka dispiratsiyi MgH_2, otrymanyy reaktyvnyy mekhanichnyy protses. [The effect of Si, Fe, Ti additives on the temperature and dissociation kinetics of MgH_2 prepared by reactive mechanical alloying]. Metallofizika I noveishie teknologii. 2017. V. 39. No. 11. Pp. 1557-1571. [in Ukrainian].

23. *Ershova O.G., Solonin Yu.M., Dobrovolsky V.D, Koval A.Yu.* Vohnezakhysni vlastyvosti, termichna stiykist′ i kinetyka rozryvu hidrychnoyi fazy MgH_2 mekhanichnyy splav mahniyu z Si, Ti, Fe. [Hydrogen-sorption properties, thermal stability and kinetics of hydrogen desorption from the MgH_2 phase of the mechanical alloyof Mg with Si, Ti, Fe]. Vidnovlyuvana energetika. 2017. No. 3. Pp. 5-12. [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції: 31.01.19
Остаточна версія14.03.19

УДК 621.472

КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ ТА ВПЛИВ ДАНОГО ПРОЦЕСУ НА РОБОТУ ЦЕНТРАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

М.М. Бордаков, аспірант

Інститут відновлюваної енергетики НАН України
02094 вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ

Контроль реактивної потужності можна вважати однією з найменш досліджених проблем в фотоелектричній промисловості, він може дати ключ до значного збільшення прибутку власників промислових сонячних електростанцій.
В даній статті описується вплив компенсації реактивної потужності на промисловій ФЕС потужністю за техінчними умовами 9 МВт. Інверторне обладнання : Kstar 500 КВт, сонячні панелі Talesun 270 Вт. В ДСТУ 8635:2016 є вимоги що до можливості регулювання реактивної потужності промисловими СЕС. Відповідно до даного стандарту промислова СЕС має регулювати свій коефіцієнт потужності від 0.8 до 1 відповідно до вимог центральної мережі. Також, в даній статті описується вплив компенсації реактивної потужності на якість електричної енергії лінії 35 кВ. Відповідно до постанови НКРЕКП від 14.03.2018 №312, про правила розрахунку за реактивну потужність, клієнт має відшкодовувати енергопередаючій компанії збитки за перетікання реактивної потужності.
В статті описано алгоритм керування ректівною потіжністью на рівні точки підключення до центарльної електирчної мережі. Він полягає в керуванні інверторним обладнанням через інформаційний протоколок ModBus TCP. Кожен інвертор має запрограмований виробником реєстр інформаційних команд. Посилаючи команду через інформаційний протокол в потрібний реєстр інвертор може виконати дію чи передачу параметрів, відповідно до типу реєстру в який послано команду. Інвертор починає компенсувати реактивну потужність коли отримує команду в реєстр, який відповідає за значення коефіцієнту потужності. Значення для компенсації зчитується з пристрою аналізу якості електромережі на вхідній комірці. Зчитане значення оброблюється сервером і відправляється на інвертор. Використовуючи компенсацію реактивної потужності, збитки клієнта за перетікання реактивної потужності зводяться до мінімального значення. Бібл. 10, табл. 3, рис.3.
Ключові слова: *реактивна потужність, напруга, коефіцієнт нелінійних спотворень, активна потужність, коефіцієнт потужності, динамічне регулювання.*

COMPENSATION OF REACTIVE POWER BY INDUSTRIAL SOLAR POWER PLAT AND INFLUENCE OF THIS PROCESS ON THE CENTRAL ELECTRIC NETWORK

M. Bordakov, postgraduate student

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv.

The control of reactive power can be considered one of the least investigated problems in the photoelectric industry, it can give the key to a significant increase in the profit of owners of industrial solar power plants.
This article describes the effect of compensation of reactive power on the industrial FES power at the technical conditions of 9 MW. Inverter equipment: Kstar 500 kW, solar panels Talesun 270 W. In DSTU 8635: 2016 there are requirements for the possibility of regulation of reactive power by industrial SES. In accordance with this standard, the industrial SES must adjust its power factor from 0.8 to 1 in accordance with the requirements of the central network. Also, this article describes the effect of compensation of reactive power on the quality of electric energy in the 35 kV line. Also, in accordance with: the NERCP regulation dated March 14, 2018, No. 312, on the rules for calculating reactive power, the client shall compensate the energy-transmitting company for losses due to the flow of reactive power.
The article describes the algorithm for verifying the bias tact at the level of the connection point to the central electic network. It consists in managing the inverter equipment through the ModBus TCP protocol. Each inverter has a manufacturer-programmed register of foreign-type teams. By sending a command through the information bar to the desired registry, the inverter can execute an action or pass parameters, according to the type of registry that is sent to the comand. The inverter starts copencing the reactive power when it receives a command in the register which corresponds to the value of the power factor. Computation for compensation is read from the device for analyzing the quality of the electrical network in the input cell. The read value is processed by the server and sent to the inverter. Using reactive power compensation, customer losses due to jet power flow are reduced to a minimum value. Ref. 10, tab. 3, fig. 3.
Keywords: *reactive power, voltage, coefficient of nonlinear distortions, active power, power factor, dynamic regulation.*

© М.М.Бордаков, 2019



М.М. Бордаков

M. Bordakov

Відомості про автора: аспірант ІВЕ НАН України.
Освіта: В 2016 р. закічив НТУУ «КПІ ім. Сікорського» за спеціальністю: електротехніка та електротехнології. Отримав ступінь: молодшого інженера-дослідника.
Наукова діяльність: сонячна енергетика, апаратна частина інвертора для сонячних панелей.
Публікації: 2
ORCID: 0000-0002-2890-5632
Контакти: +38093 56 69 447
e-mail: m.m.bordakov@gmail.com

Author information: postgraduate student Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine.
Education: In 2016, the NTUU «Igor Sikorsky KPI», specialty: electrical engineering and electrotechnology. Get a degree: junior research engineer.
Research area: solar energy, hardware part of solar panel inverter.
Publications: 2
ORCID: 0000-0002-2890-5632
Contacts: +38093 56 69 447
e-mail: m.m.bordakov@gmail.com

Вступ. В сучасній термінології електричних мереж є поняття: активної “P” та реактивної “Q” потужності. Під поняттям активної потужності розуміють потужність яка йде на виконання активної роботи (нагрів теплоелектричного нагрівача, свічіння лампи розжарювання). Поняття реактивна потужність з’явилося, коли людство почало використовувати змінний струм. Цей термін розуміє в собі енергію, яка йде на живлення реактивних споживачів (конденсаторні батареї, електродвигуни). Реактивна потужність системи характеризується коефіцієнтом потужності. При проходженні реактивного споживача струм системи починає відставати чи випереджати напругу у часі (в залежності від характеру навантаження: індуктивне чи ємнісне). Обчисливши косинус кута даного відставання ми отримаєм коефіцієнт потужності. На рис. 1 показано як відбувається дане часове відставання.

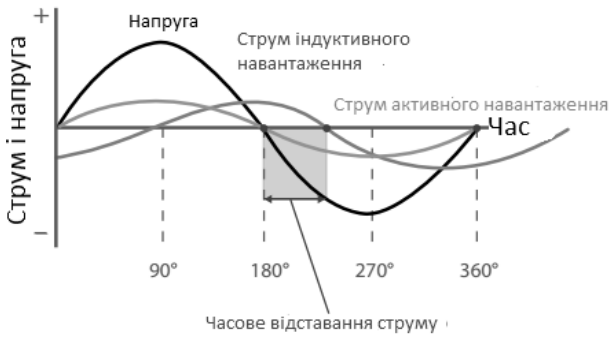


Рис. 1. Проходження струму через індуктивне навантаження
Fig. 1. Passage of current through inductive load

Векторною сумою активної та реактивної потужності буде повна потужність системи. Дана величина показує скільки енергії споживає система в цілому.

На рис. 2 описано залежність між цими величинами.

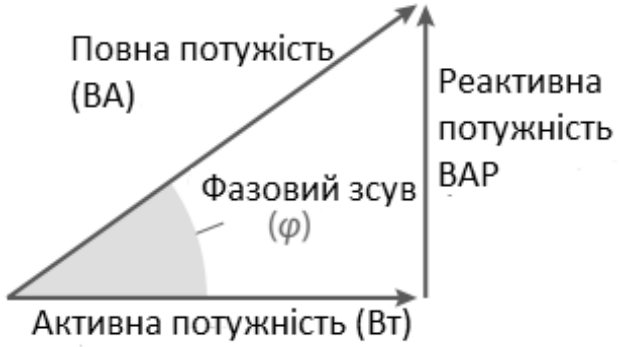


Рис. 2. Векторна сума активної та реактивної потужності
Fig. 2. Vector amount of active and reactive power

З рис. 2 можна обчислити значення коефіцієнта потужності:

$$Cos(\varphi) = \frac{S}{P},$$

де S – повна потужність системи, P – активна потужність системи.

В свою чергу, модуль повної потужності обчислюється:

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

де Q – реактивна потужність системи.

Електрична мережа зазвичай має коефіцієнт потужності приблизно рівний 0.95-0.99, його часто прирівнюють до 1. Кожен увімкнений споживач несе свій вклад у величину даного коефіцієнта.

Схема увімкнення ФЕС у точку обліку і причини споживання ФЕС реактивної потужності. Сучасні інвертори мають коефіцієнт потужності 1. Тобто, вони генерують тільки активну складову потужності. Але, при роботі ФЕС споживання реактивної складової завжди присутнє. Це пов’язано з тим, що інвертори вми-

каються в високовольтну мережу через трансформатори. Коли ФЕС починає генерувати більшу енергію в мережу споживання реактивної потужності збільшується, бо при проходженні більшого струму через трансформатор, зростає реактивна енергія спожита трансформатором. Індуктивна складова опору трансформатора є сталою, тому величина реактивної потужності залежить від струму генерації ФЕС. Розглянемо повний опір кола змінного струму:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2},$$

де Z – повний опір кола, X_L – індуктивна складова опору, X_C – ємнісна складова опору, R – активна складова. Ємнісна складова в трансформаторі майже нульова, тому нею нехтують. Тоді реактивна складова опору трансформатора матиме індуктивний характер. Реактивна потужність становитиме:

$$Q = I^2 \cdot X_L,$$

де I – струм, який проходить через трансформатор. Даний струм дорівнює струму генерації ФЕС. Далі розглянемо ФЕС побудовану в Херсонській області на території селища Миролюбівка. В роботі розгядаються лише дві інверторні станції даної ФЕС. Потужність однієї інверторної станції 2 МВт. Сумарна потужність гілки ФЕС 4 МВт. Кожна інверторна станція має по 4-ри інвертори: KSTAR GSL 500. Потужність одного 500 кВт по стороні змінного струму. Кожна інверторна станція має трансформатор. Характеристики трансформатора: потужність 2500 кВА, напруга: 315/35000, схема підключення трикутник-трикутник. На рис 3. показано схему гілки ФЕС, яку розглядаємо.

Опис алгоритму керування реактивною потужністю. Даний інвертор має в собі запас регулювання реактивної потужності. Також додатково інвертор може регулювати реактивну потужність за допомогою свого коефіцієнта потужності. При використанні другого режиму інвертор зменшує свою активну потужність. Тому на даній ФЕС регулювання відбувається за допомогою вбудованого запасу. Інвертори отримують команду що до значення реактивної складової в точці, приєднання до мережі і компенсують її значення. Частота обробки даного процесу 1 с.

За рахунок цього алгоритму мінімізовано споживання станцією реактивної потужності.

Порівняння показників аналізу мережі 35 кВ з компенсацією і без компенсації реактивної потужності. Розглянемо два дні роботи ФЕС: 12.10.2018 і 13.10.2018. Компенсацію реактивної потужності було запущено 13.10.2018. На рис. 4 показано графіки реактивної потужності для двох днів. Генерація ФЕС в дані дні була однакова. По це свідчать дані з лічильника та метеопоста.

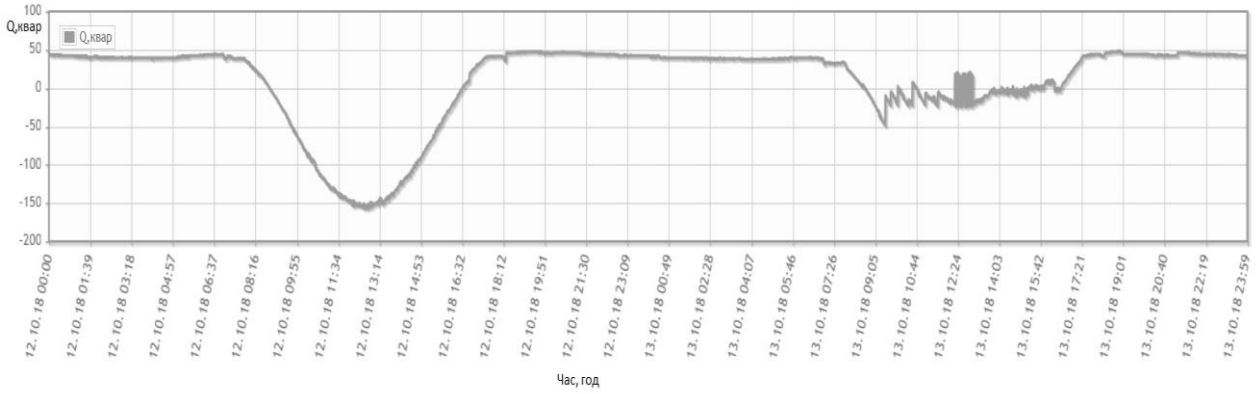


Рис. 3 Графіки реактивної потужності за період дослідження
Fig. 3 Graphs of reactive power during the research period

За даними з лічильника дана гілка спожила 80 квар·год реактивної потужності за 13.10, а за 12.10 750 квар·год.

Розглянемо вплив компенсації реактивної потужності на лінійну напругу мережі 35 кВ. В Таблиці 1. Наведено дані напруги по кожній фазі до увімкнення функції компенсації. В таблиці 2. наведено зміну напруги при компенсації реактивної потужності. Порівняння напруги проводиться між вихідними, так як це пов'язано з графіком навантаження енергосистеми.

Таблиця 1. Зміна фазної напруги при генерації ФЕС без компенсації 13.10.2018
Table 1. Change in phase voltage during generation without compensation. 13.10.2018

U_1, В	U_2, В	U_3, В
35834,49	36715,56	36054,49
36267,16	37186,27	36515,85
36240,57	37208,58	36539,93
36276,42	37270,59	36580,2
36302,46	37305,35	36624,28
36504,22	37543,13	36798,78
36652,31	37664,37	36943,72
36762,35	37787,18	37073,49
36730,51	37762,95	37054,26
36583,86	37598,24	36883,39
35954,26	36914,68	36239,68
35710,1	36624,16	36008,36
35536,98	36457,68	35856,6
35704,5	36622,49	36040,52

Таблиця 2. Зміна фазної напруги при генерації ФЕС при компенсації за 06.10.2018
Table 2. Changing the phase voltage during generation of the FES with compensation for 06.10.2018

U_1, В	U_2, В	U_3, В
35853,66	36840,58	36115,31
36000,74	36930,59	36257,81
36289,42	37209,45	36534,07
36302,23	37238,78	36545,44
36330,64	37235,63	36579,85
36385,31	37287,68	36647,66
36362,36	37262,13	36603,84
36353,7	37315,97	36570,24
36406,56	37347,47	36623,24
36176,43	37080,47	36392,7
35652,71	36583,6	35904,78
36126,92	37086,99	36429,85
35860,76	36795,78	36183,76
35995,49	36877,1	36250,09

Порівнючи максимальні значення напруг, можливо зробити висновок що після компенсації рівні напруг майже не змінились. Тільки зменшився рівень перенапруги на фазі 3. Там середній рівень знизився на 0.5 %.

Далі розглянемо вплив компенсації реактивної потужності на гармонічні спотворення мережі. В таблиці 3 наведено зміну THD до і після компенсації.

Таблиця 3. THD ФЕС до і після компенсації
Table 3. THD before and after compensation

Дата	Thd_1, %	Дата	Thd_1, %
13.10.2018 7:00	1,32	12.10.2018 7:00	1,15
13.10.2018 8:00	1,26	12.10.2018 8:00	1,09
13.10.2018 9:00	1,2	12.10.2018 9:00	1,03
13.10.2018 10:00	1,29	12.10.2018 10:00	0,99
13.10.2018 11:00	1,32	12.10.2018 11:00	1,04
13.10.2018 12:00	1,28	12.10.2018 12:00	1,02
13.10.2018 13:00	1,29	12.10.2018 13:00	1,03
13.10.2018 14:00	1,37	12.10.2018 14:00	1,19
13.10.2018 15:00	1,38	12.10.2018 15:00	1,16
13.10.2018 16:00	1,38	12.10.2018 16:00	1,29
13.10.2018 17:00	1,37	12.10.2018 17:00	1,31
13.10.2018 18:00	1,48	12.10.2018 18:00	1,36
13.10.2018 19:00	1,54	12.10.2018 19:00	1,41
13.10.2018 20:00	1,61	12.10.2018 20:00	1,41
Середнє	1,272667	Середнє	1,098667

Дані, які наведенні в табл. 3, свідчать про те, що при використанні компенсації коефіцієнт нелінійних спотворень по напрузі зменшується. Тобто даний процес збільшує якість мережі та її стійкість.

Висновки. Оброблені результати свідчать про те, що використання компенсації реактивної потужності зменшує кількість генерованої реактивної енергії в мережу, що призводить до зменшення збитків для власника станції та чинить позитивний вплив на стан центральної електромережі.

1. Постанова НКРЕКП №312 від 14.03.2018. URL: ttp://www.nerc.gov.ua/?id=31833.
2. ДСТУ 8635:2016. Площадки для фотоелектричних станцій приєднання станцій до електроенергетичної системи. URL: http://eom.com.ua/index.php?action=downloads;sa=downfile&id=3656.
3. Reactive Power Interconnection Requirements for PV and Wind Plants. Recommendations to NERC. URL: https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2012/121098.pdf.
4. *Brown T.* Transmission network loading in Europe with high shares of renewables. IET Renewable Power Generation. Jan. 2015.Vol. 9. No. 1. Pp.57-65.
5. GB/T19964-2012. Photovoltaic power plant power system access technical requirements. Beijing. General Administration of Quality Supervision. Inspection and Quarantine of Peoples Republic of China. China National Standardization Management Committee. 2012.
6. *Campbell M., Aschenbrenner P., Blunden J., Smeloff E., Wright S.* The drivers of the levelized cost of electricity for utility-scale photovoltaics. SunPower Corp. 200 p.

7. *Zhou J.* and *Gole A.* VSC transmission limitations imposed by AC system strength and AC impedance characteristics. in Proc. 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC). 2012. Pp. 1-6.

8. *Collins L.* and *Ward J.* Real and reactive power control of distributed PV inverters for overvoltage prevention and increased renewable generation hosting capacity. Renewable Energy. 2015. Vol. 81. Pp. 464-471.

9. Utility-scale solar photovoltaic power pants-A project developers guide. International Finance Corporation (IFC). 2015.

10. *Molina-Garcia A., Mastromauro R. A., Garcia-Sanchez T., Pugliese S., Liserre M., Stasi S.* Reactive power flow control for PV inverters voltage support in LV distribution networks. IEEE Trans. Smart Grid. Jan. 2017. Vol. 8. No. 1. Pp. 447-456.

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ И ВЛИЯНИЕ ДАННОГО ПРОЦЕССА НА РАБОТУ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Н.Н. Бордаков, аспирант

Институт возобновляемой энергетики НАН Украины
02094 г. Киев, ул. Г. Хоткевича, 20А

Контроль реактивной мощности можно считать одной из наименее исследованных проблем в фотоэлектрической промышленности, он может дать ключ к значительному увеличению прибыли владельцев промышленных солнечных электростанций. В данной статье описывается влияние компенсации реактивной мощности на промышленной ФЭС мощностью по техническим условиями 9 МВт. Инверторное оборудывание: Kstar 500 кВт, солнечные панели Talesun 270 Вт. В ДСТУ 8635:2016 сформулированые требования касающиеся возможности регулирования реактивной мощности промышленными СЭС. Согласно данному стандарту промышленная СЭС должна регулировать свой коэффициент мощности от 0.8 до 1 в соответствии с требованиями центральной сети. Также, в данной статье описывается влияние компенсации реактивной мощности на качество электрической энергии линии 35 кВ. Согласно постановления НКРЕКП от 14.03.2018 №312, о правилах расчета за реактивную мощность клиент должен возмещать энергопередающей компании убытки за перетоки реактивной мощности. В статье описан алгоритм управления реактивной мощностью на уровне точки подключения к центральной електрической сети. Он заключается в управлении инверторным оборудованием через информационный протоколок ModBus TCP. Каждый ивнертор имеет запрограммированный производителем реестр информациоых команд. Посылая команду через информационный протокол в нужный реестр, инвертор может выполнить действие или передать параметры, в соответствии с типом реестра в который послана команда. Инвертор начинает компенсировать реактивну мощность, когда получает команду в реестр, отвечающий значению коэффициента мощности. Значение для компенсации считывается с устройства анализа качества электросети на вводной ячейке. Считанное значение обрабатывается сервером и отправляется на инвертор. Используя компенсацию реактивной мощности убытки клиента за перетоки реактивной мощности сводятся до минимального значения. Библ. 10, табл. 3, рис. 3.

Ключевые слова: *реактивная мощность, напряжение, коэффициент нелинейных возмущений, активная мощность, коэффициент мощности, динамическое регулирование.*

REFERENCES

1. Postanovleniye NKREKP №312 ot 14.03.2018. [NERCP Resolution № 312 dated March 14. 2018]. Retrived from http://www.nerc.gov.ua/?id=31833 [in Ukrainian].

2. DSTU 8635: 2016. Ploshchadki dlya fotoelektricheskikh stantsiy prisoyedineniya stantsiy k elektroenergeticheskoy sistemy. [DSTU 8635:2016. Surfaces for photoelectric stations connection of stations to the electrical energy system]. Retrived from http://eom.com.ua/index.php?action=downloads;sa=downfile&id=3656 [in Ukrainian].

3. Reactive Power Interconnection Requirements for PV and Wind Plants. Recommendations to NERC. Retrived from https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2012/121098.pdf [in English].

4. *Brown T.* Transmission network loading in Europe with high shares of renewables. IET Renewable Power Generation. vol. 9. no. 1. pp.57-65. Jan. 2015. [in English].

5. GB/T19964-2012. Photovoltaic power plant power system access technical requirements. Beijing. General Administration of Quality Supervision. Inspection and Quarantine of Peoples Republic of China. China National Standardization Management Committee. 2012. [in English].

6. *Campbell M., Aschenbrenner P., Blunden J., Smeloff E., Wright S.* The drivers of the levelized cost of electricity for utility-scale photovoltaics. SunPower Corp. 200. [in English].

7. *Zhou J.* and *Gole A.* VSC transmission limitations imposed by AC system strength and AC impedance characteristics. in Proc. 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC). 2012. Pp. 1-6. [in English].

8. *Collins L.* and *Ward J.* Real and reactive power control of distributed PV inverters for overvoltage prevention and increased renewable generation hosting capacity. Renewable Energy. 2015. vol. 81. Pp. 464-471. [in English].

9. Utility-scale solar photovoltaic power pants-A project developers guide. International Finance Corporation (IFC). 2015. [in English].

10. *Molina-Garcia A., Mastromauro R. A., Garcia-Sanchez T., Pugliese S., Liserre M., Stasi S.* Reactive power flow control for PV inverters voltage support in LV distribution networks. IEEE Trans. Smart Grid. Jan. 2017. Vol. 8. No. 1. Pp. 447-456. [in English].

Стаття надійшла до редакції: 06.02.2019
Остаточна версія 11.03.19

УДК 621.472

ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПАРАБОЛОЇДНОГО ТА ПАРАБОЛОЦИЛІНДРИЧНОГО КОНЦЕНТРАТОРІВ ДЛЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ НА БАЗІ ДВИГУНА СТІРЛІНГА

В.П. Студенець, канд. техн. наук, доцент, **К.О. Славінська**, магістр

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Концентратори сонячної енергії набувають все більшого значення у зв'язку з необхідністю вирішення важливих наукових та інженерних задач при створенні нової техніки та використанні сонячної енергії.
Основними характеристиками дзеркал, що концентрують пряме сонячне випромінювання, є опромінення у фокальній площині E_r та максимальне опромінення $E_{\max}$ у фокусі дзеркала. При проектуванні потужних геліоустановок виникає необхідність застосування нового програмного забезпечення для розрахунку технічних характеристик сонячних концентраторів.
Розглянуто питання створення універсального програмного забезпечення для обрахунку основних енергетичних характеристик параболоїдних та параболоциліндричних концентраторів сонячної енергії у середовищі Windows. Узагальнена математична модель забезпечує реалізацію етапів розрахунку та проектування з урахуванням енергетичних характеристик джерела випромінювання, неточності відбиваючих поверхонь та інше.
Представлений аналіз існуючих моделей розрахунку параметрів параболічного та параболоциліндричного концентраторів. За результатами дослідження визначено відмінності між методиками, розраховано ключові параметри, визначено відмінності між підходами.
Створено математичну модель розрахунку основних характеристик для ідеального та реального концентратора сонячної енергії. Наведено відмінність та особливості розрахунку параболічних та параболоциліндричних сонячних концентраторів. Змодельовано покроковий алгоритм обрахунку характеристик сонячного концентратора.
Побудовано графік залежності максимальної опроміненості параболоїдного та параболоциліндричного сонячного концентратора від максимального кута розкриття.
Розроблену програму можна застосовувати у сучасній геліотехнічній практиці, пов'язаній з проектуванням потужних геліоустановок. Бібл. 8, табл. 3, рис. 7.
Ключові слова: *параболічний концентратор, параболоциліндричний концентратор, двигун Стірлінга, відновлювальні джерела енергії.*

NUMERICAL CALCULATION OF PARABOLIC AND PARABOLIC THROUGH CONCENTRATOR PARAMETERS FOR THE SOLAR POWER SYSTEM BASED ON STIRLING ENGINE

V. Stoudenets, candidate of technical science, assistant professor, **K. Slavinska**, master

Institute of Energy Saving and Energy Management,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Concentrators of solar energy are gaining increasing importance in connection with the need to address important scientific and engineering tasks in the creation of the new technology and the use of solar energy.
The main characteristics of the mirrors, which concentrate direct solar radiation, are irradiation in the focal plane E_r and maximal irradiation in the focus of the mirror $E_{\max}$. When designing powerful solar installations there is a need for the use of new software to calculate the technical characteristics of solar concentrators.
The issue of creating universal software for calculating the basic energy characteristics of parabolic and parabolic cylindrical solar energy concentrators in the Windows environment is considered. The generalized mathematical model provides implementation of the stages of calculation and designs taking into account the energy characteristics of the source of radiation, the inaccuracy of reflecting surfaces, and so on.
The analysis of the existing models for calculating parameters of parabolic and parabolic cylindrical through concentrators is presented. According to the results of the study, the differences between the methods were determined, the key parameters were calculated, the differences between approaches were determined.
The mathematical model for calculating the basic characteristics for an ideal and real solar energy concentrator is created. The difference and peculiarities of the calculation of parabolic and parabolic cylindrical solar concentrators are presented. A step-by-step algorithm for calculating the characteristics of the solar concentrator is simulated.
The plot of the dependence of the maximum irradiance of the parabolic and parabolic cylindrical solar concentrators are presented through solar concentrator on the maximum opening angle was constructed.
The developed program can be used in modern solar technology, related to the design of powerful solar systems.
Ref. 8, Tab. 3, Fig. 7.
Keywords*: parabolic concentrator, parabolic cylindrical concentrator, Stirling engine, renewable energy sources.*

© В.П.Студенець, К.О.Славінська, 2019



В.П. Студенець
V. Stoudenets

Відомості про автора: Доцент кафедри теплотехніки та енергозбереження Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кандидат технічних наук.
Освіта: Вища. Московське вище технічне училище ім. Баумана. Спеціальність «Комбіновані двигуни внутрішнього згоряння».
Наукова сфера: Поновлювальні джерела енергії та енергозбереження**,** термомолекулярна енергетика.
Публікації: більше 45 наукових праць з них 4 міститься в наукометричній базі Scopus та Web of Science .
ORCID: 0000-0002-7513-798X
Контакти: (067)477-90-50
e-mail: v.stoudenets@kpi.ua

Author information: Associate Professor of the Department of Thermal Engineering and Energy Saving of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", candidate of technical sciences.
Education: Moscow Higher Technical School after Bauman. Specialty "Combined Internal Combustion Engines".
Research area: Renewable Energy and Energy Saving, Thermomolecular Energetics.
Publications: more than 45 scientific works, 4 – Scopus, Web of Science.
ORCID: 0000-0002-7513-798X
Contacts: (067)477-90-50
e-mail: v.stoudenets@kpi.ua



К.О.Славінська
K.Slavinska

Відомості про автора: Магістр кафедри теплотехніки та енергозбереження Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».
Освіта: Вища. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Спеціальність «Теплоенергетика».
Наукова сфера: енергетика, поновлювальні джерела енергії та енергозбереження.
Публікації: 2 наукові праці
ORCID: 0000-0002-6778-6699
Контакти: (098)264-47-89
e-mail: kateryna.slavinska@gmail.com

Author information: Master of the Department of Thermal Engineering and Energy Saving of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".
Education: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Specialty " Thermal Engineering".
Research area: Energetics, Renewable energy and Energy Saving.
Publications: 2 scientific works.
ORCID: 0000-0002-6778-6699
Contacts: (098)264-47-89
e-mail: kateryna.slavinska@gmail.com

Перелік використаних позначень та скорочень:

P – фокальний параметр;
f – фокальна довжина;
U_m – кут розкриття;
E_0 – падаюча радіація;
R_S – коефіцієнт відбиття;
ПК – параболоїдний концентратор;
ПЦК – парболоциліндричний концентратор.

Вступ. Робота є продовженням досліджень процесу перетворення енергії сонячного випромінювання у механічну енергію на базі сонячних енергоустановок з тепловим динамічним перетворювачем [1, 2].

Концентратори сонячної енергії набувають все більшого значення у зв'язку з необхідністю вирішення важливих наукових та інженерних задач при створенні нової техніки та використанні сонячної енергії. Основними характеристиками дзеркал, що концентрують пряме сонячне випромінювання, є опромінення у фокальній площині E_r та максимальне опромінення $E_{\max}$ у фокусі дзеркала. При проек-туванні потужних геліоустановок виникає необхідність застосування нового програмного забезпечення для розрахунку технічних характеристик сонячних концентраторів.

Мета та завдання. Метою роботи є створення нового програмного забезпечення для обрахунку основних технічних параметрів параболоїдного та параболоциліндричного сонячних концентраторів.

Відповідно до поставленої мети мають бути вирішені такі завдання:

1. Аналіз існуючих моделей розрахунку параметрів параболоїдного та параболоцилідричного концентраторів.
2. Виведення нових формул обрахунку основних енергетичний характеристик параболоїдного концентратора.
3. Порівняння результатів, отриманих за допомогою нових та існуючих формул.
4. Побудова графіку залежності максимальної опроміненості параболоїдного та параболоциліндричного сонячного концентратора від максимального кута розкриття $U_{\max}$.
5. Створення блок-схеми алгоритму розрахунку характеристик сонячного концентратора.

Результати досліджень. Узагальнена математична модель забезпечує реалізацію етапів розрахунку та проектування з урахуванням енергетичних характеристик джерела випромінювання, неточності відбиваючих поверхонь та інше.

У роботі [3] представлено формулу для розрахунку максимальної концентруючої спромож-

ності параболоциліндричних дзеркал ідеальної системи

$$E_{m(\text{i})}^{\text{пц}} = 298{,}6E_0R_s\sin U_m, \qquad (1)$$

де R_s – коефіцієнт дзеркального відбиття, U_m – максимальний кут розкриття сонячного концентратора, E_0 – густина потоку прямого сонячного проміння, Вт/м^2.

Спираючись на вищезгадане визначення, автори [4] виводять формулу для розрахунку максимальної концентруючої спроможності параболоциліндричних дзеркал реальної системи

$$E_{m(\text{p})}^{\text{пц}} = 298{,}6E_0R_s\sin U_m\cdot K, \qquad (2)$$

де K – коефіцієнт корекції, що враховує неідеальність концентруючої системи (визначається експериментально для конкретної установки).

У даному дослідженні за вихідний пункт приймається формула Р.Р. Апарісі [5] для визначення опромінення у фокальній точці сонячного концентратора

$$E_F = 8{,}3610^3E_0R_sA_mh^2, \qquad (3)$$

де A_m – функція, що враховує геометричні особливості відбивача, h – міра точності системи (див. нижче).

Для параболоїдних відбивачів

$$A_m = \frac{\pi}{6}\left[\sqrt{2}\left(2-\cos U_m\right)\sqrt{1+\cos U_m}-2\right]. \qquad (4)$$

Для параболоциліндричних відбивачів

$$A_m = b\frac{\sqrt{2}}{3}\left(\cos U_m+2\right)\sqrt{1-\cos U_m}, \qquad (5)$$

де b – піввісь елементарного еліпса, що визначається за формулою

$$b = p\varphi/(1+\cos U_m), \qquad (6)$$

де p – фокальний параметр, що визначається виходячи з геометричної форми сонячного концентратора; для рефлекторів параболоциліндричної та параболоїдної форм обчислюється

$$p = 2f, \qquad (7)$$

де f – фокальна довжина.

Як видно, формула Р.Р. Апарісі має універсальний характер і може бути використана для розрахунку параболоциліндричних та параболічних концентраторів.

На рис. 1 зображено концентричну систему, яка збирає випромінювання в точці F в межах тілесного кута [6].

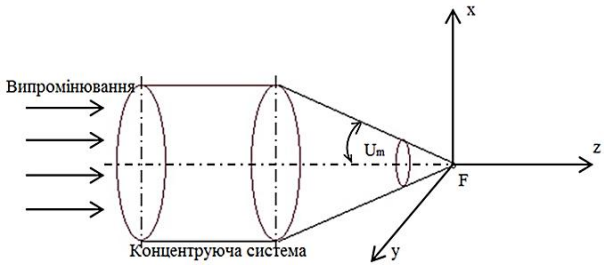


Рис. 1. Схема для розрахунку фокальної опроміненості
Fig. 1. Scheme for calculation of focal irradiance

Опромінення у фокальній точці виражається інтегралом

$$E_F = \int B\left(\overrightarrow{dw}\right)dw_z, \qquad (8)$$

де $B\left(\overrightarrow{dw}\right)$ – енергетична яскравість у напрямку $\overrightarrow{dw}$, $\overrightarrow{dw}$ – елементарний вектор тілесного кута, dw_z – проекція $\overrightarrow{dw}$ на оптичну вісь z.

Якщо яскравість постійна в межах тілесного кута, система симетрична та відсутнє затемнення, то опромінення в фокальній точці [6]

$$E_F = \pi B\sin^2 U_m. \qquad (9)$$

Енергетична яскравість в у напрямку елементарного тілесного кута [3, 7]

$$B = 1{,}255\cdot B_{cp}\cdot\frac{\left(1+1{,}5641\cdot\sqrt{1-\left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^2}\right)}{2{,}5641}. \qquad (10)$$

З іншого боку, розподіл яскравості по сонячному диску можна представити у вигляді

$$B = R_sB_0. \qquad (11)$$

В земних умовах яскравість сонячного диску у центрі в 1,2 рази перевищує середню яскравість

$$B_0 = 1{,}2\cdot B_{cp}. \qquad (12)$$

Середня яскравість сонячного диска

$$B_{cp} = \frac{E_0}{\pi\varphi_0^2}, \qquad (13)$$

де φ_0 – кут розкриття елементарного конічного пучка, кутовий радіус Сонця становить 0,004654 рад.

Таким чином, опромінення в фокусі ідеального параболоїдного концентратора [6]

$$E_F^{i\partial} = \frac{1{,}2}{\phi_o^2}E_0R_S\sin^2 U_m. \qquad (14)$$

Інтегральний параметр точності ідеальної системи

$$\left(h_1^{i\partial}\right)^2 = \frac{1{,}2}{\varphi_o^2} = (236)^2. \qquad (15)$$

З урахуванням (15), формула (14) прийме вигляд

$$E_{F(i)}^n = \left(h_1^{i\partial}\right)^2 E_0 R_s \sin^2 U_m = \\ = (236)^2 E_0 R_s \sin^2 U_m. \qquad (16)$$

Опромінення в фокусі реального параболоїдного концентратора відповідно

$$E_{F(p)}^n = h_1^2 E_0 R_s \sin^2 U_m. \qquad (17)$$

При цьому у фокусі реальної концентруючої системи опромінення буде менше ($E_F^p < E_F^{i\partial}$), так як не всі точки апертури направлять промені в фокус. Реальна апертура виявиться меншою ніж в ідеальному випадку. Однак частіше цей ефект трактується інакше: апертура вважається такою ж, а зменшення опромінення пов'язано зі зменшенням яскравості джерела [6].

Необхідно враховувати, що $h_1 < h_1^{i\partial}$. Коефіцієнт h_1 пов'язаний з неідеальністю концентруючої системи, φ_0 та B_0. При фіксованій відстані від Сонця параметр h_1 характеризує ідеальність сонячної концентруючої системи і може бути прийнятим за інтегральний ступінь точності. Інтегральний ступінь точності визначається

$$h_1 = h \cdot \frac{180}{\pi}. \qquad (18)$$

В свою чергу коефіцієнт h визначається за графіком, представленим на рис. 2 [5].

Радіус-вектор на фокальній площині, відстань від фокуса

$$r = \rho \cdot \sin\varphi. \qquad (19)$$

де ρ – відстань від фокусу до певної точки кривої визначається з рівняння конічного перерізу

$$\rho = \frac{p}{1 + \cos U_m}. \qquad (20)$$

Так як $\sin\varphi \approx \varphi$, то відповідно $r = \rho\varphi$.

Необхідно відзначити, що основною відмінністю, яку необхідно враховувати при обрахунках $E_{f(p)}$ та $E_{f(i)}$ є коефіцієнт h_1, який при визначенні опромінення в фокусі реального відбивача розраховується з формули (12), а при розрахунку ідеального відбивача приймається сталою величиною і дорівнює 236.

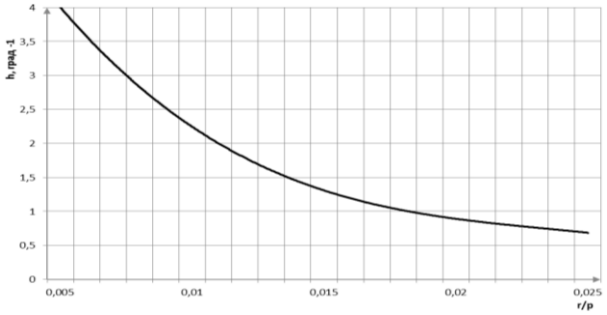


Рис. 2. Залежність коефіцієнту інтегральної точності h від радіусу фокального зображення r / p

Fig. 2. Dependence of the integral accuracy coefficient h on the focal image radius r / p

Таким чином, опромінення в фокусі реального параболоциліндричного концентратора визначається виразом

$$E_{f(p)}^{m\mu} = 8{,}36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m h^2, \qquad (21)$$

а опромінення в фокусі ідеального параболоциліндричного концентратора

$$E_{f(i)}^{m\mu} = 8{,}36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m h_1^{i\partial} = \\ = 8{,}36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m 4{,}12^2 \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 = \\ = 8{,}36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m (236)^2. \qquad (22)$$

З урахуванням того, що формули (3) та (17) відображують однакову величину і є тотожними, можна відслідкувати залежність

$$8{,}36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m h^2 = E_0 R_s \sin^2 U_m \left(h \cdot \frac{180}{\pi}\right)^2,$$

$$8{,}36 \cdot 10^3 A_m = \sin^2 U_m \left(\frac{180}{\pi}\right)^2,$$

$$A_m = 0{,}39 \cdot \sin^2 U_m, \qquad (23)$$

або

$$\sin U_m = \sqrt{\frac{A_m}{0{,}39}}. \qquad (24)$$

Необхідно зазначити, що дану залежність між A_m та $\sin U_m$ доцільно використовувати тільки у випадку параболоїдного концентратора.

Підставивши (23) в (3), відома формула Р.Р. Апарісі прийме вигляд

$$E_{F(p)}^n = 3{,}26 \cdot 10^3 E_o R_s \sin^2 U_m h^2. \qquad (25)$$

Отримана формула (25) дає змогу розрахувати $E_{F(i)}^n$ без додаткового розрахунку коефіцієнта A_m.

