ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

ІНСТИТУТ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60)

ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА

№1 (60) – 2020

НАУКОВО-ПРИКЛАДНИЙ ЖУРНАЛ

ІВЕ НАН України

Київ-2020

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 наказом Міністерства освіти і науки України від 28.12.2019 №1643, категорія «Б».

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

Кудря С.О. чл.-кор. НАН України, д-р. техн. наук, проф., Інститут відновлюваної енергетики НАН України

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

Рєзцов В.Ф. чл.-кор. НАН України, д-р. техн. наук, проф., Інститут відновлюваної енергетики НАН України

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

Басок Б.І. чл.-кор. НАН України, д-р. техн. наук, проф., Інститут технічної теплофізики НАН України
Васецький Ю.М. д-р техн. наук, проф., Інститут електродинаміки НАН України
Васько П.Ф. д-р техн. наук, ст. наук. співр., Інститут відновлюваної енергетики НАН України
Головко В.М. д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
Долінський А.А. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф., Інститут технічної теплофізики НАН України
Зварич В.М. д-р техн. наук, ст. наук. співр., Інститут електродинаміки НАН України
Карп І.М. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф., Інститут газу НАН України
Клюс В.П. канд. техн. наук, доцент, Інститут відновлюваної енергетики НАН України
Кузнецов М.П. д-р техн. наук, ст. наук. співр., Інститут відновлюваної енергетики НАН України
Кулик М.М. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф., Інститут загальної енергетики НАН України
Мазуренко О.Г. д-р техн. наук, проф., Національний університет харчових технологій
Мацевитий Ю.М. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф., Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України
Мислович М.В. д-р техн. наук, проф., Інститут електродинаміки НАН України
Морозов Ю.П. д-р техн. наук, ст. наук. співр., Інститут відновлюваної енергетики НАН України
Мхітарян Н.М. чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., почесний директор Інституту відновлюваної енергетики НАН України
Маегаард П. почесний директор «Nordic Folkecenter for Renewable Energy» (Данія)
Накашидзе Л.В. д-р техн. наук, ст. наук. співр., НДІ енергетики Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара
Павлов В.Б. д-р техн. наук, ст. наук. співр., Інститут електродинаміки НАН України
Собчук Г. д-р техн. наук, проф., Представництво Польської Академії Наук в Києві (Польща)
Стогній Б.С. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф., Інститут електродинаміки НАН України
Стріугас Н. д-р техн. наук, Литовський енергетичний інститут (Литва)
Таубе О. д-р техн. наук, проф., Суінбернський технологічний університет (м. Мельбурн, Австралія)
Троціковські Т. д-р техн. наук, президент Європейського наукового інституту інновацій (Польща)
Фіалко Н.М. чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., Інститут технічної теплофізики НАН України
Халатов А.А. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф., Інститут технічної теплофізики НАН України
Шидловський А.К. акад. НАН України, д-р техн. наук, проф., Інститут електродинаміки НАН України
Шмідт Д. д-р техн. наук, Solarinitiative Mecklenburg Vorpommern MV e.V (Німеччина)
Юрченко О.М. д-р техн. наук, ст. наук. співр., Інститут електродинаміки НАН України
Яндульський О.С. д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

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

Науковий редактор: Рєзцов В.Ф.
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 №1643 from 28.12.2019, category "B".

EDITORIAL BOARD

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY EDITOR

Rieztsov V.F. corresponding member of NAS of Ukraine, D.Sc., professor, Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine

EDITORIAL BOARD MEMBERS

Basok B.I. corresponding member of NAS of Ukraine, D.Sc., professor, Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine
Dolinskyi A.A. academician of NAS of Ukraine, D.Sc., professor, Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine
Fialko N.M. corresponding member of NAS of Ukraine, D.Sc., professor, Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine
Holovko V.M. D.Sc., professor, NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Karp I.M. academician of NAS of Ukraine, D.Sc., professor, The Gas Institute NAS of Ukraine
Khalatov A.A. academician of NAS of Ukraine, D.Sc., professor, Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine
Klius V.P. Ph.D., assistant professor, Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine
Kuznietsov M.P. D.Sc., senior researcher, Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine
Kulyk M.M. academician of NAS of Ukraine, D.Sc., professor, Institute of General Energy NAS of Ukraine
Matsevity Yu.M. academician of NAS of Ukraine, D.Sc., professor, A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine
Mazurenko O.G. D.Sc., professor, National University of Food Technologies
Mkhitarian N.M. corresponding member of NAS of Ukraine, D.Sc., professor, director emeritus of Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine
Morozov Yu.P. D.Sc., senior researcher, Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine
Myslovych M.V. D.Sc., professor, The Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine
Maegaard P. director emeritus of "Nordic Folkecenter for Renewable Energy" (Denmark)
Nakashidze L.V. D.Sc., senior researcher, SRI of Energy Oles Honchar Dnipro National University
Pavlov V.B. D.Sc., senior researcher, The Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine
Schmidt D. D.Sc., Solarinitiative Mecklenburg Vorpommern MV e.V (Germany)
Shydlovskiy A.K. academician of NAS of Ukraine, D.Sc., professor, Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine
Sobchuk H. D.Sc., professor, Representative Office of Polish Academy of Sciences in Kyiv (Poland)
Stohnii B.S. academician of NAS of Ukraine, D.Sc., professor, The Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine
Striūgas N. D.Sc., Lithuanian Energy Institute (Lithuania)
Taube O. D.Sc., professor, Swinburne University of Technology (Melbourne, Australia)
Trocikowski T. D.Sc., European Scientific Institute of Innovation (Poland)
Vasetsky Yu.M. D.Sc., professor, The Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine
Vasko P.F. D.Sc., senior researcher, Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine
Yandulskyi O.S. D.Sc., professor, NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Yurchenko O.M. D.Sc., senior researcher, The Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine
Zvarich V.M. D.Sc., senior researcher, The Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine

EXECUTIVE SECRETARY

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

Science editor: Rieztsov V.F.
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 (60) ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА 2020

Науково-прикладний журнал
Виходить чотири рази на рік

З М І С Т

Комплексні проблеми енергетичних систем на основі НВДЕ

Кудря С.О., Мхітарян Н.М., Тучинський Б.Г., Рєпкін О.О., Іванченко І.В., Петренко К.В. Причини і результати перегляду оцінки потенціалу вітрових електростанцій України 6

Сонячна енергетика

Матях С.В., Суржик Т.В., Рєзцов В.Ф. Визначення ефективності впровадження систем сонячного гарячого водопостачання 17

Бордаков М.М. Особливості конструкції частини силової електроніки в сонячних мережевих інверторах 23

Кныш Л.И. Оценка тепловых потерь трубчатого приёмника тепла солнечных параболо-цилиндрических модулей 29

Вітроенергетика

Головко В.М., Дубчак Є.М., Заморока О.Ю. Підвищення потужності генератора вітроустановки за рахунок зменшення повітряного проміжку між статором і ротором 36

Перминов Ю.Н., Монахов Е.А., Волков Л.П. Проектирование ветрогенераторов повышенной мощности (600÷3600) кВт с возбуждением от постоянных магнитов 42

Гідроенергетика

Обухов Е.В. Внешний водообмен в полезном объеме среднеднепровского водохранилища в проектных и его современных параметрах 52

Васько П.Ф., Пазич С.Т. Моделювання динаміки навантажувальних режимів роботи гідронасосної станції з електроприводом за живлення від вітроелектричної установки з синхронним генератором 61

Геотермальна енергетика

Барило А.А. Аналіз гідрогеологічних і геотермічних характеристик геотермальних об'єктів України 74

Біоенергетика

Рохман Б.Б., Нехамин М.М. Теоретическое исследование нестационарного процесса воздушной газификации твердого топлива в неподвижном слое при атмосферном давлении 86

Інформація

Вимоги до публікацій 96

XXI міжнародна науково-практична конференція "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті" 99

© ІНСТИТУТ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НАН УКРАЇНИ, 2020

№ 1 (60) VIDNOVLUVANA ENERGETIKA 2020

Scientific and applied journal
The journal publishes 4 issues per year

C O N T E N T S

Complex Problems of Power Systems Based on Renewable Energy Sources

Kudrya S., **Mkhitaryan N.**, **Tuchynskyi B.**, **Riepkin A.**, **Ivanchenko I., Petrenko K.** Potential of Ukraine's wind power plants reassessment. The reasons and the results 6

Solar Energy

Matyakh S., Surzhyk T., Ryeztsov V. Determination of the efficiency of solar hot water systems implementation 17
Bordakov M. Features of design the part of power electronics in solar grid on inverters 23
Knysh L. Estimation of heat losses for the tube heat receiver of the solar trough modules 29

Wind Energy

Golovko V., **Dubchak E., Zamoroka O.** Increasing the power of the window generator for the decrease of air length between the stator and the rotor 36
Permynov Y., Monakhov E., Volkov L. Design permanent magnet windgenerator of increased power (600÷3600) kW 42

Hydroenergy

Obukhov E. External water exchange in useful volum middlednieper reservoir in the project and about its parameters 52
Vasko P., **Pazych S.** Modeling dynamics loading modes work of the hydro-pump station with the electric drive from power supply of the wind electric installation with the synchronous generator 61

Geothermal energy

Barylo A. Analysis of hydrogeological and geothermic characteristics of the geothermal objects of Ukraine 74

Bioenergy

Rokhman B., Nekhamin M. Theoretical study of nonstationary air gasification of solid fuel in a fixed bed at atmospheric pressure 86

Information

Publication Requirements 96
XXI International scientific and practical conference "Renewable energy and energy efficiency of the XXI century" 99

© ІНСТИТУТ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НАН УКРАЇНИ, 2020

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

УДК 621.311.24 DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).6-16

ПРИЧИНИ І РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРЕГЛЯДУ ОЦІНКИ ПОТЕНЦІАЛУ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ УКРАЇНИ

С.О. Кудря[1], чл.-кор. НАН України, докт. техн. наук, проф., **Н.М. Мхітарян**[1], чл.-кор. НАН України, докт. техн. наук, проф., **Б.Г. Тучинський**[1], канд. екон. наук, ст. наук. співроб., **О.О. Рєпкін**[2], голова наглядової ради ТОВ Токмак Солар Енерджі, голова енергетичної асоціації «Українська Воднева Рада», **І.В. Іванченко**[1], **К.В. Петренко**[1].

[1]Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
02094, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна.
[2]Громадська спілка «Енергетична асоціація «Українська воднева рада»,
01015, вул. Лаврська, 16, м. Київ, Україна.

Мета статті – сучасна оцінка вітропотенціалу України і перспектив розвитку вітроенергетики. Попит на електроенергію має сталу тенденцію до зростання, а пропозиція електроенергії теплових і атомних електростанцій обмежується, головним чином, вичерпаністю світових запасів відповідних енергоносіїв і їх нерівномірним розподілом між країнами. Останнє створює політичну і економічну залежність країн-імпортерів енергоносіїв від країн, що енергоносії експортують. За прогнозом Міжнародного енергетичного агентства (IEA), в ЄС сума інвестицій у вітроенергетику в період 2014-2035 рр. становитиме 727 $млрд і буде найвищою серед галузей електроенергетики – в 1.8 рази вищою, ніж в ТЕС і АЕС разом (400 $млрд). За останній час відбулись суттєві прогресивні зміни кількісних і якісних параметрів генерації електроенергії ВЕС, а саме: подовжились лопаті вітрових електроустановок (ВЕУ); збільшились висоти веж ВЕУ. Дослідження вітрових потоків показали, що вертикальні профілі вітру фактично є більш чутливими до збільшення висоти над землею, ніж припускалось раніше. Крім того, має місце подвоєння номінальної потужності ВЕУ, за рахунок чого зменшуються як площі покриття ВЕС, так і питомі витрати землі, вилученої з сільськогосподарського використання. Якщо у попередніх дослідженнях придатними для ВЕС визначались лише зони Причорномор'я і Приазов'я, то в результаті спільної дії перелічених факторів значні території в інших регіонах України, що раніше вважались непридатними для розміщення економічно ефективних ВЕС, перейшли до категорії перспективних. В даній статті представлено географічний підхід до оцінювання вітропотенціалу територій України. Цей підхід є значно простіший, потребує значно менше витрат часу і коштів, ніж відомі підходи. Бібл. 6, табл. 4, рис. 8.
***Ключові слова**: вітроенергетика, технічно-досяжний вітропотенціал, вітрова електростанція, географічний підхід, зонування, потенціал встановленої потужності ВЕС.*

POTENTIAL OF UKRAINE'S WIND POWER PLANTS REASSESSMENT. THE REASONS AND THE RESULTS

S. Kudrya[1], corresponding member of NAS, doctor of technical sciences, professor, **N. Mkhitaryan**[1], corresponding member of NAS, doctor of technical sciences, professor, **B. Tuchynskyi**[1], candidate of economic sciences, senior researcher, **A. Riepkin**[2], chairman of the board of the company Tokmak Solar Energy, head of the Energy Association «Ukrainian Hydrogen Council», **I. Ivanchenko**[1], **K. Petrenko**[1].

[1]Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv, Ukraine.
[2]Energy Association «Ukrainian Hydrogen Council»,
01015, 16 Lavrska St., Kyiv, Ukraine.

Purpose of the article is to make a nowadays wind energy potential assessment and to study the prospects for the development of wind energy. Demand for electricity has a steady upward trend. The electricity supply of thermal and nuclear power plants is mainly limits by the depletion of the world's energy resources and their uneven distribution between countries. The last creates the political and economic dependence of energy importing countries on energy exporting ones. According to the International Energy Agency (IEA), wind energy investments in the EU in 2014-2035 will be $ 727 billion and will be the highest among the power industries - 1.8 times higher than in TPPs and NPPs together ($ 400 billion). Recently, there have been significant progressive changes in the quantitative and qualitative parameters there of wind power generation: the wind blades of the wind turbines extended; the heights of the wind turbines increased. Studies of the wind flows have shown that the vertical wind profiles are actually more sensitive to the elevation above the ground than previously thought. Besides, there is a doubling of the wind turbines' nominal capacity, thereby reducing both the area of coverage by wind turbines and the specific consumption of land withdrawn from agricultural use. In previous studies, only areas near the Black Sea and the Sea of Azov were identified as suitable for the wind farms, as a result of the combined effect of the above factors, significant territories in other regions of Ukraine that were previously considered as unfit for the deployment of cost-effective wind farms have been classified as promising. This article presents a geographic approach to the wind potential of Ukraine assessment. This approach provides sufficient accuracy, is much simpler, requires significantly less time and cost than the known approaches. Ref. 6, tabl. 4, fig. 8.
***Keywords**: wind power, technically achievable wind potential, wind power plant, geographical approach, zoning, installed capacity of wind power plant.*

© С.О. Кудря, Н.М. Мхітарян, Б.Г. Тучинський, О.О. Рєпкін, І.В. Іванченко, К.В. Петренко, 2020

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)



С.О. Кудря
S. Kudria

Відомості про автора: Директор Інституту відновлюваної енергетики НАН України, член-кореспондент НАН України, професор, доктор технічних наук.
Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», хіміко-технологічний факультет.
Наукова сфера: відновлювані джерела енергії, акумулювання енергії, енергоефективні технології, воднева енергетика.
Публікації: 376.
ORCID: 0000-0002-4798-6853
Контакти: тел./факс: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Author information: director of the Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS of Ukraine, professor, doctor of technical sciences.
Education: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Faculty of Chemical Technology.
Research area: renewable energy sources, energy storage, energy efficient technologies, hydrogen energy.
Publications: 376.
ORCID: 0000-0002-4798-6853
Contacts: tel./fax: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net



Н.М. Мхітарян
N. Mkhitaryan

Відомості про автора: Почесний директор Інституту відновлюваної енергетики НАН України, член-кореспондент НАН України, професор, доктор технічних наук.
Освіта: Єреванський політехнічний інститут за спеціальністю «Виробництво будівельних виробів і конструкцій».
Наукова сфера: відновлювані джерела енергії, енергоефективні технології, комплексні енергетичні системи.
Публікації: понад 200.
ORCID: 0000-0002-5918-4532
Контакти: тел./факс: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Author information: Honorary Director of the Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS of Ukraine, professor, doctor of technical sciences.
Education: Yerevan Polytechnic Institute, specialty "Production of building products and structures".
Research area: renewable energy sources, energy efficient technologies, hybrid renewable energy systems.
Publications: more than 200.
ORCID: 0000-0002-5918-4532
Contacts: tel./fax: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net



Б.Г. Тучинський
B. Tuchynskyi

Відомості про автора: старший науковий співробітник відділу вітроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України, старший науковий співробітник, кандидат економічних наук.
Освіта: Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, механіко-математичний факультет.
Наукова сфера: прикладна математика, обчислювальні методи в математиці, математична статистика, математичні моделі і методи в економіці, інвестиційний аналіз, вітроенергетика.
Публікації: 117.
ORCID: 0000-0002-5180-6886
Контакти: тел./факс: +38 (044) 206-28-09
e-mail: bortu77@yahoo.com

Author information: senior researcher at wind energy department at Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine, senior researcher, candidate of economic sciences.
Education: Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Mechanics and Mathematics.
Research area: applied mathematics, computational methods in mathematics, mathematical statistics, mathematical models and methods in economics, investment analysis, wind power.
Publications: 117.
ORCID: 0000-0002-5180-6886
Contacts: tel./fax: +38 (044) 206-28-09
e-mail: bortu77@yahoo.com



О.О. Рєпкін
A. Riepkin

Відомості про автора: Голова наглядової ради ТОВ Токмак Солар Енерджі, Голова енергетичної асоціації «Українська Воднева Рада».
Освіта: закінчив у 2002 році Національну академію Служби безпеки України за спеціальністю «Правознавство».
Наукова сфера: сонячна енергетика, воднева енергетика.
Публікації: 6.
ORCID: 0000-0002-3448-6729
Контакти: +38 068 899 33 99
e-mail: a.riepkin@me.com

Author information: Chairman of the Board of the company Tokmak Solar Energy, Head of the Energy Association «Ukrainian Hydrogen Council».
Education: graduated from the National Academy of Security Service of Ukraine in 2002 with a degree in Law.
Research area: solar power, hydrogen power.
Publications: 6.
ORCID: 0000-0002-3448-6729
Contacts: +38 068 899 33 99
e-mail: a.riepkin@me.com

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)



І.В. Іванченко
I. Ivanchenko

Відомості про автора: головний технолог відділу вітроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України.
Освіта: Київський національний університет технологій та дизайну, інженерно-економічний факультет.
Наукова сфера: вітроенергетика, оцінка вітроенергетичного потенціалу, економічна ефективність інвестицій в будівництво вітрових електростанцій.
Публікації: 30.
ORCID: 0000-0002-5083-4180
Контакти: тел./факс: +38 (044) 206-28-09
e-mail: mntcwind@gmail.com

Author information: chief technologist at wind energy department at Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine.
Education: Kiev National University of Technology and Design, Faculty of Engineering and Economics.
Research area: wind energy, assessment of wind energy potential, economic efficiency of investments in the construction of wind power plants.
Publications: 30.
ORCID: 0000-0002-5083-4180
Contacts: tel./fax: +38 (044) 206-28-09
e-mail: mntcwind@gmail.com



К.В. Петренко
K. Petrenko

Відомості про автора*:* головний технолог відділу вітроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України, магістр метеорології та кліматології
Освіта: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, географічний факультет, кафедра метеорології та кліматології.
Наукова сфера: метеорологія, кліматологія, картографія, вітроенергетика.
Публікації: 11.
ORCID: 0000-0002-2322-9030
Контакти: тел.: +38 (067) 129-07-43
e-mail: KaterynkaPetrenko@gmail.com

Author information: chief technologist of Wind Energy Department, Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine,
Master Degree (Meteorology and Climatology).
Education: Taras Shevchenko National University, Department of Meteorology and Climatology.
Research area: meteorology, climatology, cartography, wind power.
Publications: 11.
ORCID: 0000-0002-2322-9030
Contacts: тел.: +38 (067) 129-07-43
e-mail: KaterynkaPetrenko@gmail.com

Перелік використаних позначень та скорочень:

ЄС – Європейський Союз;
ВЕС – вітрова електростанція;
ТЕС –теплова електростанція;
АЕС – атомна електростанція;
МС – метеостанція;
ВЕУ – вітрова електроустановка;
КВНП – коефіцієнт використання номінальної потужності;
КВВП – коефіцієнт використання встановленої потужності;
ТДВП – технічно-досяжний вітропотенціал;
GIS – геоінформаційна система;
МВт – мегават;
ГВт –гігават.

Вступ. Електроенергія є товаром, специфіка якого полягає у наступному:

1. Попит на електроенергію має сталу тенденцію до зростання.

2. Пропозиція електроенергії теплових і атомних електростанцій обмежується, головним чином, вичерпаністю світових запасів відповідних енергоносіїв і їх нерівномірним розподілом між країнами.

Останнє створює політичну і економічну залежність країн-імпортерів енергоносіїв від країн, що енергоносії експортують. Тому, починаючи з 70-х років XX ст., держави багатьох країн світу запровадили законодавчу і фінансову підтримку розвитку відновлюваної енергетики, зокрема, вітроенергетики. Ця технологія здійснює генерацію електроенергії шляхом перетворювання енергії вітру без закупівлі імпортних енергоносіїв.

На початку XXI ст. в розвитку світової вітроенергетики відбулися радикальні зміни. Ця галузь стала першою з галузей відновлюваної енергетики, що увійшла до складу "великої" електроенергетики. Деякі підсумки цього процесу представлено в табл. 1 [1].

Таблиця 1. Результати розвитку вітроенергетики Європи за 2018 р.

Table 1. European Wind Energy Development Results 2018

Країна	Частка вітроенергетики в загальній генерації електроенергії, %
Данія	41
Ірландія	27
Португалія	24
Німеччина	21
ЄС	14

На сьогодні вітроенергетика є, і буде в перспективі, найбільш привабливою для інвесторів галуззю європейської електроенергетики. Так, за прогнозом [2] авторитетного Міжнародного енергетичного агентства (IEA), в ЄС сума інвестицій у

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

вітроенергетику в період 2014-2035 рр. становитиме 727 $млрд і буде найвищою серед галузей електроенергетики – в 1.8 рази вищою, ніж в ТЕС і АЕС разом (400 $млрд).

Оцінки минулих років і необхідність їх перегляду. Як зазначалось в [3], для обґрунтування стратегічних рішень щодо розвитку електроенергетики, виникла необхідність отримання оцінок максимальної сумарної потужності технічно можливих і економічно ефективних вітрових електростанцій (ВЕС), створених на території кожної країни. В 1990-2005 рр. відповідні дослідження ТДВП України здійснювались рядом закордонних організацій і компаній. Отримані оцінки становили 14-24 ГВт [3].

Але за час, що минув, відбулись суттєві прогресивні зміни кількісних і якісних параметрів генерації електроенергії ВЕС, а саме:

1. Подовжились лопаті ВЕУ.
2. Збільшились висоти веж ВЕУ.
3. Дослідження вітрових потоків показали, що вертикальні профілі вітру фактично є більш чутливими до збільшення висоти над землею, ніж припускалось раніше.

В табл. 2 в якості прикладу подано результати відповідних розрахунків за даними спостережень швидкості вітру на типовій українській МС «Біла Церква» (рис. 1) протягом валідного періоду 1988-2009 рр.

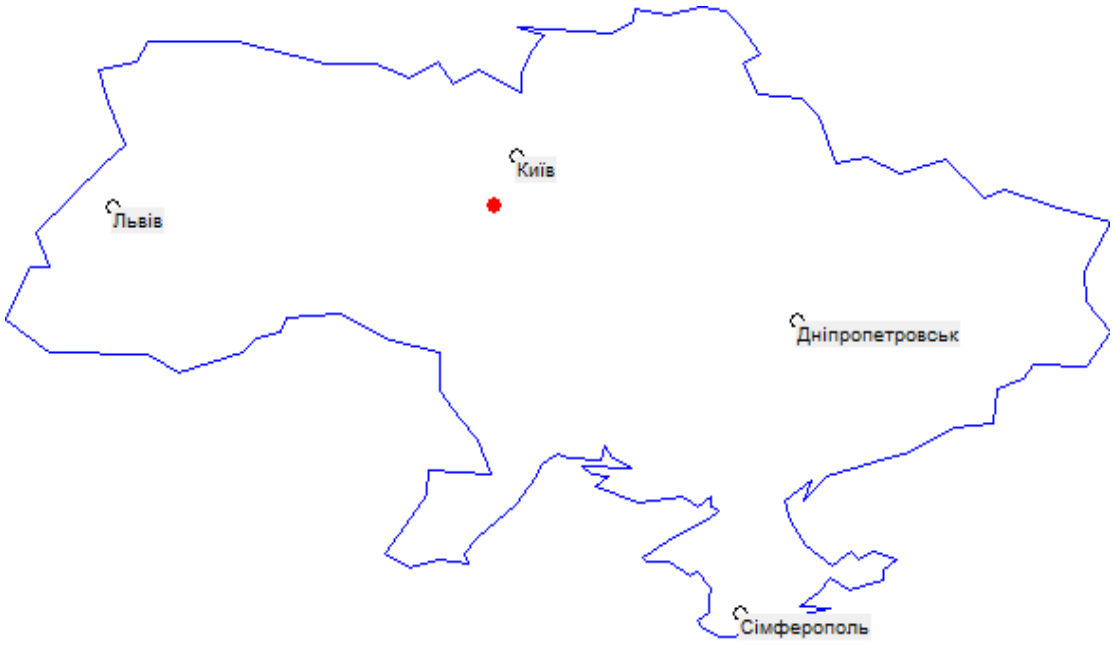


Рис. 1. Локалізація МС «Біла Церква».

Fig. 1. Localization of Weather Station "Bila Tserkva".

Таблиця 2. Вплив факторів на КВНП ВЕУ.

Table 2. Factors influence on Capacity Factor of wind turbines.

Модель ВЕУ	Діаметр вітроколеса, м	Висота осі ротора, м	Параметр Хеллмана	КВНП
Vestas V80-2.0	80	60	0.14	0.125
	80	60	0.20	0.171
	80	100	0.14	0.152
	80	100	0.20	0.221
Vestas V110-2.0	110	100	0.14	0.265
	110	100	0.20	0.346

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Аналіз табл. 2 засвідчує, що спільна дія трьох зазначених факторів призводить до збільшення виробітку електроенергії ВЕУ втричі без зміни потужності ВЕУ, що є основним чинником підвищення ТДВП. Крім того, має місце подвоєння номінальної потужності ВЕУ, за рахунок чого зменшуються як площі покриття ВЕС, так і питомі витрати землі, вилученої з сільськогосподарського використання.

Якщо у вищезгаданих попередніх дослідженнях придатними для ВЕС визначались лише зони Причорномор'я і Приазов'я, то в результаті спільної дії перелічених факторів значні території в інших регіонах України, що раніше вважались непридатними для розміщення економічно ефективних ВЕС, перейшли до категорії перспективних.

В статті [3] представлено аналітичний огляд удосконаленої методики оцінювання ТДВП Європейського агентства з охорони довкілля (ЕЕА) [4] з використанням сучасних засобів геоінформаційних систем (GIS), баз даних характеристик вітру (в тому числі – дані реаналізу), баз даних технічних параметрів ВЕУ, що дозволило зробити отримані оцінки більш обґрунтованими.

Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (IRENA) використало зазначену методику [4] для отримання нових уточнених оцінок вітропотенціалу країн південно-східної Європи, зокрема, для України [5]. Загальна встановлена потужність наземних (офшорних) ВЕС в Україні оцінюється в [5] в 320 ГВт. В [6] аналогічне дослідження показало відповідну оцінку 393 ГВт.

Зазначені вище зміни параметрів генерації електроенергії ВЕС та методик оцінювання ТДВП вимагають перегляду підходів.

В даній статті представлено географічний підхід до оцінювання ТДВП територій України. Цей підхід забезпечує точність оцінки ТДВП, є значно простіший, потребує значно менше витрат часу і коштів, ніж підхід, викладений в [2, 6].

Географічне зонування – основа оцінки вітропотенціалу України. Оцінку потенціалу встановленої потужності українських ВЕС здійснено на основі географічного підходу. Як відомо, виробіток електроенергії ВЕС суттєво залежить від природних умов розташування площадки ВЕС. Територія суходолу України за природними умовами поділяється на чотири природні зони (рис. 2).

Для кожної природної зони є притаманними свої однорідні географічні умови, зокрема, умови вітроутворення. В той же час, інші умови, природні і антропогенні, що мають значення для розміщення ВЕС, всередині кожної природної зони можуть варіюватись.

Характерні ландшафти природних зон України представлено на рис. 3-7.

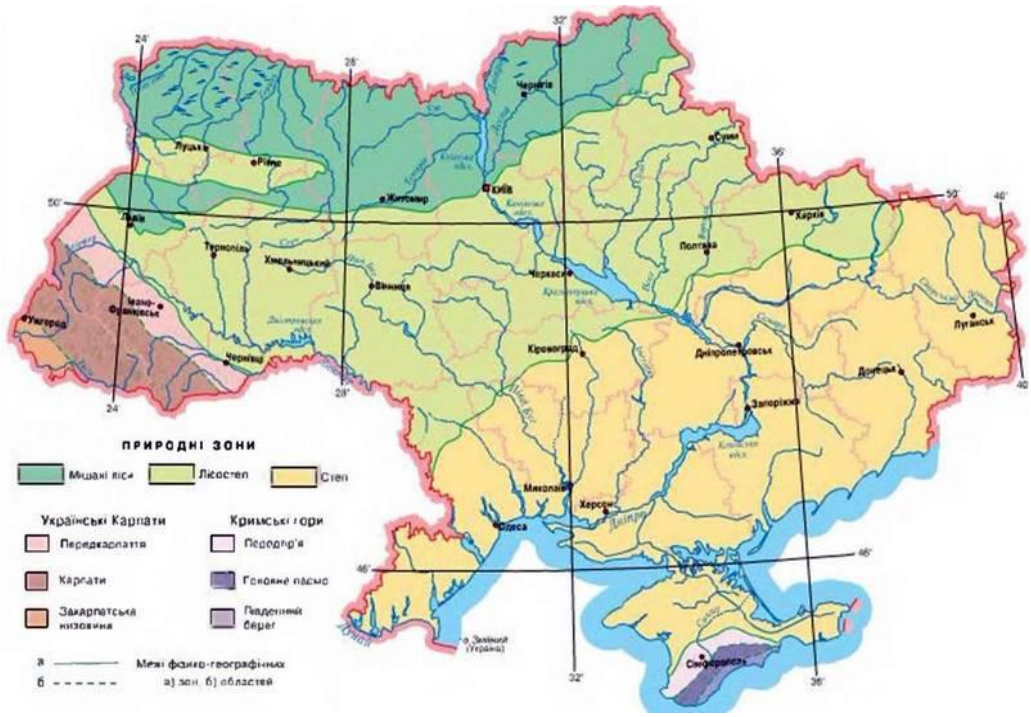


Рис. 2. Карта природних зон України [7].

Fig. 2. Map of natural areas of Ukraine [7].

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)



Рис. 3. Український степ.

Fig. 3. Ukrainian steppe.



Рис. 4. Український лісостеп.

Fig. 4. Ukrainian forest-steppe.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)



Рис. 5. Мішані ліси України.

Fig. 5. Mixed forests of Ukraine.



Рис. 6. Українські Карпати.

Fig. 6. Ukrainian Carpathian Mountains.

a 

Рис. 7. Кримські гори.

Fig. 7. Crimean mountains.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

З рис. 3-7 видно, що найскладнішими для будівництва ВЕС є гірські райони. Будівництво ВЕС в цих районах потребує суттєвого збільшення витрат часу і коштів на вибір площадок для ВЕС, доставку ВЕУ і кранів, прокладання шляхів і ліній електропередачі, обслуговування тощо.

З інших причин малопривабливою для будівництва ВЕС є лісова зона. Ліси є природніми перешкодами вітровим потокам. Дерева, навіть суттєво нижчі нижнього краю вітроколеса ВЕУ, збільшують турбулентність відповідного вітрового потоку, що зменшує виробіток електроенергії ВЕУ і прискорює її знос.

Територія зони лісостепу, що залишається після вилучення лісових ділянок і перешкод антропогенного характеру, є цілком придатною для реалізації економічно ефективних інвестиційних проектів ВЕС.

Найбільш привабливою для реалізації таких проектів є степова зона. Сильні вітри в холодну пору року, в теплу пору року зменшують свою силу, але компенсують це зменшення додатковими локальними вітрами – бризами. Наявність в степовій зоні потужних морських портів і мереж автошляхів спрощують вирішення проблем логістики.

На рис. 8 подано дані щодо нормативно-грошової оцінки землі для областей України [8].

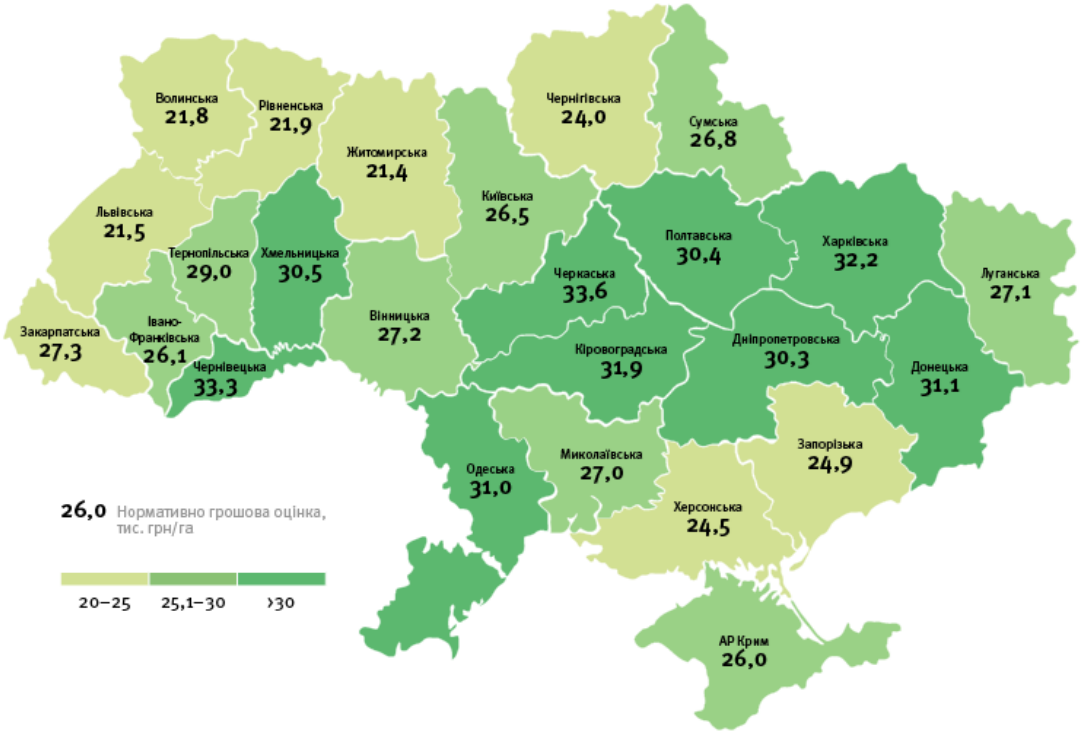


Рис. 8. Карта розподілу нормативно-грошової оцінки вартості землі сільськогосподарського призначення.