Підставивши (24) в (17) отримаємо

$$E^n_{F(p)} = h_1^2 E_0 R_s \frac{A_m}{0{,}39}. \quad (26)$$

Опромінення в фокусі ідеального параболоїдного концентратора з формул (25) та (26) відповідно

$$E^n_{F(i)} = 3{,}26\cdot 10^3 E_o R_s \sin^2 U_m h_{i\partial}^2. \quad (27)$$

$$E^n_{F(i)} = h_{i\partial}^2 E_0 R_s \frac{A_m}{0{,}39}. \quad (28)$$

Максимальну концентруючу спроможність ідеального параболічного сонячного концентратора можна визначити за формулами

$$E^n_{m(\mathrm{i})} = E_0 R_s \sin^2 U_m \left(\frac{180}{\pi}\right)^2. \quad (29)$$

$$E^n_{m(\mathrm{i})} = 8{,}36\cdot 10^3 E_0 R_s A_m. \quad (30)$$

$$E^n_{m(i)} = 3{,}26\cdot 10^3 E_o R_s \sin^2 U_m. \quad (31)$$

$$E^n_{m(i)} = E_0 R_s \frac{A_m}{0{,}39}\left(\frac{180}{\pi}\right)^2. \quad (32)$$

Для обрахунку максимальної концентруючої спроможності реального параболічного сонячного концентратора необхідно формули (29) – (32) помножити на коректуючий коефіцієнт K.

$$E^n_{m(p)} = E_0 R_s \sin^2 U_m \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 K. \quad (33)$$

$$E^n_{m(p)} = 8{,}36\cdot 10^3 E_0 R_s A_m K. \quad (34)$$

$$E^n_{m(p)} = 3{,}26\cdot 10^3 E_o R_s \sin^2 U_m K. \quad (35)$$

$$E^n_{m(p)} = E_0 R_s \frac{A_m}{0{,}39}\left(\frac{180}{\pi}\right)^2 K. \quad (36)$$

Опромінення в фокусі параболоцилідричного концентратора з ідеальним та реальним рефлектором можна вивести з формули (3)

$$E^{n\mu}_{F(i)} = 8{,}36\cdot 10^3 E_o R_s A_m h_{i\partial}^2 \left(\frac{\pi}{180}\right)^2, \quad (37)$$

$$E^{n\mu}_{F(p)} = 8{,}36\cdot 10^3 E_o R_s A_m h^2. \quad (38)$$

Розподіл опроміненості на фокальній площині концентратора

$$E_r = E_F e^{-cr^2}. \quad (39)$$

Ця формула може бути застосована у відношенні параболоциліндричного та параболічного концентратора.

Коефіцієнт в показнику визначається виразом

$$c = 3{,}283\cdot 10^3 h_1^2 \left(\frac{1+\cos U_m}{p}\right)^2. \quad (40)$$

Для зручності користування вищезазначені формули розрахунку основних енергетичних характеристик занесено в таблиці 1 та 2 для параболоїдного та параболоциліндричного концентраторів відповідно.

Для підтвердження правильності виведених формул, в табл. 3 надано розрахункове порівняння нових формул з існуючими формулами Р.Р. Апарісі та Р.А. Західова. Вихідні параметри параболоїдних концентраторів ПК №1 і ПК №2 взято з [5], ПК №3 – 3 [8].

Таблиця 1. Формули розрахунку основних енергетичних характеристик сонячного параболоїдного концентратора

Table 1. Formulas for calculating the basic energy characteristics of a solar parabolic concentrator

	Параболоїдний сонячний концентратор	
	Ідеальний рефлектор	**Реальний рефлектор**
Максимальна концентруюча спроможність E_m	$E^n_{m(\mathrm{i})} = E_0 R_s \sin^2 U_m \left(\frac{180}{\pi}\right)^2$	$E^n_{m(p)} = E_0 R_s \sin^2 U_m \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 K$
	$E^n_{m(\mathrm{i})} = 8{,}36\cdot 10^3 E_0 R_s A_m$	$E^n_{m(p)} = 8{,}36\cdot 10^3 E_0 R_s A_m K$
	$E^n_{m(i)} = 3{,}26\cdot 10^3 E_o R_s \sin^2 U_m$	$E^n_{m(p)} = 3{,}26\cdot 10^3 E_o R_s \sin^2 U_m K$
	$E^n_{m(i)} = E_0 R_s \frac{A_m}{0{,}39}\left(\frac{180}{\pi}\right)^2$	$E^n_{m(p)} = E_0 R_s \frac{A_m}{0{,}39}\left(\frac{180}{\pi}\right)^2 K$

	Параболоїдний сонячний концентратор	
	Ідеальний рефлектор	**Реальний рефлектор**
Опромінення у фокальній точці E_F	$E^n_{F(i)} = E_0 R_s \sin^2 U_m h^2_{iд}$	$E^n_{F(p)} = E_0 R_s \sin^2 U_m h^2_1$
	$E^{пц}_{F(i)} = 8,36 \cdot 10^3 E_o R_s A_m h^2_{iд} \left(\frac{\pi}{180}\right)^2$	$E^{пц}_{F(p)} = 8,36 \cdot 10^3 E_o R_s A_m h^2$
	$E^n_{F(i)} = 3,26 \cdot 10^3 E_o R_s \sin^2 U_m h^2_{iд}$	$E^n_{F(p)} = 3,26 \cdot 10^3 E_o R_s \sin^2 U_m h^2$
	$E^n_{F(i)} = h^2_{iд} E_0 R_s \frac{A_m}{0,39}$	$E^n_{F(p)} = h^2_1 E_0 R_s \frac{A_m}{0,39}$
Опромінення на фокальній площині E_r	$E_r = E_F e^{-cr^2}$	

Таблиця 2. Формули розрахунку основних енергетичних характеристик сонячного параболоциліндричного концентратора

Table 2. Formulas for calculating the basic energy characteristics of a solar parabolic cylindrical concentrator

	Параболоциліндричний сонячний концентратор	
	Ідеальний рефлектор	**Реальний рефлектор**
Максимальна концентруюча спроможність E_m	$E^{пц}_{m(i)} = 298,6 \cdot E_0 R_s \sin U_m$	$E^{пц}_{m(p)} = 298,6 \cdot E_0 R_s \sin U_m K$
Опромінення в фокальній точці E_F	$E^{пц}_{F(i)} = 8,36 \cdot 10^3 E_o R_s A_m h^2_{iд} \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right)^2$	$E^{пц}_{f(p)} = 8,36 \cdot 10^3 E_0 R_s A_m h^2$
Опромінення на фокальній площині E_r	$E_r = E_F e^{-cr^2}$	

Таблиця 3. Порівняння методик розрахунку основних енергетичних характеристик сонячних параболоїдних концентраторів (ПК)

Table 3. Comparison of the methods for calculating the basic energy characteristics of solar parabolic concentrators (PCs)

	ПК №1	ПК №2	ПК №3
Фокальний параметр *p*, м	10,72	1,694	1,2
Інтегральний параметр точності *h*, град$^{-1}$	0,9	4	2,08
Максимальний кут розкриття концентратора U_{max}, град	49,7	61,87	64
Падаюча радіація E_o, Вт/м^2	814	814	814
Коефіцієнт відбиття R_s	0,8	0,8	0,8
Геометричний коефіцієнт A_{max}	0,24	0,33	0,34
Опромінення в фокусі реального відбивача за формулою (3) Р.Р. Апарісі, Вт/м^2	1,05 · 10^6	2,84 · 10^7	8,12· 10^6
Опромінення в фокусі реального відбивача за формулою (17) Р.А. Західова, Вт/м^2	1,01 · 10^6	2,66 · 10^7	8,01 · 10^6
Опромінення в фокусі реального відбивача за новою формулою (25), Вт/м^2	1,00 · 10^6	2,64 · 10^7	8,00· 10^6
Опромінення в фокусі реального відбивача за новою формулою (26), Вт/м^2	1,06 · 10^6	2,86 · 10^7	8,07· 10^6

З отриманих результатів очевидно, що застосування спрощених формул (25) та (26) є доцільним.

Нижче приведено максимальні опроміненості, отримані у фокальній точці параболоїдного (рис. 3) та параболоцидіндричного (рис. 4) сонячного концентратора.

Розроблено програму розрахунку на основі вищенаведених математичних співвідношень, яку доцільно використовувати при проектуванні та експлуатації сонячних параболоїдних та параболоциліндричних концентраторів. Блок-схема програми представлена на рис. 5.

Інтерфейс створеної програми для розрахунку енергетичних характеристик параболоїдного та параболоциліндричного сонячного концентратора зображено на рис. 6 та рис. 7 відповідно.

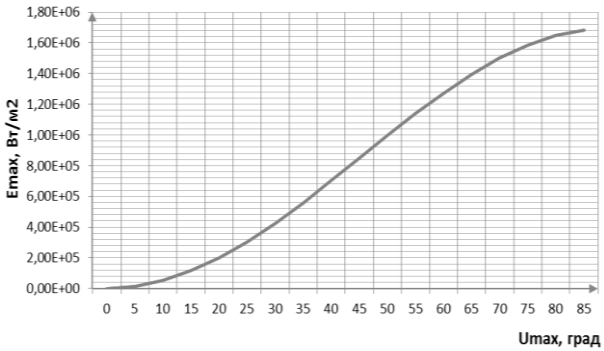


Рис. 3. Максимальна опроміненість параболоїдного сонячного концентратора в залежності від максимального кута розкриття $U_{\max}$.

Fig. 3. Max irradiance of solar parabolic concentrator, depending on the max opening angle $U_{\max}$.

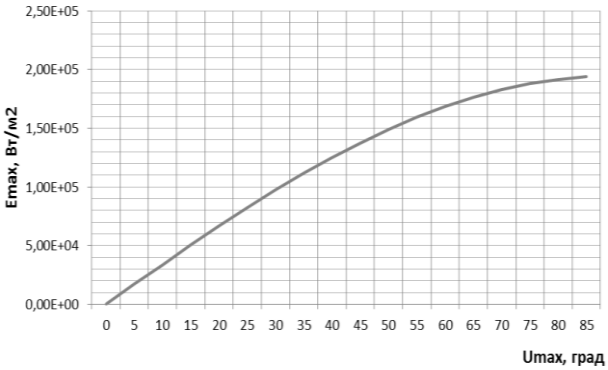
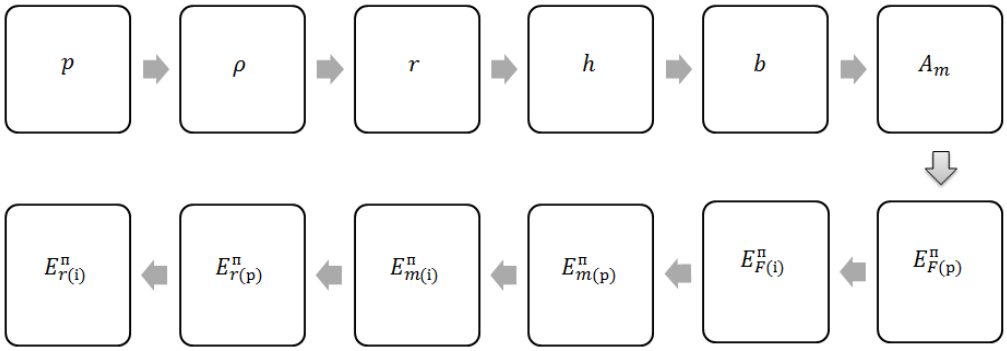


Рис. 4. Максимальна опроміненість парабоциліндричного сонячного концентратора в залежності від максимального кута розкриття $U_{\max}$.

Fig. 4. Maximum irradiance of solar parabolic cylindrical concentrator, depending on the maximum opening angle $U_{\max}$.



.

Рис. 5. Блок-схема алгоритму розрахунку основних енергетичних характеристик концентратора сонячної енергії.

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for calculating the basic energy characteristics of the solar energy concentrator.

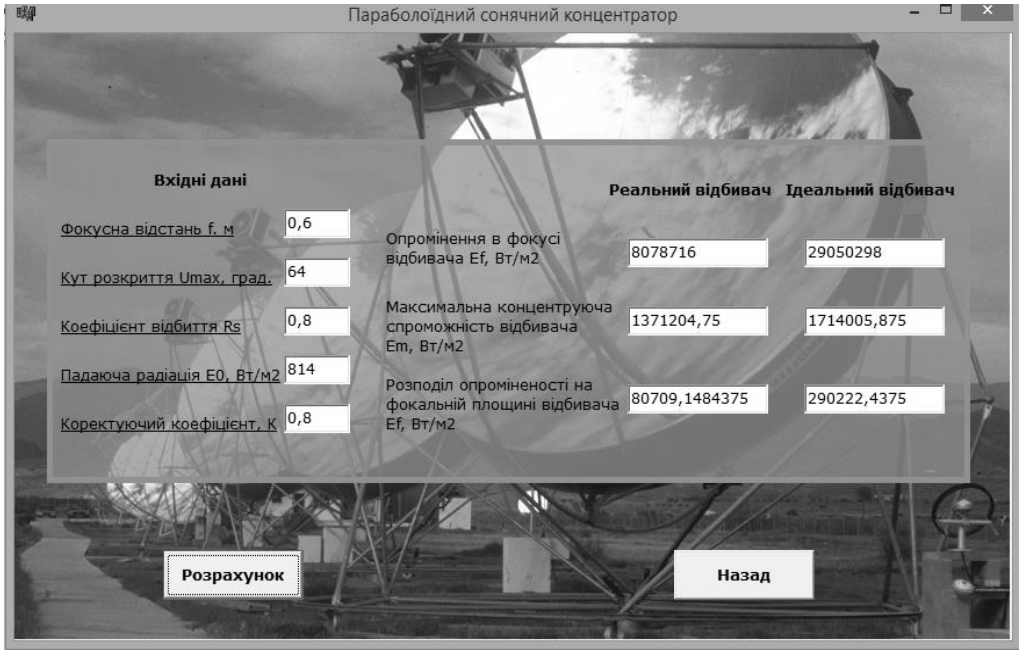


Рис. 6. Програма розрахунку параболоїдного сонячного концентратора

Fig. 6. Program for calculating solar parabolic concentrator

Вхідними параметрами є: фокусна відстань, максимальний кут розкриття, коефіцієнт відбиття, падаюча радіація, корректуючий коефіцієнт.

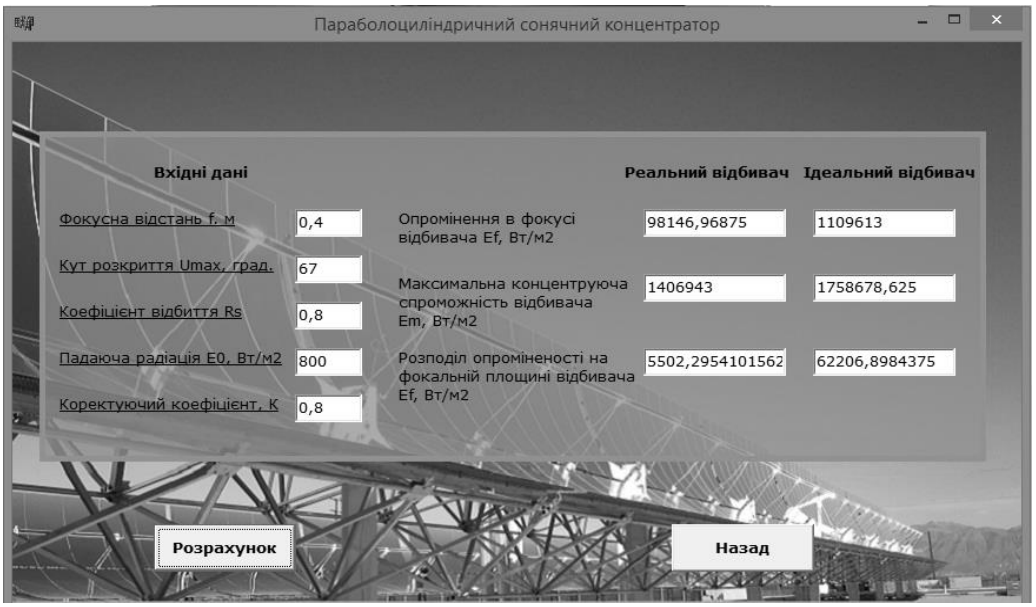


Рис. 7. Програма розрахунку параболоциліндричного сонячного концентратора.

Fig. 7. Program for calculating solar parabolic cylindrical concentrator.

Висновки. Проведено дослідження різних методик визначення основних енергетичних характеристик сонячних концентраторів. Запропоновано новий підхід розрахунку параболоїдного концентратора. Розроблено універсальну програму, яку доцільно використовувати при проектуванні і експлуатації сонячних концентраторів.

1. *Студенець В.П., Пасічний В.В., Остапенко С.О., Миротюк П.А.* Дослідницький стенд «сонячний концентратор – двигун Стірлінга» та його базові характеристики. Відновлювана енергетика. 2011. №1(24). С. 5-10.

2. *Студенець В.П., Пасічний В.В., Птуха А.А.* Базові характеристики дослідницького стенду “офсетний сонячний концентратор – двигун Стірлінга”. Відновлювана енергетика. 2013. №1(32). С. 31-36.

3. *Захидов Р.А, Клычев Ш.І.* Максимальная концентрирующая способность параболоцилиндрических зеркал. Гелиотехника. 1973. Выпуск 4. С. 46-47.

4. *Акбаров Р.Ю.* Аналитическая формула для расчета энергетических характеристик солнечного параболоцилиндирического концентратора. Республиканская Конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», посвященной 100-летию академика С.А. Азимова. Ташкент. 2014. URL: https://www.twirpx.com/file/1495729/.

5. *Апариси Р.Р.* Экспериментальная установка для получения высоких температур. Использование солнечной энергии. Вып.1. Изд. АН СССР. 1957. С. 151-162.

6. *Захидов Р.А.* Технология и испытания гелиотехнических концентрирующих систем. Ташкент. Изд. «Фан» УзССР. 1978. 184 с.

7. *Жозе П.* Распределение плотности потока энергии в фокальном изображении солнечной печи. Солнечные высокотемпературные печи. М. Изд. иностр. лит. 1960. С. 229-239.

8. *V.P. Stoudenets, N.N. Tsyrin, S.S. Dovgyi, N.O. Yemanova*. The Characteristics of Solar Dish/Stirling System Based on UDS-1 Machine. Proceedings of 8-th International Green Energy Conference (IGEC-8). Kyiv. June 17-19. 2013. Pp. 214-216.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПАРАБОЛОИДНОГО И ПАРАБОЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНЦЕНТРАТОРОВ ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

В.П. Студенец, канд. техн. наук, доцент, **К.А. Славинская**, магистр

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Институт энергосбережения и энергоменеджмента

Концентраторы солнечной энергии приобретают всё большее значение в связи с необходимостью решения важных научных и инженерных задач при создании новой техниіки и использовании солнечной энергии.

Основными характеристиками зеркал, концентрирующих прямое солнечное излучение, являются облученность в фокальной плоскости E_r *и максимальная облученность* $E_{\max}$ *в фокусе зеркала. При проектировании мощных гелиоустановок возникает необходимость использования нового программного обеспечения для расчета технических характеристик солнечных концентраторов.*

Рассмотрен вопрос создания универсального программного обеспечения для расчета основных энергетических характеристик параболоидных и параболоцилиндрических концентраторов солнечной энергии в среде Windows. Обобщенная математическая модель обеспечивает реализацию этапов расчета и проектирования с учетом энергетических характеристик источника излучения, неточности отражающих поверхностей и др.

Представлен анализ существующих моделей расчета параметров параболического и параболоцилиндрического концентраторов. По результатам исследования определены

отличия между методиками, рассчитаны ключевые параметры, определены различия между подходами.
Создана математическая модель расчета основных характеристик для идеального и реального концентратора солнечной энергии. Приведены отличие и особенности расчета параболических и параболоцилиндрических солнечных концентраторов. Смоделирован пошаговый алгоритм расчета характеристик солнечного концентратора.
Построен график зависимости максимальной облученности параболоидного и параболоцилиндрического солнечного концентратора от максимального угла раскрытия.
Розработанную программу можно применять в современной гелиотехнической практике, связанной с проектированием мощных гелиоустановок. Библ. 8, табл. 3, рис. 7.
Ключевые слова: *параболический концентратор, параболоцилиндрический концентратор, двигатель Стирлинга, возобновляемые источники энергии.*

REFERENCES

1. *Stoudenets V.P., Pasichnyi V.V., Ostapenko S.O., Myrotiuk P.A.* Doslidnytskyi stend «soniachnyi kontsentrator – dvyhun Stirlinha» ta yoho bazovi kharakterystyky. [Research unit “solar concentrator - Stirling engine” and its basic characteristics]. Vidnovljuvana energetyka. 2011. № 1(24). Pp. 5-10 [in Ukrainian].

2. *Stoudenets V.P., Pasichnyi V.V., Ptukha A.A.* Bazovi kharakterystyky doslidnytskoho stendu “ofsetnyi soniachnyi kontsentrator – dvyhun Stirlinha”. [The basic characteristics of the research unit "offset solar concentrator - Stirling engine"]. Vidnovljuvana energetyka. 2013. № 1(32). Pp. 31-36 [in Ukrainian].

3. *Zahidov R.A, Klyichev Sh.I.* Maksimalnaya kontsentriruyuschaya sposobnost parabolotsilindricheskih zerkal. [Maximum concentration capacity of parabolic through mirrors]. Geliotehnika. 1973. № 4. Pp. 46-47 [in Russian].

4. *Akbarov R.Yu.* Analiticheskaya formula dlya rascheta energeticheskih harakteristik solnechnogo parabolotsilindricheskogo kontsentratora. [Analytical formula for calculation the energetic characteristics of the solar parabolic through collector]. Respublikanskaya Konferentsiya «Fundamentalnyie i prikladnyie voprosyi fiziki», posvyaschennoy 100-letiyu akademika S.A.Azimova. Tashkent. 2014. Retieved from https://www.twirpx.com/file/1495729/ [in Russian].

5. *Aparisi R.R.* Eksperimentalnaya ustanovka dlya polucheniya vyisokih temperature. [Experimental setup for high temperatures]. Ispolzovanie solnechnoy energii. Vol. 1. Izd. AN SSSR. 1957. Pp. 151-162 [in Russian].

6. *Zahidov R.A.* Tehnologiya i ispyitaniya geliotehnicheskih kontsentriruyuschih system. [Technology and testing of heliotechnical concentrating systems]. Tashkent. Izd. «Fan» UzSSR. 1978. 184 p. [in Russian].

7. *Zhoze P.* Raspredelenie plotnosti potoka energii v fokalnom izobrazhenii solnechnoy pechi. [The flux through the focal spot of a solar furnace]. Solnechnyie vyisokotemperaturnyie pechi. Moscow. Izd. inostr. lit. 1960. Pp. 229-239 [in Russian].

8. *V.P. Stoudenets, N.N. Tsyrin, S.S. Dovgyi, N.O. Yemanova.* The Characteristics of Solar Dish/Stirling System Based on UDS-1 Machine. Proceedings of 8-th International Green Energy Conference (IGEC-8). Kyiv. June 17-19. 2013. Pp. 214-216 [in English].

Стаття надійшла до редакції 02.02.19
Остаточна версія 12.03.19



УДК 621.311.243; 621.311.245

ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ АВТОНОМНИХ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ОСНОВІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

В.І. Будько[1,2], канд. техн. наук, доцент, **С.О. Кудря[2,1],** чл.-кор. НАН України, докт. техн. наук, проф., **С.В. Войтко[1],** докт. екон. наук, проф., **О.О. Трофименко[1],** канд. екон. наук, доцент

[1]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
03056 м. Київ, пр-т Перемоги, 37
[2]Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
02094 м. Київ, вул. Гната Хоткевича, 20А

Проаналізовано об'єми виробітку електроенергії в Україні за минулий рік, а також динаміку приросту електроспоживання в порівнянні з попереднім роком. Розглянуто сучасний стан розвитку об'єктів відновлюваної енергетики України та відмічено, що суттєвий приріст фотоелектричних та вітроелектричних станцій обумовлений через найвищі коефіцієнти «зеленого тарифу», які діють на продаж екологічно чистої електроенергії. При цьому показано, що темпи збільшення потужностей вітроелектричних станцій суттєво поступаються фотоелектричним станціям. Відмічено, що вітроенергетичний потенціал України значно перевищує енергетичний потенціал сонячного випромінювання. Враховуючи швидко зростаючу динаміку приросту електромобілів на території України обґрунтована необхідність прискорення темпів використання енергетичного потенціалу вітру України через реалізацію автономних зарядних станцій електромобілів з вітроелектричними установками. Розглянута спадаюча динаміка індексу вартості вітроелектричних установок та літієвих акумуляторних батарей. Визначені основні капіталовкладення для реалізації системи автономної зарядної станції електромобіля з вітроелектричними установками та буферними акумуляторами енергії. На основі аналізу сезонного характеру зміни виробітку вітроелектричних установок, а також тарифної політики на продаж електричної енергії при заряді електромобілів встановлено, що термін окупності реалізації автономної зарядної станції даного типу може складати від 9-10 до 19-20 років. Відмічено, що показник гарантованого заряду електромобіля буде максимальним тільки за умови рівномірного розподілу швидкості вітру протягом року. Бібл. 8, рис. 4.

Ключові слова: *вітроелектрична установка, автономна зарядна станція, електромобіль, буферна акумуляторна батарея.*

ECONOMIC ASPECTS OF REALIZATION OF AUTONOMOUS CHARGER STATIONS OF ELECTRIC VEHICLES ON THE BASIS OF WIND TURBINE

V. Budko[1, 2], candidate of technical science, assistant professor, **S. Kudria[2,1],** corresponding member of the NAS of Ukraine, doctor of technical science, professor, **S. Voitko[1],** doctor of economic sciences, professor, **O. Trofymenko[1],** candidate of economic sciences, assistant professor.

[1]National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» 03056, 37 Peremohy Avenue, Kyiv, Ukraine
[2]Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine 02094, 20A Hnata Khotkevycha Street, Kyiv, Ukraine.

The volumes of electricity generation in Ukraine for the last year, as well as the dynamics of growth of electric consumption in comparison with the previous year have been analyzed. The current state of development of renewable energy objects of Ukraine is considered, and it is noted that a significant increase in photovoltaic and wind power plants is due to the highest coefficients of the "green tariff" that are valid for the sale of clean energy. It is shown that the rates of increase of capacities of wind power plants are significantly inferior to photoelectric stations. It is noted that the wind energy potential of Ukraine significantly exceeds the energy potential of solar radiation. Taking into account the rapidly growing dynamics of electric vehicle growth in Ukraine, the need to accelerate the use of the energy potential of Ukraine's wind through the implementation of autonomous charging stations of electric vehicles with wind turbines has been substantiated. The downward dynamics of the cost index of wind power plants and lithium-ion batteries is considered. The basic investments for realization of the system of an autonomous charging station of an electric motor with wind power plants and buffer batteries of energy are determined. On the basis of the analysis of the seasonal nature of the change in the production of wind power plants, as well as the tariff policy for the sale of electric energy at the charge of electric vehicles, it has been established that the payback period for the sale of an autonomous charging station of this type may be from 9-10 to 19-20 years. It is noted that the index of the guaranteed electric vehicle charge will be maximal only if the wind speed distribution is evenly distributed during the year. Ref. 8, fig. 4.

Keywords*: wind turbine, autonomous charging station, electric vehicle, buffer battery.*

© В.І.Будько, С.О.Кудря, С.В.Войтко, О.О.Трофименко, 2019



В.І. Будько
V. Budko

Відомості про автора: доцент кафедри Відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського), кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу вітроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України.
Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», інженер-технолог за фахом «Технічна електрохімія».
Наукова сфера: Системи накопичення і зберігання енергії на основі електрохімічних акумуляторів; комплексні системи енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії; підвищення ефективності роботи автономних вузлів енергопостачання на основі відновлюваних джерел енергії.
Публікації: 52. **Патенти:** 3.
ORCID: 0000-0002-6219-4221
Контакти: +38 (044) 204-81-91
e-mail: solar_budko@ukr.net

Author information: Associate Professor of the Department of Renewable Energy of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Igor Sikorsky KPI), PhD of Technical sciences, senior researcher the Department of Wind Energy the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine.
Education: National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", engineer-technologist in the specialty "Technical Electrochemistry".
Research area: Systems of accumulation and storage of energy based on electrochemical battery; Integrated energy supply systems based on renewable energy sources; Increasing the efficiency of autonomous power supply units on the basis of renewable energy sources.
Publications: 52. **Patents:** 3.
ORCID: 0000-0002-6219-4221
Contacts: +38 (044) 204-81-91
e-mail: solar_budko@ukr.net



С.О. Кудря
S. Kudria

Відомості про автора: директор Інституту відновлюваної енергетики НАН України, виконувач обов'язки завідувача кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського), чл.-кор. НАН України, доктор технічних наук, професор кафедри відновлюваних джерел енергії КПІ ім. Ігоря Сікорського.
Освіта: Київський політехнічний інститут, інженер-технолог за спеціальністю «Технології електрохімічних виробництв».
Наукова сфера: комплексні системи енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії; системи акумулювання та перетворення енергії відновлюваних джерел.
Публікації: 332.
Патенти: 45.
Монографії: 11.
ORCID: 0000-0002-4798-6853
Контакти: +38 (044) 206-28-09
e-mail: sa.kudria@gmail.com

Author information: Director of the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Acting Head of the Department of Renewable Energy Sources of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute), Corr. NAS of Ukraine, Doctor of Technical sciences, Professor of the Department of Renewable Energy Sources of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
Education: Kyiv Polytechnic Institute, engineer-technologist on the specialty "Technologies of electrochemical manufactures".
Research area: integrated power supply systems based on renewable energy sources; systems of energy storage and conversion of renewable sources.
Publications: 332.
Patents: 45.
Monographs: 11.
ORCID: 0000-0002-4798-6853
Contacts: +38 (044) 206-28-09
e-mail: sa.kudria@gmail.com



С.В. Войтко
S. Voitko

Відомості про автора: завідувач кафедри міжнародної економіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського), доктор економічних наук, професор кафедри міжнародної економіки КПІ ім. Ігоря Сікорського.
Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», інженер-конструктор-технолог за фахом «Конструювання і технологія радіоелектронних засобів».
Наукова сфера: економіка підприємства, економіка енергетичної сфери, міжнародна економіка, управління розвитком наукомістких підприємств, Індустрія-4.0.
Публікації: 510.
ORCID: 0000-0002-2488-3210
Контакти: +38 (044) 204-91-03
e-mail: s.voytko@kpi.ua

Author information: Head of the Department of International Economics of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute), Doctor of Economic sciences,Professor of the Department of International Economics of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
Education: National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", engineer-designer-technologist on the specialty "Design and technology of radio-electronic means".
Research area: the economy of the enterprise, the economy of energy sector, the international economy, the management of the development of knowledge-intensive enterprises.
Publications: 510.
ORCID: 0000-0002-2488-3210
Contacts: +38 (044) 204-91-03
e-mail: s.voytko@kpi.ua



О.О. Трофименко
O. Trofymenko

Відомості про автора доцент кафедри теоретичної та прикладної економіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського), кандидат економічних наук, відповідальний секретар наукового журналу «Підприємництво та інновації».
Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», за спеціальністю «Менеджмент організацій».
Наукова сфера: економіка підприємства, економіка енергетичної сфери, управління розвитком енергетичних підприємств.
Публікації: 35.
ORCID: 0000-0002-2339-0377
Контакти: +38 (044) 204-85-07
e-mail: o.o.trofymenko@gmail.com

Author information: Associate professor of the Department of International Economics of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute), PhD of Economic sciences, responsible secretary of the scientific journal "Entrepreneurship and Innovation".
Education: National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", in the specialty "Management of Organizations".
Research area: enterprise economy, the economy of energy sector, the management of the development of energy enterprises.
Publications: 35.
ORCID: 0000-0002-2339-0377
Контакти: +38 (044) 204-85-07
e-mail: o.o.trofymenko@gmail.com

Перелік використаних позначень та скорочень:
ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
АЗСЕМ – автономна зарядна станція електромобілів;
ОЕС – об'єднана енергосистема;
ВЕУ – вітроелектрична установка;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
АБ – акумуляторна батарея;
ЕМ – електромобіль.

Вступ. 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 % [1]. 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.

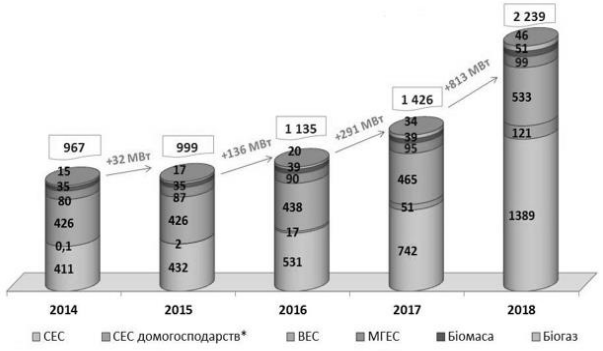


Рис. 1. Динаміка приросту потужностей відновлюваних джерел енергії в Україні

Fig. 1. Dynamics of capacity growth of renewable energy sources in Ukraine

Відновлювана енергетика поступово збільшує свою частку в загальному енергобалансі країни про що свідчить динаміка нарощування потужностей ВДЕ (рис. 1) [2]. Зокрема, за 2018 р. введено 813 МВт нових відновлюваних потужностей, основна частка яких припала на сонячну (716 МВт) та вітрову (68 МВт). Потужність решти видів 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. [3]. Це, у свою чергу, свідчить про недооцінку вітроенергетики, яка може суттєво збільшити виробництво чистої електричної енергії.

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). У даній роботі розглядаються економічні питання використання енергії вітру при застосуванні в складі автономної зарядної станції електромобілів (АЗСЕМ) вітроелектричних установок.

Метою даної роботи є встановлення економічної доцільності розширення використання енергетичного потенціалу вітру через застосування у складі автономних зарядних станцій вітроелектричних установок, як основних генераторів електричної енергії для заряду електромобілів.

Статистика показує [4], 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. 2), більше 9,5 тис. чисто електричних (BEV) та більше 2 тис. підзаряджуваних гібридів (PHEV), тоді як в 2014 році 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.

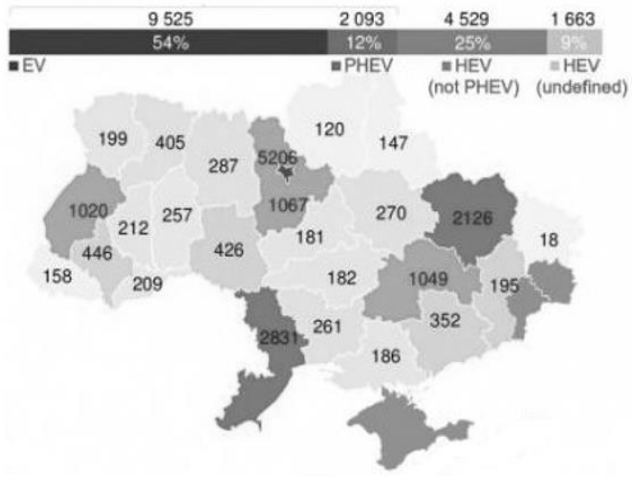


Рис. 2. Розподіл ринку електромобілів в Україні

Fig. 2. Distribution of the market of electric vehicles in Ukraine

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 АЗСЕМ 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 підза-рядки на її проектування, монтаж і експлуатацію.

Аналіз динаміки вартості ВЕУ [5] показує, що середня вартість 1 кВт встановленої потужності станом на 2018 рік становить близько 1000 дол. США (рис. 3). Для розрахунків приймаємо вартість в 1,0 дол. США за 1 Вт встановленої потужності ВЕУ.

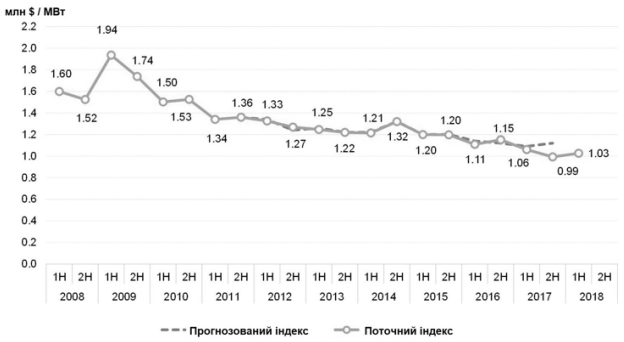


Рис. 3. Динаміка індексу вартості вітроелектричних установок

Fig. 3. Dynamics of the cost index of the wind turbines

Очікувано, що основний обсяг споживання енергії на АЗСЕМ буде спостерігатися у світлу пору доби, адже трафік у день набагато більший аніж у ночі. 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 [3] ККД кращих вітрових коліс знаходиться у межах 0,3÷0,35. Прийнявши 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÷60 МВт·год електроенергії на рік.

Для розрахунку необхідної потужності обираємо зарядну станцію на два підключення потужністю 100 кВт.

У даній статті будемо вважати, що виконуються такі попередні умови:

1) власні потреби АЗСЕМ (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 $0,2 \cdot E_{АБ}^{ЕМ}$, 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 у діапазоні від $(0,8 \div 1) E_{АБ}^{ЕМ}$ необхідно проводити в стаціонарному (не прискореному) режимі заряду;

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

5) максимальне значення напруги буферної АБ ЕЗСЕМ приймаємо рівним $U_{АБ}^{БУФ} = 600В$, згідно [4];

6) приймемо для розрахунків коефіцієнт корисної дії буферної акумуляторної батареї рівним 80% ($\eta_{АБ}^{БУФ} = 0,8$), а коефіцієнт заряду акумуляторної батареї електромобіля – рівним 90% ($\eta_{АБ}^{з} = 0,9$).

У такому випадку енергія буферної АБ для гарантованого забезпечення роботи АЗСЕМ при заряді одного ЕМ з максимальною потребою в 80 кВт·год повинна становити:

$$E_{АБ}^{БУФ} = k_{ЗЕ} \cdot \frac{E_{ВП}^{АЗСЕМ} + E_{АБ}^{ЕМ}}{\eta_{АБ}^{БУФ}} = \quad (1)$$

$$= 1,2 \cdot \frac{3 + \frac{80}{0,9}}{0,8} = 137,83 кВт \cdot год.$$

При потребі виробітку 137,83 кВт·год щодоби (або 50,37 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) витрачатиметься на власні потреби АЗСЕМ, 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 АЗСЕМ зросте в 1,5÷2 рази.

Орієнтовна вартість ВЕУ для АЗСЕМ, при рівномірному розподілі швидкості вітру (в ідеальному випадку) буде становити:

$$B_{ВЕУ} = 1000 \cdot 20 = 20000 \$.$$

або

$$B_{ВЕУ} = 20000 \cdot 28 = 560000 грн.$$

Окрім вартості ВЕУ, необхідно врахувати вартість зарядних пристроїв і акумуляторів. Згідно [6] 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 літієвих акумуляторних батарей в період з 2010 по 2017 роки включно показує стабільну динаміку зменшення вартості 1 кВт·год від 1000$ до 209$ відповідно (рис. 4) [7]. Якщо прийняти вартість 1 кВт·год у 209$, або 5852 грн, то вартість буферної АБ для АЗСЕМ енергомісткістю 138 кВт·год складає 807,576 тис. грн.

Для забезпечення заряду електромобіля у 80 кВт·год та забезпечення власних потреб зарядної станції необхідна буферна акумуляторна батарея енергоємністю в 138 кВт·год.

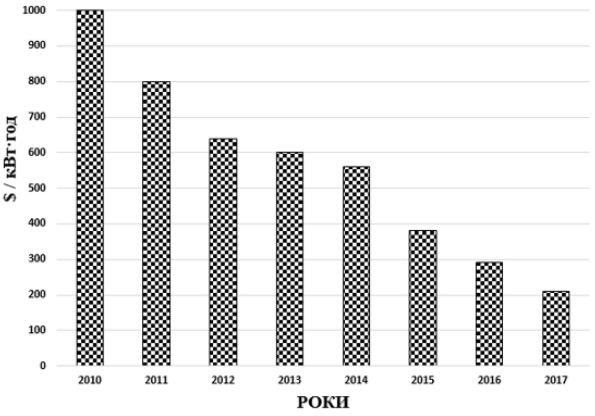


Рис. 4. Динаміка індексу вартості літієвих акумуляторних батарей

Fig. 4. Dynamics of the cost index of lithium storage batteries

Враховуючи основні витрати на реалізацію АЗСЕМ 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 вкладень. Тобто, повна реалізація АЗСЕМ 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 [8] термін окупності АЗСЕМ 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 [8], 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 (АЗСЕМ 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 АЗС (під'їзд, освітлення, розмітка, знаки, вказівники тощо).

Висновки. 1. Проаналізовано динаміку нарощування встановленої потужність 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 в 5 разів перевищує фотоелектричний сонячний потенціал.

2. Проведено попередню вартісну оцінку автономної 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).

3. Термін окупності АЗСЕМ 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.

1. 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.

2. 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.

3. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Підручник. Київ. Національний технічний університет України («КПІ»). 2012. 495 с.

4. Аналіз ринку електромобілів. Електронний ресурс. Режим доступу: http://irsgroup.com.ua/ecars.

5. Wind Turbine Price Index. Інтернет ресурс. Режим доступу: https://about.bnef.com/blog/2h-2017-wind-turbine-price-index/.

6. 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.

7. Lithium-ion battery pack costs worldwide between 2010 and 2018 (in U.S. dollars per kilowatt hour). Інтернет ресурс. Режим доступу: https://www.statista.com/statistics/883118/global-lithium-ion-battery-pack-costs/.