Fig. 8. Map of the distribution of the regulatory monetary value of agricultural land.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

З порівняння карт на рис. 2 і на рис. 8, випливає, що землі п'яти регіонів степової зони є низько продуктивними і, як наслідок, низько вартісними. Це – АР Крим і області – Миколаївська, Херсонська, Запорізька і Луганська. Загальна площа цих земель, низько продуктивних для землеробства, але цілком придатних і економічно вигідних для ВЕС, становить 10 000 тис га = 100 тис кв км.

Україна має потужні ресурси вітрової офшорної енергії (рис. 9).



Рис. 9. Карта основних акваторій території України.

Fig. 9. Map of the main water areas of Ukraine.

Мілководні території акваторій Азовського та Чорного морів, Дніпровського каскаду і Дністровських водосховищ, затоки Сиваш та ін. дозволяють будувати економічно ефективні офшорні ВЕС.

Оцінювання потенціалу встановленої потужності ВЕС України.

Припущення щодо значень параметрів:

Номінальна потужність ВЕУ – 3 МВт.

Щільність розстановки ВЕУ – 4 ВЕУ на 1 кв км території.

Мінімальний КВВП-нетто:

– 0.31 для оншорних ВЕС;

– 0.45 для офшорних ВЕС.

Питоме землевідведення:

- фундамент з площадкою – 0.3 га/ВЕУ;
- ПС – 0.2 га/ВЕУ;
- дороги – 0.5 га/ВЕУ;
- **РАЗОМ – 1.0 га/ВЕУ (за даними фактичних витрат землі для проектів ВЕС на базі сучасних моделей ВЕУ).**

Результати розрахунків потенціалу потужності ВЕС в Україні.

В табл. 3-4 подано результати розрахунків потенціалу потужності наземних (оншорних) і офшорних ВЕС в Україні.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Таблиця 3. Початкові дані і результати оцінювання потенціалу встановленої потужності наземних (оншорних) ВЕС на території України.

Table 3. Initial data and results of the evaluation of potential installed capacity of land (onshore) wind farm in Ukraine.

№	Природна зона	Площа, тис кв км	Експертна оцінка частки території зони, придатної для ВЕС, %	Площа території для ВЕС, тис кв км	Кількість ВЕУ, тис шт	Потенціал потужності ВЕС, ГВт	Площа відведеної землі, тис га
1	Степ	240	10.0	24.0	96.0	288	96.0
2	Лісостеп	202	5.0	10.0	40.0	120	40.0
3	Ліс	113	1.9	2.2	8.6	26	8.6
4	Гори	45	0.7	0.3	1.3	4	1.3
5	**Разом**	**600**	6.1	36.5	145.9	438	145.9

Таблиця 4. Вихідні параметри і результати оцінювання потенціалу встановленої потужності офшорних ВЕС на території України.

Table 4. Input parameters and results of the evaluation of potential installed capacity of offshore wind farms in Ukraine.

№	Акваторія	Площа мілководдя, кв км	Експертна оцінка частки території зони, придатної для ВЕС, %	Площа для ВЕС, кв км	Щільність розстановки, МВт/кв км	Потужність ВЕС, ГВт
1	Азовське та Чорне море (укр.)	19000	30	5700	35	199.5
2	Залив Сиваш	2500	25	625	30	18.8
3	Дніпровський каскад	6888	15	1033	25	25.8
4	Лимани	1500	15	225	25	5.6
5	**Разом**	**29888**	**25**	**7583**		**249.7**

Висновки. З поданих в табл. 3-4 даних випливає, що географічні умови території суходолу України дозволяють побудувати 438 ГВт економічно ефективних ВЕС на базі сучасних моделей ВЕУ трьохмегаватного класу. Разом з потенціалом офшорних ВЕС це становитиме 438 + 250 = 688 ГВт з середньозваженою нижньою границею КВВП-нетто 0.36. Відповідний річний виробіток електроенергії становитиме майже 2200 млрд кВт·год, що більш, ніж вдесятеро, перевищує річне поточне споживання електроенергії в Україні.

1. Ветроэнергетика Европы: официальные итоги 2018 года.[Електронний ресурс].URL: https://elektrovesti.net/64642_vetroenergetika-evropy-ofitsialnye-itogi-2018-goda.

2. World Energy Investment Outlook. Special Report. OECD/IEA. 2014. 190 p. [Електронний ресурс]. URL: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEIO2014.pdf.

3. *Кудря С.О., Тучинський Б.Г., Іванченко І.В.* Аналітичний огляд оновлених оцінок щодо перспектив розвитку вітроенергетики. Відновлювана енергетика. 2019. № 3(58). С. 42-47.

4. Europes onshore and offshore wind energy potential. An assessment of environmental and economic constraints. EEA Technical report. 2009. № 6. 90 p. [Електронний ресурс]. URL: https://www.eea.europa.eu/publications/europes-onshore-and-offshore-wind-energy-potential.

5. Cost-competitive renewable power generation: Potential across South East Europe. IRENA. 2017. 124 p.

6. *Макаровский Е.Л., Зиныч В.О.* Методика оценки ветрового энергетического потенциала. Збірник наукових праць «Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки». Харків. УкрНДІЕП. 2011. С. 211-228.

7. Природні зони України. Карта природних зон. [Електронний ресурс]. URL: https://school.home-task.com/prirodni-zoni-ukrayini-karta-prirodnix-zon/.

8. Інфографіка — розмір нормативної грошової оцінки 1 га с/г землі в усіх областях України на 2019 рік. [Електронний ресурс]. URL: https://agropolit.com/news/11019-infografika--rozmir-normativno-groshovoyi-otsinki-1-ga-s-g-zemli-v-usih-oblastyah-ukrayini-na-2019-rik.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

REFERENCES

1. Vetroenergetika Europe: ofitsialnyye itogi 2018 goda. [Wind energy in Europe: official results of 2018]. [Electronic resource]. URL: https://elektrovesti.net/64642_vetroenergetika-evropy-ofitsialnye-itogi-2018-goda. [in Russian].

2. World Energy Investment Outlook. Special Report. OECD/IEA. 2014. 190 p. [Electronic resource]. URL: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEIO2014.pdf. [in English].

3. *Kudria S.O., Tuchynskyi B.H., Ivanchenko I.V.* Analitychnyi ohliad onovlenykh otsinok shchodo perspektyv rozvytku vitroenerhetyky.[Analytical review of the updated estimates of the prospects for the development of wind energy]. Vidnovluvana energetika. 2019. № 3(58). Pp. 42-47. [in Ukrainian].

4. Europes onshore and offshore wind energy potential. An assessment of environmental and economic constraints. EEA Technical report. 2009. № 6. 90 p. [Electronic resource]. URL: https://www.eea.europa.eu/publications/europes-onshore-and-offshore-wind-energy-potential. [in English].

5. Cost-competitive renewable power generation: Potential across South East Europe. IRENA. 2017. 124 p. [in English].

6. *Makarovskij E.L., Zinych V.O.* Metodika ocenki vetrovogo energeticheskogo potenciala. [Methodology for wind energy potential assessment]. Zbirnyk naukovykh prats «Problemy okhorony navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha ta ekolohichnoi bezpeky». Kharkiv. UkrNDIEP. 2011. Pp. 211-228. [in Russian].

7. Pryrodni zony Ukrainy. Karta pryrodnykh zon. [Electronic resource]. URL: https://school.home-task.com/prirodni-zoni-ukrayini-karta-prirodnix-zon/. [in Ukrainian].

8. Infohrafika — rozmir normatyvnoi hroshovoi otsinky 1 ha s/h zemli v usikh oblastiakh Ukrainy na 2019 rik. [Infographic - the size of the regulatory monetary assessment of 1 ha of agricultural land in all regions of Ukraine for 2019] [Electronic resource]. URL: https://agropolit.com/news/11019-infografika--rozmir-normativno-groshovoyi-otsinki-1-ga-s-g-zemli-v-usih-oblastyah-ukrayini-na-2019-rik. [in Ukrainian].

ПРИЧИНЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРЕСМОТРА ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ УКРАИНЫ

С.А. Кудря[1], чл.-кор. НАН Украины, докт. техн. наук, проф., **Н.М. Мхитарян**[1], чл.-кор. НАН Украины, докт. техн. наук, проф., **Б.Г. Тучинский**[1], канд. экон. наук, ст. науч. сотруд., **А.А. Репкин**[2], глава наблюдательного совета ООО Токмак Солар Энерджи, глава энергетической ассоциации «Українська воднева рада», **И.В.Иванченко**[1], **Е.В. Петренко**[1].

[1]Институт возобновляемой энергетики НАН Украины,
02094, ул. Г. Хоткевича, 20А, г. Киев, Украина.
[2]Общественный союз «Энергетическая ассоциация «Українська воднева рада»,
01015, ул. Лаврская, 16, г. Киев, Украина.

Цель статьи – современная оценка ветропотенциала Украины и перспектив развития ветроэнергетики. Спрос на электроэнергию имеет устойчивую тенденцию к росту, а предложение электроэнергии тепловых и атомных электростанций ограничивается, главным образом, исчерпанием мировых запасов соответствующих энергоносителей и их неравномерным распределением между странами. Последнее создает политическую и экономическую зависимость стран-импортеров энергоносителей от стран-экспортеров энергоносителей. По прогнозу Международного энергетического агентства (IEA), в ЕС сумма инвестиций в ветроэнергетику в период 2014-2035 гг. составит 727 $ млрд и будет самой высокой среди отраслей электроэнергетики - в 1.8 раза выше, чем в ТЭС и АЭС вместе (400 $ млрд). За последнее время произошли существенные прогрессивные изменения количественных и качественных параметров генерации электроэнергии ВЭС, а именно: удлинились лопасти ветровых электроустановок (ВЭУ), увеличились высоты башен ВЭУ. Исследования ветровых потоков показали, что вертикальные профили ветра фактически являются более чувствительными к увеличению высоты над землей, чем предполагалось ранее. Кроме того, имеет место удвоение номинальной мощности ВЭУ, за счет чего уменьшаются как площади покрытия ВЕС, так и удельные расходы земли, изъятой из сельскохозяйственного пользования. Если в предыдущих исследованиях пригодными для ВЭС считались только зоны Причерноморья и Приазовья, то в результате совместного действия перечисленных факторов значительные территории в других регионах Украины, ранее считавшиеся непригодными для размещения экономически эффективных ВЭС, перешли в категорию перспективных. В данной статье представлен географический подход к оценке ветропотенциала территории Украины. Этот подход значительно проще, требует значительно меньше затрат времени и средств, чем известные подходы. Библ. 6, табл. 4, рис. 8.

Ключевые слова: *ветроэнергетика, технически достижимый ветропотенциал, ветровая электростанция, географический подход, зонирование, потенциал установленной мощности ВЭС.*

Стаття надійшла до редакції 28.01.20
Остаточна версія 10.03.20

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

УДК 620.91 DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).17-22

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ СОНЯЧНОГО ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

С.В. Матях, канд. техн. наук, **Т.В. Суржик,** канд. техн. наук, **В.Ф. Рєзцов,** чл.-кор. НАН України, докт. техн. наук,

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

Використання сучасних сонячних колекторів забезпечує високий рівень освоєння енергії сонячного випромінювання та стабільність гарячого водопостачання на протязі всього року на всій території України. На сучасному етапі розвитку сонячної теплоенергетики на перше місце виходять проблеми ефективного використання енергії сонячної радіації за рахунок застосування передових технологій та встановлення оптимальних параметрів енергетичного обладнання.
Представлений в роботі порядок визначення ефективності використання систем сонячного гарячого водопостачання забезпечує отримання енергетичних та економічних параметрів сонячного теплоенергетичного обладнання у конкретній місцевості, визначення типу і параметрів геліоустановок для їх максимально ефективного застосування.
Вибір типу та продуктивності сонячних колекторів для певної місцевості в першу чергу орієнтовано на потреби конкретного споживача та питомі показники з надходження сонячної радіації в даній місцевості (середньомісячна і середньорічна кількість прямої, розсіяної та сумарної сонячної радіації). На основі представлених даних визначається приведена добова інтенсивність поглинання сонячним колектором сонячної радіації із врахуванням робочих параметрів геліотехнічної установки та оптимального кута нахилу до горизонту. Розрахункові енергетичні параметри надалі використовуються для встановлення економічної ефективності, строку окупності геліоустановки та екологічної ефективності за рахунок зменшення викидів вуглекислого газу. Сонячне теплопостачання в Україні має достатній досвід використання і розвинену нормативну базу для проектування, а технологічний потенціал промисловості дозволяє вирішити завдання масового виробництва геліотехнічного обладнання. Запропонований порядок оперативного встановлення ефективності впровадження систем сонячного гарячого водопостачання для потенційних споживачів сприятиме широкому освоєнню сонячної теплової енергії на всій території України і, відповідно, зменшенню обсягів використання органічного палива та поліпшенню стану оточуючого середовища. Бібл. 7, табл. 2.
Ключові слова: *сонячна теплоенергетика, сонячний колектор, гаряче водопостачання.*

DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF SOLAR HOT WATER SYSTEMS IMPLEMENTATION

S. Matyakh, candidate of technical science, **T. Surzhyk,** candidate of technical science, **V. Ryeztsov,** corresponding member of the NAS of Ukraine, doctor of technical science

Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine,
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv, Ukraine.

The use of modern solar collectors ensures a high level of utilization of solar radiation energy and the stability of hot water supply throughout the year throughout Ukraine. At the present stage of development of solar thermal power engineering, the problems of efficient use of energy of solar radiation come to the first place due to the use of advanced technologies and establishment of optimal parameters of power equipment.
The procedure for determining the efficiency of using solar hot water systems presented in the paper provides obtaining energy and economic parameters of solar thermal power equipment in a particular locality, determining the type and parameters of solar installations for their maximum effective use.
The choice of type and performance of solar collectors for a particular area is primarily focused on the needs of a particular consumer and specific indicators of solar radiation in the area (monthly and annual average amount of direct, scattered and total solar radiation). Based on the presented data, the daily absorption intensity of the solar collector of solar radiation is determined, taking into account the operating parameters of the solar engineering installation and the optimal angle of inclination to the horizon. The estimated energy parameters are further used to establish cost-effectiveness, payback time and environmental performance by reducing carbon dioxide emissions. Solar heat supply in Ukraine has sufficient experience in the use and development of a normative base for design, and the technological potential of the industry allows to write out the tasks of mass production of heliotechnical equipment. The proposed procedure for prompt establishment of the efficiency of the introduction of solar hot water systems for potential consumers will contribute to the widespread utilization of solar thermal energy throughout Ukraine and, consequently, to reducing the use of organic fuel and improving the state of the environment. Ref. 7, tabl. 2.
Keywords: *solar thermal power, solar collector, hot water supply.*

© С.В. Матях, Т.В. Суржик, В.Ф. Рєзцов, 2020

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)



С.В. Матях
S. Matyakh

Відомості про автора: старший науковий співробітник в Інституті відновлюваної енергетики НАН України.
Освіта: Національний технічний університет України. «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», спеціальність – Програмне забезпечення автоматизованих систем.
Наукова сфера: сонячна енергетика, моделювання енергетичних процесів.
Публікації: 31.
ORCID: 0000-0002-1707-3519
Contacts: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Autor information: senior researcher Institite or Renewable energy of NAS of Ukraine.
Education: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», specialty – automated systems software.
Research area: solar power engineering, simulation of energy-intensive processes.
Publications: 31.
ORCID: 0000-0002-1707-3519
Contacts: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net



Т.В. Суржик
T. Surzhyk

Відомості про автора: кандидат технічних наук, вчений секретар Інституту відновлюваної енергетики НАН України.
Освіта: Київський інженерно-будівельний інсти-тут, спеціальність – теплогазопостачання та вентиляція.
Наукова сфера: відновлювана енергетика.
Публікації: 187. 2 монографії, 26 патентів.
ORCID: 0000-0002-1418-7748
Контакти: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Autor information: Kandidate of science, Science secretary in the Institute of Renewable Energy of the National Academy the Sciences of Ukraine
Education: Kyivs Engineering Building – Institute, specialty – gas-heating and ventilation
Research area: renewable energy.
Publications: 187. 2 monographs, 26 patents.
ORCID: 0000-0002-1418-7748
Contacts: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net



В.Ф. Рєзцов
V. Rieztsov

Відомості про автора: чл.-кор. НАН України, докт. техн. наук, професор, заступник директора з наукових питань, завідувач відділу сонячної енергетики в Інституті відновлюваної енергетики НАН України.
Освіта: Харківський авіаційний інститут, факультет двигунів літальних апаратів, спеціальність – інженер-механік.
Наукова сфера: відновлювана енергетика.
Публікації: 308. 5 монографій, 20 патентів.
ORCID: 0000-0003-2926-1733
Contacts: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Autor information: Corresponding Member of NAS of Ukraine, DoctorTechnical Sciences, Professor, Deputy Director of Research, The Head of Department Solar Energy Institute of Renewable Energy of the National Academy the Sciences of Ukraine.
Education: Kharkiv Aviation Institute, Faculty of Aircraft Engine Engines, specialty – mechanical engineer.
Research area: renewable energy.
Publications: 308. 5 monographs, 20 patents.
ORCID: 0000-0003-2926-1733
Contacts: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Вступ. З усіх відновлюваних джерел сонячна енергія є найбільш доступним природним енергоресурсом і в контексті її використання накопичено багатовіковий історичний досвід. Переваги практично невичерпного джерела енергії сонячної радіації як первинного місцевого енергоресурсу полягають у можливості використання на більшості ділянок поверхні Землі та в можливості безпосереднього перетворення енергії сонячної радіації в теплову та електричну енергію.

Сонячна теплова енергетика – один із перспективних напрямів використання енергії Сонця на території України. На сучасному етапі її розвитку на перше місце виходять проблеми ефективного використання енергії сонячної радіації за рахунок застосування передових технологій та встановлення оптимальних параметрів енергетичного обладнання. Сучасні сонячні колектори забезпечують високий рівень освоєння енергії сонячного випромінювання та стабільність гарячого водопостачання на протязі всього року.

Постановка задачі. Для підвищення рівня впровадження систем сонячного гарячого водопостачання запропоновано алгоритм визначення ефективності їх використання, який забезпечує отримання енергетичних та економічних параметрів сонячного теплоенергетичного обладнання у конкретній місцевості, визначення типу і параметрів геліоустановок для їх максимально ефективного використання.

Основними параметрами, що використовуються при визначенні ефективності впровадження сонячних теплових енергоустановок є інтенсивність надходження сонячної радіації і температура зовнішнього повітря.

Сумарне сонячне випромінювання, що поступає на любу поверхню, складається з прямої і розсіяної сонячної радіації та випромінювання, що відбивається від поверхні Землі і різних предметів, розташованих поблизу цієї поверхні.

Величина енергії сонячної радіації в значній мірі залежить від астрономічних та метеорологі-

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

чних факторів − висоти Сонця над горизонтом і тривалості дня, хмарності, вологості та прозорості атмосфери.

Надходження сумарної сонячної радіації змінюється на протязі дня, року та з року в рік, однак середньорічні її значення за багаторічний період достатньо стійкі.

Крім того, змінними величинами є самі складові сумарної сонячної радіації (пряма та розсіяна сонячна радіація), причому часто збільшення однієї з величин приводить до зменшення іншої, майже не впливаючи на їх суму. Складова прямої сонячної радіації в добовій сумі сонячної радіації, що попадає на горизонтальну поверхню Землі, може знаходитись в діапазоні від 90% в дуже ясний день і до 0% в дуже хмарний день. Величина сумарної сонячної радіації із збільшенням висоти місцевості до 200 м практично не змінюється − в даному випадку змінюється співвідношення її складових − збільшення величини прямої сонячної радіації компенсується зменшенням величини розсіяної сонячної радіації. Як правило, найбільшу долю в сумарній сонячній радіації складає пряма радіація (за виключенням зимових місяців і окремих районів, наприклад, північних) [1, 2].

Величина та співвідношення складових сумарної сонячної радіації необхідні для вибору типу геліоенергетичного обладнання. В регіонах, де переважає пряма сонячна радіація, можна застосовувати сонячні колектори з концентраторами сонячного випромінювання. Розсіяне сонячне випромінювання не можна сконцентрувати за допомогою дзеркал. Якщо значна частина сонячної радіації поступає у вигляді розсіяної, тоді використовують плоскі сонячні колектори, які збирають як пряме, так і розсіяне сонячне випромінювання і можуть ефективно застосовуватись не тільки в ясні , але й в хмарні дні.

При виборі типу та потужності сонячної теплової енергоустановки для певної місцевості в першу чергу необхідно орієнтуватись на питомі показники з надходження сонячної радіації в даній місцевості (середньомісячна і середньорічна кількість прямої, розсіяної та сумарної сонячної радіації), продуктивність геліотехнічної установки [1 - 4].

Розрахункові питомі енергетичні показники надходження сонячної енергії на горизонтальну поверхню в різних регіонах України визначені за даними щодо надходження сонячної радіації на діючих в Україні метеостанціях − прямої сонячної радіації, розсіяної сонячної радіації та сумарної сонячної радіації представлено в таблиці 1 [5, 6].

Таблиця 1. Надходження сонячної енергії на горизонтальну поверхню в регіонах України: S – прямої сонячної радіації, D – розсіяної сонячної радіації, (S +D) – сумарна радіація.

Table 1. Solar energy supply to the horizontal surface in the regions of Ukraine: S - direct solar radiation, D - diffuse solar radiation, (S + D) - total radiation.

Область	Радіація, кВт.год/м^2	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1. Чернігівська (Придеснянська МТС)	S	4,656	10,475	27,94	48,89	77,99	83,81	84,97	73,33	45,40	24,44	8,148	4,656	494,7
	D	20,95	31,43	51,22	59,36	81,48	76,82	83,81	67,51	48,89	32,59	13,97	10,476	578,5
	S +D	25,61	41,91	79,16	108,25	159,47	160,63	168,78	140,84	94,29	57,03	22,12	15,13	1073,2
2. Сумська (КонотопськаМТС)	S	4,656	13,97	36,08	47,72	74,5	84,97	91,96	74,5	51,22	20,95	6,94	3,49	511
	D	19,79	27,94	47,72	62,86	82,64	81,48	82,64	68,68	48,89	31,43	15,13	12,8	582
	S +D	24,45	41,91	83,80	110,58	157,14	166,45	174,6	143,18	100,11	52,38	22,07	16,29	1093
3. Волинська (Ковельська МТС)	S	4,656	11,64	38,41	46,56	69,84	84,97	74,5	60,53	45,4	20,95	6,98	4,656	469,02
	D	20,95	31,43	52,38	64,02	83,81	84,97	84,97	72,17	52,38	34,92	15,13	12,8	609,94
	S +D	25,61	43,07	90,79	110,58	153,65	169,94	159,47	132,7	97,78	55,87	22,11	17,46	1078,96
4. Київська (Тетерівська МТС)	S	4,656	11,64	33,76	48,89	73,33	86,14	87,3	71,0	45,4	24,44	5,82	3,49	495,86
	D	22,12	29,1	46,56	68,68	75,66	80,32	80,32	62,86	50,05	32,6	16,3	10,48	575,02
	S +D	26,78	40,74	80,32	117,57	148,99	166,46	167,62	133,86	95,45	57,04	22,12	13,97	1070,88
5. Київська (МТС м. Києва)	S	6,98	15,13	36,08	53,54	82,64	98,94	95,45	82,64	57,04	29,1	6,98	4,66	569,2
	D	19,79	26,77	47,72	62,86	79,15	83,81	81,48	66,35	48,89	33,76	17,46	13,97	582
	S +D	26,77	41,9	83,8	116,4	161,8	182,75	176,93	149,0	105,93	62,86	24,44	18,63	1151,2
6. Київська (Баришівська МТС)	S	8,15	13,97	30,26	54,71	79,15	94,28	97,78	79,15	52,38	27,94	8,15	3,49	549,41
	D	19,79	26,77	41,9	65,18	76,82	83,81	81,48	66,35	48,89	31,45	17,46	11,64	571,52
	S +D	27,94	40,74	72,16	119,89	155,97	178,09	179,26	145,5	101,27	59,37	25,61	15,13	1120,93
7. Київська (Бориспільська МТС)	S	6,98	13,97	29,1	53,54	87,3	91,96	97,78	76,82	52,38	29,1	6,98	3,49	549,41
	D	20,95	29,1	43,07	66,35	80,32	83,81	79,15	66,35	50,05	31,43	17,46	12,8	580,84
	S +D	27,93	43,07	72,17	119,89	167,62	175,77	176,93	143,17	102,43	60,53	24,44	16,29	1130,24

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Область	Радіація, кВт.год/м^2	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8. Хмельницька (Нова Ушиця МТС)	S	8,15	16,3	38,41	54,71	72,17	88,46	94,28	80,32	60,53	31,43	8,15	6,98	559,88
	D	24,44	33,76	54,71	66,35	84,97	83,81	83,81	67,51	48,89	33,76	18,62	16,3	616,92
	S +D	32,59	50,06	93,12	121,06	157,14	172,27	178,09	147,83	109,42	65,19	26,77	23,28	1176,8
9. Луганська (Деркульська МТС)	S	9,31	19,79	50,05	74,5	98,94	130,37	116,4	107,09	73,33	25,61	11,64	4,66	721,7
	D	20,95	31,43	52,38	55,87	68,68	71,0	73,33	61,69	45,4	33,76	20,95	15,13	550,57
	S +D	30,26	51,22	102,43	130,37	167,62	201,37	189,73	168,78	118,73	59,37	32,59	19,79	1272,25
10. Кропивницька	S	8,15	17,46	36,08	60,53	77,99	98,94	102,43	89,63	69,84	34,92	9,31	4,66	609,94
	D	19,79	29,1	48,89	55,87	82,64	77,99	82,64	61,69	40,74	30,26	16,3	16,3	562,2
	S +D	27,94	46,56	84,97	116,4	160,63	176,93	185,07	151,32	110,58	65,18	25,61	20,96	1172,15
11. Донецька, (Велико-Анадольська МТС)	S	8,15	17,46	39,58	60,53	88,47	108,25	116,4	104,76	73,33	37,25	10,45	3,49	668,14
	D	22,12	31,43	54,71	60,53	79,15	74,5	74,5	61,7	44,23	33,76	20,95	18,62	576,2
	S +D	30,27	48,89	94,29	121,06	167,62	182,75	190,9	166,46	117,56	71,01	31,40	22,11	1244,34
12. Закарпатська	S	9,31	15,13	44,23	62,86	82,64	91,96	90,79	87,3	71,0	39,58	10,48	6,98	612,26
	D	20,95	30,26	48,89	62,86	82,64	82,64	84,97	71,0	50,05	34,92	20,95	11,64	601,8
	S +D	30,26	45,39	93,12	125,72	165,28	174,6	175,76	158,3	121,05	74,5	31,43	18,62	1214,05
13. Одеська (МТС м. Одеса)	S	9,31	16,3	43,07	76,82	114,07	130,37	143,17	121,06	84,97	39,58	12,8	8,15	799,67
	D	23,28	30,26	51,22	64,02	73,33	71,0	67,51	57,04	45,4	39,58	22,12	19,79	564,55
	S +D	32,59	46,56	94,29	140,84	187,4	201,37	210,68	178,10	130,37	79,16	34,92	27,94	1364,2
14. Одеська (Болградська МТС)	S	15,13	20,95	44,23	59,36	88,46	100,1	121,06	111,74	86,14	46,56	13,97	10,48	718,2
	D	22,12	29,1	47,72	59,36	72,17	69,84	68,68	61,69	44,23	36,08	20,95	17,46	549,4
	S +D	37,25	50,05	91,95	118,72	160,63	169,94	189,74	173,43	130,37	82,64	34,92	27,94	1267,6
15 Полтавська	S	8,15	16,3	32,59	50,05	80,32	97,78	97,78	84,97	55,87	23,28	10,48	4,66	562,2
	D	18,62	26,77	47,72	68,68	73,33	74,5	79,15	57,04	48,89	31,43	15,13	13,97	544,75
	S +D	26,77	43,07	80,32	118,73	153,65	172,3	176,93	142,01	104,76	54,71	25,61	18,63	1106,95
16. Запорізька (Ботєвська МТС)	S	6,98	17,46	37,23	64,02	100,1	111,74	123,38	105,92	77,99	34,92	11,64	4,66	696,07
	D	22,12	32,59	51,22	67,51	75,66	75,66	76,82	62,86	46,56	37,25	20,95	16,3	585,49
	S +D	29,1	50,05	88,45	131,53	175,76	187,4	200,2	168,78	124,55	72,17	32,59	20,96	1281,56
17. Херсонська (Асканія-Нова МТС)	S	11,64	18,62	44,23	67,51	104,76	118,73	132,7	112,91	80,32	43,07	15,13	8,15	757,76
	D	23,28	33,76	51,22	67,51	80,32	77,99	71,0	64,02	48,89	33,76	20,95	17,46	590,15
	S +D	34,92	52,38	95,45	135,02	185,08	196,72	203,7	176,93	129,21	76,83	36,08	25,61	1347,91
18. Херсонська (МТС м. Херсон)	S	10,48	18,62	43,07	66,36	102,43	118,73	125,71	115,24	76,82	39,58	12,8	9,31	739,14
	D	20,95	31,43	54,71	65,18	79,15	76,82	77,99	62,86	50,05	38,41	22,12	17,46	597,13
	S +D	31,43	50,05	97,78	131,53	181,58	195,55	203,7	178,10	126,87	77,99	34,92	26,77	1336,27
19. АР Крим (Євпаторійська МТС)	S	15,13	20,95	47,72	77,99	96,61	123,38	145,5	123,38	87,3	59,36	22,12	11,64	831,1
	D	24,44	31,43	51,22	59,36	73,33	69,84	66,35	57,04	48,89	38,41	27,94	20,95	569,2
	S +D	39,57	52,38	98,94	137,35	169,94	193,22	211,85	180,42	136,19	97,77	50,06	32,59	1400,3
20. АР Крим (Карадагська МТС)	S	16,3	20,95	44,23	74,5	110,58	135,02	145,5	125,71	95,45	51,22	20,95	11,64	852,05
	D	27,94	34,92	53,54	65,18	71,0	66,35	58,2	45,4	39,58	39,58	25,61	20,95	584,34
	S +D	44,24	55,87	97,77	139,68	181,58	201,37	203,7	171,11	135,03	90,8	46,56	32,59	1436,4
21. АР Крим (Нікітський сад МТС)	S	16,3	22,12	47,72	73,33	98,94	117,56	131,53	122,22	83,81	51,22	22,12	13,97	800,83
	D	19,79	27,94	45,4	61,7	72,17	69,84	68,68	57,04	46,56	38,41	25,61	17,46	550,6
	S +D	36,09	50,06	93,12	135,03	171,11	187,4	200,21	179,26	130,37	89,63	47,73	31,43	1351,4

При впровадженні сонячного колектора визначається добова потреба споживача в тепловій енергії ($Q_Д$, кВт год) для гарячого водопостачання (ГВП):

$$Q_Д = mc_p\left(t_{гв} - t_{хв}\right), \qquad (1)$$

де: m – потреби у гарячій воді з температурою 60^{o}C за добу, м^3/доба; c_p– питома теплоємність води, 1,16 кВтгод/(м$^{3\cdot o}$C); $t_{гв}$- температура гарячої води; $t_{хв}$– температура води в холодному водопроводі, яка дорівнює 5^{o}C в опалювальний період та 15^{o}C – в літній період.

Наступним етапом є визначення приведеної добової інтенсивності поглинання сонячної радіації ($q_{\theta i}$, кВтгод/м^2) геліоприймачем [7]:

$$q_{\theta i} = 0{,}96\,(P_s\,\theta_s\,I_s + P_D\,\theta_D\,I_D), \qquad (2)$$

де I_S, I_D − інтенсивність сонячного випромінювання, відповідно прямого та розсіяного, на горизонтальну поверхню, кВт/м^2 (таблиця 1); θ_S,θ_D − приведені оптичні характеристики для прямої і розсіяної сонячної радіації відповідно. При відсутності паспортних даних θ_S приймається 0,74, θ_D = 0,64 для геліоприймача з одинарним склом

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

θ_S = 0,63, θ_D = 0,42 для геліоприймача з подвійним склом; P_S, P_D − коефіцієнти положення сонячного колектора для прямої і розсіяної сонячної радіації відповідно.

Середньомісячні значення коефіцієнта положення сонячного колектора для прямої сонячної радіації P_S для сонячних колекторів південної орієнтації при різних кутах нахилу їх до горизонту для всіх кліматичних зон України визначаються з табличних даних (таблиця 2) [6, 7].

Розрахунковий коефіцієнт положення сонячного колектора для розсіяної сонячної радіації (P_D) визначається :

$$P_D = \cos^2 b/2, \quad (3)$$

де b − кут нахилу сонячного колектора до горизонту.

Таблиця 2. Середньомісячні значення P_S для сонячних колекторів південної орієнтації.

Table 2. Monthly PS average values for southern orientation solar collectors.