8. Електрика для електромобілів в Україні стає платною. Інтернет ресурс. Режим доступу: https://auto.24tv.ua/elektryka_dlia_elektromobiliv_v_ukraini_staie_platnoiu_n3167.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ АВТОНОМНЫХ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В.И. Будько[1,2], канд. техн. наук, доцент; **С.А. Кудря**[2,1], чл.-корр. НАН Украины докт. техн. наук, профессор;
С.В. Войтко[1], докт. экон. наук, профессор;
А.А. Трофименко[1], канд. экон. наук, доцент

[1]Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского» 03056 м. Киев, пр-т Победы, 37
[2]Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094 м. Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А

Проанализированы объемы выработки электроэнергии в Украине за прошлый год, а также динамику прироста электропотребления по сравнению с предыдущим годом. Рассмотрено современное состояние объектов возобновляемой энергетики Украины и отмечено, что существенный прирост фотоэлектрических и ветроэлектрических станций определяется высокими коэффициентами «зеленого тарифа», которые действуют на продажу экологически чистой электроэнергии. При этом показано, что темпы роста мощностей ветроэлектрических станций существенно уступают фотоэлектрическим станциям. Отмечено, что ветроэнергетический потенциал Украины значительно превышает энергетический потенциал солнечного излучения. Учитывая быстро растущую динамику прироста электромобилей на территории Украины обоснована необходимость ускорения темпов использования энергетического потенциала ветра путем реализации автономных зарядных станций электромобилей с ветроэлектрическими установками. Рассмотрена падающая динамика индекса стоимости ветроэлектрических установок и литиевых аккумуляторных батарей. Определены основные капиталовложения для реализации системы автономной зарядной станции электромобиля с ветроэлектрическими установками и буферными аккумуляторами энергии. На основе анализа сезонного характера изменения выработки ветроэлектрических установок, а также тарифной политики на продажу электрической энергии при заряде электромобилей установлено, что срок окупаемости реализации автономной зарядной станции данного типа может составлять от 9-10 до 19-20 лет. Отмечено, что показатель гарантированного заряда электромобиля будет максимальным только при условии равномерного распределения скорости ветра в течение года. Библ. 8, рис. 4.

Ключевые слова: *ветроэлектрическая установка, автономная зарядная станция, электромобиль, буферная аккумуляторная батарея.*

REFERENCES

1. Rezultaty roboty rynku elektroenerhii v 2018 rotsi. [Results of the electricity market in 2018]. Electronic resource. Retrived from https://biz.censor.net.ua/resonance/3106395/ rezultati_roboti_rinku_elektroenerg_v_2018_rots [in Ukrainian].

2. U 2018 r. vvedeno maizhe u 3 razy bilshe novykh potuzhnostei vidnovliuvanoi elektroenerhety-ky, nizh u 2017 rotsi. [In 2018, almost 3 times more new renewable energy sources were introduced than in 2017]. Electronic resource. Retrived from http://saee.gov.ua/uk/news/2731 [in Ukrainian].

3. *Kudria S.O.* Netradytsiyni ta vidnovlyuvani dzherela enerhiyi. [Unconventional and renewable sources of energy]. Pidruchnyk. Kyiv: Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy («KPI»). 2012. 495 p. [in Ukrainian].

4. Analiz rynku elektromobiliv. [Analysis of the market of electric vehicles]. Electronic resource. Retrived from http://irsgroup.com.ua/ecars [in Ukrainian].

5. Wind Turbine Price Index. Internet resource. Retrived from https://about.bnef.com/blog/2h-2017-wind-turbine-price-index/ [in English].

6. *Rogozhin, Alex & Gallaher, Michael & Helfand, Gloria & McManus, Walter*. Using indirect cost multipliers to estimate the total cost of adding new technology in the automobile industry. International Journal of Production Economics. Elsevier. 2010. April. vol. 124(2). Pp. 360-368. [in English].

7. Lithium-ion battery pack costs worldwide between 2010 and 2018 (in U.S. dollars per kilowatt hour). Internet resource. Retrived from https://www.statista.com/statistics/883118/ global-lithium-ion-battery-pack-costs/ [in English].

8. Elektryka dlia elektromobiliv v Ukraini staie platnoiu. [Electricity for electric cars in Ukraine becomes paid]. Internet resource. Retrived from https://auto.24tv.ua/ elektryka_dlia_elektromobiliv_v_ukraini_staie_platnoiu_n3167 [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 22.01.19
Остаточна версія 12.03.19

УДК 621.548

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ЗАРЯДЖЕННЯ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО ПРИВОДА НАСОСУ АВТОНОМНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРО-УСТАНОВКИ

В.М. Головко, докт. техн. наук, проф., **В.П. Коханєвич,** канд. техн. наук, **М.О. Шихайлов,**
А.М. Донець, канд. техн. наук, **І.Ю. Перькова**, інженер

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
02094, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна,

Ємнісні накопичувачі, як необхідний складовий елемент, знаходять широке застосування в різноманітних електротехнічних установках і системах. Аналіз відомих підходів збільшення ККД зарядного кола показав, що вони пов'язані з певними труднощами. Наприклад, зарядні пристрої із джерелами, регульованими за певним законом напруги, є складними і їхнє застосування може бути виправдано лише у виняткових випадках. Крім перетворювача, що узгоджує джерело енергії та ємнісний накопичувач, потрібні додаткові реактивні елементи, що запасають енергію і підтримують на одному рівні вхідну і вихідну потужності протягом процесу заряджання. Ця вимога грає істотну роль у випадку застосування джерела обмеженої потужності. У більшості випадків енергетичні процеси заряду конденсатора аналізувались при нульових початкових умовах.

Максимальний ККД може бути досягнутий при незмінній формі вхідного та вихідного струму. Для досягнення максимального ККД перетворювача ємнісний накопичувач в початковий відрізок часу повинен запасати енергію, щоб в кінці заряду віддати запасену енергію для підтримання струму заряджання.

Вітроустановка працює при стохастичних умовах зміни рівня швидкості вітру, що спричиняє до відповідних показників на клемах зарядного пристрою. Оцінка необхідної кількості енергії для заряджання ємкісного накопичувача ускладнюється.

Метою роботи становила задача визначити час заряджання ємнісного накопичувача електродинамічного привода насосу автономної вітроелектричної установки до заданих технологічних меж за допомогою імітаційного моделювання при стохастичних умовах зміни рівня швидкості вітру. При зміні значень математичного сподіванням швидкості вітру в межах 4…5,2 м/с час заряджання ємнісного накопичувача при технологічній межі напруги 100 В складає відповідно 12,5…7 с. Бібл. 10, рис. 10.

Ключові слова: *вітроелектроустановка, ємнісний накопичувач, імітаційне моделювання, електродинамічний привод, стохастичні умови зміни рівня швидкості вітру*

IMMEDIATIVE MODEL OF THE CHARGING PROCESS OF THE EMCSENTIAL ACCUMULATOR OF THE ELECTRODYNAMIC DRIVER PUMP IN ALONE STATE WINDTURBINE

V.M. Golovko, doctor of technical sciences, professor, **V.P. Kohanevich,** candidate of technical sciences, **M.O. Shikhailov**,
A.M. Donets, candidate of technical sciences, **I.Yu. Perkova,** engineer

Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine,
02094, 20A, Hnat Khotkevich Str., Kyiv, Ukraine

Capacitive drives, as a necessary component, are widely used in a variety of electrical installations and systems. The analysis of known approaches to increasing the efficiency of the charging circuit has shown that they are associated with certain difficulties. For example, chargers with sources regulated under a certain voltage law are complex and their application can only be justified in exceptional cases. In addition to the converging power source and the capacitive drive additional reactive elements are required that store energy and maintain the input and output levels at the same level during the charging process. This requirement plays a significant role in the case of the use of a source of limited power. In most cases, the energy processes of the charge of the capacitor were analyzed at zero initial conditions.

The maximum efficiency can be achieved with a constant input and output current. To achieve the maximum efficiency of the converter in the initial period of time should store energy to end the charge to give stored energy to maintain the charge current.

The wind turbine works under stochastic conditions of changing the level of wind speed, which leads to the corresponding indicators on the charger terminals. Estimation of the required amount of energy for charging a capacitive drive for the above-mentioned dependence is complicated.

The purpose of the work was to determine the time of charging the capacitive drive of the electrodynamic actuator of the pump of the autonomous wind power plant to the given technological limits by means of simulation modeling under stochastic conditions of changing the level of wind speed. When changing the values of the mathematical expectation of wind speed in the range of 4...5,2 m/s, when charging a capacitive drive, at the technological limit of voltage 100 V, is, respectively, 12.5 ... 7s. Ref. 10, fig. 10.

Keywords: *wind turbine, capacitive drive, simulation, electrodynamic drive, stochastic conditions for changing the wind speed*

© В.М.Головко, В.П. Коханєвич, М.О. Шихайлов, А.М. Донець, І.Ю. Перькова, 2019



В.М. Головко
V. Holovko

Відомості про автора: провідний науковий співробітник Інституту відновлюваної енергетики НАН України.
Освіта: закінчив 1977 р. Українську сільськогосподарську академію за спеціальністю «Електрифікація сільського господарства».
Наукова сфера: відновлювані джерела енергії, вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, автономні системи енергозабезпечення.
Публікації: 157
ORCID: 0000-0003-0195-9654
Контакти: тел./факс: +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Author information: chief researcher at Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.
Education: graduated from the Ukrainian Agricultural Academy in 1977 with the degree of "Electrification of Agriculture".
Research area: renewable sources of energy, wind power systems, small capacity wind units, autonomous power systems.
Publications: 157
ORCID: 0000-0003-0195-9654
Contacts: тел./факс: +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net



В.П. Коханєвич
V. Kokhanievych

Відомості про автора: старший науковий співробітник Інституту відновлюваної енергетики НАН України.
Освіта: закінчив 1979 р. Київський політехнічний інститут за спеціальністю «Технологія машинобудування, метало ріжучі верстати та інструменти».
Наукова сфера: вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, системи регулювання та захисту.
Публікації: 129
ORCID: 0000-0003-0033-1355
Контакти: тел./факс: +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Author information: senior researcher at Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.
Education: graduated from the Kyiv Polytechnic Institute in 1979 with the specialization "Technology of Machine-Building, Metal Cutting Machines and Tools".
Research area: power systems, converting types of energy, automation and modeling processes. wind power systems, small capacity wind units, control systems and protect.
Publications: 129
ORCID: 0000-0003-0033-1355
Contacts: тел./факс: +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net



М.О. Шихайлов
M. Shykhailov

Відомості про автора: науковий співробітник Інституту відновлюваної енергетики НАН України.
Освіта: закінчив 1979 р. Київський політехнічний інститут за спеціальністю «Гідропневмоавтоматика та гидропривод».
Наукова сфера: вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, системи управління.
Публікації: 200
ORCID: 0000-0003-1845-9904
Контакти: тел./факс: +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Author information: researcher at Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.
Education: graduated from the Kyiv Polytechnic Institute in 1979 with the specialty "Hydropneumatic and Hydraulic Drive".
Research area: wind power systems, small capacity wind units, control systems.
Publications: 200
ORCID: 0000-0003-1845-9904
Contacts: тел./факс: +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net



А.М. Донець
A. Donets

Відомості про автора: науковий співробітник Інституту відновлюваної енергетики НАН України.
Освіта: магістр енергетики НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», факультет електроенерготехніки та автоматики, спеціальність: «відновлювані джерела енергії»
Наукова сфера: енергетичні системи, перетворення видів енергії, автоматизація і моделювання процесів.
Публікації: 10
ORCID: 0000-0003-4486-5666
Контакти: тел./факс +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Author information: Researcher at Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.
Education: Master of Science, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Faculty of Electric Power Engineering and Automation, Department of Renewable Sources of Energy.
Research area: power systems, converting types of energy, automation and modeling processes.
Publications: 10
ORCID: 0000-0003-4486-5666
Contacts: тел./факс +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net



І.Ю. Перькова
I. Percova

Відомості про автора: інженер Інституту відновлюваної енергетики НАН України.
Освіта: магістр енергетики НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», факультет електроенерготехніки та автоматики, спеціальність: «відновлювані джерела енергії»
Наукова сфера: вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, системи управління.
Публікації: 6.
ORCID: 0000-0002-9070-1593
Контакти: тел./факс +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Author information: Engineer at Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.
Education: Master of Science, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Faculty of Electric Power Engineering and Automation, Department of Renewable Sources of Energy.
Research area: Wind power, wind power plants of low power, management system.
Publications: 6.
ORCID: 0000-0002-9070-1593
Contacts: тел./факс +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Перелік використаних позначень та скорочень:

ЄН – ємнісний накопичувач;
ВЕУ – вітроелектрична установка;
i – струм джерела живлення;
u_c – напруга конденсатора ємнісного накопичувача;
C – ємність конденсаторів;
$R_з$ – опір ланцюга зарядження;
$R_в$ – опір еквівалентного ланцюга, що враховує струми витікання;
$t_з$ – час зарядження.

Вступ. Ємнісні накопичувачі, як необхідний складовий елемент, знаходять широке застосування в різноманітних електротехнічних установках і системах. Дослідженню та аналізу енергетичних характеристик в зарядних і розрядних колах конденсаторів при повному їх розряді на навантаження присвячено ряд робіт вчених Інституту електродинаміки НАН України. Аналіз відомих підходів збільшення ККД зарядного кола показав, що вони пов'язані з певними труднощами. Наприклад, зарядні пристрої із джерелами, регульованими за певним законом напруги, є складними і їхнє застосування може бути виправдано лише у виняткових випадках. У більшості випадків енергетичні процеси заряду конденсатора аналізувались при нульових початкових умовах [1].

Система зарядження ємнісного накопичувача (ЄН) повинна здійснювати зарядження з найвищим ККД. В [2, 3] визначено, при якому режимі ефективність буде максимальна. Максимальний ККД може бути досягнутий при незмінній формі вхідного та вихідного струму. Для досягнення максимального ККД перетворювача в початковий відрізок часу ЄН повинен запасати енергію, щоб в кінці заряду віддати запасену енергію. Тоді, крім перетворювача, що узгоджує джерело енергії та ЄН, потрібні додаткові реактивні елементи, що запасають енергії і підтримують на одному рівні вхідну і вихідну потужності протягом процесу зарядження. Ця вимога грає істотну роль у випадку застосування джерела обмеженої потужності [4-6]. При цьому, в основному, розглядалися процеси зарядження при сталих параметрах джерела енергії. Тоді кількість енергії, що споживається за час зарядного процесу ємнісним накопичувачем, складає [7]:

$$W_e = \int_0^{t_з} \left(R_з i^2 + \frac{u_c^2}{R_в} \right) dt + \int_0^{t_з} C u_c u_c' dt$$

де i та u_c – струм джерела живлення і напруга конденсаторів C накопичувача; $R_з$, $R_в$ – опори ланцюгів зарядження та еквівалентного, що враховує втрати потужності від струму витікання $i_в$ і на поляризацію діелектрика конденсаторів C, $t_з$ – час зарядження.

Перший інтеграл являє собою енергію втрат $W_{вт}$ у зарядному контурі, другий – енергію, накопичену в конденсаторах C за час зарядження $t_з$. Підінтегральна функція другого інтегралу є похідною у часі від цієї енергії.

Вітроустановка працює при стохастичних умовах зміни рівня швидкості вітру, що спричиняє до відповідних показників на клемах зарядного пристрою. Оцінка необхідної кількості енергії для зарядження ємкісного накопичувача за вище вказаною залежністю ускладнюється [8]. Крім того, будь-яка автономна установка завжди обмежена енергоресурсами, що вимагає енергозбережно підходити до вирішення власних технологічних операцій.

Постановка задачі. Визначити час зарядження ємнісного накопичувача електродинамічного привода насосу автономної вітроелектричної установки до заданих технологічних меж за допомогою імітаційного моделювання при стохастичних умовах зміни рівня швидкості вітру.

Методи дослідження. Для дослідження режиму зарядження ємкісного накопичувача електро-динамічного привода насосу у складі автономної вітроелектричної установки, розрахунки проводились шляхом моделювання за допомогою программного пакету Matlab/Simulink/SimPower Systems.

Результати дослідження. Загальна структура імітаційної моделі для дослідження процесу заряджання ЄН наведена на рис.1.

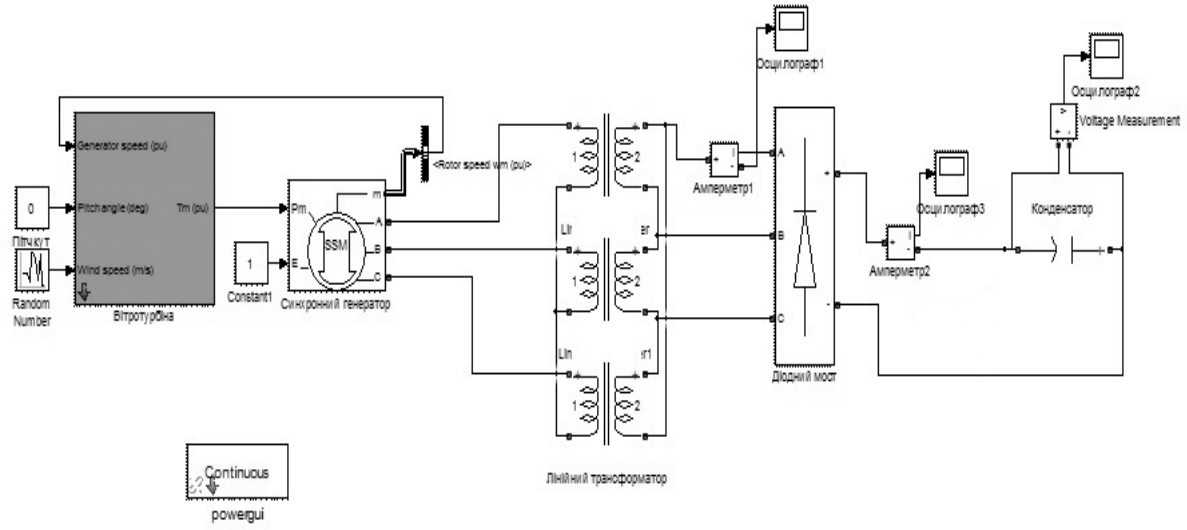


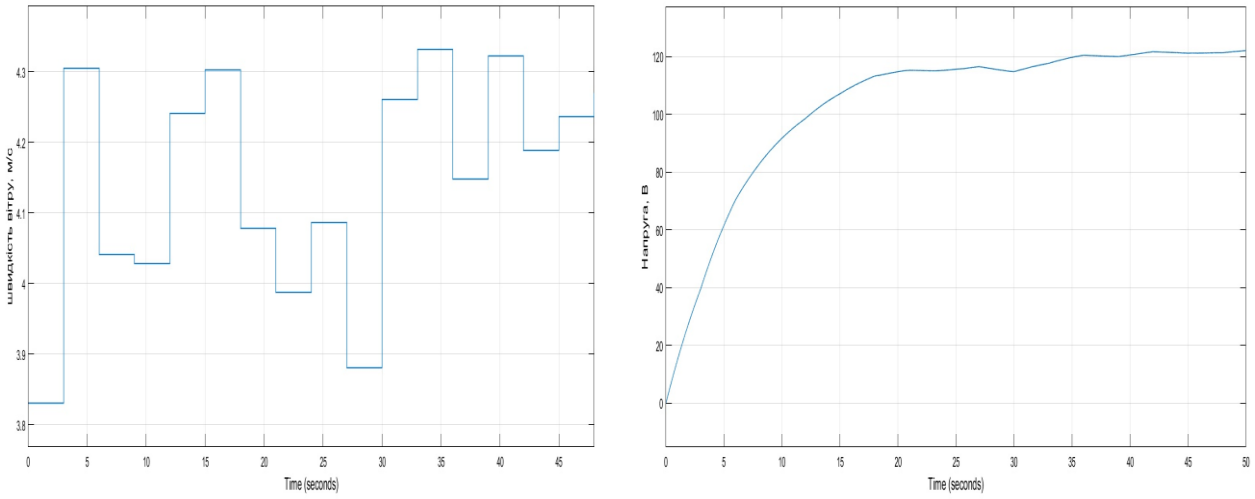
Рис.1. Імітаційна модель заряджання конденсатора від ВЕУ з синхронним генератором при змінному вітрі.

Fig.1. Simulation model for charging a capacitor from wind turbine with a synchronous generator with variable wind.

Як джерело електричної енергії прийнята вітроустановка з синхронним генератором (лінійна напруга -380 В, потужність – 100 ВА, частота – 50 Гц). Механічний момент на вал генератора надходить від блоку «вітрова турбіна». Номінальне значення швидкості вітру – 8 м/с. Швидкість зрушення – 3,8 м/с. Схема має у своєму складі діодний міст. Сигнал на міст приходить від лінійного трансформатора з коефіцієнтом трансформації, що дорівнює 1 (призначений для згладжування стрибків напруги). На виході до моста приєднаний конденсатор С=0,015Ф, що і виконує функцію ЄН. Для фіксації та візуалізації електроенергетичних параметрів в моделі присутні також амперметри, вольтметри та осцилографи. Для моделювання стохастичних параметрів надходження вітру, введений блок випадкових сигналів, що дозволяє змоделювати хід швидкості вітру із заданими показниками математичного сподівання його величини.

Розглянемо отримані результати.

1. Швидкість зміни вітру відбувається за нормальним розподілом від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 4,0.

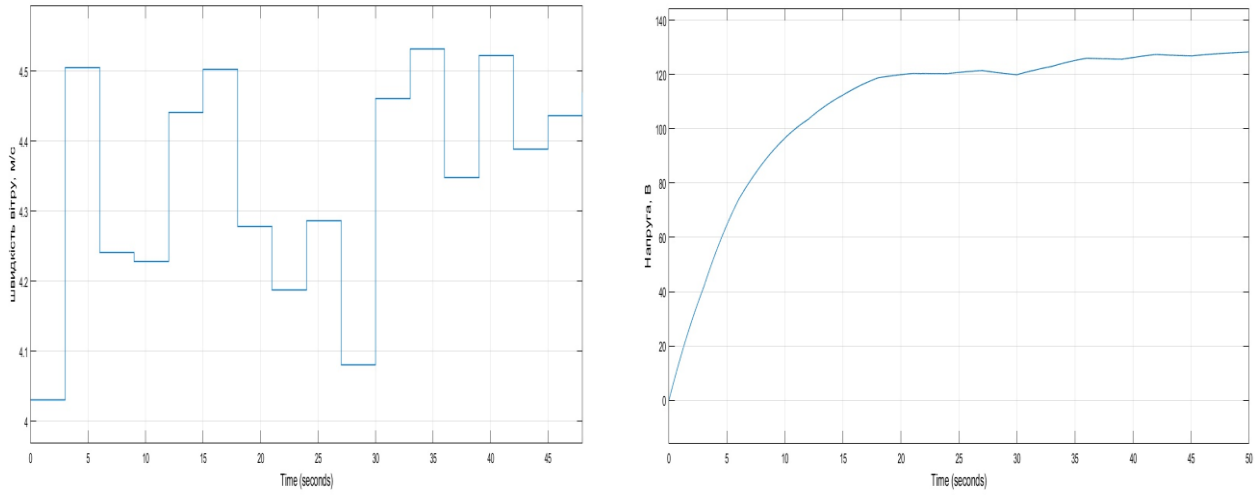


а) **б)**

Рис.2. Зміна швидкості вітру від 4 до 8м/с з математичним сподіванням в точці 4,0 (а) та зміна напруги на конденсаторі при даному вітрі (б).

Fig.2 Changing of the wind speed from 4 to 8m/s with a math expectation at 4.0 (a) and changing the voltage at the condenser at this wind (b).

2. Швидкість зміни вітру відбувається за нормальним розподілом від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 4,2.

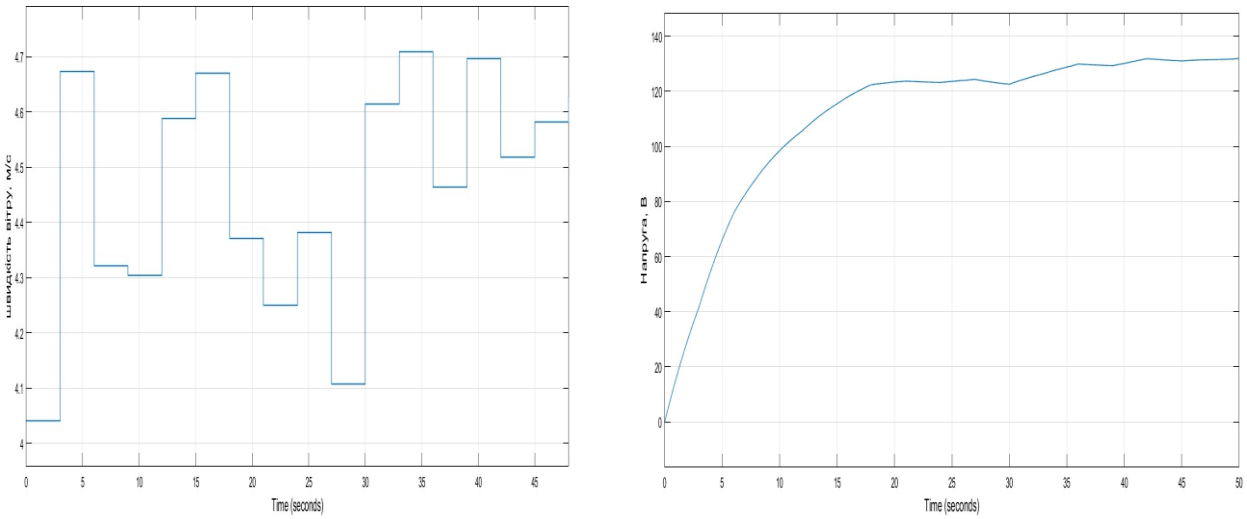


а) **б)**

Рис.3. Зміна швидкості вітру від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 4,2 (а) та зміна напруги на конденсаторі при даному вітрі (б).

Fig.3. Changing of the wind speed from 4 to 8 m/s with mathematical expectations at 4,2 (a) and changing the voltage on the condenser at this wind (b).

3. Швидкість зміни вітру відбувається за нормальним розподілом від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 4,4.

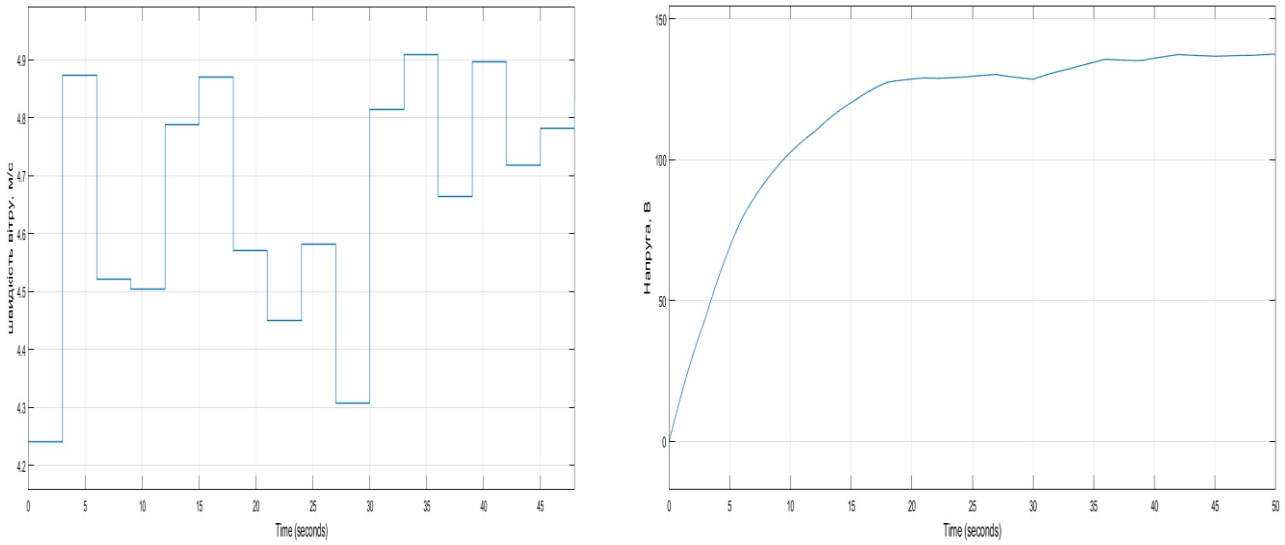


а) **б)**

Рис.4. Зміна швидкості вітру від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 4,4 (а) та зміна напруги на конденсаторі при даному вітрі (б).

Fig.4. Changing of the wind speed from 4 to 8 m/s with mathematical expectations at 4.4 (a) and changing the voltage at the condenser at this wind (b).

4. Швидкість зміни вітру відбувається за нормальним розподілом від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 4,6.

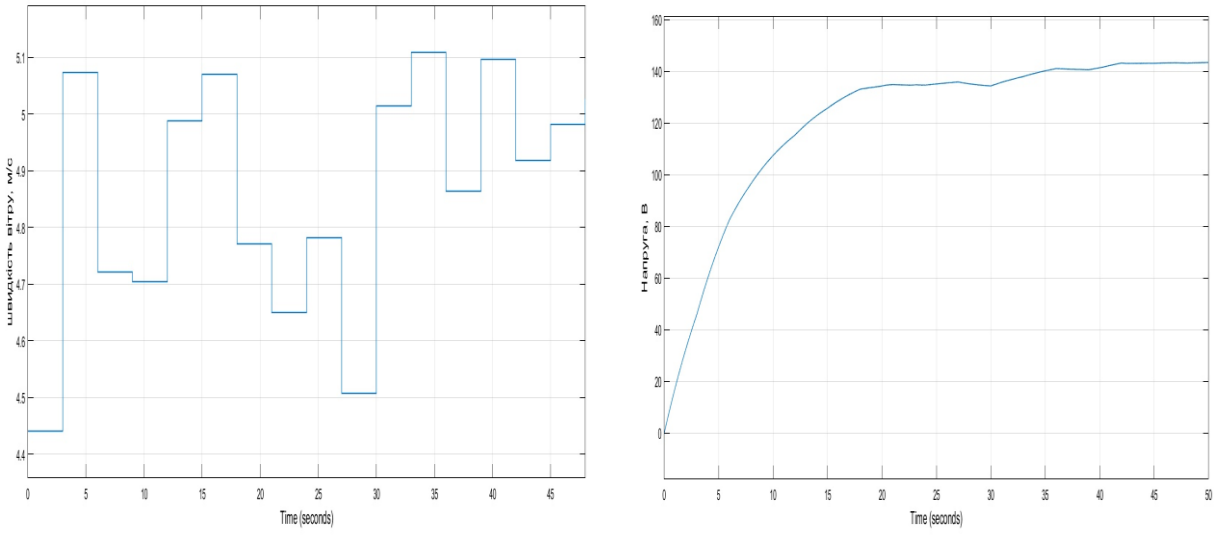


а) **б)**

Рис.5. Зміна швидкості вітру від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 4,6 (а) та зміна напруги на конденсаторі при даному вітрі (б).

Fig.5 Changing of the wind speed from 4 to 8 m/s with a mathematical expectation at 4,6 (a) and changing the voltage at the condenser at this wind (b).

5. Швидкість зміни вітру відбувається за нормальним розподілом від 4 до 8м/с з математичним сподіванням в точці 4,8.

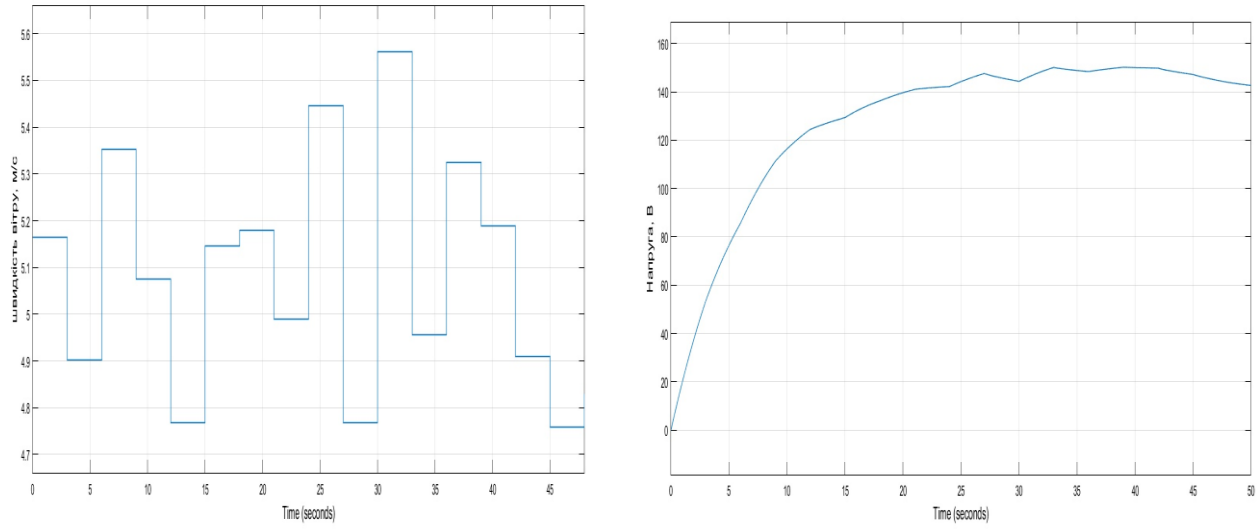


а) **б)**

Рис.6.Зміна швидкості вітру від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 4,8 (а) та зміна напруги на конденсаторі при даному вітрі (б).

Fig.6. Changing of the wind speed from 4 to 8 m / s with mathematical expectations at 4,8 (a) and changing the voltage at the condenser at this wind (b).

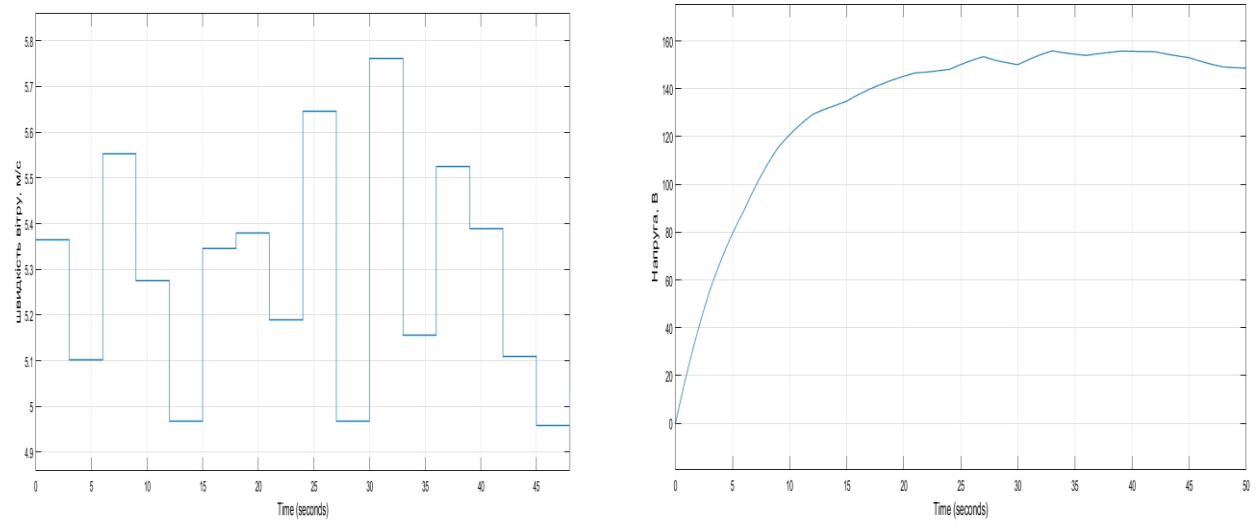
6. Швидкість зміни вітру відбувається за нормальним розподілом від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 5,0.



а) **б)**

Рис.7. Зміна швидкості вітру від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 5,0 (а) та зміна напруги на конденсаторі при даному вітрі (б).
Fig.7. Changing of the wind speed from 4 to 8 m / s with mathematical expectations at the point of 5,0 (a) and changing the voltage at the condenser at this wind (b).

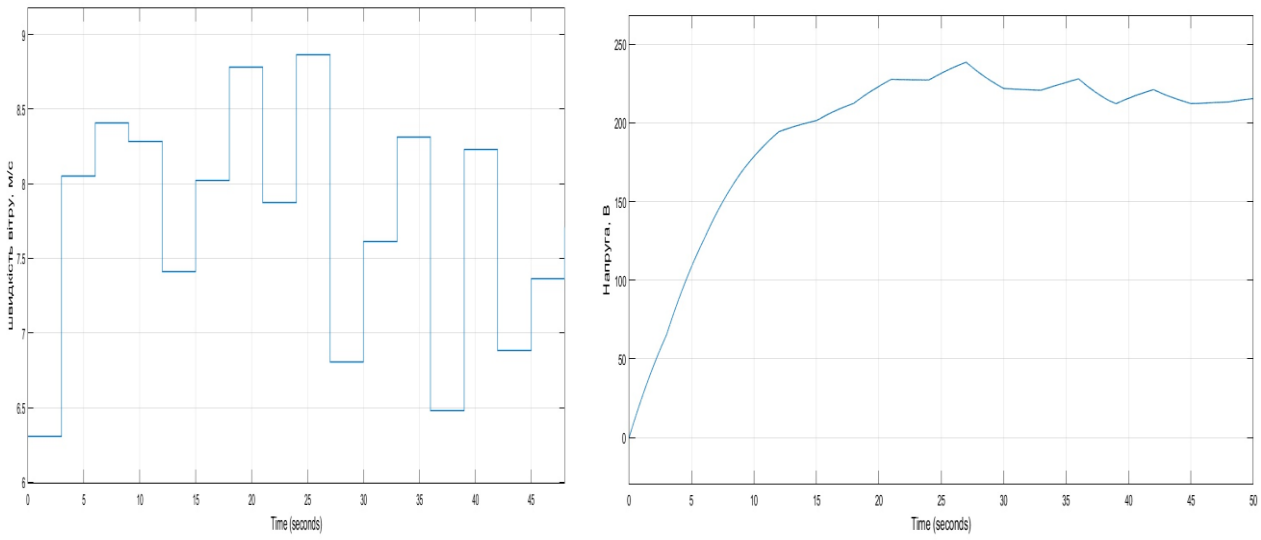
7. Швидкість зміни вітру відбувається за нормальним розподілом від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 5.2.



а) **б)**

Рис.8. Зміна швидкості вітру від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 5,2 (а) та зміна напруги на конденсаторі при даному вітрі (б).
Fig.8 Changing of the wind speed from 4 to 8 m / s with a mathematical expectation at 5,2 (a) and changing the voltage on the condenser at this wind (b).

8. Швидкість зміни вітру відбувається за нормальним розподілом від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 8,0.



а) **б)**

Рис.9. Зміна швидкості вітру від 4 до 8 м/с з математичним сподіванням в точці 8,0 (а) та зміна напруги на конденсаторі при даному вітрі (б).

Fig.9. Changing of the wind speed from 4 to 8 m/s with mathematical expectations at 8,0 (a) and changing the voltage on the condenser at this wind (b).

З графіків зміни напруги можна встановити час досягнення межі спрацювання ключів, що відповідають за початок розрядження ємнісного накопичувача. На рис.10 наведені графіки часу досягнення межі різних порогів спрацювання електродинамічного привода насосу, робота якого описана в попередніх роботах авторів [9,10], в залежності від значень математичного сподіванням швидкості вітру при його зміні в діапазоні від 4 до 8 м/с.

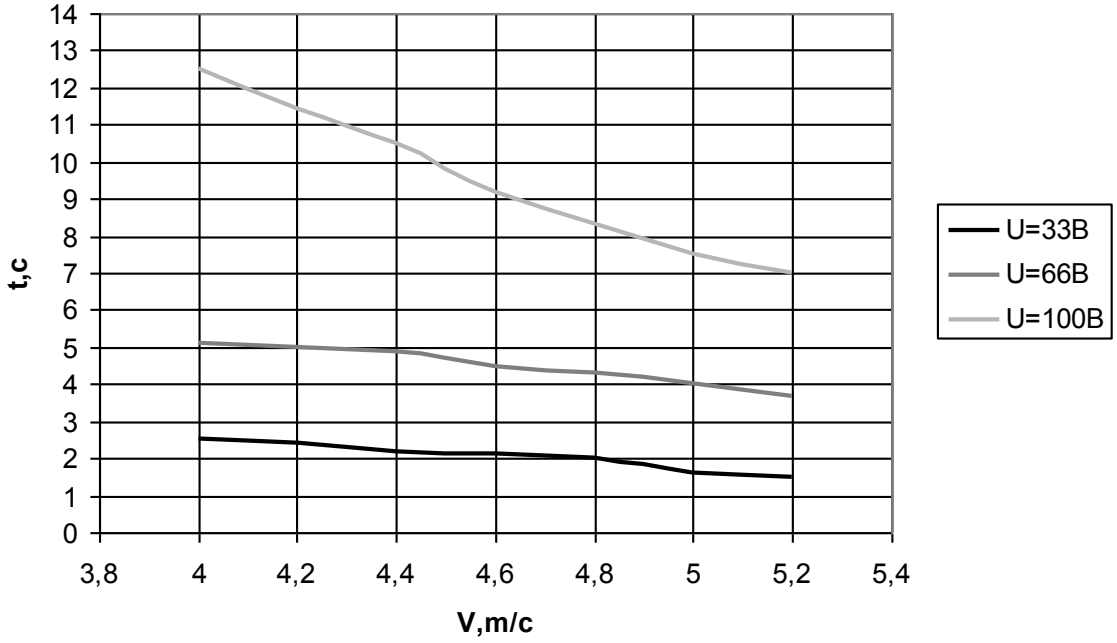


Рис.10. Залежності зміни часу досягнення межі різних порогів спрацювання електродинамічного привода насосу в залежності від значень математичного сподіванням швидкості вітру

Fig.10. Dependences of change in the time of reaching the threshold of different thresholds for the operation of the electrodynamic drive of the pump, depending on the values of the mathematical expectations of the wind speed

Графіки мають прямолінійний характер зміни, що дає можливість передбачити значення спрацювання і при більш високих значеннях швидкості вітру.

Висновки. На базі імітаційного моделювання при випадковому характері зміни швидкості вітру проаналізовано процес зарядження ємкісного накопичувача в автономній ВЕУ з електродинамічним приводом насосу. При зміні значень математичного сподіванням швидкості вітру в межах 4…5,2м/с час зарядження ємнісного накопичувача при технологічній межі напруги 100 В складає відповідно 12,5…7с.

1. *Супруновська Н.І.* Енергетичні процеси в колах заряду і розряду конденсаторів електроімпульсних установок. Автореф. дис. на здоб. ст. к.т.н. К.: 2009. 15 с.

2. *Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Колесникова О.И.* Modeling of capacitive storage charge device based on multi function into grated electromagnetic component. Нефть и газ. 2015: сб. тр. 69-й Междунар. мол. науч. конф. РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. М. 2015. С. 388-393.

3. *Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Путинцева А.А.* Моделирование системы заряда емкостного накопителя. Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч.тр. II Междунар. V Всерос. науч.-техн. конф. Уфа: изд-во УГНТУ. 2015. С. 170-177.

4. Разработка систем заряда емкостных накопителей энергии. *Вашкевич Е.* [и др.] Ч. 2. Силовая электроника. Электронный архив. 2009. №1. URL: http://www.power-e.ru/2009_1_34.php

5. *Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Колесникова О.И.* Modeling of system charge of storage capacity or based on multi functioning grated electromagnatic component. Нефть и газ. 2015. сб. тез. 69-й Междунар. мол. науч. конф. РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. М., 2015. Т. 3. С. 378.

6. *Волков И.В., Милях А.Н.* Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. Киев. Наукова думка. 1974. С. 9, 14-23.

7. *Пентегов И.В.* Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. Киев. Наукова думка. 1982. 424с.

8. *Васько П.Ф., Вербовий А.П., Пазич С.Т.* Реалізація стохастичної моделі поздовжньої складової швидкості вітру для задач вітроенергетики. Відновлювана енергетика. 2017. №3. С. 54–61.

9. Вітроелектронасосна установка: Патент на корисну модель №65230. Україна. МПК F03D7/00,9/00/ Головко В.М., Коханєвич В.П., Шихайлов М.О, Павлов В.Б., Павленко В.Є., Перькова І.Ю. №u201106729. Заявл. 30.05.11. Опубл. 25.11.11. Бюл. №22. 2011р.

10. *Головко В.М., Коханевич В.П., Шихайлов Н.А., Перькова І.Ю.* Ветронасосная установка с электродинамическим приводом. Альтер. энергет. и экология. 2015. №15-16. С.29-33

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬПРОЦЕССА ЗАРЯДКИ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРИВОДА НАСОСА АВТОНОМНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ

В.М. Головко, докт. техн. наук, проф.,
В.П. Коханевич, канд.техн.наук**, М.О. Шихайлов,**
А.М. Донец, канд.техн.наук**, И.Ю. Перькова,** инженер

Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094, г. Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А

Емкостные накопители, как необходимый составной элемент, находят широкое применение в различных электротехнических установках и системах. Анализ известных подходов увеличения КПД зарядной цепи показал, что они связаны с определенными трудностями. Например, зарядные устройства с источниками, регулируемыми по определенному закону напряжения, являются сложными и их применение может быть оправдано только в исключительных случаях. Кроме преобразователя, согласовывающего источник энергии и емкостной накопитель, нужны дополнительные реактивные элементы, которые запасают энергии и поддерживают на одном уровне входящую и исходящую мощность в течение процесса зарядки. Это требование играет существенную роль в случае применения источника ограниченной мощности. В большинстве случаев энергетические процессы заряда конденсатора анализировались при нулевых начальных условиях. Максимальный КПД может быть достигнут при неизменной форме входного и выходного тока. Для достижения максимального КПД преобразователя емкостной накопитель в начальный отрезок времени должен запасать энергию, чтобы в конце заряда отдать запасенную энергию. Ветроустановка работает при стохастических условиях изменения уровня скорости ветра, что вызывает соответствующие показатели на клеммах зарядного устройства. Оценка необходимого количества энергии для зарядки емкостного накопителя усложняется.

Целью работы является задача определить время зарядки емкостного накопителя электродинамического привода насоса автономной ветроэлектрической установки до заданных технологических пределов с помощью имитационного моделирования при стохастических условиях изменения уровня скорости ветра. При изменении значений скорости ветра с математическим ожиданием в пределах 4 … 5,2м/с время зарядки емкостного накопителя при технологическом уровне напряжения 100В составляет, соответственно, 12,5 … 7с. Библ. 10, рис. 10.

Ключевые слова: *ветроэлектроустановка, емкостной накопитель, имитационное моделирование, электродинамический привод, стохастических условиях изменения уровня скорости ветра*

REFERENCES

1. *Suprunovskaya N.I.* Enerhetychni protsesy v lantsyuhakh zaryadu i rozryadu kondensatoriv elektroimpul′snykh ustanovok [Energy processes in charge and discharge circuits of capacitors of electropulse installations.]. Author's abstract dis. for obtaining the degree PhD. K. 2009. 15 p. [in Ukrainian].

2. *Khazieva R.T., Kyryllov R.V., Kolesnikova O.I.* Modeling of capacitive storage charge device based on multi func-tion into grated electromagnetic component. Nafta i haz. 2015. Sb. tr. 69-y Mizhnarodnyy Mol. naukovyy konf. MDU Nafta i haz im. I. M. Hubkina. M. 2015. pp. 388-393. [in English].

3. *Khazieva R.T., Kyryllov R.V., Putyntseva A.A.* Modelyuvannya systemy zaryadu yemnisnoho pryvodu [Capacitive Charge System Simulation]. Elektropryvod, elektrotekhnika ta elektroobladnannya pidpryyemstv: Sb. naukovyy stupin. II Mizhnarodnyy V Vserosiys′ka naukovo-tekhnichnyy konf. (3–4 kvitnya). Ufa. vydannya UHNTU. 2015. pp. 170-177. [in Russian].

4. *Vashkevych E.H.* and others. Rozrobka zaryadnykh system dlya yemnisnykh nakopychuvachiv enerhiyi. [Development of charge systems for capacitive energy storage] Part 2. Sylova elektronika. 2009. No. 1. Retrived from http://www.power-e.ru/2009_1_34.php [in Russian].

5. *Khazieva R.T., Kyryllov R.V., Kolesnikova O.I.* Modeling of system charge of storage capacity or based on multi functioning grated electromagnatic component. Nafta i haz. 2015. Sb. dyser-

tatsiy 69-ho Mizhnarodnoho Movnoho naukovoho Konf. RNE nafty i hazu im. I. M. Hubkina. M. 2015. T. 3. P. 378.

6. *Volkov I.V., Maylz A.N.* Systemy postiynoho strumu na osnovi induktyvno-yemnisnykh peretvoryuvachiv [DC systems based on inductive-capacitive converters]. K. Naukova dumka. 1974. P. 9, Pp. 14-23. [in Russian].

7. *Pentahov I.V.* Osnovy teoriyi zaryadnykh lantsyuhiv yemnisnykh nakopychuvachiv enerhetyka [Fundamentals of the theory of charging circuits of capacitive energy storage]. K. Naukova dumka. 1982. p. 424. [in Russian].

8. *Vasko P.F., Verbovyy A.P., Pasich S.T.* Realizatsiya stokhastychnoyi modeli pozdovzhnoyi skladovoyi shvydkosti vitru dlya zadach enerhiyi vitru [Realization of a dtochastic two-parameter model of the longitudinal component of the wind speed for wind energy problems]. Vidnovliuvana enerhetyka. 2017. No. 3. pp. 54-61 [in Ukrainian].

9. *Holovko V.M., Kokanevych V.P., Shykhaylov M.O., Pavlov V.B., Pavlenko V.E., Perkova I.YU* .Vitroelektrychna ustanovka. Patent na korysnu model No 65230. Ukraina. MPK F03D7/00.9/00.[Wind Electric Pump Installation. Patent for utility model No 65230. Ukraine. MPK F03D7/00.9/00]. №201106729. Announced 30.05.11. Published 25.11.11. Bull. No. 22. 2011. [in Ukrainian].

10. *Holovko V.M., Kokanevych V.P., Shykhaylov N.A., Perkova I.YU.* Vitronasosna ustanovka z elektrodynamichnym pryvodom [Electrodynamic driven wind pump] Alter. enerhetyka ta ekolohiya. 2015. No. 15-16. pp. 29-33[in Russian].

Стаття надійшла до редакції 28.01.19
Остаточна версія 06.03.19



УДК 532.529: 517.4

ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ. 1. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕРСИИ ШУБАРКОЛЬСКОГО КАМЕННОГО УГЛЯ В ПАРОКИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ ПРИ ОТНОШЕНИИ МАССОВЫХ ДОЛЕЙ H_2O/O_2=45/55

Б.Б. Рохман, докт. техн. наук

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины,
04070, г. Киев, ул. Андреевская 19.

Построена нестационарная модель процесса парокислородной газификации твердого топлива в фиксированном слое под давлением с учетом межфазного конвективного теплообмена, радиационно-кондуктивного теплопереноса твердой фазы, лучистого и кондуктивного теплообмена слоя со стенкой реактора, гетерогенных и гомогенных химических реакций, сил тяжести и аэродинамического сопротивления.

Модель позволяет получить детальную информацию о распределении температур фаз, диаметра угольных частиц, концентраций газовых компонентов по высоте слоя в зависимости от времени при газификации шубаркольского каменного длиннопламенного угля под давлением 3 Мпа при отношении массовых долей в парокислородной смеси H2O/O2 = 45/55. Полученная информация может быть использована при конструировании реакторов, пуско-наладочных режимах и работе газогенератора на различных нагрузках, когда процесс парокислородной газификации угля является нестационарным из-за цикличности подачи исходного топлива и выгрузки золы при помощи использование системы шлюзовых бункеров. Показано, что участок окислительной зоны, где температура угольных частиц достигает максимального значения, очень узок и составляет 10-11 мм. Предложены два альтернативных режима работы газогенератора. Первый из них H2O/O2 = 40/60 связан с повышением максимальной температуры частиц в области, прилегающей к поду реактора до 1550 ℃, что позволяет организовать устойчивое жидкое шлакоудаление из газогенератора. Второй режим H_2O/O_2= 72/28 основан на твердом шлакоудалении, когда температура частиц не превышает 1000 ℃. Библ.11, табл.1, рис.9.

Ключевые слова: *неподвижный слой, уголь, теплопроводность, парокислородная газификация, температура.*

TWO-DIMENSIONAL MODEL OF THE SOLID FUEL GASIFICATION IN A FIXED BED UNDER PRESSER. 1. INVESTIGATION OF SHUBARKOL COAL CONVERSION IN A STEAM-OXYGEN MIXTURE WITH THE MASS PART OF H_2O/O_2=45/55

B.B. Rokhman, doctor of technical sciences**,**

Coal Energy Technology Institute NAS of Ukraine,
04070, Kyiv, str. Andreevskaya 19

A non-stationary model of the steam-oxygen gasification of solid fuel in a fixed bed under pressure has been developed with allowance for the interphase convective heat exchange, radiation-conductive heat transfer of the solid phase, radiant and conductive heat exchange of the bed with the reactor wall, heterogeneous and homogeneous chemical reactions, gravity and aerodynamic resistance. Temperature distribution of the phases, diameter of the coal particles, concentrations of the gas components over the bed height as a function of time during the gasification of Shubarkol long-flame coal under a pressure of 3 MPa at a ratio of mass fractions in the oxygen-oxygen mixture H_2O/O_2 = 45/55 is obtained. The obtained information can be used in the design of reactors, commissioning modes and the gas generator operation at various loads, when the process of steam-oxygen coal gasification is non-stationary due to the cyclical fuel supply and ash discharge by using a system of lock bins. It has been shown that the section of the oxidizing zone, where the temperature of the coal particles reaches its maximum value, is very narrow and is 10-11 mm. Two alternative modes of the gas generator operation are proposed. The first mode H_2O/O_2 = 40/60 is associated with an increase in the maximum temperature of the particles in a small area adjacent to the reactor bottom from to 1550 °C, which makes it possible to organize stable liquid slag removal from the gas generator. The second mode H_2O/O_2 = 72/28 is based on solid slag removal, when the temperature of the particles does not exceed 1000 ℃. Referenses 11, tabl. 1, fig. 9.

Keywords: *fixed bed, coal, thermal conductivity, steam-oxygen gasification, temperature.*

© Б.Б.Рохман, 2019



Б.Б. Рохман
B. Rokhman

Сведения об авторе: ведущий научный сотрудник Института угольных энерготехнологий НАН Украины, доктор технических наук. Биографические данные Рохмана Б.Б. размещены в известных мировых изданиях “Who's Who in Science and Engineering” и “2000 Outstanding Intellectuals of the 21st Century”.
Образование: Новочеркасский политехнический институт.
Научная сфера: Математическое моделирование аэродинамики, тепломассообмена и химического реагирования полидисперсного ансамбля твердого топлива в камерных и слоевых топках, в реакторах с циркулирующим кипящим слоем и в кипящем слое.
Публикации: более 90 научных работ, из них 27 работ содержатся в наукометрической базе Scopus и 4 в наукометрической базе Web of Science.
ORCID: 0000-0002-1270-6102
Контакты: тел.: +38-044-425-53-77
e-mail: Brolene@yahoo.com

Author information: the leading researcher of the Institute of Coal Energy Technologies of the NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences. Biographical information of Rohman B.B. is published in well-known world directories "Who's Who in Science and Engineering" and "2000 Outstanding Intellectuals of the 21st Century".
Education: Novocherkassk Polytechnic Institute.
Research area: Mathematical modeling of aerodynamics, heat and mass transfer and chemical reaction of a polydisperse ensemble of solid fuel in chamber and layer furnaces, in reactors with a circulating fluidized bed and in the fluidized bed.
Publications: more than 90 scientific papers, 27 of them are contained in the science-based Scopus database and 4 in the science-based Web of Science database.
ORCID: 0000-0002-1270-6102
Contacts: phone: +38-044-425-53-77
e-mail: Brolene@yahoo.com

Условные обозначения:

a	–	степень черноты частицы;
A, N, O, S, V, W	–	массовые доли золы, азота, кислорода, серы, летучих веществ и влаги в твердом топливе;
B	–	расход, кг/ч;
C	–	концентрация газовых компонентов, (кмоль/м^3) или массовая доля углерода в твердом топливе ;
c	–	теплоемкость, кДж/(кг·К);
D	–	коэффициент диффузии, м^2/с;
H	–	высота (м) или массовая доля водорода;
h	–	коэффициент теплообмена между слоем и частицей, кДж/(с·м^2·К);
g	–	ускорение свободного падения, м/с^2;
k	–	константа скорости реакции, м/с;
L	–	универсальная газовая постоянная кДж/(кмоль·К);
m	–	масса, кг;
Nu	–	критерий Нуссельта;
P	–	давление, Н/м^2;
Q	–	тепловой эффект реакции (кДж/кмоль) или тепловой поток (кДж/(с·м^3));
R	–	объемная доля компонента газовой смеси;
r	–	скорость гомогенной реакции, кмоль/(м^3·с);
t	–	температура, °С;
T	–	температура, К;
u	–	скорость, м/с;
z	–	аксиальная координата, м;
α	–	коэффициент массообмена, м/с;
δ	–	диаметр частицы, м;
ε	–	порозность слоя;
λ	–	коэффициент теплопроводности, кДж/(с·м·К);
η	–	кинематическая вязкость, м^2/с;
μ	–	молекулярная масса, кг/кмоль;
ρ	–	плотность, кг/м^3;
τ	–	время, с;
Ф	–	параметр модели теплопроводности зернистого слоя.

Индексы нижние:

ash	–	зола;
A	–	деформация золы;
bad	–	слой;
B	–	размягчение золы;
C	–	жидкоплавкое состояние золы;
C	–	углерод;
CO, CO_2, CH_4, H_2O, H_2, C_6H_6, $CH_{3,147}O_{0,5625}$	–	окись и двуокись углерода, метан, водяной пар, водород, бензол, кислородосодержащее соединение;
C + O_2, C + 0,5O_2, C + CO_2, C + H_2O	–	гетерогенные реакции;
CO + O_2, H_2 + O_2, CO + H_2O, CH_4 + H_2O	–	гомогенные реакции;
conv	–	конвективный теплообмен;
H_2O + O_2	–	парокислородная смесь;
CO_2→см, O_2→см, CO→см, H_2O→см, H_2→см, C_6H_6→см, CH_4→см, $CH_{3,147}O_{0,5625}$→см	–	диффузия углекислого газа, кислорода, окиси углерода, водяного пара, водорода, бензола, метана и кислородосодержащего соединения в газовую смесь;
D	–	диффузия;
d	–	сухая масса;
g	–	газ;
max	–	максимальное значение;
p	–	частица;
p→w	–	передача тепла от частиц к стенке;
slag	–	шлак;
volat	–	летучие вещества;
ф	–	фиксированный углерод;
эф	–	эффективный;
0	–	начальные условия.

Индексы верхние:

cond	–	кондуктивный теплообмен;	rad	–	лучистый теплообмен;
daf	–	сухая беззольная масса;	r	–	рабочая масса.
w	–	поверхность;			

Введение. В последние годы одной из приоритетных задач промышленности и энергетики является сокращение потребления дорогостоящего природного газа, использование которого делает нерентабельным металлургическую промышленность, производство различных химических продуктов на основе природного газа, например, аммиака, метанола, уксусной кислоты и т. д. Для сокращения потребления объемов газа необходимо широко внедрять газозамещающие технологии, такие, например, как использование твердых топлив (уголь, биоэнергетические ресурсы) в доменных печах и энергетических установках для производства генераторного газа. Одной из таких технологий термохимической переработки твердого топлива является парокислородная газификация дробленного угля в неподвижном слое под давлением в газогенераторах типа Lurgi (SEDIN), BGL.

Настоящая статья посвящена моделированию и теоретическому исследованию нестационарного процесса парокислородной газификации частиц шубаркольского каменного длиннопламенного угля под давлением 3 МПа в неподвижном слое ($C_{ф}^{r}$ = 43,48%, C_{volat}^{r} = 15,698%, S^{r} = = 0,746%, H^{r} = 4,117%, O^{r} = 11,773%, N^{r} = = 1,139%, W^{r} = 14,5%, A^{r} = 8,55%, V^{daf} = 43,5%, t_A = 1100°C, t_B = 1420°C, t_C = 1440°C). В отличие от стационарного процесса, где распределение физико-химических параметров дискретной и газовой фаз в слое не зависит от времени из-за равенства скоростей подачи и термохимической переработки дробленного топлива, здесь рассматривается случай одноразовой (невозобновляемой) загрузки исходного угля на колосниковую решетку. При такой постановке задачи процесс газификации является неустановившимся и характеризуется изменяющимися во времени профилями температур и концентраций двухфазной среды в слое.

В соответствии с изменениями, претерпеваемыми топливом на различных стадиях термохимической переработки, неподвижный слой угля в реакторе можно условно разделить на четыре зоны (рис. 1). Первая из них (поз. *2*), примыкающая к колосниковой решетке, формируется из частиц золы и шлака, образующихся за счет горения и газификации исходного угля. Этот слой играет роль засыпки, выравнивающей распределение парокислородного дутья (поз. *1)*, и защищает колосники от перегрева. Над шлаковой подушкой располагается окислительная зона (поз. *3)*, где практически весь кислород на очень небольшом участке слоя расходуется на конверсию углерода и догорание продуктов газификации CO и H_2.

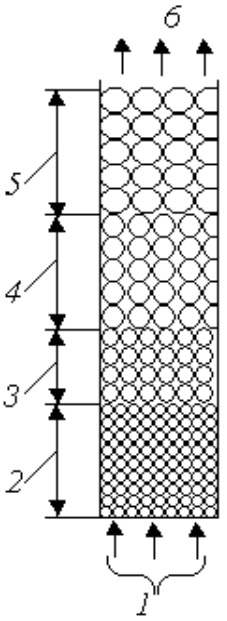


Рис. 1. Схема парокислородной газификации твердого топлива в неподвижном слое: *1* – парокислородная смесь; *2* – шлаковая подушка; *3* – зона окисления; *4* – зона газификации; *5* – зона пиролиза; *6* – выход синтетического газа

Fig. 1. Scheme of steam-oxygen gasification of solid fuel in a fixed bed: *1* – steam-oxygen mixture; *2* – slag pad; *3* – oxidation zone; *4* – gasification zone; *5* – pyrolysis zone; *6* –synthetic gas output

Эта область характеризуется максимальным уровнем температур из-за высоких значений тепловыделений гетерогенных и гомогенных химических реакций. В восстановительной зоне (поз. *4)* газовые компоненты CO_2 и H_2O вступают в реакцию с углеродом с образованием горючих веществ CO и H_2. Указанная область имеет значительно большую протяженность и более низкий уровень температур по сравнению с окислительной зоной за счет протекания в ней эндотермических восстановительных реакций с высокими значениями энергии активации. В четвертой зоне (поз. *5)* высушенные дробленные частицы угля нагреваются бескислородной газовой смесью за счет межфазного конвективного теплообмена и радиационно-кондуктивного теплопереноса твердой фазы, что обеспечивает выход из дробленки летучих веществ, которые смешиваются с газовой средой, выходящей из третьей зоны, тем самым формируя генераторный газ на выходе из установки.

Постановка задачи. Предлагаемая модель базируется на следующих основных предпосылках: 1) процесс нестационарный; 2) газовая смесь в реакторе состоит из кислорода, диоксида и оксида углерода, метана, водяного пара, водорода и бензола; 3) дисперсная фаза включает монодисперсные частицы сферической формы; 4) выход летучих и протекание гетерогенных реакций го-

рения и газификации на поверхности угольных частиц приводит к уменьшению их размера; 5) усадка неподвижного слоя за счет термохимической переработки твердого топлива не учитывается; 6) газ движется в режиме идеального вытеснения; 7) стехиометрическая схема реакций включает в себя четыре гетерогенные реакции:

$$\begin{gathered} C + O_2 = CO_2,\ C + 0{,}5O_2 = CO, C + CO_2 = \\ = 2CO \text{ и } C + H_2O = CO + H_2. \end{gathered} \quad (1)$$

и пять гомогенных:

$$\begin{gathered} CH_{3,147}O_{0,5625} \rightarrow 0{,}09132CO + 0{,}0581CO_2 + \\ + 0{,}5042CH_4 + 0{,}05783C_6H_6 + \\ + 0{,}03655H_2 + 0{,}3549H_2O, \end{gathered}$$

$$\begin{gathered} CO + 0{,}5O_2 = CO_2,\ H_2 + 0{,}5O_2 = \\ = H_2O,\ CO + H_2O = CO_2 + H_2 \\ \text{и } CH_4 + H_2O = CO + 3H_2. \end{gathered} \quad (2)$$

В стехиометрической схеме реакций летучие шубаркольского каменного длиннопламенного угля представлены формулой кислородосодержащего соединения $CH_{3,147}O_{0,5625}$, которое при нагреве разлагается на газовые компоненты CO, CO_2, CH_4, C_6H_6, H_2 и H_2O согласно первой реакции (2).

Слой прогревается высокотемпературной смесью дымовых газов и воздуха до температуры воспламенения частиц в узкой области, примыкающей к решетке. Далее происходит отключение теплоносителя и подача вместо него парокислородной смеси с температурой $t_{H_2O+O_2}$ = 450°C. За начало отсчета $\tau = 0$ выбрано время воспламенения твердой фазы.

Основные уравнения. Система уравнений, описывающая аэродинамику, тепломассообмен и химическое реагирование дробленных частиц и газовой фазы в плотном слое газификатора, может быть представлена в следующем виде.

Уравнение неразрывности для кислорода

$$\frac{\partial C_{O_2}}{\partial \tau} + \frac{\partial (u_g C_{O_2})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D_{O_2 \rightarrow см} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial z} \right] - \frac{6(k_{C+O_2} + k_{C+0.5O_2}) C^w_{O_2} (1-\varepsilon)}{\delta} - 0{,}5 r_{CO+O_2} - 0{,}5 r_{H_2+O_2}. \quad (3)$$

Уравнение неразрывности для диоксида углерода

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial \tau} + \frac{\partial (u_g C_{CO_2})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D_{CO_2 \rightarrow см} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial z} \right] + \frac{6(k_{C+O_2} C^w_{O_2} - k_{C+CO_2} C^w_{CO_2})(1-\varepsilon)}{\delta} + r_{CO+O_2} + r_{CO+H_2O} + 0{,}0581 r_{CH_{3,147}O_{0,5625} \rightarrow}. \quad (4)$$

Уравнение неразрывности для окиси углерода

$$\frac{\partial C_{CO}}{\partial \tau} + \frac{\partial (u_g C_{CO})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D_{CO \rightarrow см} \frac{\partial C_{CO}}{\partial z} \right] + \frac{6\left[2(k_{C+0.5O_2} C^w_{O_2} + k_{C+CO_2} C^w_{CO_2}) + k_{C+H_2O} C^w_{H_2O}\right](1-\varepsilon)}{\delta} - r_{CO+O_2} - r_{CO+H_2O} + r_{CH_4+H_2O} + 0.09132 r_{CH_{3,147}O_{0,5625} \rightarrow}. \quad (5)$$

Уравнение неразрывности для метана

$$\frac{\partial C_{CH_4}}{\partial \tau} + \frac{\partial (u_g C_{CH_4})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D_{CH_4 \rightarrow см} \frac{\partial C_{CH_4}}{\partial z} \right] - r_{CH_4+H_2O} + 0{,}5042 r_{CH_{3,147}O_{0,5625} \rightarrow}. \quad (6)$$

Уравнение неразрывности для водяного пара

$$\frac{\partial C_{H_2O}}{\partial \tau} + \frac{\partial (u_g C_{H_2O})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D_{H_2O \rightarrow см} \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial z} \right] - \frac{6k_{C+H_2O} C^w_{H_2O}(1-\varepsilon)}{\delta} + r_{H_2+O_2} - r_{CO+H_2O} + 0{,}3549 r_{CH_{3,147}O_{0,5625} \rightarrow}. \quad (7)$$

Уравнение неразрывности для водорода

$$\frac{\partial C_{H_2}}{\partial \tau} + \frac{\partial (u_g C_{H_2})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D_{H_2 \rightarrow см} \frac{\partial C_{H_2}}{\partial z} \right] + \frac{6k_{C+H_2O} C^w_{H_2O}(1-\varepsilon)}{\delta} - r_{H_2+O_2} + r_{CO+H_2O} + 3r_{CH_4+H_2O} + 0{,}03655 r_{CH_{3,147}O_{0,5625} \rightarrow}. \quad (8)$$

Уравнение неразрывности для бензола

$$\frac{\partial C_{C_6H_6}}{\partial \tau}+\frac{\partial (u_g C_{C_6H_6})}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left[D_{C_6H_6\to см}\frac{\partial C_{C_6H_6}}{\partial z}\right]+0{,}05783 r_{CH_{3,147}O_{0,5625}\to}. \quad (9)$$

Уравнение неразрывности для кислородосодержащего соединения $CH_{3,147}O_{0,5625}$

$$\frac{\partial C_{CH_{3,147}O_{0,5625}}}{\partial \tau}+\frac{\partial (u_g C_{CH_{3,147}O_{0,5625}})}{\partial z}=\frac{6(1-\varepsilon)m_{p0}(1-V_d)V_d A_{volat}\exp\left[-\int_0^\tau A_{volat}d\tau\right]}{\pi\left(1-V_d\exp\left[-\int_0^\tau A_{volat}d\tau\right]\right)^2\delta^3\mu_{CH_{3,147}O_{0,5625}}}+$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}\left[D_{CH_{3,147}O_{0,5625}\to см}\frac{\partial C_{CH_{3,147}O_{0,5625}}}{\partial z}\right]-r_{CH_{3,147}O_{0,5625}\to}. \quad (10)$$

Уравнение изменения диаметра частиц

$$\frac{d\delta}{d\tau}=-\frac{\delta_0^3(1-V_d)V_d A_{volat}\exp\left[-\int_0^\tau A_{volat}d\tau\right]}{3\delta^2\left(1-V_d\exp\left[-\int_0^\tau A_{volat}d\tau\right]\right)^2}-$$

$$-\left[(k_{C+O_2}+2k_{C+0.5O_2})C^w_{O_2}+k_{C+CO_2}C^w_{CO_2}+k_{C+H_2O}C^w_{H_2O}\right]\frac{2\mu_C}{\rho_p}. \quad (11)$$

Уравнение сохранения количества движения газовой фазы

$$\frac{\partial(\rho_g u_g)}{\partial \tau}+\frac{\partial(\rho_g u_g^2)}{\partial z}=-\frac{\partial P_g}{\partial z}-g\rho_g+\frac{\partial}{\partial z}\left[\rho_g\eta_g\frac{\partial u_g}{\partial z}\right]-\frac{150\eta_g\rho_g(1-\varepsilon)^2u_g}{\delta^2\varepsilon^3}-$$

$$-\frac{1{,}75\rho_g(1-\varepsilon)u_g^2}{\delta\varepsilon^3}. \quad (12)$$

Уравнение теплового баланса частиц

$$\rho_p(1-\varepsilon)\frac{\partial c_p t_p}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda_{эф}\frac{\partial t_p}{\partial z}\right]+\left[(k_{C+O_2}Q_{C+O_2}+k_{C+0,5O_2}Q_{C+0,5O_2})C^w_{O_2}-k_{C+CO_2}C^w_{CO_2}Q_{C+CO_2}-\right.$$

$$\left.-k_{C+H_2O}C^w_{H_2O}Q_{C+H_2O}-h_{conv}(t_p-t_g)\right]\frac{6(1-\varepsilon)}{\delta}-Q^{rad}_{p\to w}-Q^{cond}_{p\to w}. \quad (13)$$

Уравнение сохранения энергии несущей среды

$$\frac{\partial\rho_g c_g t_g}{\partial\tau}+\frac{\partial(\rho_g u_g c_g t_g)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda_{g,эф}\frac{\partial t_g}{\partial z}\right]+h_{conv}(t_p-t_g)\frac{6(1-\varepsilon)}{\delta}+$$

$$+r_{CO+O_2}Q_{CO+O_2}+r_{H_2+O_2}Q_{H_2+O_2}+r_{CO+H_2O}Q_{CO+H_2O}+r_{CH_4+H_2O}Q_{CH_4+H_2O}, \quad (14)$$

где эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}$ находится по формуле [1]

$$\frac{\lambda_{эф}}{\lambda_g}=\varepsilon\left(1+\frac{\alpha_{rad,g}\delta}{\lambda_g}\right)+\frac{1-\varepsilon}{\frac{1}{1/\Phi+\frac{\alpha_{rad,p}\delta}{\lambda_g}}+\frac{2\lambda_g}{3\lambda_p}}. \quad (15)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением от частицы через газ мимо соседних зерен определяется согласно выражению [1]

$$\alpha_{rad,g}=0{,}227\cdot10^{-9}\left[\frac{1}{1+\varepsilon(1-a_p)/(2a_p(1-\varepsilon))}\right](t_p+273)^3, \quad (16)$$

коэффициент теплоотдачи излучением между соседними частицами [1]

$$\alpha_{\text{rad,p}} = 0{,}227 \cdot 10^{-9} \frac{a_{\text{p}} (t_{\text{p}} + 273)^3}{2 - a_{\text{p}}}, \tag{17}$$

концентрации газовых компонентов на поверхности частицы и коэффициенты массообмена находятся согласно [2]

$$C^{\text{w}}_{\text{O}_2} = \frac{\alpha_{\text{D,O}_2} C_{\text{O}_2}}{\alpha_{\text{D,O}_2} + k_{\text{C+O}_2} + k_{\text{C+0,5O}_2}},\ C^{\text{w}}_{\text{CO}_2} = \frac{\alpha_{\text{D,CO}_2} C_{\text{CO}_2} + k_{\text{C+O}_2} C^{\text{w}}_{\text{O}_2}}{\alpha_{\text{D,CO}_2} + k_{\text{C+CO}_2}},\ C^{\text{w}}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\alpha_{\text{D,H}_2\text{O}} C_{\text{H}_2\text{O}}}{\alpha_{\text{D,H}_2\text{O}} + k_{\text{C+H}_2\text{O}}},$$

$$C^{\text{w}}_{\text{CO}} = \frac{\alpha_{\text{D,CO}} C_{\text{CO}} + 2(k_{\text{C+0,5O}_2} C^{\text{w}}_{\text{O}_2} + k_{\text{C+CO}_2} C^{\text{w}}_{\text{CO}_2}) + k_{\text{C+H}_2\text{O}} C^{\text{w}}_{\text{H}_2\text{O}}}{\alpha_{\text{D,CO}}},\ \alpha_{\text{D,O}_2} = \frac{D_{\text{O}_2 \to \text{см}}\,\text{Nu}}{\delta},$$

$$\alpha_{\text{D,CO}_2} = \frac{D_{\text{CO}_2 \to \text{см}}\,\text{Nu}}{\delta},\ \alpha_{\text{D,CO}} = \frac{D_{\text{CO} \to \text{см}}\,\text{Nu}}{\delta},\ \alpha_{\text{D,H}_2\text{O}} = \frac{D_{\text{H}_2\text{O} \to \text{см}}\,\text{Nu}}{\delta}. \tag{18}$$

Скорости реакций $r_{\text{H}_2+\text{O}_2}$, $r_{\text{CO}+\text{H}_2\text{O}}$, $r_{\text{CO}+\text{O}_2}$, $r_{\text{CH}_4+\text{H}_2\text{O}}$, $r_{\text{CH}_{3,147}\text{O}_{0,5625}\to}$ и выхода летучих веществ из угля определяются из выражений, приведенных в табл. 1.

Таблица 1. Кинетика гомогенных реакций.

Table 1. Kinetics of homogeneous reactions.

Реакции	Выражения для скоростей реакций, кмоль/(м^3·с)	Литература
$CO + 0{,}5O_2 = CO_2$	$r_{\text{CO}+\text{O}_2} = 2{,}239 \cdot 10^{12} C_{\text{CO}} C^{0,5}_{\text{H}_2\text{O}} C^{0,25}_{\text{O}_2} \cdot \exp\left[-167{,}4 \cdot 10^3 / (L_{\text{g}} T_{\text{g}})\right]$	[3]
$H_2 + 0{,}5O_2 = H_2O$	$r_{\text{H}_2+\text{O}_2} = 6{,}8 \cdot 10^{15} T_g^{-1} C^{0,25}_{\text{H}_2} C^{1,5}_{\text{O}_2} \exp\left[-167 \cdot 10^3 / (L_{\text{g}} T_{\text{g}})\right]$	[3]
$CO + H_2O = CO_2 + H_2$	$r_{\text{CO}+\text{H}_2\text{O}} = 2{,}34 \cdot 10^{10} \exp\left[-288{,}3 \cdot 10^3 / (L_{\text{g}} T_{\text{g}})\right] C_{\text{H}_2\text{O}} C^{0,5}_{\text{CO}} - 2{,}2 \cdot 10^7 \exp\left[-190 \cdot 10^3 / (L_{\text{g}} T_{\text{g}})\right] C^{0,5}_{\text{H}_2} C_{\text{CO}_2}$	[4]
$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$	$r_{\text{CH}_4+\text{H}_2\text{O}} = 8 \cdot 10^7 C^{0,5}_{\text{CH}_4} C_{\text{H}_2\text{O}} \exp\left[-251 \cdot 10^3 / (L_{\text{g}} T_{\text{g}})\right] - 5{,}12 \cdot 10^{-14} C_{\text{CO}} C_{\text{H}_2} \exp\left[-27{,}3 \cdot 10^3 / (L_{\text{g}} T_{\text{g}})\right]$	[5]
$CH_{3,147}O_{0,5625} \to 0{,}09132CO + 0{,}0581CO_2 + 0{,}5042CH_4 + 0{,}05783C_6H_6 + 0{,}03655H_2 + 0{,}3549H_2O$	$r_{\text{CH}_{3,147}\text{O}_{0,5625}\to} = 4{,}26 \cdot 10^6 \exp\left[-60 \cdot 10^3 / (L_{\text{g}} T_{\text{g}})\right] C_{\text{CH}_{3,147}\text{O}_{0,5625}}$	[6]
Выход летучих веществ	$\frac{dV}{d\tau} = -A_{\text{volat}} V,\ A_{\text{volat}} = 1{,}14 \cdot 10^5 \exp\left[-8900 / T_{\text{p}}\right]$	[7]

Граничные условия на входе в слой (z = 0) для уравнений (3)–(14) находятся из выражений:

$$\frac{\partial t_{\text{p}}}{\partial z} = C_{\text{CO}_2} = C_{\text{CO}} = C_{\text{CH}_4} = C_{\text{H}_2} = C_{\text{C}_6\text{H}_6} = C_{\text{CH}_{3,147}\text{O}_{0,5625}} = 0,\ C_{\text{O}_2} = C_{\text{O}_2 0},\ C_{\text{H}_2\text{O}} = C_{\text{H}_2\text{O}0},$$

$$z_{\text{п}} = z_{\text{п}0}\text{б}\ e_{\text{п}} = e_{\text{п}0}\text{б}, \tag{19}$$

а на выходе из слоя ($я = P_{\text{иув}}$)

$$\frac{\partial t_{\text{p}}}{\partial z} = \frac{\partial t_{\text{g}}}{\partial z} = \frac{\partial C_{\text{O}_2}}{\partial z} = \frac{\partial C_{\text{CO}_2}}{\partial z} = \frac{\partial C_{\text{CO}}}{\partial z} = \frac{\partial C_{\text{CH}_4}}{\partial z} = \frac{\partial C_{\text{H}_2\text{O}}}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial C_{\text{H}_2}}{\partial z} = \frac{\partial C_{\text{C}_6\text{H}_6}}{\partial z} = \frac{\partial C_{\text{CH}_{3,147}\text{O}_{0,5625}}}{\partial z} = \frac{\partial u_{\text{g}}}{\partial z} = 0. \tag{20}$$

Численные результаты расчетов. Рассмотрим рабочий процесс парокислородной газификации дробленных частиц шубаркольского каменного угля диаметром δ_0 = 9 мм и плотностью ρ_p = 1350 кг/м^3 (B_{H_2O} = 1750 кг/ч, B_{O_2} = =2139 кг/ч и $t_{H_2O+O_2}$ = 450 °С) в реакторе с неподвижным слоем порозностью ε = 0,4, высотой слоя 2,75 м и сечением 0,5 м^2 под давлением P_g = 3 Мпа. Как отмечалось выше, окислительная зона, где объемное содержание O_2 снижается с 40,75 % до 1 % (рис. 2 *а*, кривая *2*), располагается в очень узком интервале 0,151 м < < z < 0,25 м и упакована дробленными частицами, не содержащими летучие вещества, о чем свидетельствует рис. 2 *в*, кривая *2*. Рассматриваемый диапазон можно разделить на два характерных участка. На первом из них 0,151 м < z < 0,161 м наблюдается интенсивная конверсия коксозольных частиц в парокислородной смеси за счет окислительных и восстановительных гетерогенных реакций (см. (1)) и догорание продуктов газификации CO и H_2 согласно реакциям $CO+0{,}5O_2=CO_2$ и $H_2+0{,}5O_2=H_2O$. Здесь тепловыделение экзотермических реакций превалирует над теплопоглощением эндотермических реакций, вследствие чего температура t_p возрастает с 450 °С до максимального значения 1365 °С (рис. 3, кривая *2*), объемные доли CO_2, CO и H_2 в газовой смеси повышаются до 0,1 %, 20 % и 7,4 %. Соответственно величина R_{H_2O} уменьшается с 59,25 % до 43,6 %, значение R_{O_2} падает с 40,75 % до 28 % (рис. 2 *а*, рис. 4, рис. 5, кривые *2*).

В этом интервале происходит резкое убывание функции δ(τ, z) из-за конверсии коксозольных частиц за счет гетерогенных реакций (см. (1)), благодаря чему диаметр дискретной фазы уменьшается с δ = 4,39 мм до минимального размера частиц δ_{ash} = 3,96 мм, состоящих из золы (рис. 6, кривая *2*). Полученный таким образом инертный материал формирует шлаковую подушку, которая защищает колосники (поз. *2* (рис. 1)) от перегрева.