Кут нахилу колектору до горизонту (b), град.	*Місяці року*											
	I	**II**	**II**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**	**XI1**	**XII**
	Широта місцевості 40º											
25	1,76	1,49	1,30	1,13	1,04	1,0	1,01	1,08	1,22	1,4	1,66	1,85
40	2,24	1,72	1,36	1,11	0,97	0,90	0,93	1,03	1,24	1,55	2,03	2,45
55	2,46	1,79	1,33	1,03	0,86	0,78	0,81	0,94	1,17	1,56	2,18	2,72
90	2,30	1,48	0,91	0	0	0	0	0	0,75	1,17	1,96	2,61
	Широта місцевості 45 º											
30	2,14	1,71	1,42	1,19	1,07	1,02	1,04	1,13	1,30	1,56	1,96	2,31
45	2,86	1,99	1,49	1,17	1,00	0,92	0,95	1,08	1,33	1,74	2,47	3,27
60	3,13	2,07	1,45	1,09	0,89	0,80	0,84	0,99	1,26	1,76	2,66	3,64
90	3,04	1,81	0,99	0,71	0	0	0	0	0,89	1,37	2,5	3,63
	Широта місцевості 50 º											
35	2,77	2,01	1,57	1,27	1,11	1,05	1,08	1,19	1,42	1,79	2,44	3,12
50	4,06	2,38	1,65	1,24	1,04	0,95	0,98	1,33	1,44	2	3,22	5,27
65	4,46	2,47	1,61	1,16	0,93	0,82	0,87	1,04	1,37	2,02	3,47	5,9
90	4,46	2,26	1,3	0,84	0	0	0	0,72	1,06	1,77	3,36	6,04
	Широта місцевості 55 º											
40	4	2,47	1,79	1,37	1,17	1,09	1,12	1,26	1,56	2,11	3,27	4,91
55	3,37	2,99	1,87	1,34	1,09	0,99	1,03	1,21	1,59	2,38	4,81	5,85
70	9,29	3,11	1,83	1,26	0,98	0,87	0,91	1,11	1,51	2,41	5,2	6,4
90	9,52	2,95	1,57	1	0,73	0	0	0,84	1,26	2,2	5,17	6,45

Загальна площа абсорбера (A, м^2) становить

$$A = \frac{q_{\theta i}}{Q_Д \cdot \eta}, \quad (4)$$

де $q_{\theta i}$ – середнє значення доступної сонячної енергії, кВт·год/м^2; $Q_Д$ – значення енергії необхідної для підігріву заданого об'єму води, кВт·год; η – середній ККД сонячної геліоустановки.

Необхідна кількість колекторів, N_{ck} визначається:

$$N_{ck} = \frac{A}{S_{ab}}, \quad (5)$$

де S_{ab} – робоча площа одного абсорбера, м^2.

Строк окупності геліоустановки

$$T = \frac{S_C}{Q \cdot C_T}, \quad (6)$$

де Sc –вартість геліоустановки, грн./кв.м, Q – річна кількість теплоти, вироблена 1кв.м установки, C_T – вартість теплоти від традиційного енергоджерела, грн./1 кВт·год.

Для визначення економічної ефективності розраховується сума, необхідна для оплати централізованого гарячого водопостачання за рік для даного району $S_{гв\ річне}$, грн.:

$$S_{гв\ річне} = \sum_1^{12} S_{гв}, \quad (7)$$

$$E_{екон.} = S_{затрати\ на\ ГВП} - S_{затрати\ на\ геліоустановку}. \quad (8)$$

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Екологічна ефективність, тобто заощаджена кількість викидів CO_2 становить:

$$E_{еко} = Qk, \quad (9)$$

де $к$ − коефіцієнт викидів CO_2 (1,32 т CO_2 на 1 МВт·год).

Висновок. Використання алгоритму визначення ефективності впровадження систем сонячного гарячого водопостачання забезпечує отримання енергетичних та економічних параметрів сонячного теплоенергетичного обладнання у конкретній місцевості, визначення типу і параметрів геліоустановок для їх максимально ефективного використання. Подальша розробка програмного забезпечення на основі представленого алгоритму дасть можливість оперативного встановлення доцільності застосування сонячного теплоенергетичного обладнання на всій території України та сприятиме широкомасштабному їх впровадженню.

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

2. *Мхитарян Н.М.* Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. Наукова думка. Київ. 1999. 314 с.

3. *Даффи У.Дж., Бекман У.А.* Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. Под ред. Ю.Н.Малевского. Москва. 1977. 420 с.

4. *Твайделл Дж., Уэйр А.* Возобновляемые источники энергии. Энергоатомиздат. Москва. 1990. 344 с.

5. Научно-прикладной справочник по климату СССР, Сер. Вып. 10. УССР. Кн. 1. Ч. 1. Солнечная радиация и солнечное сияние. Гидрометеоиздат. 1990. 608 с.

6. Рекомендации по проектированию установок солнечного горячего водоснабжения для жилых и общественных зданий. КиевЗНИИЭП. Киев. 1987. 119 с.

7. *Гершкович В.Ф.* Солнечные установки горячего водоснабжения: пособие по проектированию. ЗНИИЭП. Киев. 2006. 26с.

REFERENCES

1. *Kudrja S.O.* Netradycijni ta vidnovljuvani dzherela energhiji. [Alternative and renewable energy sources]. Pidruchnyk. Nacionaljnyj tekhnichnyj universytet Ukrajiny («KPI»). Kyjiv. 2012. 495 p. [in Ukrainian].

2. *Mkhitaryan N.M.* Energetika netraditsionnykh i vozobnovlyaemykh istochnikov. [Alternative and Renewable Energy]. Naukova dumka. Kiïv. 1999. 314 p. [in Russian].

3. *Daffi U.Dzh., Bekman U.A.* Teplovye protsessy s ispol'zovaniem solnechnoy energii. [Thermal processes using solar energy]. Pod red. Yu.N.Malevskogo. Moskva. 1977. 420 p. [in Russian].

4. *Tvaydell Dzh., Ueyr A.* Vozobnovlyaemye istochniki energii. [Renewable energy sources]. Energoatomizdat. Moskva. 1990. 344 p. [in Russian].

5. Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Ser. Vyp. 10. USSR. Kn. 1. Ch. 1. Solnechnaya radiatsiya i solnechnoe siyanie. [Scientific-applied reference on the climate of the USSR. P.1 Solar radiation and solar luminescence]. Gidrometeoizdat. 1990. 608 p. [in Russian].

6. Rekomendatsii po proektirovaniyu ustanovok solnechnogo goryachego vodosnabzheniya dlya zhilykh i obshchestvennykh zdaniy. [Recommendations for the design of solar hot water installations for residential and public buildings]. KievZNIIEP. Kiev. 1987. 119 p. [in Russian].

7. *Gershkovich V.F.* Solnechnye ustanovki goryachego vodosnabzheniya: posobie po proektirovaniyu. [Solar Hot Water Plants: Design Guide]. ZNIIEP. Kiev. 2006. 26 p. [in Russian].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

С.В. Матях, канд. техн. наук**, Т.В. Суржик,** канд. техн. наук, **В.Ф. Резцов,** чл.-кор. НАН Украины, докт. техн. наук

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

Использование современных солнечных коллекторов обеспечивает высокий уровень освоения энергии солнечного излучения и стабильность горячего водоснабжения в течение всего года на всей территории Украины. На современном этапе развития солнечной теплоэнергетики на первое место выходят проблемы эффективного использования энергии солнечной радиации за счет применения передовых технологий и установления оптимальных параметров энергетического оборудования.

Представленный в работе порядок определения эффективности использования систем солнечного горячего водоснабжения обеспечивает определение энергетических и экономических параметров солнечного теплоэнергетического оборудования в конкретной местности, определение типа и параметров гелиоустановок для их максимально эффективного использования.

Выбор типа и производительности солнечных коллекторов для определенной местности в первую очередь ориентирован на потребности конкретного потребителя и удельные показатели поступления солнечной радиации в данной местности (среднемесячное и среднегодовое количество прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации). На основе представленных данных определяется приведенная суточная интенсивность поглощения солнечным коллектором солнечной радиации с учетом рабочих параметров гелиотехнической установки и оптимального угла наклона к горизонту. Расчетные энергетические параметры в дальнейшем используются для установления экономической эффективности, срока окупаемости гелиоустановки и экологической эффективности за счет уменьшения выбросов углекислого газа. Солнечное теплоснабжение в Украине имеет достаточный опыт использования и развитую нормативную базу для проектирования, а технологический потенциал промышленности позволяет решать задачи массового производства гелиотехнического оборудования. Предложенный порядок оперативного определения эффективности внедрения систем солнечного горячего водоснабжения для потенциальных потребителей будет способствовать широкому освоению солнечной тепловой энергии на всей территории Украины и, соответственно, уменьшению объемов использования органического топлива и улучшению состояния окружающей среды.Библ. 7, табл. 2.

Ключевые слова: *солнечная теплоэнергетика, солнечный коллектор, горячее водоснабжение.*

Стаття надійшла до редакції 16.01.20
Остаточна версія 19.03.20

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

УДК 621.472 DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).23-28

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ЧАСТИНИ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ В СОНЯЧНИХ МЕРЕЖЕВИХ ІНВЕРТОРАХ

М.М. Бордаков, аспірант

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

При дослідженні роботи інвертора було визначено параметри, які впливають на ефективність його роботи. Одним з таких парметрів є внутрішні компоненти інвертора від яких залежить ефективність його роботи. Основним силовим компонентом є Power Stack (силовий модуль). Основним компонентом силового модуля є IGBT (біполярний транзистор з ізольованим затвором).
Даний тип транзисторів поєднує в собі характеристики двох напівпровідникових пристроїв:

- *Біполярного транзистора (утворює силовий канал).*
- *Польового транзистора (утворює канал управління).*

При розрахунку ефективності роботи інвертора потрібно розуміти як працює його силова частина і як силова частина перетворює постійний струм у змінний. Робота силових транзисторів керується драйвером, який пристрій керує частотою відкриття і закриття транзисторів та вихідними характеристиками напруги інвертора.
Для регулювання роботи інвертора драйвер отримує сигнал та відправляє команду на сам силовий модуль. Таким чином відбувається регулювання вихідних параметрів інвертора. Для регулювання вихідної потужності інвертором також застосовується алгоритм зменшення вхідної потужності. Це досягається шляхом переходу робочої точки поля ФЕМ з точки MPPT до робочої точки, ближчої до режиму холостого ходу сонячної панелі.
Регулювання рівня реактивної потужності також відбувається за рахунок роботи силового модуля. Для роботи інвертора, його силовий модуль повинен мати якісне охолодження. Охолодження має забезпечити відвід тепла від силового модуля, що в свою чергу попередить руйнування транзистора. В сучасних інверторах використовується активна і пасивна система охолодження. Зазвичай інвертори з пасивним охолодженням мають потужність до 100 кВт. Також у деяких виробників є тестові моделі інверторів з водяним охолодженням. Потужність даних інверторів очікується більшою ніж 2500 кВт. Бібл. 10, рис. 5.
Ключові слова: *ефективність роботи, сонячна електростанція, навантаження, напруга, інвертор, струм.*

FEATURES OF DESIGN THE PART OF POWER ELECTRONICS IN SOLAR GRID ON INVERTERS

M. Bordakov, postgraduate student

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

In the study of inverters have been identified parameters that affect its performance. One of the parameters is the internal components of the inverter on which the efficiency of its operation depends. The main power component is the Power Stack. The main component of the power module is the IGBT (bipolar insulated gate transistor).
This type of transistor combines the characteristics of two semiconductor devices:

- *Bipolar transistor (forms a power channel).*
- *FET (forms a control channel).*

When calculating the efficiency of the inverter, it is necessary to understand how its power part works and how the power time turns the direct current into an alternating current. The operation of the power transistors is controlled by the driver. This unit controls the frequency of opening and closing of the transistors and the output voltage characteristics of the inverter.
To control the inverters the driver receives a signal and sends a command to the power module itself. In this way the output parameters of the inverter are adjusted. To control the output power the inverter used an algorithm to reduce the input power. This is achieved by switching the FEM field operating point from the MPPT point to the operating point closest to the idle mode of the solar panel. Adjustment of the reactive power level is also due to the operation of the power module.
For the inverter to operate its power module must have good cooling. Cooling should ensure that the heat module is removed from the power module, which in turn will prevent the transistor from breaking down. Modern inverters use an active and passive cooling system. Usually passive cooling inverters have a capacity of up to 100 kW. Some manufacturers also have thematic models of water cooled inverters. The power of these inverters is expected to be greater than 2500 kW. Ref. 10, fig. 5.
Keywords*: efficiency, solar power, load, voltage, inverter, current.*

© М.М. Бордаков, 2020

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)



М.М. Бордаков
M. Bordakov

Відомості про автора: аспірант ІВЕ НАН України.
Освіта: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» за спеціальністю: електротехніка та електротехнології. Отримав ступінь: молодшого інфженера-дослідника.
З 2016 аспірант ІВЕ НАН України.
Наукова діяльність: сонячна енергетика, апаратна частина інвертора для сонячних панелей.
Публікації: 3.
ORCID: 0000-0002-2890-5632
Контакти: тел.: +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: NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, specialty: electrical engineering and electrotechnology. Get a degree: junior research engineer.
Research area: solar energy, hardware part of solar panel inverter.
Publications: 3.
ORCID: 0000-0002-2890-5632
Contacts: tel.: +38093 56 69 447
e-mail: m.m.bordakov@gmail.com

Перелік позначень та скорочень:
СЕС – Сонячна електростанція;
ВДЕ – Відновлювані джерела енергії;
ФЕС – Фотоелектрична станція;
ФЕМ – Фотоелектричний модуль.

Вступ. При дослідженні ефективності роботи інвертора було знайдено чинники, які впливають на дану величину. Одним з чинників є внутрішні компоненти інвертора. Основним силовим компонентом є Power Stack (силовий модуль). Основним компонентом силового модуля є IGBT (біполярний транзистор з ізольованим затвором). Даний тип транзисторів поєднує в собі характеристики двох напівпровідникових пристроїв:

- Біполярного транзистора (утворює силовий канал).
- Польового транзистора (утворює канал управління).

При розрахунку ефективності роботи інвертора потрібно розуміти як працює його силова частина і як силова частина перетворює постійний струм у змінний.

Опис схеми виконання інвертора. Основним завданням інвертора для сонячних панелей є перетворення електричної енергії постійного струму у змінний струм. При роботі на мережу, інвертор ведеться нею. Він отримує данні від неї і працює синхронно з нею. На рис 1. Зображено типову схему заміщення інвертора.

На даній схемі видно, що перетворення здійснюється IBGT транзистором. Керуються вони так званим драйвером, драйвер подає сигнали на транзистори і задає форму вихідної кривої струму. В даній роботі розглянемо роботу саме IGBT транзистора.

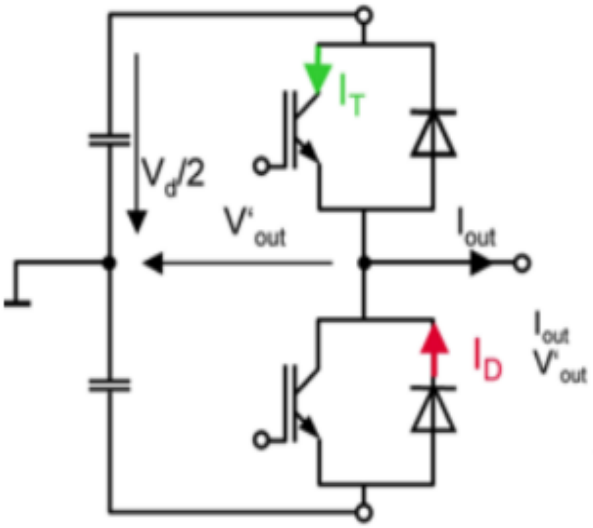


Рис. 1. Типова схема інвертора:

I_T-струм транзистора; I_D-струм діоду транзистора; I_{out}, V_{out} – вихідні струм і напруга інвертора; $V_d/2$ – половинчаста вхідна напруга.

Fig. 1. Typical diagram of solar inverter:

I_T – ransistor current; I_D- current of the transistor diode; I_{out}, V_{out} – output current and voltage of the inverter; $V_d/2$ – half input voltage.

Опис структури та роботи IGBT транзистора. Даний транзистор складається з таких частин: p-n-p транзистора який керується МОН-транзистором через канал зв’язку n-типу. На рис.2 зображено еквівалентну схему IBGT транзистора.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

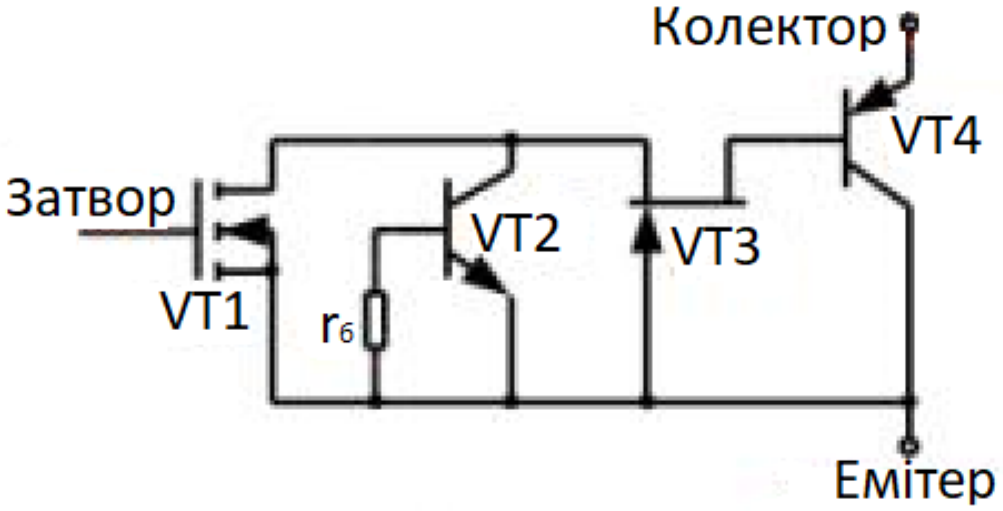


Рис. 2. Структурна схема IGBT транзистора.

Fig. 2. Structural diagram of IGBT tramsystor.