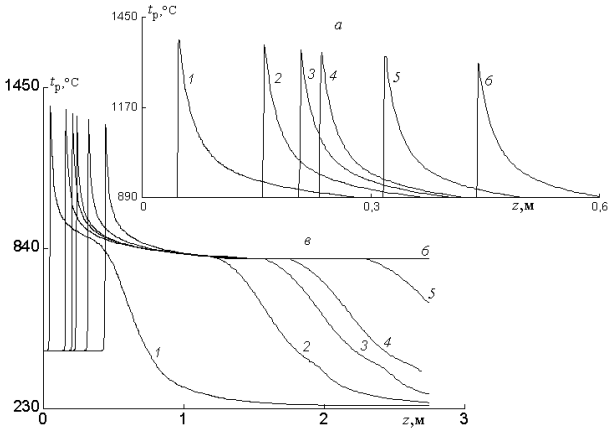


Рис. 3. Распределение температуры частиц по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени при отношении массовых долей в парокислородной смеси H_2O/O_2 = 45/55 (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 3. Temperature distribution of particles along the height of the fixed bed as a function of time with the ratio of mass fractions in the steam-oxygen mixture H_2O/O_2 = 45/55 (notations are the same as in Fig. 2).

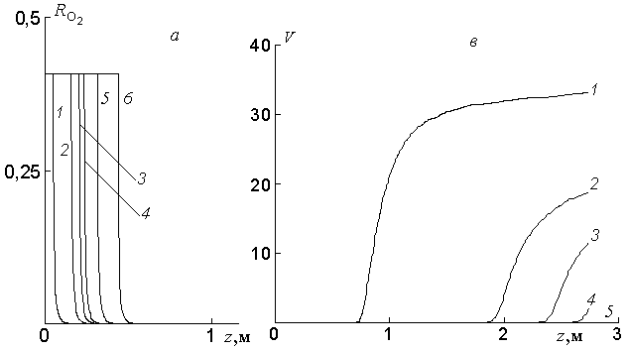


Рис. 2. Распределение объемной доли кислорода (*а*) и летучих веществ (*в*) по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени при отношении массовых долей в парокислородной смеси H_2O/O_2 = 45/55: *1* – 60 с; *2* – 200 с; *3* – 260 с; *4* – 300 с; *5* – 400 с; *6* – 560 с.

Fig. 2. Distribution of the volume fraction of oxygen (*а*) and volatile substances (*в*) over the height of the fixed bed as a function of time with respect to the mass fractions in the steam-oxygen mixture H_2O/O_2 = 45/55: *1* – 60 s; *2* – 200 s; *3* – 260 s; *4* – 300 s; *5* – 400 s; *6* – 560 s.

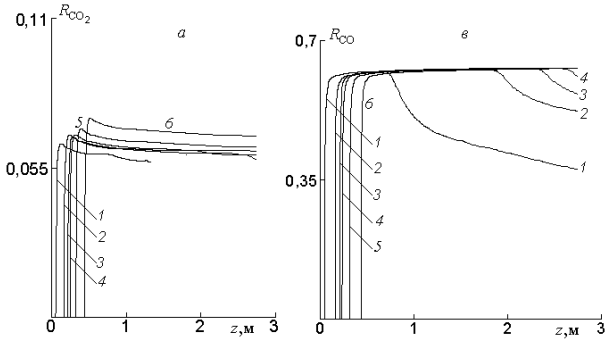


Рис. 4. Распределение объемных долей компонентов газа CO_2 (*а*) и CO (*в*) по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени при отношении массовых долей в парокислородной смеси H_2O/O_2 = 45/55 (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 4. The distribution of the volume fractions of the components of the gas CO_2 (*а*) and CO (*в*) over the height of the fixed bed as a function of time with respect to the mass fractions in the steam-oxygen mixture H_2O/O_2 = 45/55 (notations are the same as in Fig. 2).

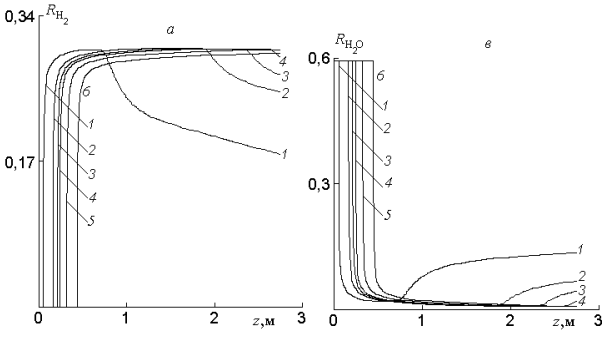


Рис. 5. Распределение объемных долей компонентов газа H_2 (*а*) и H_2O (*в*) по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени при отношении массовых долей в парокислородной смеси H_2O/O_2 = 45/55 (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 5. Distribution of the volume fractions of the components of the gas H_2 (*a*) and H_2O (*в*) over the height of the fixed bed depending on the time with respect to the mass fractions in the steam-oxygen mixture H_2O/O_2 = 45/55 (notations are the same as in Fig. 2).

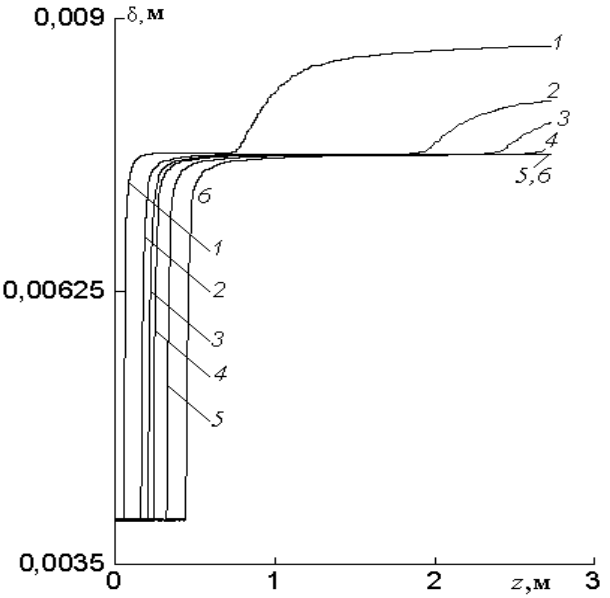


Рис. 6. Распределение диаметра частиц по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени при отношении массовых долей в парокислородной смеси H_2O/O_2 = 45/55 (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 6. The distribution of the diameter of the particles at the height of the fixed bed depending on the time with respect to mass fractions in the steam-oxygen mixture H_2O/O_2 = 45/55 (notations are the same as in Fig. 2).

На втором участке (окислительно-восстановительная область реагирования) 0,161 м < z < 0,25 м теплопоглощение эндотермических реакций превосходит тепловыделение экзотермических реакций. В результате значения t_p и R_{H_2O} снижаются до 945 °С и 4,7 %, объемные доли CO_2, CO и H_2 продолжают возрастать и достигают величин 6,7 %, 60,7 % и 27,9 % соответственно, а диаметр частиц уменьшается с 7,5 мм до 4,39 мм.

Бескислородная область 0,25 м < z < 1,9 м характеризуется относительно низкими значениями температур 410–945 °С и объемным содержанием в газе CO_2 6,14–6,7 % и H_2O 1,36–4,7 %, что приводит к существенному снижению скоростей восстановительных реакций $C+CO_2 = 2CO$ и $C+H_2O = CO+H_2$, поэтому концентрации газовых компонентов CO, H_2 и размер частиц мало изменяются в этом диапазоне.

Конвективный теплообмен между твердой и газовой фазами и тепловыделение гомогенных химических реакций $CO+0{,}5O_2=CO_2$ и $H_2+0{,}5O_2=H_2O$ обеспечивают резкое возрастание кривой $t_g(\tau, z)$ с 450 °С до максимального значения 995 °С (рис. 7, кривая *2*). Из рис. 3 и 7 видно, что зависимости $t_p(\tau, z)$ и $t_g(\tau, z)$ подобны, однако максимум кривой $t_g(\tau, z)$ смещен относительно максимума функции $t_p(\tau, z)$ из первой зоны в окислительно-восстановительную область реагирования.

В зоне сухой перегонки 1,9 м < z < 2,75 м (поз. *5* (рис. 1)) происходит нагрев высушенной дробленки до температуры 240–410 °С (рис. 3, кривая *2*) за счет межфазного конвективного теплообмена и радиационно-кондуктивного теплопереноса твердой фазы, что обеспечивает интенсивный выход летучих веществ из угольных частиц.

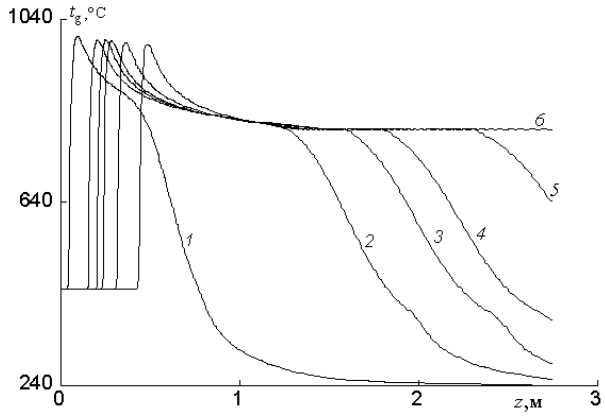


Рис. 7. Распределение температуры газа по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени при отношении массовых долей в парокислородной смеси H_2O/O_2 = 45/55 (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 7. Gas temperature distribution over the height of the fixed bed as a function of time with respect to the mass fractions in the steam-oxygen mixture H_2O/O_2 = 45/55 (notations are the same as in Fig. 2).

В модели летучие шубаркольского каменного длиннопламенного угля представлены в виде кислородосодержащего соединения, которое при нагреве разлагается на компоненты пиролизного газа согласно реакции $CH_{3{,}147}O_{0{,}5625} \rightarrow 0{,}09132CO + 0{,}0581CO_2 + 0{,}5042CH_4 + 0{,}05783C_6H_6 + 0{,}03655H_2 + 0{,}3549H_2O$. Из этой реакции следует, что объ-

емные доли метана и водяного пара значительно больше, чем диоксида углерода, окиси углерода и водорода. Поэтому при смешении компонентов летучих веществ с компонентами газа, выходящего из зоны газификации поз. *4* (рис. 1), происходит уменьшение величин R_{CO}, R_{H_2} и возрастание значений R_{H_2O}, R_{CH_4} и $R_{C_6H_6}$ (рис. 4 *в*, рис. 5, рис. 8, кривые *2*). В пиролизной зоне за счет выхода летучих веществ наблюдается уменьшение диаметра частиц с 8,2 мм до 7,64 мм (первый член уравнения (11); рис. 6, кривая *2*).

С течением времени высота шлаковой подушки возрастает ($\Delta z_{ash}(\tau = 60$ с) = 47,3 мм, $\Delta z_{ash}(\tau = 560$ с) = 438,3 мм), вследствие чего зоны окисления, газификации и пиролиза смещаются вверх по вертикальной оси *z* (рис. 2–8, ср. кривые *1* и *6*). Следует отметить, что выгорания компонентов пиролизных газов C_6H_6, CH_4 и кислородосодержащего соединения $CH_{3,147}O_{0,5625}$ не происходит, так как скорость убывания летучих веществ по высоте слоя значительно выше, чем скорость перемещения окислительной зоны. Например, при $\tau = 260$ с зона окисления располагается на участке 0,21 м $< z <$ 0,25 м, в то время как область содержания летучих веществ находится в диапазоне 2,188 м $< z <$ 2,75 м (рис. 2, кривые *3*).

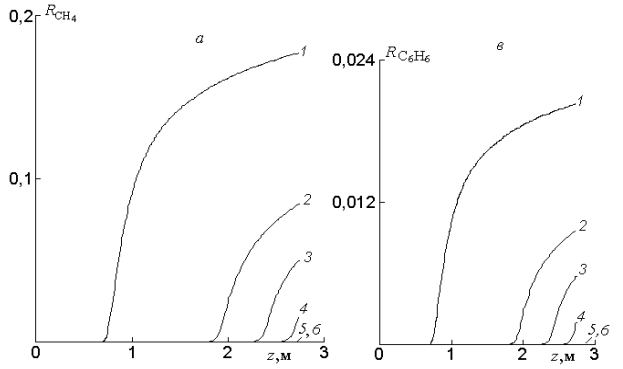


Рис. 8. Распределение объемных долей компонентов газа CH_4 (*а*) и C_6H_6 (*в*) по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени при отношении массовых долей в парокислородной смеси H_2O/O_2 = 45/55 (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 8. Distribution of the volume fractions of the components of the gas CH_4 (*а*) and C_6H_6 (*в*) over the height of the fixed bed as a function of time with respect to the mass fractions in the steam-oxygen mixture H_2O/O_2 = 45/55 (notations are the same as in Fig. 2)**.**

По этой причине скорость распада комплекса $r_{CH_{3,147}O_{0,5625}\rightarrow}$ (см. табл. 1) была повышена за счет уменьшения энергии активации с $108 \cdot 10^3$ до $60 \cdot 10^3$ кДж/кмоль. В результате более 99 % комплекса $CH_{3,147}O_{0,5625}$ распадается на газовые компоненты CO, CO_2, CH_4, C_6H_6, H_2 и H_2O и менее 1% остается в виде соединения $CH_{3,147}O_{0,5625}$.

Во временном интервале $0 < \tau < 350$ с состав генераторного газа на выходе из реактора изменяется. При $\tau = 60$ с (на сухую массу):

R_{CO} = 40,82 %, R_{H_2} = 19,3 %, R_{CO_2} = 15,3 %, R_{CH_4} = 22 % и $R_{C_6H_6}$ = 2,53 %; $\tau = 260$ с: R_{CO} = = 58,36 %, R_{H_2} = 28 %, R_{CO_2} = 6,4 %, R_{CH_4} = 6,4 % и $R_{C_6H_6}$ = 0,75 %, H_2/CO = 0,48. Расчетный состав газа при $\tau = 260$ с хорошо согласуется с литературными данными, приведенными в [8]: R_{CO} = 58%, R_{H_2} = 30 %, R_{CO_2} = 5 %, R_{CH_4} = 6,9 %, H_2/CO = 0,52.

Диапазон $\tau > 350$ с характеризуется отсутствием летучих веществ в угольных частицах по всей высоте неподвижного слоя (рис. 2 *в*, кривая *5*). Поэтому с течением времени при интенсивном перемещении границ зон окисления, газификации и пиролиза по вертикальной оси *z* состав генераторного газа на выходе из реактора практически не изменяется: R_{CO} = 61,3 %, R_{H_2} = 30,13 %, R_{CO_2} = 7,68 %, R_{CH_4} = 0 и $R_{C_6H_6}$ = 0 (рис. 4, рис. 5 *а*, рис. 8, ср. кривые *5* и *6*).

При организации процесса газификации шубаркольского каменного длиннопламенного угля в газогенераторе необходимо решить две проблемы. Первая из них связана с низкой зольностью исходного топлива A^r = 8,55% (согласно сертификату). Как отмечается в роботе [9], величина A^r в реальных условиях может снижаться до 3 %. Это приводит к значительному уменьшению высоты шлаковой подушки, тем самым приближает диапазон максимальных тепловых потоков к колосниковой решетке, что усиливает ее перегрев (рис. 3, кривая *1*). Вторая задача связана с низкой температурой начала шлакования t_{slag} = 1003°C, которая вычислялась по химическому составу золы, приведенному в сертификате. Величина t_{slag} оказывается ниже, чем температура начала деформации золы t_A = 1100°C. Из рис. 3 следует, что максимальная температура частиц при $\tau = 60$ с составляет 1371°C. Значение $t_{p,max}$ оказывается выше, чем величина t_{slag}, но меньше температуры жидкоплавкого состояния золы t_C = 1440 °C, что говорит о возможном формировании агломератов и шлаковании в области, прилегающей к колосниковой решетке, вследствие чего могут возникнуть проблемы с эксплуатацией газогенератора. Если испытания на действующей промышленной установке покажут наличие серьезных проблем, тогда целесообразно рассмотреть организацию двух альтернативных режимов работы установки. Первый из них характеризуется повышением максимальной темпера-

туры частиц в зоне максимальных тепловыделений с 1371 °С до 1550 °С за счет уменьшения отношения массовых долей в парокислородной смеси H_2O/O_2 с 45/55 до 40/60 (рис. 3, рис. 9, кривые *1*). Высокий уровень температур $t_{p,max} > t_C$ в узкой области, прилегающей к поду реактора, обеспечивает устойчивое жидкое шлакоудаление из газогенератора. На выходе из реактора получается следующий состав генераторного газа на сухую массу. При τ = 280 с: R_{CO} = 65%, R_{H_2} = 25,6%, R_{CO_2} = 3,8%, R_{CH_4} = 5% и $R_{C_6H_6}$ = = 0,57%; τ = 330 с: R_{CO} = 69%, R_{H_2} = 27%, R_{CO_2} = 3,6%, R_{CH_4} = 0,065% и $R_{C_6H_6}$ = 0. Эти результаты хорошо согласуются с литературными данными, приведенными в [10]. Из состава генераторного газа следует, что его калорийность выше, чем при газификации угольной пыли в потоке [11].

Второй режим базируется на твердом шлакоудалении, когда значение t_p в окислительной зоне не превышает 1000 °С. Для построения этого режима необходимо устранить перегрев колосниковой решетки за счет добавления инерта (отработанной золы) в исходное топливо, что позволит повысить высоту шлаковой подушки и тем самым стабилизировать тепловое состояние решетки. Детальный анализ второго режима будет представлен во второй части статьи.

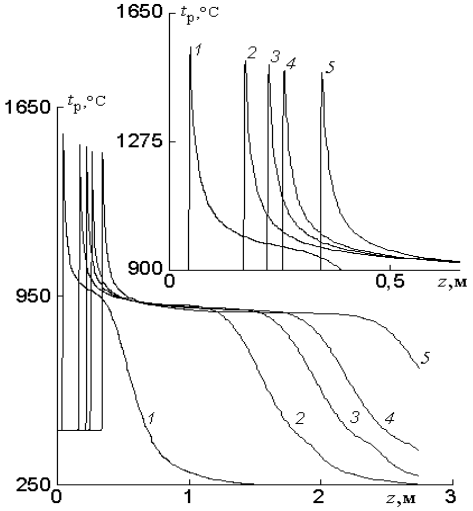


Рис. 9. Распределение температуры частиц по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени при отношении массовых долей в парокислородной смеси H_2O/O_2 = 40/60 (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 9. Temperature distribution of particles along the height of the fixed bed as a function of time with the ratio of mass fractions in the steam-oxygen mixture H_2O/O_2 = 40/60 (notations are the same as in Fig. 2)/

Выводы. 1. Предложенная модель позволяет получить детальную информацию о геометрических, аэродинамических, тепловых и физико-химических параметрах парокислородной газификации твердого топлива под давлением в неподвижном слое в любой момент времени. Эта информация может быть использована при конструировании реакторов на стадиях эскизного, технического и рабочего проектирования, пусконаладочных режимах и работе газогенератора на различных нагрузках, когда процесс парокислородной газификации угля является нестационарным из-за цикличности подачи исходного топлива и выгрузки золы при помощи системы шлюзовых бункеров.

2. Показано, что:

а) участок окислительной зоны, где температура угольных частиц шубаркольского каменного длиннопламенного угля достигает максимального значения, очень узок и составляет 10-11 мм;

б) основной процесс газификации коксозольных частиц протекает на малом окислительно-восстановительном участке фиксированного слоя Δz_{bed} = 89 мм, что приводит к понижению температуры твердой фазы на 420 °С и объемной доли H_2O до 4,7 %, вследствие чего оставшаяся часть интервала газификации Δz_{bed} = 1,65 м является малоэффективной;

в) кислородная и восстановительная зоны не содержат пиролизных газов, так как скорость убывания летучих веществ по высоте слоя значительно выше, чем скорость перемещения указанных диапазонов;

г) в диапазоне $0 < \tau < 350$ с состав генераторного газа на выходе из реактора изменяется из-за интенсивного выхода летучих веществ из угольных частиц в зоне сухой перегонки в отличие от интервала $\tau > 350$, где отсутствует участок сухой перегонки, благодаря чему состав уходящих газов с течением времени не изменяется;

д) при τ = 260 с состав генераторного газа (на сухую массу): R_{CO} = 58,36%, R_{H_2} = 28%, R_{CO_2} = = 6,4%, R_{CH_4} = 6,4% и $R_{C_6H_6}$ = 0,75% хорошо согласуется с литературными данными, приведенными в работе [8]: R_{CO} = 58%, R_{H_2} = 30%, R_{CO_2} = 5%, R_{CH_4} = 6,9%.

3. Предложены два альтернативных режима работы газогенератора. Первый из них связан с повышением максимальной температуры частиц в малой области, прилегающей к поду реактора, с 1371 °С до 1550 °С, что позволяет организовать устойчивое жидкое шлакоудаление из газогенератора. Второй режим основан на твердом шлакоудалении, когда температура частиц не превышает 1000 °С. В этом случае для устранения перегрева колосниковой решетки в исходное топливо добавляется отработанная зола, что позволяет повысить

высоту шлаковой подушки и тем самым стабилизировать тепловое состояние решетки.

1. *Аэров М. Э., Тодес О. М., Наринский Д. А.* Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л. Химия. 1979. 176 с.

2. *Rokhman B.B.* Modeling and numerical investigation of the process of vapor-oxygen gasification of solid fuels in a vertical flow reactor under pressure. Journal of Ehgineering Physics and Thermopysics. 2014. Vol. 87. No. 5. Pp. 1103-1115.

3. *Westbrook C.K. Dryer F.L.* Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. Combust. Sci. Technol. 1981. Vol. 27. Pp. 31-43.

4. *Bustanmante F. Enick R.M. Killmeyer R.P. Howard B.H. Rothenberger K.S. Cugini A.V. Morreale B.D. Ciocco M.V.* Uncatalyzed and wall-catalyzed forward water-gas shift reaction kinetics. AIChE J. 2005. Vol. 51. Pp. 1440-1454.

5. *Ma J., Zitney S.E.* CFD modeling of entrained-flow gasifiers with improved physical and chemical submodels. Energy Fuels 2012. Vol. 26. Pp. 7195-7219.

6. Gómes-Barea A., Leckner B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed. Progress in Energy and Combustion Science. 2010. Vol. 36. Pp. 449-509.

7. *Wen C.Y., Chaung T.Z.* Entrainment Coal Gasification Modeling. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 1979. Vol. 18. № 4. Pp. 684-695.

8. *Gräbner M.* Industrial Coal Gasification Technologies Covering Baseline and High Ash Coal. Wiley. 2014. 384 p.

9. *Нагорнов А.Н.* Исследование и разработка технологии газификации малозольных углей в плотном слое под давлением при паровоздушном дутье. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Барнаул. 2010. 20 с.

10. *Yoon H., Wei J., Denn M.* A model for moving bed coal gasification reactors. AIChE J. 1978. Vol. 24. №. 5. Pp. 885-903.

11. *Рохман Б.Б.* Моделирование тепломассообмена и химического реагирования газодисперсного потока пылевидных частиц угля в высокотемпературном газификаторе. Відновлювана енергетика. 2016. № 3. С. 13-26.

ДВОВИМІРНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ ТВЕРДОГО ПАЛИВА В НЕРУХОМОМУ ШАРІ ПІД ТИСКОМ. 1. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНВЕРСІЇ ШУБАРКОЛЬСЬКОГО КАМ'ЯНОГО ВУГІЛЛЯ В ПАРОКИСНЕВІЙ СУМІШІ ПРИ СПІВВІДНОШЕННІ МАСОВИХ ЧАСТОК H_2O/O_2=45/55

Б.Б. Рохман, доктор технічних наук

Інститут вугольних енерготехнологій НАН України
04070 м. Київ, вул. Андріївська, 19

Побудовано нестаціонарну модель процесу парокисневої газифікації твердого палива в фіксованому шарі під тиском з урахуванням міжфазного конвективного теплообміну, радіаційно-кондуктивного теплопереносу твердої фази, радіаційного і кондуктивного теплообміну шару зі стінкою реактора, гетерогенних і гомогенних хімічних реакцій, сил тяжіння і аеродинамічного опору. Отримано розподіл температур фаз, діаметрів вугільних частинок, концентрацій газових компонентів по висоті шару в залежності від часу при газифікації шубаркольского кам'яного довгополуменевого вугілля під тиском 3 МПа при співвідношенні масових часток в парокисневій суміші H_2O/O_2 = 45/55. Отримана інформація може бути використана при конструюванні реакторів, пуско-налагоджувальних режимах і роботі газогенератора на різних навантаженнях, коли процес парокисневої газифікації вугілля є нестаціонарним через циклічність подачі вихідного палива і вивантаження золи за допомогою використання системи шлюзових бункерів. Показано, що ділянка окислювальної зони, де температура вугільних частинок досягає максимального значення, дуже вузька і становить 10-11 мм. Запропоновано два альтернативних режими роботи газогенератора. Перший з них H_2O/O_2 = 40/60 пов'язаний з підвищенням максимальної температури частинок в області, прилеглій до поду реактора до 1550 °С, що дозволяє організувати стійке рідке шлаковидалення з газогенератора. Другий режим H_2O/O_2 = 72/28 базується на твердому шлаковидаленні, коли температура частинок не перевищує 1000 °С. Бібл.11, табл.1, рис.9.

Ключеві слова: *нерухомий шар, вугілля, теплопроводність, парокиснева газифікація, кондуктивний, радиаціоний, температура*

REFERENCES

1. *Aerov M. E., Todes O. M., Narinskiy D.* Apparatyi so statsionarnyim zernistyim sloem. [Apparatus with a stationary granular bed]. Leningrad. USSR. Khimiya. 1979. 176 p. [in Russian].

2. *Rokhman B.B.* Modeling and numerical investigation of the process of vapor-oxygen gasification of solid fuels in a vertical flow reactor under pressure. Journal of Ehgineering Physics and Thermopysics. 2014. Vol. 87. No. 5. Pp. 1103-1115. [in English].

3. *Westbrook C.K., Dryer F.L.* Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. Combust. Sci. Technol.. 1981. No. 27. Pp. 31-43. [in English].

4. *Bustanmante F., Enick R.M, Killmeyer R.P, Howard B.H, Rothenberger K.S, Cugini A.V, Morreale B.D., Ciocco M.V.* Uncatalyzed and wall-catalyzed forward water-gas shift reaction kinetics. *AIChE J.* 2005. No. 51. Pp. 1440-1454. [in English].

5. *Ma J., Zitney S.E.* CFD modeling of entrained-flow gasifiers with improved physical and chemical submodels. Energy Fuels. 2012. No. 26. Pp. 7195-7219. [in English].

6. *Gómes-Barea A., Leckner B.* Modeling of biomass gasification in fluidized bed. Progress in Energy and Combustion Science. 2010. No. 36. Pp. 449-509. [in English].

7. *Wen C. Y., Chaung T. Z.* Entrainment Coal Gasification Modeling. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.. 1979. Vol. 18. No. 4. Pp. 684-695. [in English].

8. *Gräbner M.* Industrial Coal Gasification Technologies Covering Baseline and High- Ash Coal. Wiley. 2014. 384 p. [in English].

9. *Nagornov A. N.* Issledovanie i razrabotka tehnologii gazifikacii malozolnyh uglej v plotnom sloe pod davleniem pri parovozdushnom dute. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehnicheskih nauk. [Research and development of technology for gasification of low-ash coals in a dense bed under pressure with a vapor-air blast. Abstract of thesis for the degree of candidate of technical sciences]. Barnaul. Russia. 2010. 20 p. [in Russian].

10. *Yoon H., Wei J., Denn M.* A model for moving bed coal gasification reactors. AIChE J. 1978. Vol. 24. No. 5. Pp. 885-903. [in English].

11. *Rokhman B.B.* Modelirovanie teplomassoobmena i himicheskogo reagirovaniya gazodispersnogo potoka pylevidnyh chastic uglya v vysokotemperaturnom gazifikatore. [Modelling heat-and-mass transfer and chemical reaction of the gas-dispersed flow of the pulverized coal particles in a high-temperature gasifier]. Vidnovluvana energetika, 2016. No. 3. 13-26. [in Russian].

Стаття надійшла до редакції 20.11.18
Остаточна версія 12.03.19

УДК 629.3.063.2

ОБҐРУНТУВАННЯ КАНАЛУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

О.Ф. Соколовський, канд. техн. наук, **Я.Д. Ярош**, канд. техн. наук,
Н.М. Цивенкова, канд. техн. наук, **С.М. Кухарець**, докт. техн. наук

Житомирський національний агроекологічний університет
10008 Старий бульвар, 7, м. Житомир

Сучасною тенденцією розвитку енергетики є прагнення до збалансованості енергетичного комплексу, підвищення надійності електропостачання споживачів. Важливе місце в стратегії розвитку електроенергетики займають автономні системи електропостачання. Вони використовуються на підприємствах, в аеро-, морських і річкових портах, в енергоблоках лікарень, у фермерських господарствах, в системах аварійного енергопостачання, на об'єктах оборонного комплексу – скрізь, де потрібна електроенергія, в той час як мережа або віддалена, або працює з перебоями.
Представлено автономну систему енергопостачання з двигунами внутрішнього згорання. Основним перетворювачем механічної енергії приводних двигунів в електричну є електромеханічний перетворювач змінного струму з обмоткою збудження, яка розташована на роторі.
Представлено алгоритм, згідно з яким на початку циклу контролер визначає добову норму споживання електроенергії та, відповідно до типу дня і часу доби, виконує дії за коротким чи розгалуженим алгоритмом. У разі використання добової норми електроенергії може виникнути ситуація, за якої увімкнутою залишиться тільки частина світильників, що спричинить дискомфорт для персоналу та впливатиме на продуктивність праці співробітників. Пропонується впровадження другого незалежного каналу електропостачання з використанням газогенераторних технологій. Вироблений газ забезпечує роботу двигуна внутрішнього згорання, який обертає вал генератора.
Представлено графік прогнозованого вироблення енергії фотоелектричною системою встановленою потужністю 3,5 кВт на основі даних сонячної інсоляції на широті м. Житомира. Також представлено графік продуктивності газогенераторної установки потужністю 5 кВт за однозмінної роботи. Розраховано прогнозоване споживання електроенергії освітлювальною установкою протягом першого місяця року для корпусів Житомирського національного агроекологічного університету.
Представлено графік різниці між спожитою та виробленою енергією за днями тижня. Величина спожитої електрики за місяць становила 767,8 кВт·год за встановленої норми 251 кВт·год. Фотоелектричними панелями та газогенераторною установкою вироблено відповідно 184,8 кВт·год та 493,2 кВт·год. Другий резервний канал живлення забезпечив більше половини потреб на освітлення навчального корпусу.
Розроблено структурну схему контролера, що реалізує спеціалізований алгоритм. Представлено графік регульованих змінних під час роботи контролера.
Застосування спеціалізованого алгоритму дозволяє зменшити енергоспоживання установки, забезпечує можливість повноцінного використання глибокого резервування на базі фотоелектричної системи та газогенераторної установки.
Подальші дослідження спрямовані на встановлення впливу продуктивності газогенераторної установки на стійкість роботи системи двигун-генератор в умовах мінливого попиту на електроенергію та з врахуванням нестабільного значення коефіцієнта потужності. Бібл. 10, рис. 9.
Ключові слова: *газогенератор, система електропостачання, фотоелектрична система.*

THE SUBSTANTIATION OF THE ELECTRICAL POWER SUPPLY CHANNEL BASED ON THE GAS-GENERATOR INSTALLATION

O. Sokolovskyi, candidate of technical science, **Y. Yarosh,** candidate of technical science, **N. Tsyvenkova,** candidate of technical science, **S. Kukharets,** doctor of technical science

Zhytomyr National Agroecological University
10008, 7 Staryi Blvd, Zhytomyr, Ukraine

A modern tendency in power production development is an aspiration to balance the whole electric power complex, to raise the consumer power supply reliability. Autonomous power supply systems take an important place in electric power industry development. They are used in aero-, sea and river ports, in hospitals, on farms, in emergency power supply systems, on defense complex objects – literally everywhere where you need power and supply is distant or working intermittently.
An autonomous power supply system powered by internal combustion engines is introduced. The main converter of an engine rotation to electric power is an alternator with excitation winding on the rotor.
An algorithm is introduced according to which a controller determines the daily amount of power consumption and, accordingly to the type and time of day, performs actions by either short or ramified algorithm. In a case when the daily rate of power is depleted, an unwished situation can occur, when only some of the lighting can stay on, that can cause discomfort for employees, and can lower their productivity. A second independent power source is proposed based on gas generator technology. A generated gas feeds an internal combustion engine which turns the alternator shaft.
A diagram of predicted power production of a 3.5 kW photovoltaic installation is presented, based on insolation data for Zhytomyr latitude. Also, a productivity diagram for gas generator installation with a nominal power output of 5 kW for one shift operation is presented. A predicted power consumption for a lighting installation for the first month of the year for all buildings of Zhytomyr national agroecological university is calculated.

© О.Ф.Соколовський, Я.Д.Ярош, Н.М.Цивенкова, С.М.Кухарець, 2019

A diagram of difference between produced and consumed power by days is presented. A monthly amount of consumed power is 767.8 kWh while the restricted norm is 251 kWh. Photovoltaic provided 184.8 kWh. The gas generator provided 493.2 kWh. The second reserve power supply channel provided more than a half of needed power for lighting.
A structural diagram of a controller, that performs a specialized algorithm, is developed. A diagram of variables regulated during controller operation is presented.
Implementation of the specialized algorithm can lower the installation energy consumption, provides the possibility of high-grade usage of deep reserving based on photovoltaic system and gas generator installation.
Further investigations are directed towards determining of an influence of gas generator installation productivity on operational stability of an engine-alternator system under the conditions of variable power demand and considering unstable power factor. Ref. 10, fig.9.
Keywords: *gas producer, power supply system, photovoltaic system.*



О.Ф. Соколовський
O. Sokolovskyi

Відомості про автора: завідувач кафедрою електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології Житомирського національного агроекологічного університету, к.т.н, доцент.
Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».
Наукова сфера: біоенергетичні системи аграрного виробництва, електротехнічні системи, енергозбереження в системах автоматизованого електропривода.
Публікації: 50 публікацій, з них 32 наукові (у тому числі 26 наукових праць, опублікованих у вітчизняних і 6 у міжнародних рецензованих фахових виданнях), 2 патенти на винахід та 11 навчально-методичного характеру.
ORCID: 0000-0001-8440-7462
Контакти: +38(097) 578-77-54
e-mail: of@ukr.net

Author information: head of Electrification, Automation of Production and Engineering Ecology Department (Engineering and Energetic Faculty) of Zhytomyr National Agroecological University, Ph.D, assis. professor of Mechanics and Agroecosystems Engineering Department.
Education: National Technical university of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».
Research area: bioenergy systems of agrarian production, electrical and technical engineering systems, energy saving in automated electric drive systems.
Publications: 50, including 32 scientific articles (26 scientific papers were published in Ukrainian peer-reviewed journals, and 6 – in international), 2 patents and 11 educational and methodical materials.
ORCID: 0000-0001-8440-7462
Contacts: +38(097) 578-77-54
e-mail: of@ukr.net



Я.Д. Ярош
Y. Yarosh

Відомості про автора: декан факультету інженерії та енергетики Житомирського національного агроекологічного університету, к.т.н., доцент кафедри процесів, машин і обладнання в агроінженерії.
Наукова сфера: біоенергетичні системи аграрного виробництва, технологічні засоби формування екологобезпечних проектів у агрохарчовій галузі.
Освіта: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.
Публікації: 70, з них 56 наукові (у тому числі 46 наукових праць, опублікованих у вітчизняних і 10 у міжнародних рецензованих фахових виданнях), 4 патенти та 14 матеріалів навчально-методичного характеру.
ORCID: 0000-0001-6590-7058
Контакти: +38 (067) 796-24-49
e-mail: yaroslav.yarosh76@gmail.com

Author information: dean of Engineering and Energetic Faculty of Zhytomyr National Agroecological University, Ph.D, assis. professor of Processes, Machinery, and Equipment in Agroengineering Department.
Education: Ternopil Ivan Puluj National Technical University.
Research area: bioenergy systems of agrarian production, technological means of forming ecologically safe projects in the sphere of agro-food industry.
Publications: 70, including 56 scientific articles (46 scientific papers were published in Ukrainian peer-reviewed journals, and 10 – in international), 4 patents and 14 educational and methodical materials.
ORCID: 0000-0001-6590-7058
Contacts: +38 (067) 796-24-49
e-mail: yaroslav.yarosh76@gmail.com



Н.М. Цивенкова
N. Tsyvenkova

Відомості про автора: заступник декана з наукової роботи факультету інженерії та енергетики Житомирського національного агроекологічного університету, к.т.н., доцент кафедри механіки та інженерії агроекосистем.
Освіта: Житомирський державний технологічний університет.
Наукова сфера: енергозбереження, альтернативна енергетика, біоенергетичні системи і комплекси.
Публікації: 82, з них 65 наукові (у тому числі 55 наукових праць, опублікованих у вітчизняних і 10 у міжнародних рецензованих фахових виданнях), 2 патенти на винахід та 18 праць навчально-методичного характеру.
ORCID: 0000-0003-1703-4306
Контакти: +38 (050) 313-89-03
e-mail: nataliyatsyvenkova@gmail.com

Author information: deputy dean in science of Engineering and Energetic Faculty of Zhytomyr National Agroecological University, Ph.D, assis. professor of the Mechanics and agroecosystems engineering Department.
Education: Zhytomyr state technological university.
Research area: energy saving, alternative energy, bionergetic systems and complex.
Publications: 82, including 65 scientific articles (55 scientific papers were published in Ukrainian peer-reviewed journals, and 10 – in international), 2 patents and 18 educational and methodical materials.
ORCID: 0000-0003-1703-4306
Contacts: +38 (050) 313-89-03
e-mail: nataliyatsyvenkova@gmail.com



С.М. Кухарець
S. Kukharets

Відомості про автора: завідувач кафедрою механіки та інженерії агроекосистем Житомирського національного агроекологічного університету, д.т.н.
Освіта: Житомирський національний агроекологічний університет.
Наукова сфера: технічна біоенергетика, технічне забезпечення агроекосистем.
Публікації: 155, з них 128 наукові (у тому числі 114 наукових праць, опублікованих у вітчизняних і 14 у міжнародних рецензованих фахових виданнях), 4 наукові монографії, 14 патентів на винахід та 27 праць навчально-методичного характеру (з них 1 підручник, 3 навчальні посібники).
ORCID: 0000-0002-5129-8746
Контакти: +38 (067) 665-35-48
e-mail: saveliy_76@ukr.net

Author information: head of the Mechanics and Agroecosystems Engineering Department (Engineering and Energetic Faculty) of Zhytomyr National Agroecological University, D.Sc, professor of the Mechanics, and Agroecosystems Engineering Department.
Education: Zhytomyr National Agroecological University.
Research area: technical biotechnology, technical support of agro-ecosystems.
Publications: 155, including 128 scientific articles (114 scientific papers were published in Ukrainian peer-reviewed journals, and 14 – in international), 4 monographs, 14 patents and 27 educational and methodical materials.
ORCID: 0000-0002-5129-8746
Contacts: +38 (067) 665-35-48
e-mail: saveliy_76@ukr.net

Перелік використаних позначень та скорочень:

W_Y – споживання енергії від мережі централізованого електропостачання, кВт·год;
$W_{СП}$ – електроенергія, спожита від фотоелектричної системи, кВт·год;
$W_{СГ}$ – електроенергія, спожита від газогенераторної установки, кВт·год;
W_{Ti} – електроенергія, спожита протягом темного часу доби, кВт·год;
W_{XMi} – електроенергія, спожита внаслідок хмарності, кВт·год;
P_C, P_H – встановлена потужність сонячних панелей та освітлювальної установки, кВт;
P_{CH} – потужність однієї панелі, кВт;
T – тривалість робочого дня, год;
k_C – сезонний коефіцієнт сонячної системи (для літа $k_C = 0,5$; для зими $k_C = 0,7$);
k_{XC} – сезонний коефіцієнт хмарності;
$A_{XП}$ – величина хмарності відповідно до прогнозу погоди;
t_T – тривалість сутінок на проміжку робочого дня, год;
$t_Г$, t_C – відповідно час використання на добу енергії, виробленої газогенераторною системою автономного електропостачання та час використання на добу сонячної енергії, год;
N – кількість робочих днів протягом місяця;
n – ціле додатне число;
Z – кількість сонячних панелей;
$G_Д$ – середньодобове значення сонячної інсоляції, кВт·год/м^2;
H – інтенсивність сонячного випромінювання за якого виконують тестування сонячних панелей, кВт/м^2.
$Q_П$ – потужність, отримана з м^3 газу, кВт/м^3;
$L_Г$ – продуктивність газогенератора за добу, м^3/добу;
$\eta_{ДВ}$ – коефіцієнт корисної дії двигуна внутрішнього згорання;
$\eta_Г$ – коефіцієнт корисної дії синхронного генератора;
$E(n \cdot T_0)$ – освітленість на поточному кроці квантування алгоритму, лк;
$E((n–1) \cdot T_0)$ – освітленість на попередньому кроці квантування, лк;
$U_з \cdot ((n+1) \cdot T_0)$ – напруга завдання, встановлена системою керування, В;
$U \cdot ((n–1) \cdot T_0)$ – напруга завдання, що визначається персона лом на попередньому кроці квантування алгоритму, В;
T_0 – період квантування, хв;
U_d, U_q – проекції напруг статора;
U'_{fd}, U'_{kd}, U'_{kq1}, U'_{kq2} – проекції приведених напруг збудження;
i_d, i_q – проекції струмів статора;
i'_{fd}, i'_{kd}, i'_{kq1}, i'_{kq2} – проекції приведених струмів збудження;
ϕ_d, ϕ_q – проекції потокозчеплення статора;
ϕ'_{fd}, ϕ'_{kd}, ϕ'_{kq1}, ϕ'_{kq2} – проекції приведених потоків потокозчеплен ня ротора;
R_S – активний опір статора;
R'_{fd}, R'_{kd}, R'_{kq1}, R'_{kq2} – проекції приведених опорів ротора, де індекси змінних і параметрів позначають таке: *d*, *q* – проекції змінних на осі *d* і *q*; *f*, *k* – змінні кола збудження і демпферної обмотки.