Колектор IGBT-транзистора на еквівалент-ній схемі (рис. 2) є емітером транзистора VT4. При подачі позитивної напруги на затвор у транзистора VT1 з'являється електропровідний канал. Через нього емітер транзистора IGBT (колектор транзистора VT4) з'єднується з базою транзистора VT4. Це призводить до того, що він повністю вимикається і падіння напруги між колектором транзистора IGBT і його емітером стає рівним падінню напруги на емітерному переході транзистора VT4, підсумованим з падінням напруги Uси на транзисторі VT1.

У зв'язку з тим, що падіння напруги на p-n-переході зменшується зі збільшенням температури, падіння напруги на відкритому IGBT-транзисторі в певному діапазоні струмів має негативний температурний коефіцієнт, який стає позитивним при великому струмі.

При збільшенні напруги, прикладеного до транзистора IGBT, збільшується струм каналу, який визначає струм бази транзистора VT4, при цьому падіння напруги на IGBT-транзисторі зменшується.

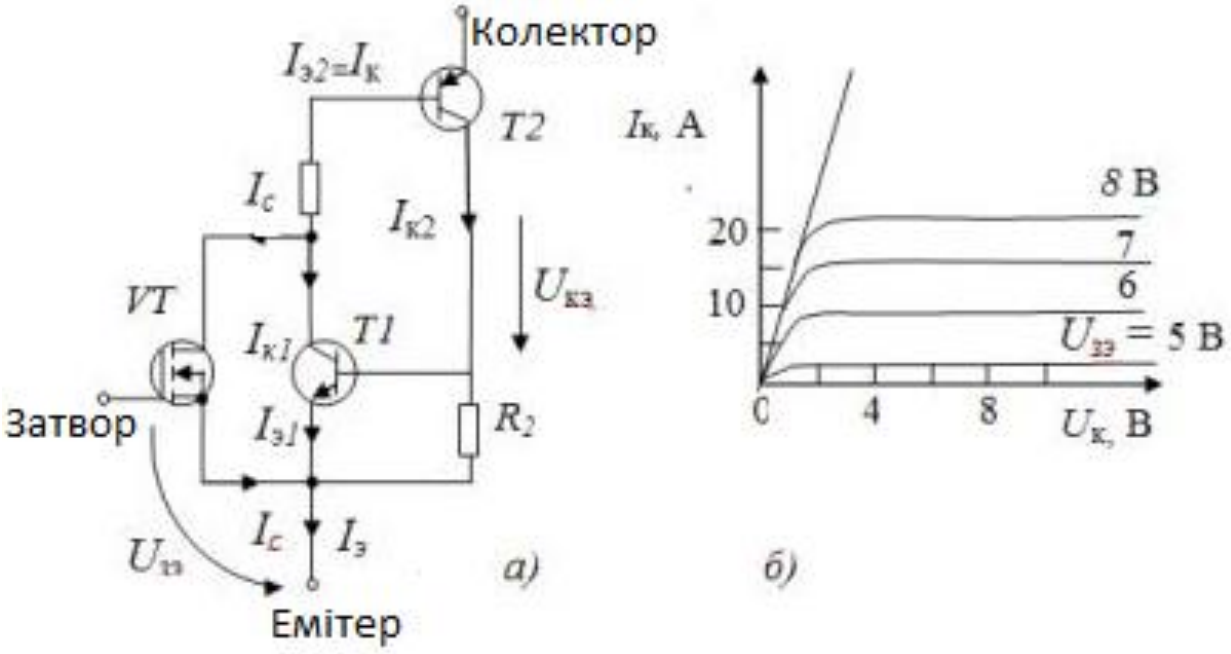


Рис. 3. Схема заміщення та вихідні характеристики ідеального IGBT.

Fig. 3. Replacement diagram and output characteristics of an ideal IGBT.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

При замиканні транзистора VT1 струм транзистора VT4 стає малим, що дозволяє вважати його замкненим. Додаткові шари введені для виключення режимів роботи, характерних для тиристорів, коли відбувається лавинний пробій. Буферний шар n+ і широка базова область n- забезпечують зменшення коефіцієнта посилення за струмом p-n-p-транзистора.

Загальна картина ввімкнення та вимикання транзистора досить складна, так як відбувається зміна рухливості носіїв заряду, коефіцієнтів передачі струму транзисторів, зміни опорів областей та ін. Хоча в принципі IGBT-транзистори можуть бути використані для роботи в лінійному режимі, але в основному їх застосовують в ключовому режимі.

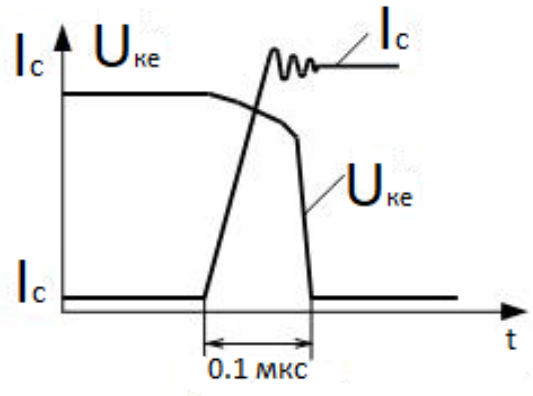


Рис. 4. Зміна падіння напруги Uке і струму Ic IGBT-транзистора.

Fig. 4. Change in voltage drop of Uke and current Ic of IGBT transistor.

Дослідження показали, що для більшості транзисторів типу IGBT час ввімкнення і вимкнення не перевищує 0,5 - 1,0 мкс. Для зменшення кількості додаткових зовнішніх компонентів до складу IGBT-транзисторів вводять діоди або випускають модулі, що складаються з декількох компонентів.

Процес перетворення і втрати під час роботи IGBT. Процес рекомбінації Q_s позитивно заряджених частин під час проходження негативно зарядженої зони транзистора має майже лінійну залежність на малих струмах і зі збільшенням струму до номінального і в режимі над струмів описується функцією квадратного кореня.

$Q_s \sim |^{0.8..1}$ робота на малих струмах.

$Q_s \sim |^{0.5}$ робота на номінальних і над струмах.

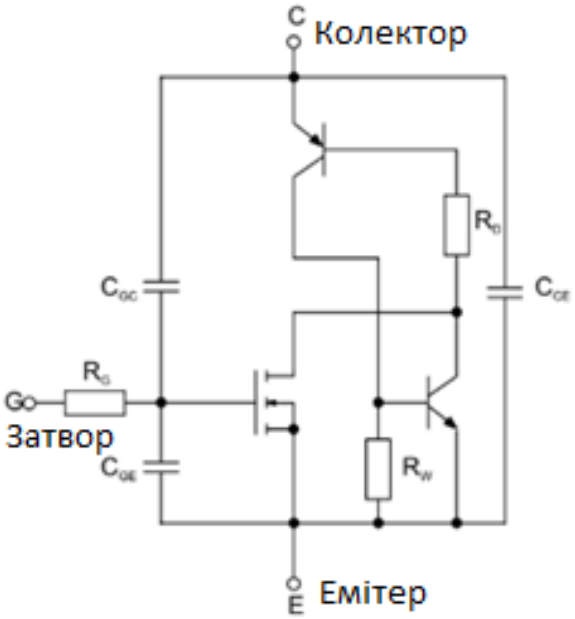


Рис. 5. Еквівалентна схема реального IGBT транзистора.

Fig. 5. Equivalent diagram of real IGBT transistor.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Процеси накопичення зберігання та віддача заряду супроводжуються так званими комутаційними втратами. Час зберігання еквівалентний часу закриття транзистора, процес закриття (відключення) супроводжується появою “хвостового струму” в колекторі. Для того, щоб зрозуміти втрати в IGBT транзисторі потрібно розглянути структурну схему реального транзистора та оцінити всі паразитичні елементи в ній (рис.5).

При роботі транзистора паразитичні елементи і є основним джерелом втрат. Але крім внутрішніх ємностей та опорів, еквівалентна схема також показує так званий "ідеальний MOSFET". Транзистор NPN на стороні затвора: n + область випромінювача (емітер) / p + свердловина (база) / n-зона дрейфу (колектор) з бічним опором p + свердловини нижче зони емітера як опорний випромінювач RW і - у послідовності p + -колекторна площа (емітер) / n-зона дрейфу (основа) / p + свердловина (колектор) - транзистор PNP, який, у поєднанні з транзистором NPN утворює тиристорний ланцюг. Цей паразитичний тиристор чинить вплив на роботу, як тільки буде виконано наступну умову замикання:

$$M \cdot (\alpha_{npn} + \alpha_{pnp}) = 1, \alpha_{npn}, \alpha_{pnp} = \alpha_T \cdot \gamma_E, \qquad (1)$$

де: M – коефіцієнт множення; $\alpha_{npn}, \alpha_{pnp}$ – коефіцієнти підсилення струму індивідуального транзистора в колі бази; α_T – фактор транспорту бази; γ_E – ефективність емітера.

Це призвело б до втрати керованості IGBT і до його руйнування. В принципі, це може статися під час роботи в стаціонарному режимі (при перевищенні критичної щільності струму, яка зменшується в міру підвищення температури мікросхеми) або навіть під час відключення (динамічний зсув струму за рахунок збільшення струму порівняно зі стаціонарним режимом спрацювання). Відповідні проектні заходи надійно запобігають засувці у всіх сучасних типах IGBT при будь-яких допустимих статичних і динамічних умовах роботи; замикання відбудеться лише під час відключення, якщо б була номінальна щільність струму помножена на значення.

Відповідними проектними заходами є, наприклад, зменшення опору базового випромінювача RW.

Висновки та подальші дослідження. З поданого в статті матеріалу робимо висновки що:

1. Втрати в силовій частині інвертора досягаються в основному за рахунок паразитичних складових самого транзистора.

2. Втрати збільшуються як що виконується рівність 1.

При розрахунку інвертора потрібно враховувати втрати в силовому модулі. Також зважати на рівність 1. В подальшому, на основі даної статті, буде розроблена математична модель інвертора та порівняння її з реальним інвертором.

1. *Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T.* Application Manual Power Semiconductors. SEMIKRON International GmbH. 2015. 464 p.

2. ДСТУ 8635:2016. Площадки для фотоелектричних станцій. Приєднання станцій до електроенергетичної системи. Київ. ДП «УкрНДНЦ». 2017. С. 22. [Електронний ресурс]. 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. [Електронний ресурс]. 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. 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., 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., 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. 2017. Vol. 8. No. 1. Pp. 447-456.

REFERENCES

1. *Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T.* Application Manual Power Semiconductors. SEMIKRON International GmbH. 2015. 464 p. [in English].

2. DSTU 8635:2016. Ploshchadky dlya fotoelektrychnykh stantsiy. Pryyednannya stantsiy do elektroenerhetychnoyi systemy. [Areas for photovoltaic plants. Interconnecting plants with the grid]. Kyiv. DP«UkrNDNTS». [Electronic resource]. URL: 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. [Electronic resource]. URL: 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. [in English].

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

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 p. [in English].

7.*Zhou J., 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., 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. 2017. Vol. 8. No. 1. Pp. 447-456. [in English].

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЧАСТИ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В СОЛНЕЧНЫХ СЕТЕВЫХ ИНВЕРТОРАХ

Н.Н. Бордаков, аспирант

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

При исследовании работы инвертора были определены параметры которые влияют на эффективность его работы. Одним из параметров есть внутренние компоненты инвертора от которых зависит эффективность его работы. Основным силовым компонентом является Power Stack (силовой модуль). Основным компонентом силового модуля является IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором).

Данный тип транзисторов сочетает в себе характеристики двух полупроводниковых устройства:

• биполярного транзистора (образует силовой канал).

• Полевого транзистора (образует канал управления).

При расчете эффективности работы инвертора нужно понимать как работает его силовая часть и как силовая часть преобразует постоянный ток в переменный. Работа силовых транзисторов руководствуется драйвером, данное устройство управляет частотой открытия и закрытия транзисторов и выходными характеристиками напряжения инвертора.

Для регулирования работы инвертора драйвер получает сигнал и отправляет команду на сам силовой модуль. Таким образом происходит регулирование выходных параметров инвертора. Для регулирования выходной мощности инвертора применяется алгоритм уменьшения входной мощности. Это достигается путем перехода рабочей точки поля ФЭМ с точки MPPT к рабочей точки, близкой к режиму холостого хода солнечной панели.

Регулировка уровня реактивной мощности также происходит за счет работы силового модуля. Для работы инвертора, его силовой модуль должен иметь качественное охлаждение. Охлаждение должно обеспечить отвод тепла от силового модуля в свою очередь предупредит разрушения транзистора. В современных инверторах используется активная и пассивная система охлаждения. Обычно инверторы с пассивным охлаждением имеют мощность до 100 кВт. Также у некоторых производителей есть тестовые модели инверторов с водяным охлаждением. Мощность данных инверторов ожидается больше 2500 кВт. Библ. 10, рис. 5.

***Ключевые слова**: эффективность работы, солнечная электростанция, нагрузка, напряжение, инвертор, ток.*

Стаття надійшла до редакції 18.11.19
Остаточна версія 13.03.20

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

УДК 620.91, 519.6 DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).29-35

ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ТРУБЧАТОГО ПРИЁМНИКА ТЕПЛА СОЛНЕЧНЫХ ПАРАБОЛОЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Л.И. Кныш, докт. техн. наук

Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара,
49000, пр. Гагарина, 72, г.Днепр, Украина.

Составлена одномерная математическая модель, разработан численный алгоритм и проведены численные эксперименты по количественной оценке тепловых потерь от трубчатого теплоприёмника системы приёма тепла солнечного параболоцилиндрического модуля. Исследования проводились для теплоприёмника, который помещён в стеклянный конверт по типу «труба в трубе». Рассмотрены случаи со слоем атмосферного воздуха в межтрубном пространстве и с вакуумом различной степени. Отдельно проведен расчет для одиночной трубы без стеклянного конверта. Система нелинейных алгебраических уравнений, которая составляет основу математической модели, решена методом простой итерации. Сходимость итераций обеспечивалась заданием начальных приближений, максимально близких к искомым значениям. В модели предусмотрен учет зависимости теплофизических параметров от температуры и давления. Предложен метод расчета теплового потока через слой газа различной степени разреженности. В качестве физической модели для численных расчетов выбрана модель параболоцилиндрического модуля, который исследовался экспериментально и описан в научной литературе. Численные расчеты проведены для случая отсутствия теплового потока от концентратора и при наличие концентрированного теплового потока. Проведенное сравнение численных и экспериментальных данных показало хорошее совпадение результатов. Незначительное расхождения наблюдалось по значению температуры стекла и по значению тепловых потерь при наличии ветра. Проведенные расчеты показали, что наличие стеклянного пакета является обязательным проектным элементом системы приёма параболоцилиндрических энергетических модулей. Использование такого стеклянного конверта с атмосферным воздухом снижает тепловые потери в два раза, а с глубоким вакуумом – в три раза. Библ. 13, рис. 3.
Ключевые слова: *параболоцилиндрический концентратор, трубчатый теплоприёмник, стеклянный конверт, тепловые потери, одномерная математическая модель, система нелинейный уравнений, численное решение.*

ESTIMATION OF HEAT LOSSES FOR THE TUBE HEAT RECEIVER OF THE SOLAR TROUGH MODULES

L. Knysh, doctor of technical sciences

Oles Honchar Dnipro National University,
49000, Gagarin ave., 72, Dnipro, Ukraine.

The one-dimensional mathematical model for the quantitative estimation of the heat losses from tube receiver system of the solar trough module was created. Based on this mathematical model the numerical algorithm was developed and numerical experiments were carried out. The studies were conducted for tube heat receiver which placed inside glass envelope as «tube-in-tube». Cases with atmosphere air in annular space and with various vacuum degree were described. Analysis for a unit tube without the glass envelope was carried out separately. A system of nonlinear algebraic equations, which consist basis of the mathematical model, was solved using fixed-point iteration method. Convergence of iterates was provided through initial guess, which were chosen as close to the real values. The thermophysical parameters depend on the temperature and pressure. It was considered in the created mathematical model. The calculation method for the heat flow through a gas layer was offered. The vacuum gas degree was taken into account in the method. As physical model for numerical analysis was chosen solar though module which studied experimentally. Data of the experiments were described in scientific literature. Numerical analyses were carried out for two cases – with heat flow from concentrator and without it. Comparison of numerical and experimental data show good agreement of results. Slight discrepancies were observed for glass temperature and for heat losses in the presence of wind. Analyses show that glass envelope is mandatory design element for heat receiver system of the solar though energy modules. If atmosphere air is used inside glass envelope than heat losses decreased twice, if deeper vacuum – in tree times. Ref. 13, fig. 3.
Keywords: *though concentrator, tube heat receiver, glass envelope, heat losses, one-dimension mathematical model, system of nonlinear equations, numerical solution.*

© Л.И.Кныш, 2020

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)



Л.И. Кныш
L. Knysh

Сведения об авторе: д.т.н., проф., зав. каф. аэрогидромеханики и энергомассопереноса Днепровскогонационального университета имени Олеся Гончара.
Образование: Специалист в области математического и компьютерного моделирования процессов аэрогидродинамики и тепломассообмена.
Научная сфера: исследования процессов переноса в энергетических системах на основе возобновляемых источников энергии.
Публикации: более 100.
ORCID: 0000-0003-3525-4804
Контакты: тел./факс: +380990034310
e-mail: lknysh@ukr.net

Author information: Doctor of Technical Science, Professor, Chair of Department of Aehydromechanics and Energy Mass Transfer of Oles Gonchar Dnipro National University.
Education: Expert in the field of mathematical and computational modeling of fluid dynamics and heat and mass transfer processes.
Research area: Research energy transfer processes in systems based on the renewable sources energy.
Publications: over 100.
ORCID: 0000-0003-3525-4804
Contacts: phone/fax: +380990034310
e-mail: lknysh@ukr.net

Введение. Термодинамическое преобразование энергии Солнца является технологией, которая активно развивается в Украине и за её пределами [1]. Всё чаще плоские и вакуумированные солнечные коллекторы выступают как альтернатива традиционным системам горячего водоснабжения, обеспечивая бесперебойную подачу в автономном режиме [9, 2, 7]. Широкое внедрение получают солнечные термодинамические системы в различных технологических процессах – сушке сельскохозяйственной продукции, обогреве теплиц и пр. [8]. Однако подобные энергетические установки с концентраторами ещё не нашли достаточного применения. Существует множество проектов автономных солнечных термодинамических систем с концентраторами разных типов [5]. Но достаточно апробированными являются пока лишь солнечные параболоцилиндрические электрические станции, строительством которых занимаются частные компании Испании, США, Израиля. Основным элементом таких станций является система приёма солнечного излучения «параболоцилиндрический концентратор – трубчатый теплоприёмник» (ПЦК-ТТП). Качество системы приёма во многом определяет эффективность всей энергетической установки. Очевидно, что совершенствование системы приёма, в конечном счёте, приведёт и к более широкому применению параболоцилиндрических энергетических модулей в различных теплообменных системах, расширит их температурных диапазон и энергетические возможности.