Вступ. Сучасною тенденцією розвитку енергетики є прагнення до збалансованості енергетичного комплексу, підвищення надійності електропостачання споживачів. Важливе місце в стратегії розвитку електроенергетики займають автономні системи електропостачання. Останнім часом такі системи отримують все більше поширення майже у всіх галузях народного господарства [5]. Необхідність в автономних системах виникає там, де технічно неможливо або економічно невигідно використовувати централізоване електропостачання, наприклад, на пересувних об'єктах. Автономні системи знаходять широке застосування в промисловості, будівництві, сільському і комунальному господарствах. Вони використовуються на підприємствах, в аеро-, морських і річкових портах, в енергоблоках лікарень, у фермерських господарствах, в системах аварійного енергопостачання, на об'єктах оборонного комплексу – скрізь, де потрібна електроенергія, в той час як мережа або віддалена, або працює з перебоями.

Для отримання стабільного надходження

енергії в автономних системах доречним буде використання газогенераторів [1, 2]. Генераторний газ використовується в якості палива для двигунів внутрішнього згоряння, газотурбінних установок, теплотехнічного обладнання та виробництва електроенергії [1, 2].

Постановка завдання. Первинним джерелом енергії в запропонованій системі (рис. 1) є газогенератор, вироблений газ якого є пальним для двигуна внутрішнього згорання.

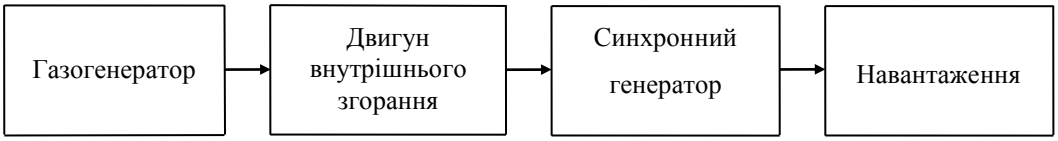


Рис. 1. Структурна схема газогенераторної системи автономного електропостачання
Fig. 1. Gas generator system block diagram for autonomous power supply

Основними перетворювачами механічної енергії приводних двигунів в електричну є синхронні генератори, асинхронні генератори та генератори постійного струму. Застосування асинхронних генераторів обмежується нестабільністю напруги та частоти у разі зміни параметрів навантаження та вимагає впровадження складних систем керування збудженням [4]. Використання колекторних генераторів обмежене недостатнім поширенням приладів постійного струму або ж вимагає застосування інверторів для отримання змінної напруги [6]. Синхронні генератори дозволяють отримувати якісну енергію змінного струму фіксованої частоти при зміні навантаження в межах номінальної потужності [3]. Тому для запропонованої системи автономного електропостачання обрано електромеханічний перетворювач змінного струму з обмоткою збудження, розташованою на роторі.

Одним зі способів зменшення витрат на освітлення є застосування автономних систем на базі фотоелектричних панелей, що в поєднанні зі світлодіодною технікою дозволяє отримувати значну економію електроенергії. Для реалізації таких систем необхідно впровадити такі рішення [9]:

– застосовувати в якості пристроїв комутації імпульсних вимикачів, що дозволить здійснювати централізоване керування освітленням автоматично та в ручному режимі;

– встановити датчики освітленості, датчики присутності в робочих приміщеннях, датчики положення жалюзі;

– періодично вимикати світло в автоматичному режимі в неробочий час;

– застосувати системи сонячного електропостачання з автономними інверторами типу off-grid для часткового покриття потреб на освітлення;

– впровадити світлодіодне освітлення офісу (для зменшення вартості реконструкції системи пропонується заміна люмінесцентних ламп на світлодіодні зі збереженням встановлених світильників);

– зонально керувати освітленням з метою створення необхідної освітленості в окремих частинах приміщень;

– запровадити добові норми витрат електроенергії з урахуванням тривалості робочого дня, тривалості сутінок відповідно до астрономічних даних, хмарності відповідно до прогнозу погоди;

– централізовано керувати системою від програмованого логічного контролера.

Відповідно до розробленого алгоритму [9] на початку циклу контролер визначає добову норму споживання електроенергії та, відповідно до типу дня і часу доби, виконує дії за коротким чи розгалуженим алгоритмом. На проміжку неробочого часу (18:00–08:00) контролер виконує періодичне вимикання світла через кожні дві години. Цю саму процедуру контролер виконує у вихідні дні. На інтервалі 08:00–18:00 в робочий день відповідно до сигналів датчиків присутності, освітленості та положення жалюзі з урахуванням добового залишку електроенергії забезпечується живлення системи освітлення від мережі централізованого електропостачання або від акумуляторних батарей фотоелектричної системи. У разі використання добової норми електроенергії може виникнути ситуація, за якої увімкнутою залишиться тільки частина світильників, що спричинить дискомфорт для персоналу та впливатиме на продуктивність праці співробітників.

Пропонується впровадження другого незалежного каналу електропостачання на основі газогенераторної установки [2]. Вироблений газ буде забезпечувати роботу двигуна внутрішнього згорання, який у свою чергу обертатиме вал генератора. У більшості випадків для вироблення електроенергії в автономних системах електропостачання з електромеханічними перетворювачами застосовують синхронні та асинхронні генератори напругою 220/380 В.

Виклад основного матеріалу. В мобільних електростанціях для нормальної роботи генера-

тора частота обертання привідного двигуна підтримується на рівні 3000 об/хв. В умовах нестабільної продуктивності газогенератора та коливання величини навантаження, що викликатиме зміну обертів генератора та, як наслідок, погіршення якості виробленої електроенергії, найбільш прийнятним буде схемне рішення: газогенератор – двигун внутрішнього згорання – синхронний генератор – контролер зарядження – акумуляторні батареї – інвертор 220/380 В. Застосування такої схеми дозволить отримати додаткове резервне джерело та уникнути вимушеного зменшення рівня освітлення приміщень навчального корпусу у випадку розрядження акумуляторних батарей фотоелектричної системи.

Алгоритм роботи контролера (рис. 2) передбачатиме порівняння стану зарядження акумуляторних батарей з подальшим вибором основного каналу живлення в умовах вичерпання добової норми витрат електроенергії на освітлення корпусу. У разі недостатнього рівня зарядження батарей фотоелектричної системи ($U_Г > U_С$) в роботу вступає вузол на основі газогенераторної установки.

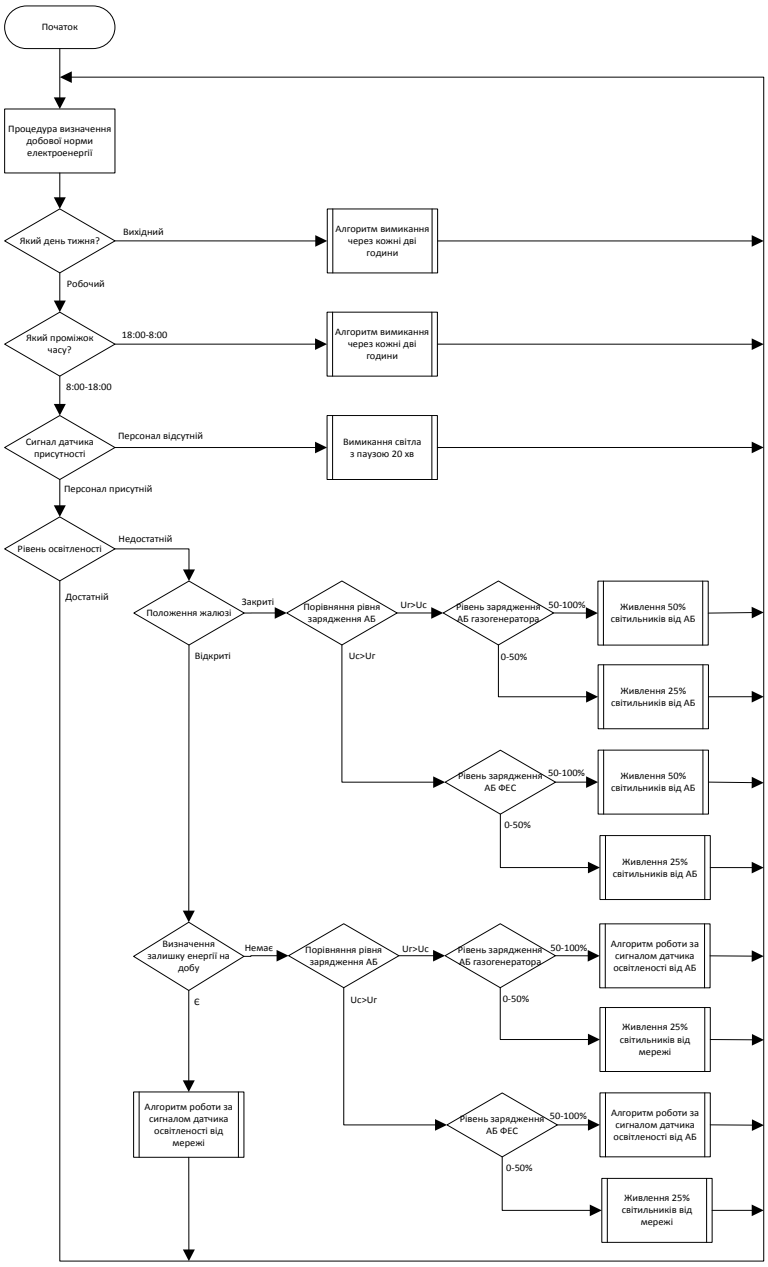


Рис. 2. Алгоритм роботи контролера

Fig. 2. Algorithm of controller operation

Енергозберігаючі властивості розробленої мережі забезпечуються: у нормальному режимі за рахунок використання датчиків присутності, освітленості та періодичного вимикання світла в неробочий час; в екстремальному режимі (у разі затемнення вікон) за рахунок зниження рівня штучного освітлення та спонукання персоналу до використання природного освітлення; в ощадному режимі (у випадку вичерпання добової норми) за рахунок вмикання відповідного алгоритму; використанням фотоелектричної системи та газогенераторної установки.

Величина електроенергії, яку споживає запропонована система за добу:

$$W_{П}\left(P_{Н},P_{С},P_{Г},T,k_{ХС},A_{ХП},t_{Т},t_{С},t_{Г}\right)= \\ =W_{У}\left(P_{Н},T,t_{Т},k_{ХС},A_{ХП}\right)+ \\ +W_{СП}\left(P_{С},t_{С}\right)+W_{СГ}\left(P_{Г},t_{Г}\right). \quad (1)$$

Сумарне прогнозоване споживання електроенергії за добу:

$$W_{Уi}=W_{Тi}+W_{ХМi}. \quad (2)$$

$$W_{Тi}=P_{Н}\cdot t_{Тi}. \quad (3)$$

$$W_{ХМi}=P_{Н}\cdot k_{ХС}\cdot T\cdot N\cdot\frac{A_{ХПi}}{\sum_{1}^{N}A_{ХПi}}. \quad (4)$$

Рекомендується прийняти $k_{ХС}=0,3$ для зимових місяців, $k_{ХС}=0,2$ – для весни та осені, $k_{ХС}=0,1$ – для літа. З метою врахування витрат електроенергії у сонячний день через затемнення вікон приймемо для зими $A_{ХП}=0$, для весни та осені – $A_{ХП}=0,5$, для літа – $A_{ХП}=1$. Визначення хмарності здійснюється відповідно до прогнозу на погодних сайтах [8] за чотирибальною шкалою.

Величина електроенергії, яку може виробити сонячна система електропостачання за добу, кВт·год:

$$W_{СД}=\frac{Z\cdot k_{С}\cdot P_{СН}\cdot G_{Д}}{H}. \quad (5)$$

Кількість електроенергії, виробленої газогенераторною установкою протягом доби:

$$W_{ГД}=Q_{П}\cdot L_{Г}\cdot\eta_{ДВ}\cdot\eta_{Г}. \quad (6)$$

На рис. 3 зображено: графік прогнозованого вироблення енергії фотоелектричною системою $W_{СМ}$ встановленою потужністю 3,5 кВт на основі даних сонячної інсоляції [10] на широті м. Житомира з урахуванням середньостатистичних показників хмарності у січні 2018 року; графік продуктивності газогенераторної установки $W_{ГМ}$ потужністю 5 кВт за однозмінної роботи обслуговуючого персоналу; графік прогнозованого споживання електроенергії освітлювальною установкою $W_{ОМ}$ протягом першого місяця року для забезпечення потреб навчального корпусу Житомирського національного агроекологічного університету.

Добова норма витрат для кожного із 22 робочих днів зображена на графіку $W_{НМ}$.

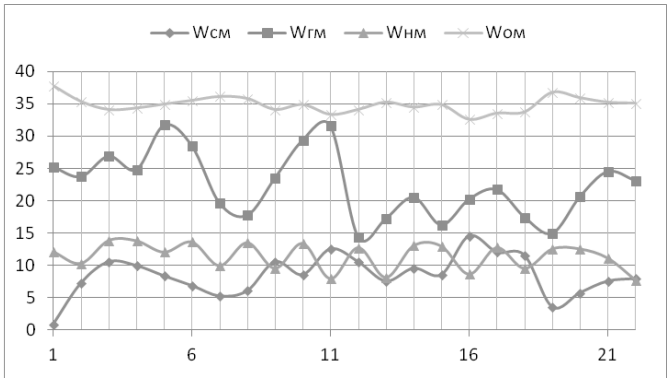


Рис 3. Графік прогнозованого вироблення енергії фотоелектричною системою

Fig. 3. Graph of the projected energy generation by a photoelectric system

На рис. 4 представлено графічну залежність, яка відображає різницю між спожитою та виробленою енергією за днями тижня. Найбільший дисбаланс за абсолютними показниками спостерігався на 3-й, 5-й, 10-й та 11-й робочі дні тижня. Лише три дні тижня характеризуються дефіцитом енергії, яка має забезпечуватися двома допоміжними каналами електропостачання.

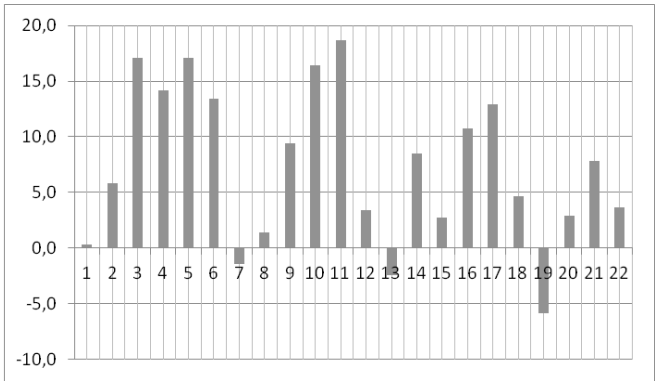


Рис. 4. Різниця між спожитою та виробленою енергією за днями тижня

Fig. 4. Difference between consumption and produced energy by days of the week

Величина спожитої електрики за місяць становила 767,8 кВт·год за встановленої норми 251 кВт·год. Фотоелектричними панелями та газогенераторною установкою вироблено відповідно 184,8 кВт·год та 493,2 кВт·год. Другий резер-

вний канал живлення забезпечив більше половини потреб на освітлення навчального корпусу.

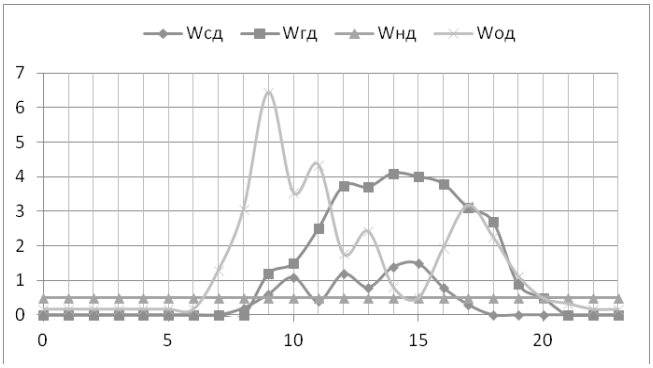


Рис. 5. Енергетичні показники установки протягом доби

Fig. 5. Energy indicators of the installation during the day

На рис. 5 зображено: графік вироблення енергії $W_{СД}$ фотоелектричною системою протягом доби; графік продуктивності газогенераторної установки $W_{ГД}$; графік споживання електроенергії освітлювальною установкою $W_{ОД}$ за той самий проміжок часу. Графік $W_{НД}$ відображає середнє споживання електроенергії освітлювальною установкою відповідно до встановленої норми. На окремих проміжках часу ділянки графіків споживання та вироблення електричної енергії мають протилежні тренди. Це пов'язано з мінливістю освітлення фотоелектричних панелей та нестабільною продуктивністю газогенераторної установки, а також значним зменшенням споживання енергії у денний час, коли сонячні модулі забезпечують найбільший коефіцієнт корисної дії.

У разі низького рівня зарядження акумуляторних батарей одночасно за двома каналами можливе виникнення ситуації, коли освітленість приміщень не буде відповідати встановленим вимогам. Пропонується застосування спеціалізованого алгоритму, за якого система керування зменшуватиме освітленість у разі вичерпання добової норми електроенергії незалежно від рівня зарядження акумуляторних батарей. При цьому зберігається принцип пріоритетності вибору каналу живлення за ознакою стану електрохімічних джерел енергії. Рівняння, що реалізує алгоритм:

$$U_З((n+1)T_0) = \frac{E(nT_0)}{E\left((n-1)T_0\right)} U((n-1)T_0), \qquad (7)$$

Структурна схема контролера, що реалізує спеціалізований алгоритм, зображена на рис. 6.

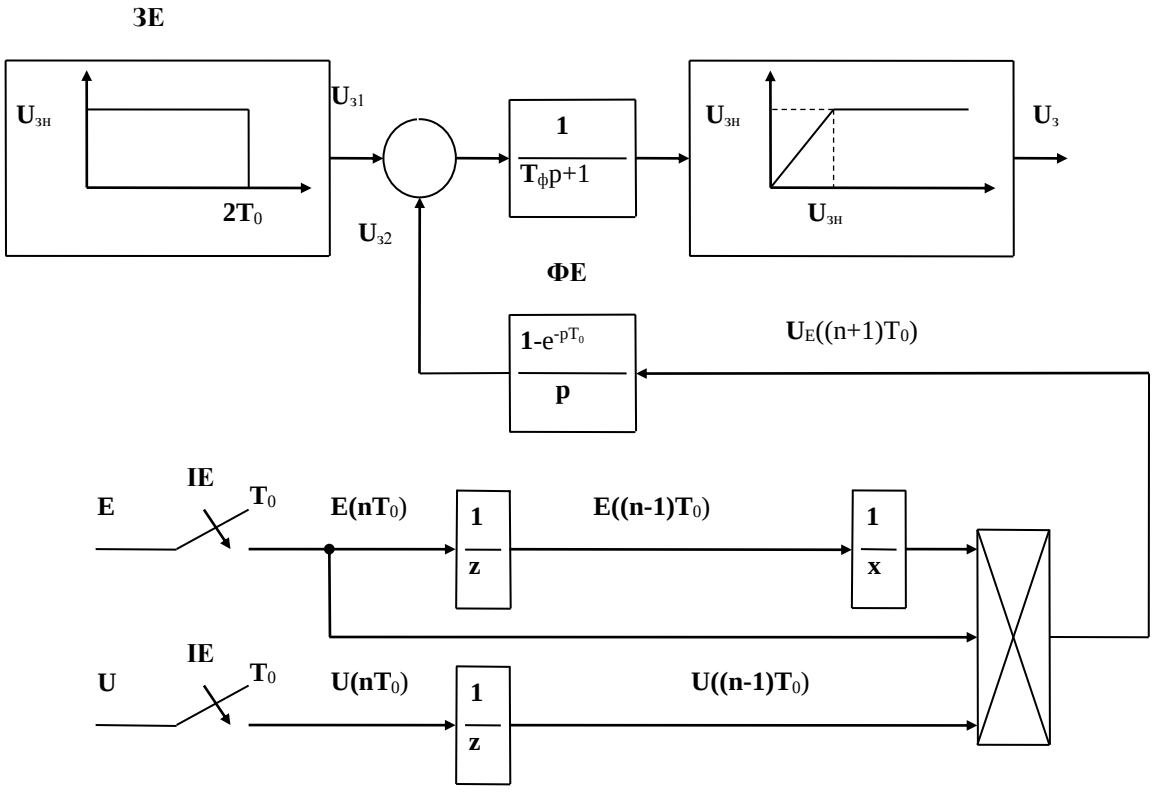


Рис. 6. Структурна схема реалізації спеціалізованого алгоритму

Fig. 6. Block diagram of specialized algorithm implementation

Задаючий елемент ЗЕ формує напругу завдання $U_{З1}$, яка відповідає номінальному значенню освітленості і утримується протягом періоду часу $2T_0$ під час вмикання системи освітлення. Період квантування T_0 повинен перевищувати час перехідних процесів, викликаних у

системі зміною напруги завдання. Інформація про освітленість надходить у фіксовані моменти часу nT_0 за допомогою імпульсних елементів ІЕ. Ланки *1/z* реалізують затримку сигналів на один фіксований часовий крок. Формуючий елемент ФЕ забезпечує формування сигналу завдання освітленості після вмикання системи. Ланка *1/x* реалізує обернено-пропорційну залежність. Через нульові початкові умови роботи системи ($E=0$, $U=0$) напруга U_{32} буде дорівнювати нулю протягом $2T_0$. Для зменшення стрибків струмів під час перехідних процесів напруга завдання подається через аперіодичний фільтр зі сталою часу $T_ф$.

Початковий режим визначається освітленістю $E=150$ *лк* (рис. 7). У момент часу $4T_0$ формується сигнал керування на виході спеціалізованого регулятора $U_3((n+1)T_0)$ з урахуванням: $E(n\cdot T_0)=120$ *лк*; $E\cdot(n-1)\cdot T_0=150$ *лк*; $U(n\cdot T_0)=7$ *В*; $U((n-1)\cdot T_0)=10$ *В*. При цьому напруга завдання зменшується з *10 В* до *7,3 В*. Далі система реагує на потреби споживачів. Збільшення сигналу завдання з боку персоналу від *3 В* до *9 В* призведе до зростання освітленості у момент часу $7T_0$. У випадку відповідності освітленості приміщення сигналу завдання на вході системи, напруга завдання на кожному наступному кроці квантування змінювалася б пропорційно встановленому завданню персоналом на двох сусідніх кроках квантування алгоритму. Але освітленість приміщень залежить від багатьох факторів, що суттєво впливає на форму графіка вихідної напруги регулятора. Для уникнення різких коливань освітленості рекомендується прийняти період квантування $T_0=15$ *хв*.

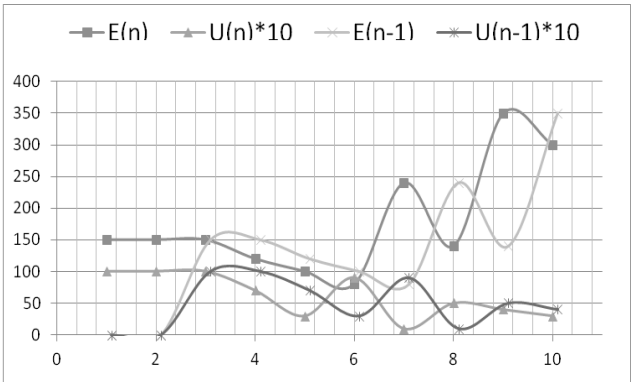


Рис. 7. Графіки регульованих змінних під час роботи спеціалізованого регулятора

Fig. 7. Diagram of regulated variables during the operation time of a specialized regulator

Проведемо дослідження автономної системи електропостачаня за допомогою програми Simulink, яка є додатком до пакета MATLAB [7]. Для моделювання перехідних процесів скористаємося блоком Synchronous Machine PU Fundamental бібліотеки SimPowerSystems. Блок є моделлю класичної синхронної машини з демпферною обмоткою. Електрична частина синхронного генератора описується системою диференційних рівнянь шостого порядку (8) в системі координат, пов'язаною з ротором [6].

Порти моделі є виводами статорної обмотки машини. Сигнал, що відповідає механічній потужності на валу подається на вхідний порт *Pm*, а на вхідний порт *Vf* подається еквівалент напруги обмотки збудження. На вихідному порту *m_pu* формується векторний сигнал, який містить 16 змінних: 1–3 – струми обмотки статора i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}; 4–5 – проекції струмів статора i_d, i_q; 6–8 – струм збудження i_{fd} та проекції струмів демпферної обмотки i_{kd}, i_{kq}; 9–10 – проекції потоку намагнічування ϕ_{md}, ϕ_{mq}; 11–12 – проекції напруг статора U_d, U_q; 13 – відхилення ротора $\Delta\theta$; 14 – швидкість ротора ω_r; 15 – електромагнітна потужність $P_в$; 16 – відхилення швидкості ротора $\Delta\omega$.

$$
\begin{aligned}
U_d &= R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_R \varphi_q, \\
U_q &= R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} - \omega_R \varphi_d, \\
U'_{fd} &= R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d\varphi'_{fd}}{dt}, \\
U'_{kd} &= R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d\varphi'_{kd}}{dt}, \\
U'_{kq1} &= R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d\varphi'_{kq1}}{dt}, \\
U'_{kq2} &= R'_{kd2} i'_{kq2} + \frac{d\varphi'_{kq2}}{dt}
\end{aligned}
\qquad (8)
$$

Для зручності отримання вихідних величин в Simulink передбачено блок Machines Measurement Demux. Стабілізація напруги на виводах машини у разі зміни навантаження здійснюється колом зворотного зв'язку з використанням блоку Excitation System. Блок є моделлю системи збудження для синхронної машини, що дозволяє регулювати напругу на затискачах у разі генераторного режиму. За основу блоку взятий збудник без врахування насичення магнітного кола. На перший вхід блоку (*vref*) подається необхідне значення напруги на затискачах статора. На другий (*vd*) і третій (*vq*) входи подаються поточні значення проекцій напруг статора на осі *d* і *q*. Четвертий вхід може бути використаний для створення контуру стабілізації потужності. Всі вхідні змінні та вихідна змінна мають розмірність відносних одиниць *pu*.

На рис. 8 показана схема для досліджень автономної системи електропостачання на базі синхронного генератора із чотириполюсним рото-

ром та демпферними обмотками. Дані генератора [3]: $P_{ном}$=5 кВт; $n_{ном}$=3000 об/хв; $U_{ном}$=380 В; $I_{ном}$=9 А.

На рис. 9а зображено графічні залежності вихідної напруги, на рис. 9б – графічна залежність струму у разі підключення трифазного симетричного навантаження. Пуск генераторної установки здійснюється з навантаженням, що відповідає лінійному струму 3,8 А. Далі в три етапи через кожні 0,4 с підключалася наступна секція трифазного симетричного опору, що збільшило струм до 5,7 А. Тривалість перехідних процесів при зміні навантаження не перевищувала 0,2 с. Моделювання проводилося з урахуванням сталої частоти обертання привідного двигуна при зміні навантаження.

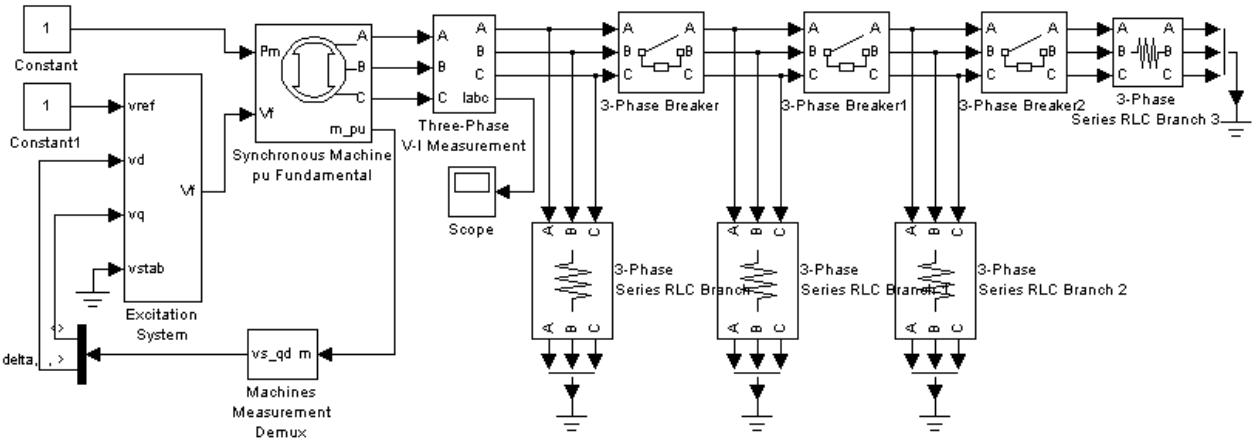
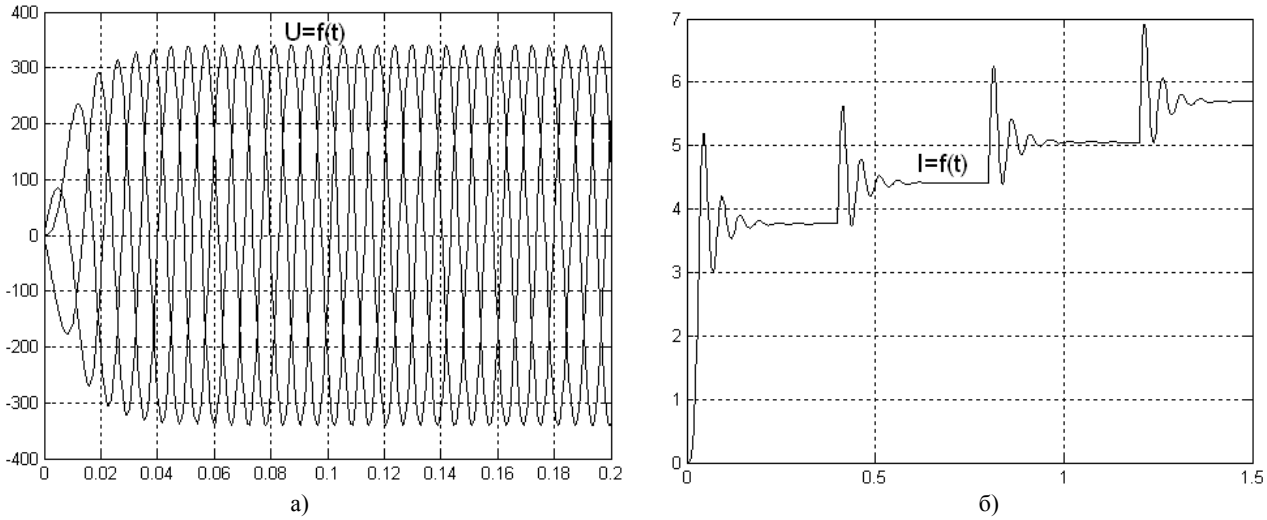


Рис. 8. Схема для дослідження системи автономного електропостачання

Fig. 8. Scheme for research of autonomous electric power supply system



а) б)

Рис. 9. Результати досліджень системи автономного електропостачання

Fig. 9. Results of the research of autonomous electric power supply system

Введення додаткового каналу на основі газогенераторної системи автономного електропостачання зменшує ймовірність обмеження щодо якості освітлення приміщень навчального корпусу та водночас зберігає функцію енергоощадного виховання персоналу.

Висновки. 1. Застосування спеціалізованого алгоритму дозволяє зменшити енергоспоживання установки, забезпечує можливість повноцінного використання глибокого резервування на базі фотоелектричної системи та газогенераторної установки.

2. Вироблення необхідної кількості енергії, запропонованою системою електроживлення, залежить від продуктивності газогенераторної установки, що вимагає ретельного узгодження встановлених потужностей елементів силового каналу. Вихідна частота визначається швидкістю обертання вала генератора, напруга – струмом ротора. Тому привідний двигун і система збу-

дження генератора повинні бути обладнані відповідними регуляторами для стабілізації обертів та напруги у випадку зміни величини та характеру навантаження. У разі застосування автономної системи для живлення обчислювальних комплексів необхідно враховувати дію поздовжньої реакції якоря, яка викликана навантаженням ємнісного характеру. Вимоги до автоматизації газогенераторної електростанції можуть бути знижені у випадку живлення нагрівальних установок (без електронних термостатів) та освітлювальних установок. Навантаження мережі електричними двигунами призведе до вимушеного збільшення встановленої потужності автономної системи електропостачання через значні пускові струми електромеханічних перетворювачів.

3. Подальші дослідження рекомендується спрямувати на встановлення впливу продуктивності газогенераторної установки на стійкість роботи системи двигун-генератор в умовах мінливого попиту на електроенергію та з урахуванням нестабільного значення коефіцієнта потужності.

1. *Perez N.P., Machin E.B., Pedroso D.T., Roberts J.J., Antunes J.S., Silveira J.L.* Biomass Gasification for Combined Heat and Power Generation in the Cuban Context. Energetic and Economic Analysis. Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 90. Pp. 1-12. URL: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.095

2. *Tsyvenkova N.M., Golubenko A.A., Kukharets S.M., Biletsky V.R.* The research of downdraft gas producer heat productivity on straw. Proceedings of International symposium .ISB-INMA TEH Agricultural and Mechanical Engineering. October 27-29. Bucharest. Romania. 2016. Pp. 83-91.

3. *Бєлікова Л.Я., Шевченко В.П.* Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів. Одеса. Наука і техніка. 2012. 480 с.

4. *Зачепа Ю.В.* Автономные системы электроснабжения на базе асинхронных генераторов, основные требования и структура. Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий. 2010. №2. С. 32–40.

5. *Козирський В.В., Каплун В.В., Волошин С.М.* Електропостачання агропромислового комплексу. К. Аграрна освіта 2011. 448 с.

6. *Копылов И.П., Клоков Б.К.* Справочник по электрическим машинам. М. Энергоатомиздат. 1989. 688 с.

7. *Островерхов М.Я., Пижов В.М.* Моделювання електромеханічних систем в Simulink: навч. посібник для студ. вищ. навч. закладів. К. Стилос 2008. 528 с.

8. Погода на місяць. URL: https://www.gismeteo.ua/ua/ (дата звернення: 17.01.2018)

9. *Соколовський О.Ф., Соколовська Л.М.* Енергозберігаюче керування освітлювальною установкою. Вісник Житомирського національного агроекологічного університету. 2017. Вип. 1(58). Т.1. С. 243-302.

10. Сонячний календар у Житомирі на січень 2018 року. URL: http://ua.365.wiki/world/ukraine/zhytomyr/sun/calendar/january/ (дата звернення: 21.05.2018)

ОБОСНОВАНИЕ КАНАЛА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

О.Ф. Соколовский, канд. техн. наук**, Я.Д. Ярош,** канд. техн.наук, **Н.М. Цивенкова,** канд. техн. наук, **С.М. Кухарец,** докт. техн. наук

Житомирский национальный агроэкологический университет 10008 Старый бульвар, 7 г. Житомир

Современной тенденцией развития энергетики является стремление к сбалансированности энергетического комплекса, повышению надежности электроснабжения потребителей. Важное место в стратегии развития электроэнергетики занимают автономные системы электроснабжения. Они используются на предприятиях, в аэро-, морских и речных портах, в энергоблоках больниц, в фермерских хозяйствах, в системах аварийного энергоснабжения, на объектах оборонного комплекса – везде, где требуется электроэнергия, а сеть или удаленная, или работает с перебоями.

Представлено автономную систему энергоснабжения с двигателями внутреннего сгорания. Основным преобразователем механической энергии приводных двигателей в электрическую является электромеханический преобразователь переменного тока с обмоткой возбуждения, расположенной на роторе.

Представлен алгоритм, согласно которому в начале цикла контроллер определяет суточную норму потребления электроэнергии и, соответственно типу дня и времени суток, выполняет действия по короткому или разветвленному алгоритму. При использовании суточной нормы электроэнергии может возникнуть ситуация, при которой включенными останутся только часть светильников, что вызовет дискомфорт для персонала и повлияет на производительность труда сотрудников. Предлагается внедрение второго независимого канала электроснабжения с использованием газогенераторных технологий. Произведенный газ обеспечивает работу двигателя внутреннего сгорания, который вращает вал генератора.

Представлено график прогнозируемой выработки энергии фотоэлектрической системой установленной мощностью 3,5 кВт на основе данных солнечной инсоляции на широте г. Житомира. Также представлено график производительности газогенераторной установки мощностью 5 кВт при односменной работе. Рассчитано прогнозируемое потребление электроэнергии осветительной установкой в течение первого месяца года для корпусов Житомирского национального агроэкологического университета.

Представлено график разницы между потребленной и выработанной энергией по дням недели. Величина потребляемого электричества за месяц составила 767,8 кВт·ч при установленной норме 251 кВт·ч. Фотоэлектрическими панелями и газогенераторной установкой произведено соответственно 184,8 кВт·ч и 493,2 кВт·ч. Второй резервный канал питания обеспечил более половины потребностей на освещение учебного корпуса.

Разработана структурная схема контроллера, которая реализует специализированный алгоритм. Представлен график регулируемых переменных во время работы контроллера.

Применение специализированного алгоритма позволяет уменьшить энергопотребление установки, обеспечивает возможность полноценного использования глубокого резервирования на базе фотоэлектрической системы и газогенераторной установки.

Дальнейшие исследования направлены на установление влияния производительности газогенераторной установки на устойчивость работы системы двигатель-генератор в условиях меняющегося спроса на электроэнергию и с учетом нестабильного значение коэффициента мощности. Библ. 10, рис. 9.

Ключевые слова: *газогенератор, система электроснабжения, фотоэлектрическая система.*

REFERENCES

1. *Perez N.P., Machin E.B., Pedroso D.T., Roberts J.J., Antunes J.S., Silveira J.L.* Biomass Gasification for Combined Heat and Power Generation in the Cuban Context. Energetic and Economic Analysis. Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 90. Pp. 1-12. Retrived from https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.095 [in English].

2. *Tsyvenkova N.M., Golubenko A.A., Kukharets S.M., Biletsky V.R.* The research of downdraft gas producer heat productivity on straw. Proceedings of International symposium, ISB-INMA TEH Agricultural and Mechanical Engineering, October 27–29. Bucharest. Romania. Pp. 83-91. [in English].

3. *Byelikova L.YA.* Elektrychni mashyny: navch. posib. dlya stud. vyshch. navch. Zakladiv. [Electric machines: a textbook for students at higher educational institutions]. Odesa. Nauka i tekhnika. 2012. 480 p. [in Ukrainian].

4. *Zachepa YU.V.* Avtonomnye systemy elektrosnabzhenyy a na baze asynkhronnykh heneratorov, osnovnye trebovanyya y struktura. [Independent power supply systems based on asynchronous generators, basic requirements and structure]. Electromechanical and energy saving systems quarterly scientific and production. 2010. No.2. Pp. 32-40. [in Ukrainian].

5. *Kozyrskyy V.V., Kaplun V.V., Voloshyn S.M.* Elektropostachannya ahropromyslovoho kompleksu. [Power supply for agro-industrial complex]. Kiev. Ahrarna osvita. 2011. [in Ukrainian].

6. *Kopylov I.P., Klokov B.K.* Spravochnik po elektricheskim mashinam. [Reference book on electrical machines]. Moscow. Energoatomizdat. 1989. [in Russian].

7. *Ostroverkhov M.YA., Pyzhov V.M.* Modelyuvannya elektromekhanichnykh system v Simulink: navch. posibnyk dlya stud. vyshch. navch. zakladiv [Modeling of electromechanical systems in Simulink: a textbook for students at higher educational institutions]. Kiev. Stylos. 2008. [in Ukrainian].

8. Weather for a month. Retrived from https://www.gismeteo.ua/ua/ (application date: 17/01/2018) [in Ukrainian].

9. *Sokolovskyy O.F., Sokolovska L.M.* Enerhozberihayuche keruvannya osvitlyuvalnoyu ustanovkoyu. [Energy saving management of lighting equipment]. Visnyk Zhytomyrskoho natsionalnoho ahroekolohichnoho universytetu. 2017). No. 1(58). vol.1. Pp. 243-302. [in Ukrainian].