Одной из важнейших задач проектирования ПЦК-ТТП является минимизация тепловых потерь от трубчатого теплоприёмника. Решению этой задача посвящена данная работа.

Постановка задачи. В качестве физической модели была рассмотрена классическая система приёма солнечного излучения, состоящая из параболоцилиндрического концентратора, в фокусе которого расположен трубчатый теплоприёмник. Солнечные лучи отражаются от поверхности концентратора и перенаправляются на теплоприёмник, внутри которого движется теплоноситель. Этот теплоноситель может быть рабочим телом одноконтурного или двухконтурного паротурбинного цикла. Кроме того, такая схема может быть использована для других теплоэнергетических целей – подогрев теплоносителя или получения технологического пара, комбинированное термофотоэлектрическое преобразование и пр.

Существует множество подходов к моделированию теплопереноса в системе ПЦК-ТТП [10, 11]. Многие из них слишком детализированные, базируются на стандартных коммерческих вычислительных пакетах, доступ к которым ограничен. В работе [3] предложена математическая модель обобщённого вида, на основе которой создан программный модуль для расчёта основных динамических, геометрических и энергетических показателей системы ПЦК-ТТП. При составлении математической модели не были учтены некоторые моменты, связанные с минимизацией тепловых потерь от трубчатого теплоприёмника. В частности, в [3] для упрощения расчётов принималось, что в фокусе располагается единичная теплоприёмная труба, в то время как такая труба, как правило, располагается в стеклянном конверте по принципу «труба в трубе». Это существенно минимизирует тепловые потери, что повышает общую эффективность установки. Значение тепловых потерь будет ещё более снижено, если систему «труба в трубе» дополнительно вакуумировать. Количественная оценка таких потерь может быть проведена на основе одномерной стационарной модели теплопереноса в трубчатом теплоприёмнике.

Математическая модель теплопереноса в трубчатом теплоприёмнике системы ПЦК-ТТП. Математическая модель теплообмена между внешней поверхностью канала с теплоносителем и внешней средой было создана на основе принципа суперпозиций. Система уравнений теплового баланса для системы ПЦК-ТТН имеет вид:

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \\ Q_{SUN} - Q_{TH} = Q_3 + Q_4, \end{cases}$$

где Q_1, Q_3 – конвективные потери в межтрубном пространстве и между защитным стеклом и окружающей средой соответственно; Q_2, Q_4 – лучистые потери в межтрубном пространстве и между защитным стеклом в внешней средой соответственно; Q_{SUN} – тепловой поток от концентратора; Q_{TH} – тепловой поток, поглощенный теплоносителем.

Следует отметить, что в модели не проводился учет теплопроводности защитного стекла.

Радиационные тепловые потери, приходящие на метр теплоприёмника, вычислялись по закону Стефана-Больцмана. Конвективные потери между стеклом и окружающей средой вычислялись с использованием классических критериальных уравнений для случая свободной или вынужденной конвенции.

Величина конвективных потерь в межтрубном пространстве связанна с величиной степени разреженности воздуха в этой зоне. При давлениях, близких к атмосферному, там имеет место свободная конвекция с ламинарным режимом течения. Т.е. основным механизмом теплопереноса в межтрубном пространстве является молекулярная проводимость. Для случая узкого кольцевого канала предлагается использовать подход, описанный в [12]. В нём учет свободноконвективных потоков проводится с использованием коэффициента эффективной теплопроводности вида:

$$\lambda_{eff} = 0{,}386\lambda\left(\frac{Pr}{0{,}861 + Pr}\right)^{0{,}25} Ra^{*0{,}25},$$

где λ – коэффициент теплопроводности среды, в данном случае воздуха; Pr – число Прандтля среды; Ra^* – число Рэлея специального вида:

$$Ra^* = \frac{\left(ln\left(\frac{D_{CT}}{D_{TP}}\right)\right)^4}{L^3\left(D_{TP}^{-0{,}6} + D_{CT}^{-0{,}6}\right)^5} Ra_{TP}.$$

В последнем выражении D_{TP}, D_{CT} – диаметры единичной трубы и системы «труба в трубе» соответственно; L – длина исследуемого участка трубы; Ra_{TP} – число Рэлея при температуре стенки единичной трубы.

Окончательно выражения для определения конвективных потерь в межтрубном пространстве по форме соответствует выражению для вычисления молекулярной теплопрооводности:

$$Q_1 = \frac{2\pi\lambda_{eff}}{ln\left(\frac{D_{CT}}{D_{TP}}\right)}\left(T_{TP} - T_{CT}\right),$$

где T_{TP} и T_{CT} – температуры трубы с теплоносителей и стеклянной трубы соответственно.

Следует отметить, что для расчёта эффективного коэффициента теплопроводности может быть использована также классическая эмпирическая формула М.А. Михеева [6]. Однако проведенные численные исследования показали, что предложенная методика более точно соответствует эксперименту, так как учитывает цилиндрическую геометрию системы.

Уменьшение давления в межтрубном пространстве приводит к изменению механизма теплопередачи. Постепенно длина свободного пробега молекул начинает увеличиваться. При этом свободная конвекция ослабевает – фактически не хватает молекул для транспортировки энергии. Начинает доминировать свободно-молекулярный режим, при котором межмолекулярные взаимодействия почти не происходят. Считается, что молекулы просто двигаются между двумя поверхностями. Расчёт теплового потока для такого режима проводиться, как правило, по упрощённым формулам из кинетической теории газов вида [4]:

$$q = \left(c_v + \frac{1}{2}R\right)\overline{\rho}\sqrt{\frac{RT}{2\pi}}a\left(T_{TP} - T_{CT}\right),$$

где c_v – изохорная теплоёмкость; $\overline{\rho}$ – средняя плотность газа; a – коэффициент аккомодации; T – температура газа вблизи внутренней поверхности трубы; R – газовая постоянная.

Однако для данной задачи использование таких соотношений затрудненно. Поэтому предлагается подход, основанный на использовании коэффициента теплопередачи через слой разреженного газа:

$$K = \frac{\lambda}{\frac{D_{TP}}{2} ln\frac{D_{CT}}{D_{TP}} + bl\left(\frac{D_{TP}}{D_{CT}} + 1\right)},$$

где l – длина свободного пробега молекул, а b – безразмерный коэффициент, который определяется выражением:

$$b = \frac{2-a}{a} \cdot \frac{9\gamma - 5}{2(\gamma - 1)},$$

где γ – показатель адиабаты.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Нахождение значения коэффициента аккомодации, особенно для селективных поверхностей, является отдельной задачей. Но следует отметить, что этот коэффициент относительно слабо характеризует реальный тепломассоперенос в межтрубном пространстве. Многие литературные источники и экспериментальные данные указывают на то, что для хорошо очищенных поверхностей значение коэффициента аккомодации близко к единице. Именно такое предположение было принято в данной работе.

В качестве критерия, характеризующего переход от конвективного теплообмена к свободномолекулярному в межтрубном пространстве, использовалось число Рэлея Ra. Для $Ra \geq 100$ использовалась конвективная модель, а для $Ra < 100$ – кинетическая теория. Конечно, между этими режимами теплообмена существует некоторая переходная зона. Её наличие учитывалась косвенно в выражении для коэффициента теплопередачи K.

Выбор численного метода и его сходимость. На основе приведенной выше математической модели был создан расчётный алгоритм, состоящий из трёх основных блоков. В первом блоке помещались значения теплофизических констант, зависящих от температуры; во втором блоке – критериальные уравнения, вид которых определялся природой теплообмена; в третьем блоке непосредственно задавались начальные данные и проводился расчёт. Нелинейная система балансовых уравнений решалась методом простой итерация. Теоретически вопрос сходимости этого метода не исследовался. Сходимость достигалась максимальным приближением начальных значений к физически реальным.

Анализ результатов численного моделирования. Численное исследования на основе созданной математической модели проводились с использованием экспериментального параболоцилиндрического модуля, который тестировался в Sandia National Laboratories (США) [13]. Длина параболического модуля составляла 7,8 м, диаметр апертуры 5 м. Рассматривался металлокерамический трубчатый теплоприёмник, расположенный на фокусной линии модели. На внешней стороны теплоприёмника было нанесено градиентное селективное покрытие. Такие теплоприёмники имеют более высокие эксплуатационного характеристики, чем традиционное черные хромовые. Кроме того, селективное покрытие способно минимизировать радиационные потери, являться актуальным в такие системах. Единичная металлокерамическая труба диаметром 0,07 м располагалась внутри стеклянной трубы. Внешний диаметр системы «труба в трубе» равнялся 0,109 м. Предполагалось, что в межтрубном пространстве может находится воздух при различных давлениях. В качестве теплоносителя использовалось синтетическое масло Syltherm 800.

Для удобства сравнения и верификации созданной математической модели и численного алгоритма был выбран уровень температур, который соответствовал экспериментальным исследованиям, описанным в [13]. Температура окружающей среды равнялась 22 ^{0}C, а так называемая sky-температура была 14 ^{0}C. При расчётах учитывалась зависимость степени черноты трубы с теплоносителем от температуры.

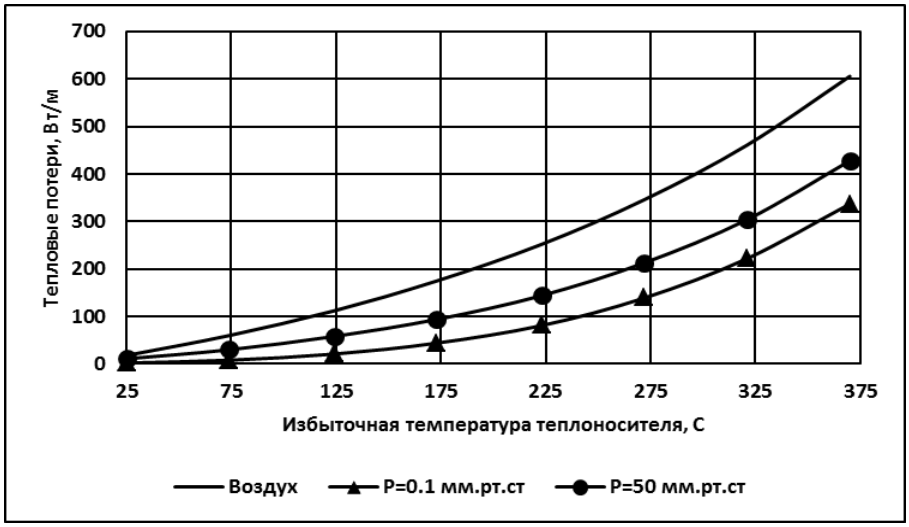


Рис. 1. Зависимость тепловых потерь от избыточной температуры при различном уровне вакуума при отсутствии теплового потока от концентратора.

Fug. 1. Thermal losses Vs. heat receiver temperature above ambient for various vacuum degree without the heat flow from concentrator.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

На рис. 1 представлены результаты первого цикла расчётов тепловых потерь трубчатого теплоприёника. Численные эксперименты в этом случае проводились при отсутствии теплового потока от концентратора, в безветренную погоду – учитывалась лишь свободная конвекции вокруг теплоприёмника. Предполагалось, что теплоноситель не циркулирует в канале. В этом случае второе уравнение в общей системе уравнений баланса отсутствует, что позволяет детально проанализировать влияние степени разряжения в межтрубном пространстве на общие тепловые потери в теплоприёмнике.

В расчётах уровень значения давления изменялся в широком диапазоне. На рис.1 представлены три характерные кривые – воздух в межтрубном пространстве при нормальном атмосферном давлении, при давлении, характерном для переходного режима и при давлении, которое соответствует глубокому вакууму. Можно заметить, что тепловые потери при создании глубокого вакуума снижаются почти в два раза, что, очевидно, существенно повышает общую эффективность системы.

Расчётные значения тепловых потерь, полученные для воздуха и вакуума, практически совпадают с экспериментальными результатами, полученными в [13]. Модель имеет некоторую погрешность лишь при вычислении температуры стеклянной трубы. На рис. 2 представлено отклонение между расчётными и экспериментальными данными.

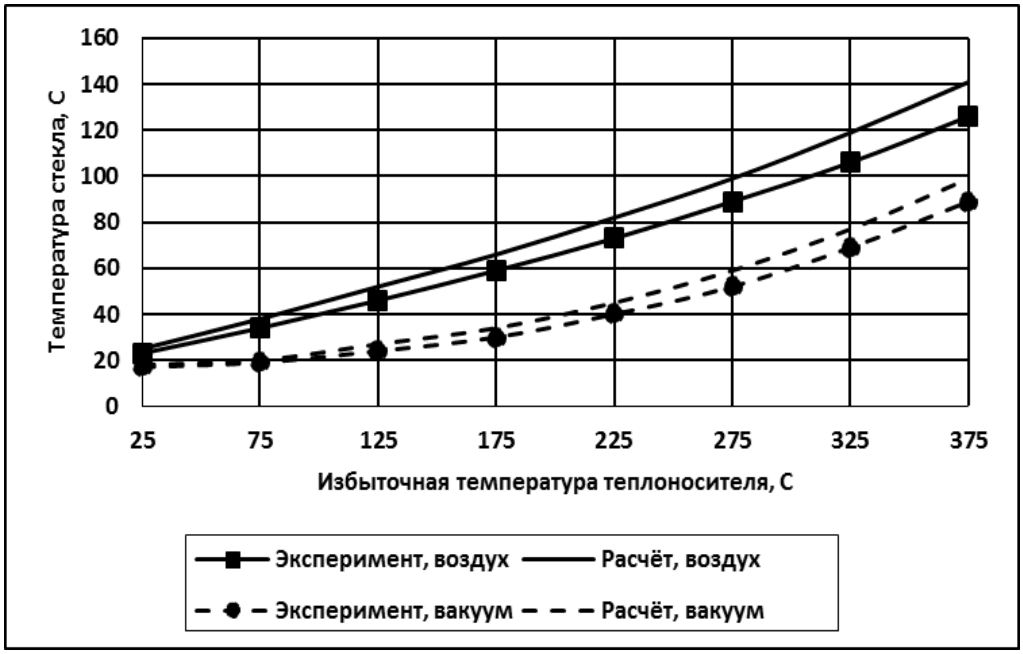


Рис. 2. Сравнение экспериментальной и расчётной абсолютной температуры поверхности стекла.

Fug. 2. Comparison experimental and calculated temperature of the glass surface.

Как видно из графика, расчётные данные являются несколько завышенными, как для случая использования воздуха при нормальном атмосферном давлении, так и для вакуумированного межтрубного пространства. Расхождения наблюдаются главным образом при повышенных температурах, где отклонения приближаются к 10%. Очевидно, такие отклонения связаны с использованием одномерной модели. Использование более детализированной методика, например, предложенной в [3], приблизит значения температур к экспериментальным.