10. Sonyachnyy kalendar u Zhytomyre na sichen′ 2018 roku. [Zhytomyr region solar calendar for January 2018.] Retrived from http://ua.365.wiki/world/ukraine/zhytomyr/sun/calendar/ january/ (Applying Date: May 21, 2018). [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 19.09.18
Остаточна версія 11.03.19



УДК 621.428

ОДНОКОНТУРНЫЕ И ДВУХКОНТУРНЫЕ ТЕПЛОНАСОСНЫЕ СИСТЕМЫ. ВЗАИМОСВЯЗЬ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЭФФЕКТИВНОСТИ

С.В. Гошовский, докт. техн. наук, проф., **А.В. Зурьян**, канд. техн. наук

Украинский государственный геологоразведочный институт
04114 ул. Автозаводская, 78А, Киев

Приведен теоретический анализ особенностей использования и технологий построения теплонасосных систем в одноконтурном и двухконтурном исполнении. Выполнен анализ основных недостатков одноконтурных теплонасосных систем. Аналитически обосновано, что процесс теплообмена происходит при переменных температурах со стороны источника и приемника теплоты, что ведет к дополнительным потерям в испарителе и конденсаторе и, соответственно, к снижению коэффициента трансформации теплонасосной системы. Экспериментально установлено, что уменьшение коэффициента трансформации происходит не прямо пропорционально увеличению температуры подающего теплоносителя, а имеет некоторое ускорение, обусловленное повышением тепловых потерь в системе, связанных с увеличением давления и температуры. Представлен действующий макет разработанной и сконструированной в УкрГГРИ двухконтурной экспериментальной теплонасосной установки. Описана методика проведения исследований. Приведены характеристики измерительного оборудования, установленного на макете экспериментальной установки и программного обеспечения, которое использовалось для архивирования и визуализации данных, полученных в процессе проведения исследований. Изложены результаты научной работы, полученные в ходе теоретических расчетов и экспериментальных исследований эффективности теплонасосных систем, в зависимости от одноконтурного или двухконтурного исполнения. Даются зависимости коэффициента трансформации теплового насоса от количества контуров. Обоснованы зависимости эффективности теплонасосной системы от параметров первичного источника низкопотенциального тепла и конструктивных особенностей системы теплоснабжения. Сделан вывод, что двухконтурная система с последовательно соединенными контурами работает эффективнее, чем одноконтурная. Библ. 38, табл.1, рис. 6.

Ключевые слова: *тепловой насос, двухконтурный тепловой насос, энергия окружающей среды, возобновляемые источники энергии.*

SINGLE-CIRCUIT AND DUAL-CIRCUIT HEAT PUMP SYSTEMS. INTERRELATION OF PHYSICAL PROCESSES AND EFFICIENCY

S. Goshovskyi, doctor of technical science, professor, **O. Zurian,** candidate of technical science
Ukrainian State Geological Research Institute
04114, 78A Avtozavodska St., Kyiv, Ukraine

It contains the theoretical analysis of special aspects of the use and technologies used for single and dual circuit heat pump systems. The analysis of major disadvantages of single circuit heat pump systems is conducted. It is analytically proved that heat exchange process occurs at variable temperatures of the heat source and heat sink and it causes stray load loss in an evaporator and condenser and, correspondently, it decreases the coefficient of performance of the heat pump system. Experiments proved that decrease of the coefficient of performance is not positively associated with increase of the temperature of supply heat transfer medium, but it has some acceleration caused by increase of the system heat loss related to increase of pressure and temperature. It demonstrates functioning model of the experimental dual circuit heat pump system developed and designed by UKRSGRI. It describes the research procedure. It contains specifications of measuring equipment used for the experimental system model and of software used for archiving and visualization of data obtained during research conduction. It states the results of scientific work received by theoretical calculations and experimental testing of the heat pump system efficiency depending on one or dual circuit version. The dependence of heat pump coefficient of performance on the number of circuits is shown. It explains the dependence of the heat pump system efficiency on characteristics of the primary source of low-grade heat and design features of the heat supply system. The conclusion is drawn that the dual circuit system with circuits connected in series is more efficient than the single circuit one. Ref. 8, tab. 8, fig. 4.

Keywords*: heat pump, dual-circuit heat pump, energy of environment, renewable energy sources.*

© С.В.Гошовський, А.В.Зур'ян, 2019



С.В. Гошовский
S. Goshovskyi

Сведения об авторе: директор Украинского государственного геологоразведочного института, профессор, доктор технических наук. Произведенные автором фундаментальные исследования по применению геофизических методов изучения горных пород и использование энергии взрыва в технологиях бурения скважин при поисках и разведке нефти и газа, заложили научную базу принципиально нового для украинской науки направления изучения геологической среды и конструирования прострелочно-взрывных приборов, которые используются в глубоких скважинах. При его участии разведано ряд нефтегазовых месторождений, которые имеют народнохозяйственное значение для Украины.
Образование: Киевский национальный университет им. Т. Шевченко. Специальность: геолог-геофизик.
Научная сфера: исследования минерально-сырьевой базы Украины, методика геологических и геофизических исследований, технология интенсификации добычи нефти и газа, бурение скважин, технология с использованием энергии взрыва, приборостроение.
Публикации: более 350, в т.ч. 19 монографий, 154 авторских изобретений и патентов.
ORCID: 0000-0002-8312-6244
Контакты: +38 (044) 430-70-24
e-mail: ukrdgri@ukrdgri.gov.ua

Information about the author: director of the Ukrainian State Geological Research Institute, professor, doctor of technical sciences. Sergii Goshovskyi's fundamental research on the application of geophysical methods on application of geophysical methods to study rocks and explosion energy in wells construction technology for search and exploration of oil and gas, has laid the fundamentally new scientific basis for Ukrainian science to study of the geological environment and explosive device design used in the deep wells.
With his participation explored several oil and gas deposits, which have economic importance for Ukraine.
Education: Taras Shevchenko National University of Kyiv. Specialty: geologist – geophysicist
Research area: mineral resource base of Ukraine research, methods of geological and geophysical research, a technology of oil and gas production intensification, drilling technology, technology of the explosion energy using, engineering.
Publications: over 350 scientific publications, including 19 monographs, and 154 inventions and patents.
ORCID: 0000-0002-8312-6244
Contacts: +38 (044) 430-70-24
e-mail: ukrdgri@ukrdgri.gov.ua



А.В. Зурьян
O. Zurian

Сведения об авторе: заведующий отделом инновационных технологий Украинского государственного геологоразведочного института, кандидат технических наук.
Образование: Ставропольское высшее военное инженерное училище связи (1987). Специальность: инженер радиосвязи. Киевский национальный университет им. Т. Шевченко (2012). Харьковский национальный университет
им. В. Каразина (2016) – защита диссертации по теме «Экологически безопасные возобновляемые источники получения тепловой энергии».
Научная сфера: возобновляемая энергетика, проэктирование энергоэфективных зданий, проектирование систем, которые работают за счет возобновляемых источников энергии; добыча (разработка) нетрадиционных источников углеводородов, устойчивое развитие и экологическая безопасность; технологии получения тепловой энергии для систем отопления с использованием теплонасосных систем и тепла атмосферного воздуха, солнечная энергия и низкотемпературная энергия приповерхностных слоев Земли.
Публикации: более 50, 16 авторских патентов на изобретение и полезную модель.
ORCID: 0000-0002-2391-1611
Контакты: +38 (050) 778-30-29
e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

Information about the author: head of the Department of Innovative Technologies of the Ukrainian State Geological Research Institute, candidate of technical sciences.
Education: Stavropol higher military engineering academy of communication. Specialty: engineer of radiocommunication. Oleksii Zurian has a higher engineering and humanitarian education. In 1987, graduated from the Stavropol higher military engineering academy of communication, and in 2012, Taras Shevchenko National University of Kyiv. In 2016 at the V.N. Karazin Kharkiv National University defended his dissertation on the theme «Environmentally safe renewable sources of thermal energy».
Research area: renewable energy, designing energy efficient buildings, designing systems that operate at the expense of renewable energy sources; extraction (development) of non-traditional sources of hydrocarbons, renewable energy sources, sustainable development and ecological safety; technologies for obtaining thermal energy for heating systems using heat pump systems and heat of atmospheric air, solar energy and low-temperature energy of near-surface layers of the Earth.
Publications: over 50 scientific publications, and 16 patents for invention and utility model.
ORCID: 0000-0002-2391-1611
Contacts: +38 (050) 778-30-29
e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

Список использованных обозначений и сокращений:
НПИТ - низкопотенциальный источник тепла;
УкрГГРИ - Украинский государственный геологоразведочный институт;
РА - рабочий агент;
РТ - рабочее тело;
СОР - коэффициент трансформации;
ТН – тепловой насос;
ТНУ - теплонасосная установка;
ТСП - термопреобразователь сопротивления.

Постановка проблемы. Мировая экономика в начале третьего тысячелетия характеризуется существенным противоречием между постоянным увеличением потребления энергоресурсов в процессе производства и обострением экономических проблем, связанных с ростом расходов на ее потребление. Это приводит к необходимости как поиска новых экономически выгодных и экологически безопасных источников энергии, так и к разработке и производству эффективных устройств ее преобразования в энергию, удобную для потребления.

Использование альтернативных экологически чистых источников энергии может, если не предотвратить энергетический кризис в Украине, то значительно его смягчить. Вследствие этого, наряду с поисками и освоением традиционных источников (газ, нефть), перспективным направлением является использование возобновляемой энергии, накапливаемой в водоемах, грунте, геотермальных источниках, технологических выбросах (воздух, вода, стоки и др.). Однако температура этих источников довольно низкая (0–25°С) и для эффективного их использования необходимо осуществить перенос этой энергии на более высокий температурный уровень (50–100°С). Реализовать такое преобразование возможно с помощью тепловых насосов [23].

Анализ последних исследований и публикаций. В условиях растущего энергетического кризиса ведутся значительные научные исследования, направленные на поиск вариантов замещения в системах энергоснабжения доли энергии из возобновляемых источников [14, 15, 17, 29]. Одним из направлений обеспечения энергетического баланса энергоснабжения является использование низкопотенциальной энергии Земли, воды, воздуха и др. с помощью теплонасосных систем [2, 3, 6, 7]. Преобразование низкопотенциальной энергии в тепловую обеспечивает существенную экономию традиционных энергоресурсов, минимизирует сжигания углеводородов и уменьшает выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду [1, 10, 13, 16, 18, 19]. Причем тепловая энергия, полученная с помощью тепловых насосов и может быть использована непосредственно в системах отопления, горячего водоснабжения и для технологических нужд [21, 20, 24, 38]. В летний период теплонасосные системы могут обеспечить потребности в технологическом холоде [22, 28].

Базовые типы тепловых насосов методом парных сравнений согласно методике [32] исследованы в работах [12, 34]. Анализ эффективности различных типов тепловых насосов приведено в работе [27]. В исследовании [25] предложен новый подход к оценке эффективности тепловых насосов. Авторами [26] выполнен анализ ТН как с электрическим, так и когенерационным приводом. В работе [8] проведена оценка эффективности разных вариантов тепловых насосов по коэффициенту использования первичной энергии. Авторами [5, 11] выполнен термодинамический анализ разных типов ТН.

Постановка задачи. Цель нашего исследования – обоснование эффективности использования в системах теплоснабжения, кондиционирования и холодоснабжения производственных, административных, складских помещений двухконтурных тепловых насосов.

Сегодня с уверенностью можно сказать, что первые шаги на этом пути уже сделаны. Но они еще достаточно медленные. Вопрос, какие же тепловые насосы наиболее целесообразны для дальнейшей разработки и внедрения, до сих пор недостаточно обоснованы. Отсутствует научная техническая база для изготовления двухконтурных теплонасосных систем. Актуальными остаются вопросы разработки методик проектирования кластерных ТН. Нет сравнительного анализа эффективности работы одноконтурных, многоконтурных и кластерных теплонасосных систем. Вместе с тем надо отметить, что соединение однотипных устройств в различных сферах техники с целью повышения эффекта от их сложения известно давно и широко применяется.

Изложение основного материала. Теплонасосная установка (ТНУ) состоит из теплообменника-испарителя, компрессора, теплообменника-конденсатора и дросселя. В качестве рабочего тела (РТ) установки применяются рабочие агенты (РА): фреоны, аммиак, пропан и др. [34].

Основным показателем эффективности теплового насоса является коэффициент трансформации (тепловой коэффициент) φ:

$$\varphi = Q_1 / N = (Q_2 + N) / N = T_2 / (T_2 - T_{11}), \quad (1)$$

где Q_1 – теплопроизводительность ТНУ, Вт; N – мощность компрессора, Вт; T_2 – температура теплоносителя на выходе из конденсатора, К; T_{11} – температура теплоносителя на входе в испаритель, К.

Теоретические значения коэффициента трансформации могут достигать величин 7–8. Реальные значения при работе в оптимальном режиме, что экспериментально установлено авторами составляют, величины 3–4. Это означает, что на 1 кВт мощности электрической энергии можно получить 3–4 кВт мощности тепловой энергии.

Существенным недостатком теплового насоса является необходимость подвода и отвода теплоты при постоянной температуре, что практически невозможно [37]. В действительности процесс теплообмена происходит при переменных температурах со стороны источника и приемника теплоты, что ведет к дополнительным потерям в испарителе и конденсаторе и, соответственно, к снижению коэффициента трансформации.

Действительный коэффициент трансформации теплового насоса φ должен иметь вид:

$$\varphi = \varphi_T \eta_{TH}, \quad (2)$$

где – η_{TH} коэффициент потерь, учитывающий реальные процессы, которые осуществляются рабочим телом в ТН, который можно принять 0,5 [8].

Из соотношения (1) и (2) можем определить действительный коэффициент трансформации теплового насоса φ в системе с контуром теплых полов с температурой подающей линии 45 °С и контуром отопления с радиаторами и температурой 60 °С при условии, что температура первичного источника тепла равна 5 °С.

Результаты расчета коэффициента трансформации теплового насоса φ *в* зависимости от температуры подающей линии T_2 сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Зависимость коэффициента трансформации теплового насоса φ от температуры подающей линии T_2
Table 1. Dependence of the transformation coefficient of the heat pump φ on the temperature at the heat supply line T_2

T_2, °C	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	60,00	65,00	70,00	75,00	80,00	85,00
φ	6,06	5,13	4,47	3,98	3,59	3,28	3,03	2,82	2,64	2,49	2,35	2,24

Анализ полученных данных свидетельствует, что коэффициент трансформации существенно зависит от температуры подающей линии.

В ходе проводимых в Украинском Государственном геологоразведочном институте исследований на экспериментальной геотермальной установке было установлено, что уменьшение коэффициента трансформации φ происходит не прямо пропорционально увеличению температуры подающего теплоносителя, а имеет некоторое ускорение, обусловленное повышением тепловых потерь в системе связанное с увеличением давления и температуры (рис. 1). При этом коэффициент ускорения – η_y увеличивается пропорционально увеличению температуры подающего теплоносителя. Вследствие предложенной гипотезы действительный коэффициент трансформации теплового насоса φ принимает вид:

$$\varphi = \varphi_T \cdot \frac{\eta_{TH}}{\eta_y} = \frac{T_2}{T_2 - T_{11}} \cdot \frac{\eta_{TH}}{\eta_y}. \quad (3)$$

При этом надо отметить, что наибольшая эффективность насоса достигается при температуре подающего теплоносителя 35−45 °С, что обуславливает определенные технические требования к системе теплообеспечения и утепления здания.

Основным недостатком теплового насоса является обратная зависимость его эффективности от разницы температур между источником теплоты и потребителем. Это накладывает определённые ограничения на использование систем типа «воздух – вода» или «воздух – воздух». При минусовой температуре первичного источника теплоты тепловой насос не только резко снижает температуру подающей линии, но у него также падает мощность.

На графике (рис. 2) приведена зависимость коэффициента трансформации φ от температуры конденсации t_{cd} для воздушного теплового насоса, в котором в качестве холодильного агента был применен фреон R 134a. Расчет выполнен с применением математического аппарата [30] для температуры конденсации t_{ev} -5 и -20°С соответственно.

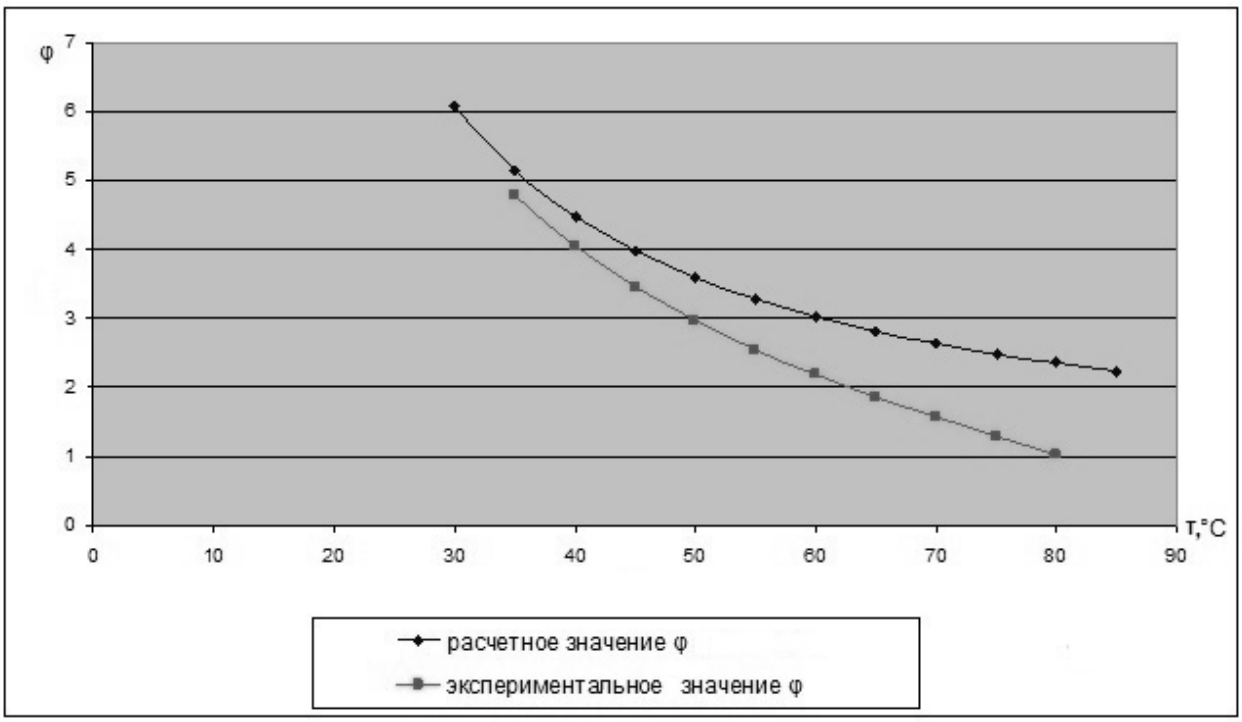


Рис. 1. Зависимости коэффициента трансформации теплового насоса φ от температуры подающей линии.

Fig. 1. Dependence of the transformation coefficient of the heat pump φ on the temperature at the heat supply line.

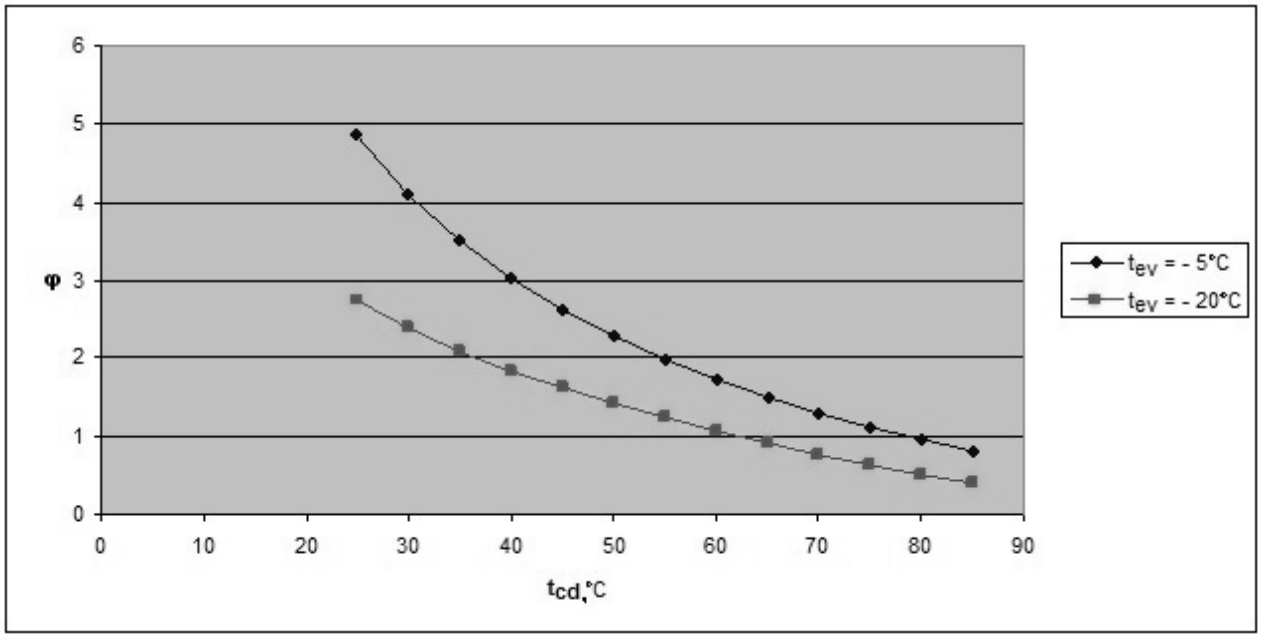


Рис. 2. Зависимость коэффициента трансформации φ от температуры конденсации t_{cd} для теплового насоса (температура кипения - t_{ev}=5 °С и – 20 °С, фреон R 134a).

Fig. 2. Dependence of the transformation coefficient φ on the condensation temperature tcd for the heat pump (boiling point - t_{ev}=5 °C and -20 °C, Freon R 134a).

Из проведенных аналитических исследований можно сделать вывод, что реальные значения эффективности современных тепловых насосов - COP (Coefficient of Perfomance) составляют порядка COP=2.0 при температуре источника -20 °С, и порядка COP=4.0 при температуре источника +5 °С. Это приводит к тому, что для обеспечения заданного температурного режима потребителя при низких температурах воздуха необходимо использовать оборудование со значительной избыточной мощностью, что сопряжено с нерациональным использованием капиталовложений.

Одним из путей повышения эффективности теплонасосной системы является уменьшение

корреляции зависимости температуры рабочего агента в испарителе и конденсаторе от выходной температуры НПИТ потребителя может быть использование – цикла Лоренса.

Применение идеального цикла Лоренса на практике невозможно. Приближение к нему возможно в частности путем соединения нескольких компрессионных ТНУ в одну систему.

С целью исследований эффективности работы двухконтурного теплового насоса в Украинском государственном геологоразведочном институте (УкрГГРИ) была сконструирована двухконтурная экспериментальная теплонасосная система (рис. 3).

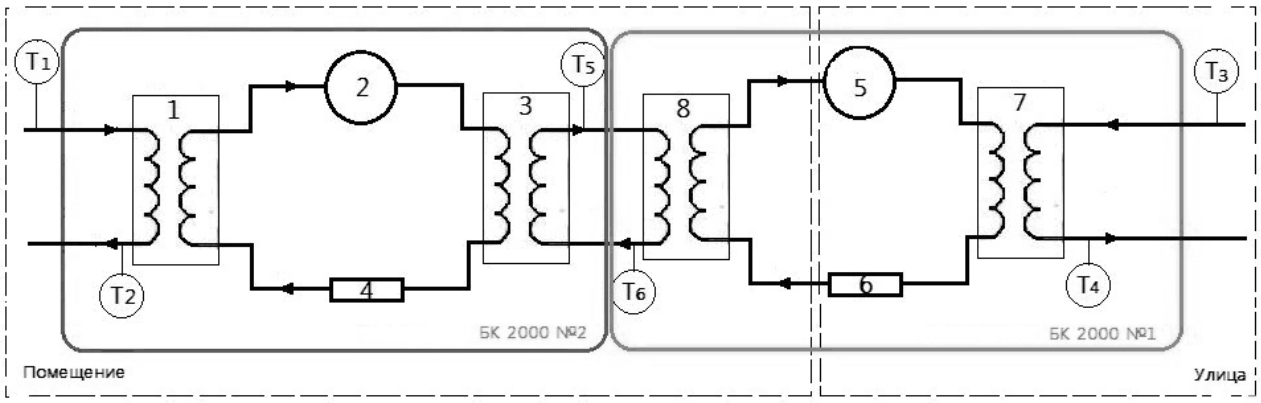


Рис. 3. Схема экспериментальной установки с местами установки датчиков температуры: *T_1 – датчик температуры в помещении; T_2 – датчик температуры воздуха на выходе из испарителя второго кондиционера; T_3 – датчик температуры воздуха на улице; T_4 – датчик температуры воздуха на выходе из конденсатора первого кондиционера; T_5 – датчик температуры воздуха на выходе из конденсатора второго кондиционера; T_6 – датчик температуры воздуха на выходе из испарителя первого кондиционера; 1– испаритель второго кондиционера; 2 – компрессор второго кондиционера; 3 – конденсатор второго кондиционера; 4 – терморегулирующий вентиль второго кондиционера; 5 – компрессор первого кондиционера; 6 – терморегулирующий вентиль первого кондиционера; 7 – конденсатор первого кондиционера; 8 – испаритель первого кондиционера.*

Fig. 3. Diagram of the experimental installation with the locations of the temperature sensors: *T1 – the temperature sensor in the room; T2 – air temperature sensor at the outlet of the evaporator of the second air conditioner; T3 – outdoor temperature sensor; T4 – air temperature sensor at the output of the condenser of the first air conditioner; T5 – air temperature sensor at the outlet of the condenser of the second air conditioner; T6 – air temperature sensor at the output of the evaporator of the first air conditioner; 1 – evaporator of the second air conditioner; 2 – compressor of the second air conditioner; 3 – the condenser of the second conditioner; 4 – thermostatic valve of the second air conditioner; 5 – compressor of the first air conditioner; 6 – thermostatic valve of the first air conditioner; 7 – condenser of the first air conditioner; 8 – evaporator of the first air conditioner.*

Двухконтурная экспериментальная теплонасосная система УкрГГРИ состоит из испарителя первого контура 8, компрессора первого контура 5, компрессора второго контура 2, конденсатора второго контура 3 и испарителя второго контура 1, конденсатора первого контура 7, дросселя первого контура 6 и дросселя второго контура 4. К испарителю 1 подводится теплоноситель с низкой температурой. В испарителе он отдает тепловую энергию жидкому хладагенту для его испарения и повышения энтальпии. В компрессоре 2 пары хладагента сжимаются, что сопровождается повышением температуры, и нагнетаются в конденсатор второго контура 3, совмещенного с испарителем первого контура теплового насоса 8.

Предполагается, что данная схема подключения тепловых насосов позволяет получить увеличение температуры подачи теплоносителя в систему кондиционирования здания при минимизации затрат внешней энергии.

Для измерений температуры использовались температурные датчики (термопреобразователи сопротивления) ТСП-204 (рис. 4.1). Рабочий диапазон измеряемых температур от -40 до +270 °С. Показатель тепловой инерции не более 6–8 сек. Для приема и преобразования сигналов, поступающих от термопреобразователей сопротивления, в значения температуры, и отображения их на встроенном цифровом индикаторе применялся измеритель восьмиканальный с блоком расширения аналоговых входов И8 8ТС/10-RS485-БП-12-ИПК-Щ (рис. 4.2). С целью визуализации в режиме реального времени данных, полученных с датчиков, записи их в архив, отображение полученных данных в виде таблиц или графиков, использовался индикатор логгер И16П RS 485/43-USB-GSM-ИПR-Д (рис. 4.2) и программное обеспечение (система сбора данных) РегМик (рис. 4.4).

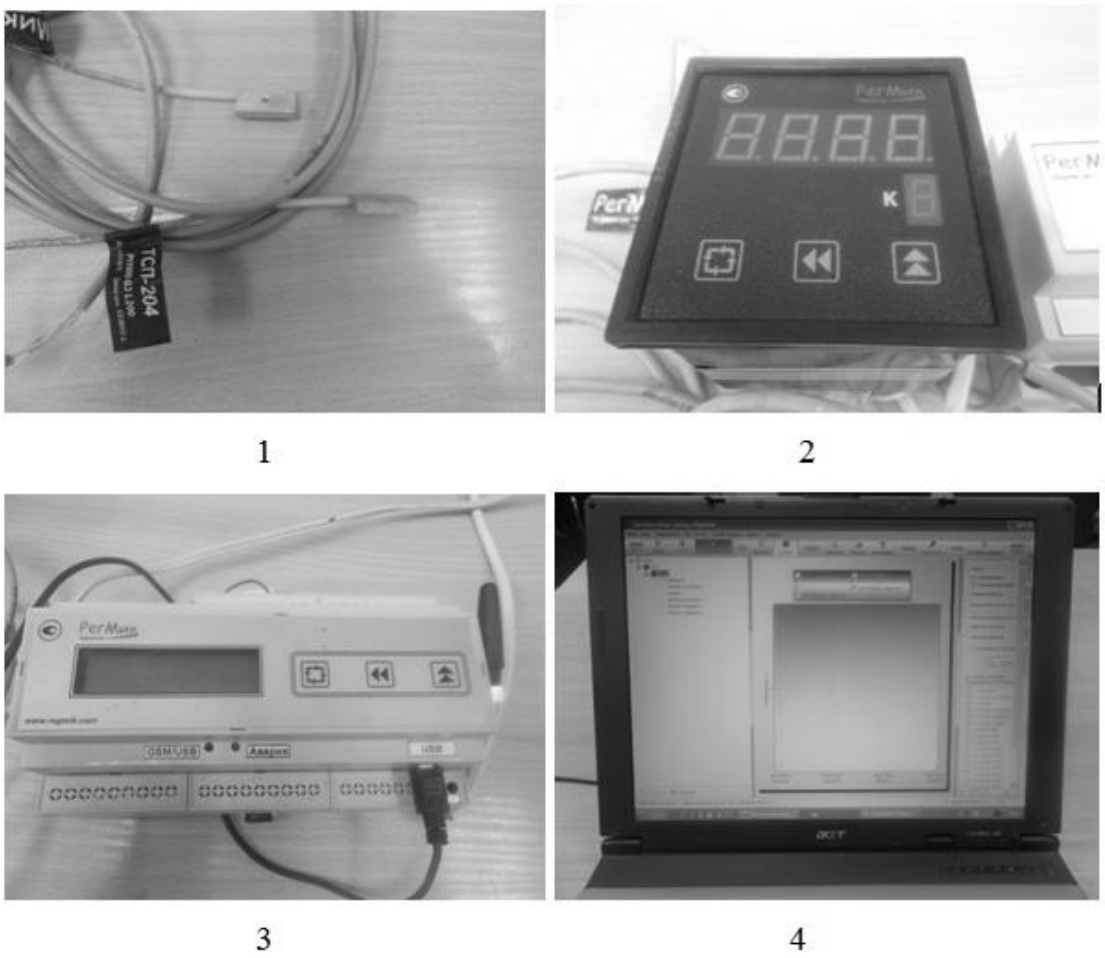


Рис. 4. Основное измерительное оборудование, которое использовалось для проведения эксперимента: *1 – температурные датчики (термопреобразователи сопротивления) ТСП-204; 2 – измеритель восьмиканальный с блоком расширения аналоговых входов И8 8ТС/10-RS485-БП-12-ИПК-Щ; 3 – индикатор логгер И16П RS 485/43-USB-GSM-ИПР-Д; 4 – программное обеспечение (система сбора данных) РегМик.*

Fig. 4. The main measuring equipment used for the experiment: *1 – temperature sensors (thermal resistance transducers) ТСП-204; 2 – an eight-channel meter with an extension block of analog inputs И8 8TS/10-RS485-БП-12-ИПК-Щ; 3 – the indicator logger И16П RS 485/43-USB-GSM-IPR-D; 4 – software (data collection system) RegMik.*

Измерения проводились в трех режимах работы модуля с последовательно соединенными кондиционерами. В первом режиме оба кондиционера работали с одинаковыми режимами производительности (режим 11), а в двух последующих режимах уменьшалась производительность одного модуля (кондиционера) по отношению к другому (режим 10 и 01). Переключение режимов производилось тумблером «Макс/Мин» на панели управления кондиционеров.

В процессе исследования были произведены измерения температур и рассчитаны такие параметры холодильных машин как коэффициент трансформации, полезная мощность и затраты внешней энергии для работы системы. Выполнен сравнительный анализ эффективности кондиционеров работающих в паре (последовательном соединении) и одиночного кондиционера.

Экспериментально было установлено, что температуры T_2, T_4, T_5, T_6 коррелируются с температурой T_3 (температура на улице), а температура T_1 (температура в помещении) фактически поддерживается неизменной. Кондиционер, подключенный вторым, работает стабильно. Девиация температур T_2 и T_5 незначительная. В то же время кондиционер, подключенный первым, работает прерывисто. Девиация температур T_4 и T_6 значительная.

Выполнен анализ производительности системы в зависимости изменения производительности каждого из подключенных к системе моноблочных кондиционеров. Также выполнен сравнительный анализ эффективности роботы системы, состоящей из двух последовательно подключенных моноблочных кондиционеров и системы, состоящей из одного моноблочного кондиционера.

Графики изменения температур в контрольных точках двухконтурной и одноконтурной холодильной систем изображены на рис. 5 и рис. 6 соответственно.

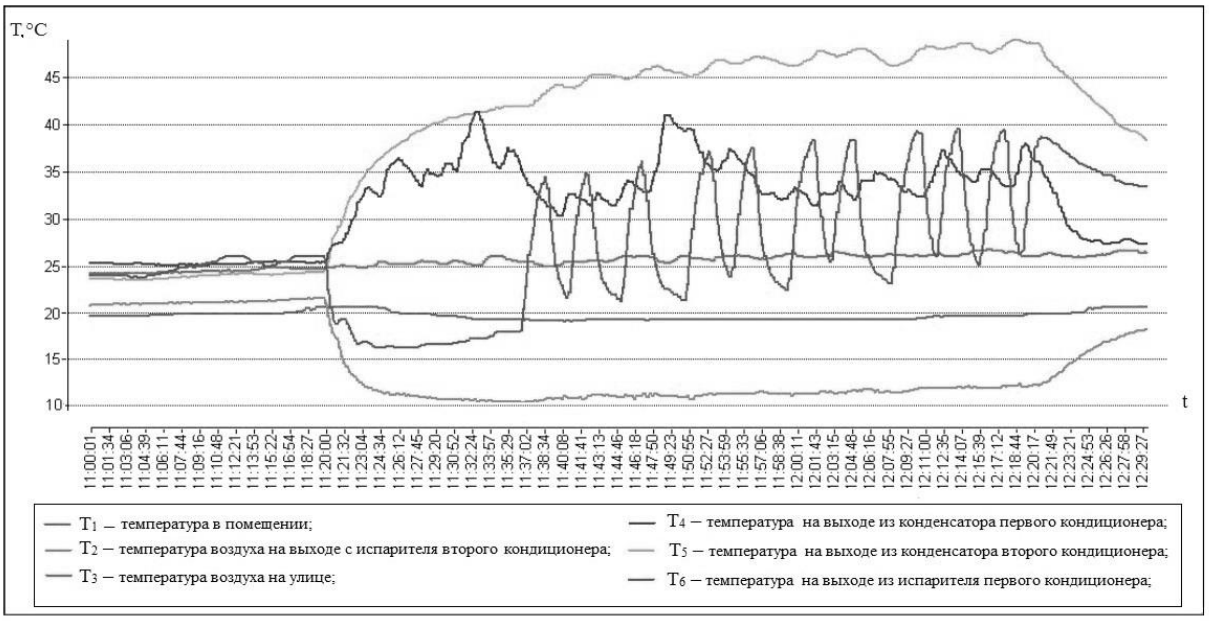


Рис. 5. График изменения температур в контрольных точках двухконтурной холодильной системы (последовательно соединенных двух моноблочных кондиционеров).

Fig. 5. Graph of temperature changes in the control points of a two-circuit refrigeration system (in series connected two monoblock conditioners).

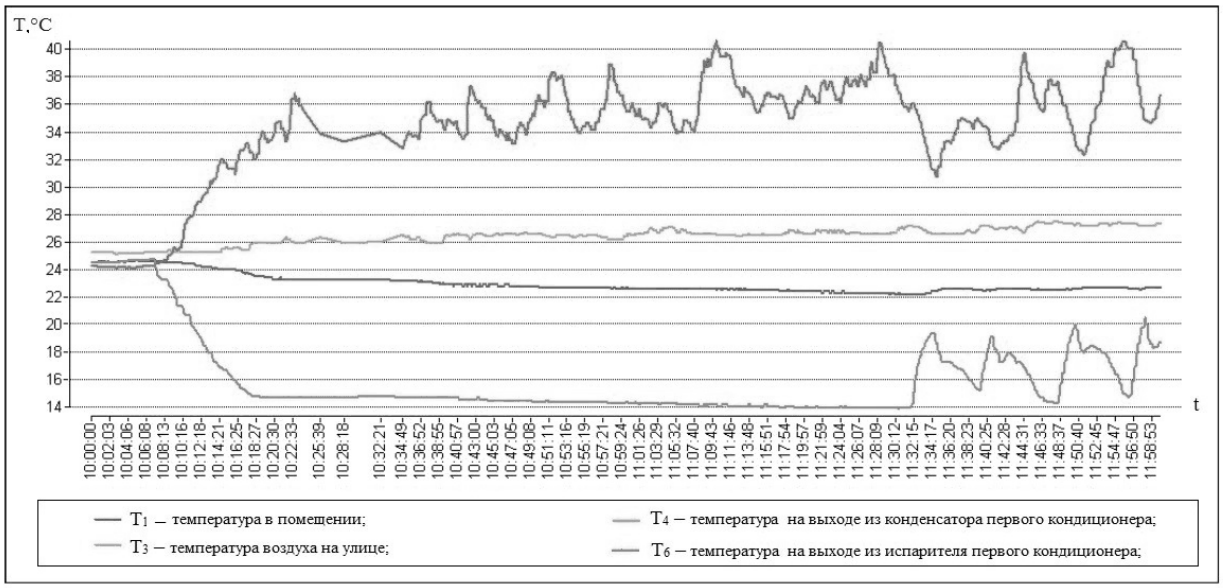


Рис. 6. График изменения температур в контрольных точках одноконтурной холодильной системы (после демонтажа второго кондиционера).

Fig. 6. Graph of temperature changes in the control points of a single-circuit refrigeration system (after dismantling the second air conditioner).

Экспериментально установлено, что уменьшение производительности одного из моноблоков влечет к уменьшению производительности системы в целом.

Известно, что основными параметрами холодильных машин являются:

1. Коэффициент полезного действия или коэффициент термической (термодинамической) эффективности. Этот коэффициент представляет собой отношение холодильной мощности и электрической мощности, потребляемой компрессором.

2. Коэффициент трансформации (холодильный коэффициент) – величина, характеризующая энергетическую эффективность работы холодильной машины (равна отношению холодопроизводительности к количеству энергии (работе)), затраченной за единицу времени на осуществление холодильного цикла. Он зависит от темпера-

турных условий её работы, и определяется выражением $\varepsilon_к=T_0/(T-T_0)$, где T_0 и T — абсолютные температуры охлаждаемого объекта и окружающей среды (кипения и конденсации хладагента).

Соотношение коэффициента полезного действия двухконтурной системы к одноконтурной будет иметь вид:

$$K_{21}=\frac{\eta_2}{\eta_1}, \qquad (4)$$

где η_2 – коэффициент полезного действия двухконтурной системы, η_1 – коэффициент полезного действия одноконтурной системы.

Учитывая, что

$$\eta_2=\frac{P_{x2}}{P_{э2}}\text{ , а }\eta_1=\frac{P_{x1}}{P_{э1}}, \qquad (5)$$

где P_{x1} и P_{x2} – холодильная мощность одноконтурной и двухконтурной системы соответственно, $P_{э1}$ $P_{э2}$ – электрическая мощность, потребляемая компрессором одноконтурной и двухконтурной системы соответственно.

С учетом (5) выражение (4) примет вид:

$$K_{21}=\frac{P_{x2}}{P_{э2}}\cdot\frac{P_{э1}}{P_{x1}}=\frac{P_{x2}}{P_{x1}}\cdot\frac{P_{э1}}{P_{э2}}, \qquad (6)$$

Для определения номинального значения K_{21} найдем номинальные значения соотношения холодильных мощностей двухконтурной и одноконтурной системы – K_{px21} и номинальные значения отношения электрических мощностей потребляемых компрессором одноконтурной и двухконтурной систем – $K_{\epsilon 12}$

$$K_{px21}=\frac{P_{x2}}{P_{x1}}=\frac{V\cdot c\cdot\left(T_{\max px2}-T_{\min px2}\right)}{V\cdot c\cdot\left(T_{\max px1}-T_{\min px1}\right)}=\frac{\Delta T_{\max px2}}{\Delta T_{\max px1}}, \qquad (7)$$

где V – объем охлаждаемого помещения; c – удельная теплоемкость воздуха, $T_{\max px2}$ и $T_{\min px2}$ – максимальная и минимальная температура воздуха в помещении за единицу времени работы двухконтурной системы, $T_{\max px1}$ и $T_{\min px1}$ – максимальная и минимальная температура воздуха в помещении за единицу времени работы одноконтурной системы, $\Delta T_{\max px2}$ и $\Delta T_{\max px1}$ – разница между максимальной и минимальной температурой воздуха в помещении за единицу времени работы двухконтурной и одноконтурной систем соответственно.

Подставив в формулу (5) значения температур, полученных в ходе исследования, получаем значение K_{px21}=2,17.

Принимая во внимание, что во время проведения эксперимента компрессоры обоих кондиционеров работали совместно в двухконтурной системе, в то время когда в одноконтурной системе работал только один компрессор, параметр $K_{\epsilon 12}$ будет иметь следующее значение:

$$K_{\epsilon 12}=\frac{P_{э1}}{P_{э2}}=\frac{1}{2}=0,5. \qquad (8)$$

Исходя из этого, можно рассчитать значение K_{21}

$$K_{21}=\frac{P_{x2}}{P_{э2}}\cdot\frac{P_{э1}}{P_{x1}}=\frac{P_{x2}}{P_{x1}}\cdot\frac{P_{э1}}{P_{э2}}=K_{px21}K_{\epsilon 12}=2.17\cdot 0.5=1.085, \qquad (9)$$

Таким образом, расчеты показывают, что двухконтурная система с последовательно соединенными кондиционерами работает на 8,5% эффективнее, чем одноконтурная.

Был выполнен расчет ε_K – коэффициента трансформации (холодильного коэффициента) как еще одного параметра, характеризующего эффективность холодильных машин с целью проверки полученных результатов:

$$\varepsilon_K=\frac{T_X}{T_Г-T_X}, \qquad (10)$$

где T_X – абсолютная температура охлаждаемого объекта (кипения хладагента), $T_Г$ – абсолютная температура окружающей среды (конденсации хладагента).

Нас, как и в предыдущем случае, интересует не абсолютное значение этих величин для одноконтурной и двухконтурной систем, а соотношение данных величин для этих систем. Соотношение коэффициента трансформации двухконтурной системы к одноконтурной – K_ε будет иметь вид:

$$K_\varepsilon=\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}=\frac{\frac{T_{X2}}{T_{Г2}-T_{X2}}}{\frac{T_{X1}}{T_{Г1}-T_{X1}}}=\frac{T_{X2}\cdot(T_{Г1}-T_{X1})}{(T_{Г2}-T_{X2})\cdot T_{X1}}, \qquad (11)$$

где T_{X1} и T_{X2} – абсолютная температура охлаждаемого объекта (кипения хладагента) одноконтурной и двухконтурной систем соответственно, $T_{Г1}$ и $T_{Г2}$ – абсолютная температура окружающей среды (конденсации хладагента) одноконтурной и двухконтурной систем соответственно.

Подставив в (11) значения температур, полученные экспериментально: T_{X1}=14°С; T_{X2}=15°С; $T_{Г1}=T_{Г2}$=35°С, получим значение K_{ε}=1,05.

Полученные расчеты показывают, что коэффициент трансформации у двухконтурной системы с последовательно соединенными кондиционерами на 5% выше, чем у одноконтурной, что соотносится с результатами эффективности данной системы.

Таким образом, можно сделать вывод, что система с последовательным соединением двух парокомпрессионных установок работает эффективнее, чем одноконтурная, но при этом следует отметить, что на эффективность данной системы значительное влияние имеют параметры рабочего тела.

Выводы. 1. Установлено, что основным недостатком теплового насоса является обратная зависимость его эффективности от разницы температур между источником теплоты и потребителем, а также, то что существенным недостатком парокомпрессионных ТНУ является необходимость подвода и отвода теплоты при постоянной температуре.

2. Экспериментально подтверждено, что двухконтурная система с последовательно соединенными кондиционерами работает эффективнее, чем одноконтурная.

3. Обосновано, что коэффициент трансформации двухконтурной системы с последовательным соединением парокомпрессионных установок выше, чем у одноконтурной. А значение этого параметра в существенной степени зависит от параметров рабочего тела.

4. Доказано, что уменьшение коэффициента трансформации φ происходит не прямо пропорционально увеличению температуры подающего теплоносителя, а имеет некоторое ускорение, обусловленное повышением тепловых потерь в системе связанных с увеличением давления и температуры. При этом коэффициент ускорения увеличивается пропорционально увеличению температуры подающего теплоносителя.

1. *Алимгазин А.Ш., Бахтиярова С.Г., Бергузинов А.Н.* Экологические аспекты применения теплонасосных технологий для теплоснабжения различных объектов в республике Казахстан. Вестник ПГУ №1. 2010. С. 42-52.

2. *Безродний М.К., Галан М.А.* Енергетична ефективність теплонасосоної системи вентиляції з рекуператором теплоти і рециркуляцією відпрацьованого повітря. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2011. №2. С. 16-19.

3. *Басок Б.И., Беляева Т.Г., Рутенко А.А., Лунина А.А.* Анализ экономической эффективности при реализации теплонасосных систем для теплоснабжения. Пром. теплотехника. 2008. №4. С. 56-63.

4. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизически свойствам вещества. М. Наука. 1972 г.

5. *Гошовський С.В., Зурьян А.В.* Извлечение энергии тепла Земли. LAMBERT Academic Publishing. 2018. 296 с.

6. *Гошовський С.В., Зурьян А.В.* Анализ применения различных источников возобновляемой энергии для оптимальной работы теплонасосных систем. Сборник научных трудов Украинского государственного геологоразведочного института. 2015. №2. С. 9-20.

7. *Гошовський С.В., Зурьян А.В.* Грунтовые теплообменники (ГТ) для геотермальних систем теплоснабжения оптимальне конструкции и характеристики. Сборник научных трудов Украинского государственного геологоразведочного института. 2013. №4. С. 168-184.

8. Документация для проектирования Bosch Thermotechnik 6 720 642 483 (2009/12). URL: https://www.bosch-climate.ru/files/201212111351220.Condens%207000%20W.pdf

9. *Елистратов С.Л.* Комплексное исследование эффективности тепловых насосов: дисс. доктора техн. наук: 01.04.14. Новосибирск. 2010. 383 с.

10. *Забулонов Ю.Л.* Оцінка впливу об'єктів електроенергетики на природне середовище та стан здоров'я населення. Захист довкілля від антропоген. навантаж. Зб. наук. пр. 2005. Вип. 11(13).

11. *Ильин Р.А., Ильин А.К.* Новый подход к оценке эффективности тепловых насосов. Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2010. №2. С. 83-87.

12. *Калнинь И.М.* Техника низких температур на службе энергетики. Холодильное дело. 1996. №1. С. 26-29.

13. *Каплун В.В.* Засади сталого розвитку паливно-енергетичного комплексу україни у світлі виконання вимог конвенцій РІО. Вісник КНУТД. 2014. №5 (79). С. 64-69.

14. *Качинський А.Б., Хміль Т.А.* Екологічна безпека України: аналіз, оцінка та державна політика. К. НІСД. 1997. 127 с.

15. *Кидрук М.И.* Моделирование и оптимизация систем теплоснабжения зданий с использованием возобновляемых источников энергии. Нова тема. 2007. №4. С. 13-16.

16. *Корчевой Ю.П., Вольчин И.А., Горбунов В.С.* та ін. Экологические аспекты развития теплоэнергетики Украины. Энергетика и электрификация. 2002. №2. С. 45-50.

17. *Кудря С.О.* Стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні. Вісник НАН України. 2015. №12. С. 19-26.

18. *Лимаренко А.Н., Тараненко О.О.* Экологические последствия получения и использования геотермальной энергии в Украине. Технологический аудит и резервы производства. 2015. №3/1(23).

19. *Любчик Г.Н.* Экологические показатели воздействия энергетических установок на окружающую среду. Промышленная теплотехника. 1992. т.14. №1-3. С. 72-78.

20. *Мацевитий Ю.М., Чиркин Н.Б., Богданович Л.С., Клепанда А.С.* Внедрение теплонасосных установок. Экотехнологии и ресурсосбережение. 2008. №3. С. 4-10.

21. *Накорчевский А.И.* Грунтовые аккумуляторы теплоты и модернизация коммунальной теплоенергетики. К. Институт технической теплофизики НАН Украины. 2010. 254 с.

22. *Некрасова О.А.* Синяк Ю.В. Исследование теплонасосных систем отопления (модельный подход). Теплоэнергетика. 1986. №11. С. 30-34.

23. Области применения тепловых наосов. URL: https://www.atmosfera.ua/ heatpump/oblasti-primeneniya-tn/

24. *Овчаров С.В., Стребков А.А., Буряк А.В.* Разработка комбинированной системы отопления жилых домов и коммунальных объектов в сельской местности. Технологический аудит и резервы производства. 2015. №1(21). Том 1. С. 46-51.

25. *Олийниченко В.Г., Марченко Е.В.* Сравнительный анализ типов технологического исполнения тепловых насосов. Возобновляемая энергетика и энергоэффективность в XXI столетии: Материалы XYIII Международной научно-практической конференции (27–29 сент. 2017 г.). Киев. 2017. С. 604-609.

26. *Петин Ю.М., Накоряков В.Е.* Тепловые насосы. Российский химический журнал. 1999. Т. 41. №6. С. 107-111.

27. *Попов А.В.* Анализ эффективности различных типов тепловых насосов. Журнал «Проблемы энергосбережение». №1-2, август 2005 г. URL: http://www.energosovet.ru/stat422.html.

28. *Потапова А.А., Султангузин И.А.* Применение тепловых насосов в системе теплоснабжения промышленного предприятия и города. Металлург. 2010. №9. С. 44-51.

29. *Прутська О.О., Федик О.Ю.* Сучасний стан та проблеми розвитку альтернативної енергетики в Україні. Збірник наукових праць ВНАУ (Вінницький національний аграрний університет). 2012. №1(56). Том 2. С. 158-164.

30. Расчет холодильной машины. URL: http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/T_T_5_2_1_Ref.html

31. *Розен В.П., Соловей А.И., Балашев А.А.* Методические указания для работы студентов по лабораторному практикуму по курсам «Модели и методы оптимизации систем электроснабжения», «Автоматизированные системы управления и переработки информации» и «Энергетический менеджмент». К. 1999. 27 с.

32. *Татаринова Г.Г.* Методология анализа данных в социологии. Условие транзитивности. URL: *http://society.polbu.ru/tatarova_sociology33_all.html*

33. Тепловой насос. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Тепловой_насос

34. *Федянин В.Я., Карпов М.К.* Использование грунтовых теплообменников в системах теплоснабжения. Ползуновский вестник. №4. 2006. С. 98-103.

35. *Федянин В.Я., Михеев Д.Д.* Методика расчета тепловых потоков в грунтовом теплообменнике. Горизонты образования. 61-я научно-техническая конференция студентов, аспрантов и профессорско-препода-вательского состава. 2003. Вып. 5. Ч. 11. С. 12-15.

36. *Хайнрих Г., Найорк Х., Нестлер В.* Тепловые установки для отопления и горячего водоснабжения. Стройиздат. М. 1985. 351 с.

37. *Шаталов И.К., Фролов М.Ю., Шаталов И.К.* Схема теплонасосной установки с параллельным подключением. Вестник РУДН, сер. Инженерные исследования. 2003 №1. С. 103-105

38. *Яценко Л.В.* Визначення ефективності застосування комбінованих енергосистем на основі відновлюваних джерел енергії. Технічна електродинаміка. Ч.1. Київ. 1999. С. 34-41.

ОДНОКОНТУРНІ ТА ДВОКОНТУРНІ ТЕПЛОНАСОСНІ СИСТЕМИ. ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ

С. В. Гошовський, доктор технічних наук, проф.,
О. В. Зур'ян, кандидат технічних наук

Український державний геологорозвідувальний інститут
04114 вул. Автозаводська, 78А, Київ

Наведено теоретичний аналіз особливостей використання і технологій побудови одноконтурних та двоконтурних теплонасосних систем. Виконано аналіз основних недоліків одноконтурних теплонасосних систем. Аналітично обґрунтовано, що процес теплообміну відбувається при змінних температурах з боку джерела і приймача теплоти, що веде до додаткових втрат в випарнику і конденсаторі й, відповідно, до зниження коефіцієнта трансформації теплонасосної системи. Експериментально встановлено, що зменшення коефіцієнта трансформації відбувається не прямо пропорційно збільшенню температури теплоносія на вході в систему, а має деяке прискорення, обумовлене підвищенням теплових втрат в системі, пов'язаних із збільшенням тиску і температури. Представлено діючий макет розробленої і сконструйованої в УкрДГРІ двоконтурної експериментальної теплонасосної системи. Описана методика проведення досліджень. Наведено характеристики вимірювального обладнання, що було встановлено на макеті експериментальної установки й програмного забезпечення, яке використовувалося для архівування і візуалізації даних, отриманих в процесі проведення досліджень. Викладені результати наукової роботи, отримані в ході теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень ефективності теплонасосних систем, в залежності від одноконтурного або двоконтурного виконання. Даються залежності коефіцієнта трансформації теплового насоса від кількості контурів. Обґрунтовано залежність ефективності теплонасосної системи від параметрів первинного джерела низькопотенційного тепла і конструктивних особливостей системи теплопостачання. Зроблено висновок, що двоконтурна система з послідовно з'єднаними контурами працює ефективніше, ніж одноконтурна. Бібл. 38, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: *тепловий насос, двоконтурний тепловий насос, енергія довкілля, відновлювані джерела енергії.*

REFERENCES

1. *Alimgazin A.Sh., Bahtiyarova S.G., Berguzinov A.N.* Ekolohichni aspekty zastosuvannya teplonasosnykh tekhnolohiy dlya teplopostachannya riznykh obyektiv v respublitsi Kazakhstan. [Environmental aspects of the application of heat pump technologies for heat supply of various objects in the Republic of Kazakhstan]. Vestnik PGU No. 1. 2010. Pp. 42-52. [in Russian].

2. *Bezrodnyj M.K. Galan M.A.* Enerhetychna efektyvnist teplonasosovoyi systemy ventylyatsiyi z rekuperatorom teploty i retsyrkulyatsiyeyu vidpratsovanoho povitrya. [Energy efficiency of the heat pump pump system for ventilation with heat recovery and recirculation of exhaust air]. Naukovi visti NTUU «KPI». 2011. No. 2. Pp. 16-19. [in Ukrainian].

3. *Basok B.I., Belyaeva T.G., Rutenko A.A., Lunina A.A.* Analiz ekonomichnoyi efektyvnosti pry realizatsiyi teplonasosnykh system dlya teplonavantazhennya. [Analysis of economic efficiency in the implementation of heat pump systems for heat supply]. Prom. teplotehnika. 2008. No. 4. Pp. 56-63. [in Russian].

4. *Vargaftik N.B.* Spravochnyk po teplofyzycheskym svoystvam rechovyn. [Handbook of thermophysical properties of substances]. M. Nauka. 1972. [in Russian].

5. *Goshovskiy S.V., Zurian A.V.* Izvlecheniye energii tepla Zemli. [Extraction of energy of heat of the Earth]. LAMBERT Academic Publishing. 2018. 296p. [in Russian].

6. *Goshovskiy S.V., Zurian A.V.* Analiz primeneniya razlichnykh istochnikov vozobnovlyayemoy energii dlya optimal'noy raboty teplonasosnykh sistem. [Analysis of the application of various renewable energy sources for optimal operation of heat pump systems]. Sbornik nauchnyih trudov Ukrainskogo gosudarstvennogo geologorazvedochnogo instituta. 2015. No. 2. Pp. 9-20. [in Russian].

7. *Goshovskiy S.V., Zurian A.V.* Gruntovyye teploobmenniki (GT) dlya geotermal'nykh sistem teplosnabzheniya optimal'noye konstruktsii i kharakteristiki. [Soil heat exchangers (GT) for geothermal heating systems are optimally designed and features]. Sbornik nauchnyih trudov Ukrainskogo gosudarstvennogo geologorazvedochnogo institute. 2013. No. 4. Pp. 16-184. [in Russian].

8. Dokumentatsiya dlya proyektirovaniya Bosch Thermotechnik 6720642483 (2009/12). [Design documentation Bosch Thermotechnik 6 720 642 483(2009/12)]. Retrived from https://www.bosch-climate.ru/files/201212111351220.Condens%207000%20W.pdf [in Russian].

9.*Elistratov S.L.* Kompleksnoye issledovaniye ef-fektivnosti teplovykh nasosov [Comprehensive study of the effectiveness of heat pumps]. diss. doktora tehn. nauk: 01.04.14. Elistratov Sergey Lvovich. .Novosibirsk. 2010. 383 p. [in Russian].

10. *Zabulonov Yu.L.* Otsinka vplivu obyektiv elektronerhetiki na pryrodno seredovyshche ta stan zdorovya naselenyynya. Zakhyst dovkillya vid antropohen. navantazh. [Estimation of influence of objects of electric power industry on the natural environment and state of health of the population Zaxyst dovkillya vid antropogen. navantazh]. Zb. nauk. pr. 2005. No. 11(13). Pp. 58-64. [in Ukrainian].

11. *Ilin R.A., Ilin A.K.* Novyy podkhod k otsenke effektivnosti teplovykh nasosov. [New approach to evaluating the efficiency of heat pumps]. Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tehnika i tehnologiya. 2010. №2. Pp. 83-87. [in Russian]

12. *Kalnin I.M.* Tekhnika nizkikh temperatur na sluzhbe energetiki. [Technique of low temperatures in the service of energy]. Holodilnoe delo. 1996. No. 1. Pp. 26-29. [in Russian].

13. *Kaplun V.V.* Zasady staloho rozvytku palyvno-enerhetychnoho kompleksu ukrayiny u Svitli Vykonannya vymoh konventsiy RIO. [Principles of sustainable development of Ukraine's fuel and energy complex in the light of the requirements of the RIO conventions]. Visnyk KNUTD. 2014. No. 5(79). Pp. 64-69. [in Ukrainian].

14. *Kachynskyj A.B., Xmil T.A.* Ekolohichna bezpeka Ukrayiny: analiz, otsinka ta derzhavna polityka. [Ecological safety of Ukraine: analysis, evaluation and state policy]. K. NISD. 1997. 127 p. [in Ukrainian].

15. *Kidruk M.I.* Modelirovaniye i optimizatsiya sistem teplosnabzheniya zdaniy s vnedreniyem vozobnovlyayemykh istochnikov energii. [Modeling and optimization of building heat supply systems using renewable energy sources]. Nova tema. 2007. No. 4. Pp. 13-16. [in Russian].

16. *Korcheviy YU.P., Volchin I.A., Horbunov V.S. ta in.* Ekolohichni aspekty rozvytku teploenerhetyky Ukrayiny. [Environmental aspects of the development of heat and power engineering of Ukraine]. Energetika i elektrifikatsii. 2002. No. 2. Pp. 45-50. [in Ukrainian].

17. *Kudrya S.O.* Stan ta perspektyvy rozvytku vidnovlyuvanoyi enerhetyky v Ukrayini. [Status and Prospects for the Development of Renewable Energy in Ukraine]. Visnik NAN Ukraïni. 2015. No. 12. Pp. 19-26. [in Ukrainian].

18. *Limarenko A.N., Taranenko O.O.* Ekologicheskiye posledstviya polucheniya i ispol'zovaniya geotermal'noy energii v Ukraine. [Ecological consequences of obtaining and using geothermal energy in Ukraine]. Tehnologicheskiy audit i rezervy proizvodstva. 2015. No.3/1(23). Pp. 19-26. [in Russian].

19. *Lyubchik G.N.* Ekologicheskiye pokazateli vozdeystviya energeticheskikh ustanovok na okruzhayushchuyu sredu. Promyshennaya teplotekhnika. [Environmental indicators of the impact of energy installations on the environment]. Promyshlennaya teplotehnika. 1992. T.14. No.1-3. Pp. 72-78. [in Russian].

20. Macevitiy Yu.M., Chirkin N.B., Bogdanovich L.S., Klepanda A.S. Vnedreniye teplonasosnykh ustanovok. Ekotekhnologii i resursosberezheniye. [Introduction of heat pump installations]. Ekotehnologii i resursosberezhenie. 2008. No.3. Pp. 4-10. [in Russian]

21. *Nakorchevskiy A.I.* Gruntovyye akkumulyatory teploty i modernizatsiya kommunal'noy teploenergetiki. [Soil accumulators of heat and modernization of municipal heat and power engineering]. K. Institut tehnicheskoy teplofiziki NAN Ukrainy. 2010. 254 p. [in Russian].

22. *Nekrasova O.A., Sinyak Yu.V.* Issledovaniye teplonasosnykh sistem otopleniya (modelnyy podkhod). [Research of heat pump systems of heating (model approach)]. Teploenergetika. 1986. No.11. Pp. 30-34. [in Russian].

23. Oblasti primeneniya teplovykh naosov. [Application areas of thermal pumps]. Retrived from: https://www.atmosfera.ua/heatpump/oblasti-primeneniya-tn/ 1. [in Russian].

24. *Ovcharov S.V., Strebkov A.A., Buryak A.V.* Razrabotka kombinirovannoy sistemy otopleniya zhilykh domov i kommunal'nykh ob"yektov v sel'skoy mestnosti. [Development of a combined heating system for residential and public buildings in rural areas]. Tehnologicheskiy audit i rezervy proizvodstva. 2015. No.1(21). T. 1. Pp. 46-51. [in Russian]

25. *Oliynichenko V.G., Marchenko E.V.* Sravnitelnyy analiz tipov tekhnologicheskogo ispolneniya teplovykh nasosov. [Comparative analysis of the types of technological performance of heat pumps]. Vozobnovlyaemaya energetika i energoeffektivnost v XXI stoletii: Materialy XYIII Mezhdunarodnoy nauchno - prakticheskoy konferencii. Kiev. 2017. Pp. 604-609. [in Russian].

26. *Petin Yu.M., Nakoryakov V.E.* Teplovyye nasosy. [Heat pumps]. Rossiyskiy himicheskiy zhurnal. 1999. T. 41. No. 6. Pp. 107-111. [in Russian].

27. *Popov A.V.* Analiz effektivnosti razlichnykh tipov teplovykh nasosov. [Analysis of the effectiveness of various types of heat pumps]. Zhurnal «Problemy energosberezhenie». 2005. No.1-2. Retrived from: http://www.energosovet.ru/stat422.html [in Russian]

28. *Potapova A.A., Sultanguzin I.A.* Primeneniye teplovykh nasosov v sisteme teplosnabzheniya promyshlennogo predpriyatiya i goroda. [The use of heat pumps in the heat supply system of industrial enterprises and the city]. Metallurg. 2010. No.9. Pp. 44-51. [in Russian].

29. *Prutska O.O., Fedyk O.Yu.* Suchasnyy stan ta problemy rozvytku al′ternativnoyi enerhetyky v Ukrayini. [Current state and problems of alternative energy development in Ukraine]. Zbirnyk naukovykh prats VNAU (Vinnytskyy natsionalnyy ahrarnyy universytet). 2012. No.1(56). T. 2. Pp. 158-164. [in Ukrainian].

30. Raschet kholodil'noy mashiny. [Calculation of the refrigeration machine]. Retrived from: http://twt.mpei.ac.ru/TTHB/2/T_T_5_2_1_Ref.html [in Russian]

31. *Rozen V.P., Solovey A.I., Balashev A.A.* Metodicheskiye ukazaniya dlya raboty studentov po laboratornomu praktikuma po kursam «Modeli i metody optimizatsii sistem elektrosnabzheniya», «Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya i pererabotki informatsii» i «Energeticheskiy menedzhment». [Guidelines for the work of students in laboratory practical work on the courses "Models and methods for optimizing power supply systems", «Avtomatizirovannye sistemy upravleniya i pererabotki informacii» i «Energeticheskiy menedzhment»]. K. 1999. 27 p. [in Russian].

32. *Tatarinova G.G.* Metodologiya analiza dannykh v sotsiologii. Usloviye tranzitivnosti. [Methodology of data analysis in sociology. Transitivity condition]. Retrived from: http://society.polbu.ru/tatarova_sociology33_all.html [in Russian].

33. Teplovoy nasos. [Heat pump]. Retrived from: https://ru.wikipedia.org/wiki/Тепловой_насос [in Russian]

34. *Fedyanin V.Ya., Karpov M.K.* Ispolzovaniye gruntovykh teploobmennikov v sistemakh teplosnabzheniya.

[The use of ground heat exchangers in heating systems]. Polzunovskiy vestnik. №4. 2006. Pp. 98-103. [in Russian].

35. *Fedyanin V.Ya., Miheev D.D.* Metodika rascheta teplovykh potokov v gruntovykh teploobmennike. [The method of calculating the heat flow in the soil heat exchanger]. Gorizonty obrazovaniya. 61-ya nauchno-tehnicheskaya konferenciya studentov, asprantov i professorsko-prepodavatelskogo sostava. 2003. No. 5. T. 11. Pp. 12-15. [in Russian].

36. *Haynrih G., Nayork H., Nestler V.* Teplovyye ustanovki dlya otopleniya i goryachego vodosnabzheniya. [Thermal installation for heating and hot water]. Stroyizdat. M. 1985. 351 p. [in Russian].

37. *Shatalov I.K., Frolov M.Yu.* Skhema teplonasosnoy ustanovki s parallel'nym podklyucheniyem. [Scheme of heat pump installation with parallel connection]. Vestnik RUDN, ser. Inzhenernye issledovaniya. 2003. No.1. Pp. 103-105. [in Russian].

38. *Yacenko L.V.* Opredeleniye effektivnosti primeneniya kombinirovannykh energosistem na osnove vozobnovlyayemykh istochnikov energii. [Determination of efficiency of application of combined power systems on the basis of renewable energy sources]. Texnichna elektrodynamika. 1999. T.1. Pp. 34-41. [in Russian].

Стаття надійшла до редакції.02.07.18
Остаточна версія 14.03.19



Вимоги до публікацій у науково-прикладному журналі «Відновлювана енергетика»

Науково-прикладний журнал «Відновлювана енергетика» є науковим фаховим виданням України у галузі технічних наук. У журналі публікуються результати досліджень у сфері відновлюваної енергетики, зокрема: використання комплексних енергосистем, енергії сонця, вітру, гідроенергетики, біоенергетики, геотермальної енергетики тощо. До публікації в журналі приймаються неопубліковані раніше статті, які містять результати фундаментальних теоретичних розробок та найбільш значних прикладних досліджень. До друку приймаються статті українською, англійською або російською мовою.

До статей додаються:

– офіційний лист, підписаний керівником установи, де виконувалася робота;
– ліцензійна угода на використання твору (передача авторського права на друк статті редакції журналу; форма ліцензійної угоди розміщена на сайті http://www.ve.org.ua);
– повна контактна інформація кожного з авторів: повна поштова адреса, контактний номер телефону та адреса електронної пошти;
– фотографії кожного з авторів (на однотонному фоні, роздільна здатність зображень 300 dpi) в електронному вигляді;
– коротка анотація про досягнення кожного автора (мовою статті та англійською мовою) (розміщується на початку тексту статті перед переліком прийнятих позначень);
– стаття надається на електронному носії (флешка) або надсилається на e-mail: ar.shchek@gmail.com у вигляді текстового файлу готової статті та файлами рисунків (зображення на рисунках мають бути чіткі, текст на рисунках повинен легко читатися);
– копія документа про передплату друкованої версії журналу поточного року (за власним бажанням автора (-ів).

Структура статті повинна складатися з таких блоків:

1. Блок мовою оригіналу (українська, англійська або російська);

• індекс Універсальної десяткової класифікації (УДК);
• назва статті;
• прізвище, ім’я та по батькові всіх авторів;
• відомості про автора (-ів): вчене звання і вчений ступінь, місце роботи або навчання – повна назва установи, посада, адреса, населений пункт;
• анотація основною мовою статті (згідно з наказом МОН №32 від 15.01.2018 анотація повинна бути обсягом не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова), де чітко сформульовано головну ідею статті та обґрунтовано її актуальність.

Анотація повинна бути змістовною, не повторювати назву статті, не містити загальних фраз, не дублювати розділ «Висновки», а відображати короткий зміст статті (мета, задачі, методи дослідження, результати);

• ключові слова (до 10 слів);
• **Код DOI** (сплачується додатково) – кожній статті присвоюється окремий унікальний код.

Редакція журналу отримує код DOI через передплатне агенство «Укрінформнаука» за умови попередньої сплати відповідного внеску автором.

• **Код ORCID** (безкоштовно) – кожен автор отримує власний код **ORCID**, пройшовши реєстрацію, для цього автор просто заповнює форму на сайті http://orcid.org. Через деякий час після реєстрації на вказану автором електронну пошту надходить 16-тизначний код, який необхідно вказати в першому блоці статті. **Код ORCID** – це науковий паспорт автора, який надається один раз на все життя.

2. Стаття мовою оригіналу.

3. Кожна публікація не українською мовою супроводжується **блоком 1 українською мовою**, включно з україномовною анотацією (згідно з наказом МОН №32 від 15.01.2018 анотація повинна бути обсягом не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова).

4. Кожна публікація не англійською мовою супроводжується **блоком 1 англійською мовою**, включно з англомовною анотацією (згідно з наказом МОН №32 від 15.01.2018 анотація повинна бути обсягом не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова).

5. Перелік літературних джерел, на які посилається автор, повинен надаватися в алфавітному порядку, пронумерований, і окремо **дублюватися латиницею**: вся інформація, зазначена в україномовному списку літератури, викладається транслітерацією. У другий (транслітерований) список використаних джерел необхідно до транслітерованої назви джерела обов'язково додавати переклад назви англійською мовою [зазначати в кінці бібліографічного опису в квадратних дужках].
Для кожного пункту англомовного списку використаних джерел вказувати мову оригіналу статті, напр. (Ukr.) або (Rus.). Для джерел, яким присвоєно код DOI, необхідно вказати цей код.

Більше інформації про оформлення переліку літературних джерел за посиланням:

- Про оформлення пристатейних списків посилань відповідно до вимог світових наукометричних баз // Наука України у світовому інформаційному просторі. – Вип. 10. – К.: Академперіодика, 2014. – С. 91–94. (Ukr.) http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/122995

Транслітерацію латиницею виконують згідно з постановою Кабміну №55 від 27.01.2010 р. (див. http://zakon.rada.gov.ua.)

Текст статті повинен містити взаємопов'язані розділи, які виділені **напівжирним шрифтом:**

• **перелік використаних позначень та скорочень**;

• **вступ** (у тому числі теоретична частина, постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з останніми дослідженнями і публікаціями як за кордоном, так і в Україні, а також із важливими науковими і практичними завданнями. Автор повинен виділити із загальної проблеми ту частину, яку він досліджує, і показати її актуальність);

• **постановка завдання** (формулювання мети і методів дослідження теми, що розглядається);

• **виклад основного матеріалу** дослідження з обґрунтуванням одержаних наукових результатів;

• **висновки** (наукова новизна, теоретичне і практичне значення досліджень, соціально-економічний ефект, який виникає внаслідок впровадження наукових результатів, перспективи подальших наукових розробок у цьому напрямку);

• **бібліографія** (перелік використаної літератури, складений відповідно до вище вказаних вимог і розміщений у кінці статті в алфавітному порядку). На всі першоджерела повинні бути зроблені посилання. У тексті цитоване джерело позначається у квадратних дужках цифрою, що відповідає його номеру в списку літератури.

Обсяг статті має становити не більше 10 сторінок формату А4.

Електронну версію статті слід надавати у форматі текстового редактора MS Word 97-2003 (doc).

Стиль основного тексту: шрифт – Times New Roman 11 pt, міжрядковий інтервал – 1,5, вирівнювання по ширині, автоматична розстановка переносів, перший рядок – відступ 1,25 см.

Всі поля згори, знизу, ліворуч – 2,5 см, праворуч – 1,5 см. Назва статті – шрифт 12 pt, напівжирний, великими літерами, розміщення по центру. Стаття оформлюється без колонтитулів та нумерації сторінок.

Стиль формул: формули створюються у вигляді окремих об'єктів тільки в редакторі математичних формул **MathType 6.0**, шрифтом New Roman 11 pt, вирівнювання по центру, нумерація в круглих дужках праворуч. Латинські літери і символи повинні виконуватися у стилі «Математичний», кириличні – у стилі «Текст». Не допускається представлення формули та її номера у вигляді таблиці. Символи у формулах та в тексті статті повинні мати однаковий формат.

Фізичні, хімічні, технічні та математичні терміни, одиниці фізичних величин та умовні позначення, що використовуються у статті, мають бути загальноприйнятими. Скорочення одиниць фізичних величин мають відповідати вимогам Міжнародної системи одиниць СІ. Всі позначення прийнятих у статті термінів потрібно додатково вносити у перелік використаних позначень.

Стиль рисунків: рисунки (**не більше 5**) приймаються у форматах, TIF, JPG, GIF (300 dpi) без підрисункових підписів. Рисунки вставляються у текст як «рисунок», а не «полотно». Шрифт тексту на рисунках – Times New Roman 11 pt. Якщо рисунок вставлений, то мають бути відмічені опції «Переміщувати з текстом» та «Установити прив'язку». Застосування альбомної орієнтації не допускається. Всі лінії на рисунках повинні бути чіткими.

Рисунки та фотографії повинні мати чітке оформлення, однотонний контрастний фон. Звертаємо увагу, що після друку максимальний розмір зображення на сторінці не може перевищувати 170х200 мм. Текст до рисунків має виконуватися шрифтом Times New Roman. Одиниці виміру на графіках вказуються через кому, а не в дужках. Всі рисунки нумеруються в порядку їх розміщення у тексті. Не допускається вносити номер рисунка і підпис до нього безпосередньо в рисунок.

Стиль таблиць: табличний редактор – Word, таблиці подавати в тексті, шрифт Times New Roman 10 pt. Якщо таблиць декілька, кожна повинна мати порядковий номер (без знака №). Слово «Таблиця 1» і назва таблиці набирається напівжирним шрифтом 10 pt.

У рисунках і таблицях **лінії товщиною менше 0,3 мм не допускаються.**

Увага! Рисунки з «волосяними» лініями не приймаються. Статті, в яких рисунки і таблиці будуть оформлені тонкими напівпрозорими лініями менше 0,3 мм, до друку не прийматимуться, натомість будуть повертатися авторам для виправлення. Під час роботи над макетом публікації, редакція, перш за все, звертає увагу на відповідність вимогам типографії щодо контрастності підготовленого матеріалу.

Всі назви рисунків і таблиць повинні додатково дублюватися англійською мовою.

Стиль оформлення списку літератури: список пронумерованих літературних джерел, на які посилається автор, подається в алфавітному порядку (кожне джерело – з абзацу), шрифт – Times New Roman 10 pt, прізвища авторів – курсивом. У тексті цитоване джерело позначається у квадратних дужках цифрою, що відповідає його номеру в списку літератури. До всіх цитованих джерел повинен застосовуватися один і той же стандарт, тобто порядок надання даних у посиланнях та розділові знаки повинні бути представлені однаково. Скорочення назв цитованих джерел не допускається.

Формат посилань:

• **книги –** автор (-и) (прізвища, потім ініціали) курсивом, назва книги, місто та видавництво, рік видання, загальна кількість сторінок.

• **журнали** – автор (-и) (прізвища, потім ініціали) курсивом, назва статті, назва журналу, рік видання, номер випуску, номери сторінок.

Рукописи відправляються за адресою: 02094 м. Київ, вул. Гната Хоткевича, 20А, Інститут відновлюваної енергетики НАН України, редакція наукового журналу, оф. 301, (e-mail: **ar.shchek@gmail.com**). Тел. +38 (044) 206-28-09.

Перед відправкою рукопису наукового твору, автор повинен перевірити остаточний варіант тексту статті на унікальність за допомогою програм Unicheck, Advego Plagiatus (https://advego.ru/blog/read/news/3588559) або Etxt. Навіть одне речення у вашій статті, ідентичне до того, яке є у вже існуючих публікаціях (це стосується навіть власних попередніх публікацій!) – є приводом звинуватити авторів у плагіаті та відмовити у публікації. На сьогоднішній день, перевірка на плагіат обов'язково проводиться в усіх міжнародних журналах. Пам'ятайте, що схожий з уже опублікованим текст може з'явитися не з вашої вини, а в процесі перекладу.

Весь зміст наукових редакційних матеріалів, надісланих авторами, проходить обов'язкове рецензування незалежними експертами, яким призначається сліпе або подвійне сліпе рецензування, враховуючи «Керівництво рецензента». https://openscience.in.ua/peer-review-guidelines.html

Кожен автор у супровідному листі повинен підтвердити, що ознайомлений з цими вимогами до підготовки наукового твору, а також, що автором здійснено перевірку твору на плагіат.

Більш детальну інформацію можна одержати в редакції журналу за телефоном +38 (044) 206-28-09 або на сайті журналу http://www.ve.org.ua

Поштова адреса редакції:
02094 вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна
02094, 20A Hnata Khotkevycha Street, Kyiv, Ukraine
phone /fax: +38 (044) 206-28-09

XX ЮВІЛЕЙНА МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ "ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У XXI СТОЛІТТІ"

15 - 17 травня 2019 року, м. Київ, пр. Перемоги, 37

Шановні колеги!

Оргкомітет конференції запрошує Вас взяти участь в XX ювілейній міжнародній науково-практичній конференції "ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У XXI СТОЛІТТІ", яку заплановано провести **15-17 травня 2019 року.**

Організатори: Представництво Польської академії наук в м. Києві, Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Інститут відновлюваної енергетики НАН України, ДП «МНТЦ вітроенергетики НАН України», Кафедра ЮНЕСКО «Вища технічна освіта, прикладний системний аналіз та інформатика» при НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та ННК «Інститут прикладного системного аналізу».

Метою конференції є обговорення проблем та перспектив розвитку використання відновлюваних джерел енергії, електро - і теплопостачання за рахунок енергії сонця, вітру, біоенергетичних ресурсів, тепла землі і гідроенергетичних ресурсів, а також реалізації заходів для енергоефективності та енергозбереження.

На конференції передбачається розглянути широкий спектр проблем за такими секціями:

- Енергоефективність
- Комплексні системи з ВДЕ
- Вітроенергетика
- Сонячна енергетика
- Енергія біомаси
- Гідроенергетика
- Геотермальна енергетика
- Освітня діяльність
- Воднева енергетика
- Енергетика довкілля (теплові насоси)
- Розумні мережі

Також просимо активно виступити спонсорами підтримки нашої конференції, при цьому з нашого боку ми забезпечимо розміщення Вашої інформації та інформаційних матеріалів на інформаційних ресурсах та в матеріалах конференції.

Мова конференції: українська, англійська.

При Вашій зацікавленості більш детальну інформацію щодо проведення конференції надішлемо на Вашу електронну пошту додатковими інформаційними листами та повідомленнями.

Кінцеві терміни подачі тез доповідей до **15 березня 2019 року** за адресою: **tezy.ive@gmail.com**

Підтвердження Вашої участі у конференції, заповнивши реєстраційну форму, надсилати не пізніше 12 травня 2019 року за факсом або електронною поштою до Оргкомітету.

Кращі статті будуть рекомендовані до публікації у провідних фахових журналах України та Польщі.

З усіх питань публікацій тез звертайтеся до

Пономаренко Олени Петрівни за тел.: (044) 206-28-09

ОРГВНЕСОК З ПДВ ДЛЯ УЧАСТІ У КОНФЕРЕНЦІЇ СТАНОВИТЬ- 300 грн.

Для студентів, аспірантів - **150 грн.**

Термін оплати — **до 10 травня 2019 року** за умови безготівкового розрахунку

РОЗРАХУНКОВИЙ РАХУНОК ОРГАНІЗАТОРА:

ДП МНТЦ вітроенергетики ІВЕ НАНУ, ЄДРПОУ 30973289, МФО 380805,

р/рах. № 26005427307 у ПАТ «Райффайзен банк Аваль», м. Київ

Детальна інформація на сайті: **www.ive.org.ua.**

Оргкомітет: Інститут відновлюваної енергетики НАН України

вул. Гната Хоткевича 20а, 02094, Київ, Україна. тел./факс: +38 (044) 206-28-09

e-mail: info@ive.org.ua, веб-сайти: www.ive.org.ua, www.conf.ive.org.ua, www.ve.org.ua

Друкується згідно з рекомендацією Вченої ради Інституту відновлюваної енергетики НАНУ, протокол № 6 від 18.03.19.

Підписано до друку 18.03.2019. Формат 84Ч108/16. Друк – офсетний. Умовн.друк.арк. 10,5. Тираж 120 прим.

Зареєстровано 01.09.2004, свідоцтво: серія КВ, № 9115. Ціна договірна.

Віддруковано ТОВ "НВП "ІНТЕРСЕРВІС", м. Київ, вул. Бориспільська, 9.