Аналогичные расчёты были проведены и для случая, когда тепловой поток от концентратора поступал на теплоприёмный канал. Предполагалось, что плотность теплового потока от концентратора равнялась 940 Вт/м^2. Такое значение выбиралось для удобства сравнения предлагаемой методики и экспериментальных данных, представленных в [13]. На рис. 3 представлены результаты расчёта тепловых потерь системы ПЦК-ТТП для экспериментальной установки. Рассматривался случай отсутствия ветра. В этом случае данные расчёта практически полностью совпадали в экспериментальными данными. При ветреной погоде наблюдалось некоторое расхождение данных, которое находилось в пределах 10-15%.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

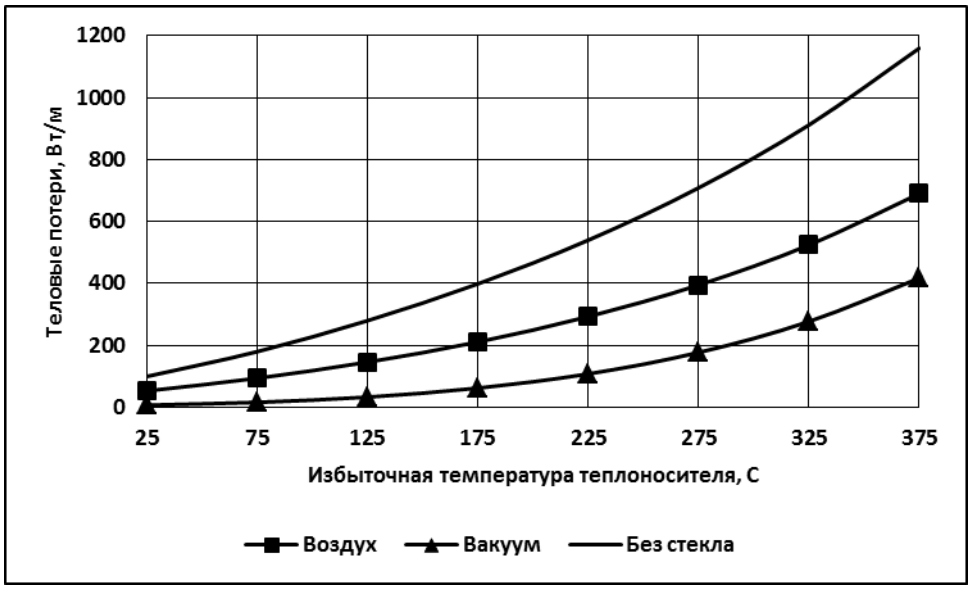


Рис. 3. Зависимость тепловых потерь от избыточной температуры теплоносителя при наличие теплового потока от концентратора.

Fug. 3. Thermal losses Vs. heat receiver temperature above ambient with heat flow from concentrator.

На рис. 3 также представлены данные для случая, когда защитное стекло отсутствует. Как видно, в этом случае тепловые потери увеличиваются практически в два раза по сравнению со случаем воздушной прослойки в межтрубном пространстве и в три раза для вакуумированного зазора.

Очевидно, что несмотря на технологическое усложнение системы, вакуумирование дает существенный прирост эффективности за счёт снижения тепловых потерь. Но следует учесть, что вакуумирование эффективно лишь при отсутствии притока водорода из окружающего воздуха в зазор. Термические потери с водородом в межтрубном пространстве могут быть даже выше кондуктивных потерь с воздухом.

Выводы. Проведенное исследование является логическим продолжение работ автора по комплексному исследованию тепломассопереносу в системах приёма солнечных термодинамических модулей с параболоцилиндрическими концентраторами. Разработанная методика теоретически обосновывает необходимость использования стеклянного конверта для канала с теплоносителем при проектировании подобных энергетических систем. Элементы представленной математической модели могут быть использованы в качестве граничных условий для более детализированных расчётов. Созданный численный алгоритм, который базируется на решении системы нелинейных алгебраических уравнений, может быть легко адаптирован для расчёта систем ПЦК – ТТП произвольной геометрии, различной мощности и назначения.

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

2. *Кныш Л.И.* Метод учёта тепловой проводимости абсорбера в плоском солнечном коллекторе. Відновлювальна енергетика. 2014. № 2(37). С. 38-42.

3. *Кныш Л.И., Гоман О.Г.* Особенности моделирования энергопереноса в системе приёма тепла солнечной параболоцилиндрической станции. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2016. № 3(58). С. 352-356.

4. *Кошмаров Ю.А., Рыжов Ю.А.* Прикладная динамика разреженного газа. М. Машиностроение. 1977. 184 с.

5. *Кудря С.А., Пепелов А.В.* Використання відновлюваної енергії: досвід розвинутих країн. Київ. ЮНІДО. 2015. 32 р. URL: http://www.reee.org.ua/download/trainings/%D0%A2%D0%9C28.pdf

6. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. М. Энергия. 1977. 344 с.

7. *Рєзцов В.Ф., Суржик Т.В., Охота О.О.* Експериментальне дослідження теплопровідності композіційних матеріалів колекторів сонячної енергії. Відновлювальна енергетика. 2016. № 2(46). С. 41-44.

8. *Рєзцов В.Ф., Суржик Т.В., Щокіна В.А.* Можливі причини формування неоднорідних структур при геліосушці вологовмісних середовищ. Відновлювальна енергетика. 2015. № 1(40). С.28-31.

9. *Суржик Т.В.* Дослідження матеріалу абсорбера сонячного колектора з полімерних композиційних матеріалів. Відновлювальна енергетика. 2015. № 4(44). С.28-31.

10. *Hachicha A.A., Bashria A.A. Yousef, Zafar Said, Ivette Rodríguez.* A review study on the modeling of high-temperature solar thermal collector systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. V. 112. Pp. 280-298.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

11. *Cheng Z.D., He Y.L., Xiao J., Tao Y.B., Xu R.J.* Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics in the receiver tube of parabolic trough solar collector. Int. J. Heat Mass Transf. 2010. V. 37. Pp. 782-787.

12. *Theodore L. Bergman and other.* Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons. 2007. 1051 p.

13. *Dudley V., Kolb G., Sloan M., Kearney D.* SEGS LS2 Solar Collector Test Results. Report of Sandia National Laboratories. USA. 1994. 140 c.

REFERENCES

1. *Budko V.Y., Kudria S.A., Pepelov A.V.* Sovremennoe sostoyanie i razvitie vozobnovlyaemoj energetiki. [Current state and development of renewable energy]. Alternativnaya energetika i ekologiya. 2017. No. 4-6. Pp. 130-141. [in Russian].

2. *Knysh L.I.* Metod uchyota teplovoj provodimosti absorbera v ploskom solnechnom kollektore. [The method of accounting of heat conductivity of absorber the flat solar collector]. Vidnovluvana energetika. 2014. No. 2(37). Pp. 38-42. [in Russian].

3. *Knysh L.I., Goman O.G.* Osobennosti modelirovaniya energoperenosa v sisteme priyoma tepla solnechnoj paraboloczilindricheskoj stanczii. [Modeling features of energy-mass transfer in the heat receiver system of the solar parabolic cylindrical plant]. Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. 2016. No. 3(58). Pp. 352-356. [in Russian].

4. *Koshmarov Yu.A., Ryzhov Yu.A.* Prikladnaya dinamika razrezhennogo gaza. [Applied rarefied gas dynamics]. Moscow. Mashinostroenie. 1977. 184 p. [in Russian].

5. *Kudria S.A., Pepelov A.V.* Vykorystannia vidnovliuvanoi enerhii: dosvid rozvynutykh krain. [The use of renewable energy: the experience of developed countries]. Kiev. UNIDO. URL: http://www.reee.org.ua/download/trainings/%0% A2%D0% 9C28.pdf . [in Ukrainian].

6. *Mikheev M.A., Mikheeva I.M.* Osnovy teploperedachi. [Heat Transfer Basics]. Moscow. Energiya. 1977. 344 p. [in Russian].

7. *Rieztsov V.F., Surzhyk T.V., Okhota O.O.* Eksperymentalne doslidzhennia teploprovidnosti kompozitsiinykh materialiv kolektoriv soniachnoi enerhii. [Experimental study of thermal conductivity of composite materials of solar energy collectors]. Vidnovluvana energetika. 2016. No. 2(46). Pp. 41-44. [in Ukrainian].

8. *Rieztsov V.F., Surzhyk T.V., Shchokina V.A.* Mozhlyvi prychyny formuvannia neodnoridnykh struktur pry heliosushtsi volohovmisnykh seredovyshch. [Possible reasons for the formation of inhomogeneous structures during the solar drying of moisture-containing media]. Vidnovluvana energetika. 2015. No. 1(40). Pp. 28-31. [in Ukrainian].

9. *Surzhyk T.V.* Doslidzhennia materialu absorbera soniachnoho kolektora z polimernykh kompozytsiinykh materialiv. [Investigation of the material of a solar collector absorber made of polymer composite materials]. Vidnovluvana energetika. 2015. No. 4. Pp. 28-31. [in Ukrainian].

10. *Hachicha A.A., Bashria A.A. Yousef Zafar Said, Ivette Rodriguez.* A review study on the modeling of high-temperature solar thermal collector systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. V. 112. Pp. 280-298. [in English].

11. *Cheng Z.D., He Y.L., Xiao J., Tao Y.B., Xu R.J.* Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics in the receiver tube of parabolic trough solar collector. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. V. 37. Pp. 782-787. [in English].

12. *Theodore L., Bergman and other.* Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons. 2007. 1051 p. [in English].

13. *Dudley V., Kolb G., Sloan M., Kearney D.* SEGS LS2 Solar Collector Test Results. Report of Sandia National Laboratories. USA. 1994. 140 p. [in English].

ОЦІНКА ТЕПЛОВИХ ВТРАТ ТРУБЧАТОГО ПРИЙМАЧА ТЕПЛА СОНЯЧНИХ ПАРАБОЛОЦИЛІНДРИЧНИХ МОДУЛІВ

Л.І. Книш, докт. техн. наук

Дніпровський національний університет імені О. Гончара, 49000, пр. Гагаріна, 72, м. Дніпро, Украина

Складено одновимірну математичну модель, розроблено числовий алгоритм та проведено числові експерименти по визначенню кількісних показників теплових втрат від трубчатого теплоприймача системи прийому тепла сонячного параболоциліндричного модуля. Дослідження проводились для теплоприймача, який знаходиться в середині скляного конверту по типу «труба в трубі». Розглянуто випадки зі шаром атмосферного повітря в міжтрубному просторі та із вакуумом різного ступеню. Окремо проведено розрахунок для одиничної труби без скляного конверту. Система нелінійних алгебраїчних рівнянь, яка складає основу математичної моделі, розв'язана методом простої ітерації. Збіжність ітерацій забезпечувалась заданням початкових наближень, максимально наближених до шуканих значень. В моделі було передбачено врахування залежності теплофізичних параметрів від температури та тиску. Запропоновано метод розрахунку теплового потоку скрізь шар газу різного ступеня розрідженості. В якості фізичної моделі для числових розрахунків вибрано модель параболоциліндричного модуля, який був досліджений експериментально та описаний в науковій літературі. Числові розрахунки проведено для випадку відсутності теплового потоку від концентратору та при наявності концентрованого теплового потоку. Проведено порівняння числових та експериментальних даних, яке показало добрий збіг результатів. Незначна розбіжність спостерігалась по значенню температури скла та по значенню теплових втрат при наявності вітру. Розрахунку, які були проведені, показали, що наявність скляного пакету є обов'язковим проектним елементом системи прийому параболоциліндричних енергетичних модулів. Використання такого скляного конверту з атмосферним повітрям знижує теплові втрати в два рази, а з глибоким вакуумом – в три рази. Бібл. 13, рис. 3.

Ключові слова: *параболоциліндричних концентратор, трубчатий теплоприймач, скляний конверт, теплові втрати, одновимірна математична модель, система нелінійних рівнянь, числовий розв'язок.*

Стаття надійшла до редакції 04.09.19
Остаточна версія 09.03.20

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

УДК 621.548 DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).36-41

ПІДВИЩЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ГЕНЕРАТОРА ВІТРОУСТАНОВКИ ЗА РАХУНОК ЗМЕНШЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОМІЖКУ МІЖ СТАТОРОМ І РОТОРОМ

В.М. Головко[1], докт. техн. наук, проф., **Є.М. Дубчак**[2], ст. викл., **О.Ю. Заморока**[2], магістрант

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

Збільшення потужності вітроустановки при мінімальних конструкційним змінах завжди було пріоритетним напрямком досліджень у вітроенергетиці. Жорстка залежність потужності на валу ротора вітроустановки від аеродинамічних характеристик лопаті відомі і втілені в інженерні рішення. Електромашинна частина вітроустановки комплектується загальнопромисловим виконанням синхронних або асинхронних генераторами, переваги та недоліки застосування яких всебічно відомі. Також встановлено, що відношення потужності в генераторному режимі до потужності машини в двигунному режимі, стає більше одиниці в залежності від числа пар полюсів та потужності машини.
Робота присвячена визначенню підвищення потужності асинхронної машини в генераторному режимі за рахунок впливу на магнітний потік гранично припустимим зменшенням повітряного проміжку між статором і ротором. В даній роботі використана вдосконалена методики розрахунку параметрів і характеристик асинхронних машин с короткозамкненим ротором на базі уточнених Т-подібних заступних схем. В таких заступних схемах в контурі намагнічування паралельно приєднані один змінний індуктивний опір, що пов'язаний з результуючим полем взаємоіндукції, та декілька змінних активних опорів, значення яких пов'язані із змінами основних та додаткових (поверхневих та пульсаційних) втрат в магнітопроводах статора і ротора. При розрахунках, що були проведені за даною методикою, повітряний проміжок був зменшений в межах 0,05мм, але, не досягав гранично допустимого значення 0,25мм. Потужність машини приймалась від 1,1 до 4,0 кВт, як найбільш доцільною для малих вітроустановок для умов нашої країни, з числом пар полюсів 1,2 та 3. Порівняння результатів з відомими даними, для діапазону потужності 1,1…4 кВт показує збільшення коефіцієнта використання для: 2p=2 до 7%, 2p=4 до 18%, а для 2p=6 до 23%. Бібл. 6, табл.1, рис. 2.
***Ключові слова**: вітроустановка, асинхронний генератор, енергетичні характеристики вітроустановки.*

INCREASING THE POWER OF THE WINDOW GENERATOR FOR THE DECREASE OF AIR LENGTH BETWEEN THE STATOR AND THE ROTOR

V. Golovko[1], doctor of technical science, professor, **E. Dubchak**[2], senior lecturer, **O. Zamoroka**[2], undergraduate

[1]Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv, Ukraine.
[2]National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
03056, 37 Peremohy Av., Kyiv, Ukraine.

Increasing wind power with minimal structural changes has always been a priority in wind power research. The rigid dependence of the power on the rotor shaft of the wind turbine on the aerodynamic characteristics of the blade is known and embodied in engineering solutions. The electrical part of the wind farm is equipped with a common industrial design of synchronous or asynchronous generators, the advantages and disadvantages of which are well known. It is also found that the ratio of power in the generator mode to the power of the machine in the motor mode, becomes greater than one depending on the number of pairs of poles and the power of the machine.
The work is devoted to determining the increase in power of an asynchronous machine in the generator mode due to the influence on the magnetic flux of the maximum allowable reduction of the air gap between the stator and the rotor. In this work we have used advanced methods of calculation of parameters and characteristics of asynchronous machines with short-circuited rotor based on refined T-shaped alternating circuits. In such alternate circuits, one alternating inductive resistance associated with the resultant field of induction and several alternating active resistors, whose values are related to changes in the main and additional (surface and ripple) losses in the stator magnetic circuits, are connected in parallel to the magnetization circuit. . In the calculations performed by this method, the air gap was reduced within 0.05 mm, but did not reach the maximum permissible value of 0.25 mm. The power of the machine was taken from 1.1 to 4.0 kW as the most suitable for small wind turbines for the conditions of our country, with the number of pairs of poles 1.2 and 3. Comparison of the results with known data for the power range of 1.1… 4 kW shows an increase in the utilization rate for: 2p = 2 to 7%, 2p = 4 to 18%, and for 2p = 6 to 23%. Ref. 6, tab. 1, fig. 2.
***Keywords:** wind turbine, asynchronous generator, wind turbine power characteristics.*

© В.М. Головко, Є.М. Дубчак, О.Ю. Заморока, 2020

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)



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: 162.
ORCID: 0000-0003-0195-9654
Контакти: тел./факс: +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Author information: chief researcher at Institute for Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.
Education: graduated from the Ukrainian Agricultural Academy in 1977 with the degree of "Electrification of Agriculture".
Reasearch area: renewable sources of energy, wind power systems, small capacity wind units, autonomous power systems.
Publications: 162.
ORCID: 0000-0003-0195-9654
Contacts: tel./fax: +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net



Є.М. Дубчак
E. Dubchak

Відомості про автора: старший викладач кафедри електромеханіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».
Освіта: закінчив 1979 р. Київський політехнічний інститут за спеціальністю «Електричні машини і апарати».
Наукова сфера: електромашинно-напівпровідникові перетворювачі, системи збудження, машини подвійного живлення.
Публікації: 26.
ORCID: 0000-0001-7654-7908
Контакти: тел./факс: +38-044-285-23-68
e-mail: edubchak@ukr.net

Author information: senior lecturer in the Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".
Education: graduated in 1979 from the Kiev Polytechnic Institute, majoring in Electrical Machines and Apparatus.
Research area: electromachine-semiconductor converters, excitation systems, dual-power machines.
Publications: 26.
ORCID: 0000-0001-7654-7908
Contacts: Phone / Fax + 38-044-285-23-68
E-mail: edubchak@ukr.net



О.Ю. Заморока
O. Zamoroka

Відомості про автора: магістрант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».
Освіта: отримав 2018 р. у Київському політехнічному інституті освітню ступінь бакалавр за спеціальністю «Електричні машини і апарати».
Наукова сфера: відновлювані джерела енергії, вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, автономні системи енергозабезпечення.
Публікації: 0.
ORCID: 0000-0001-7349-6666
Контакти: тел./факс: +38-050-011-83-37
e-mail: zamoroka777333@gmail.com

Author information: undergraduate of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".
Education: obtained bachelor's degree in 2018 in Kiev Polytechnic Institute, majoring in Electrical Machines and Apparatus.
Research area: renewable sources of energy, wind power systems, small capacity wind units, autonomous power systems.
Publications: 0.
ORCID: 0000-0001-7349-6666
Contacts: тел./факс: +38-050-011-83-37
e-mail: zamoroka777333@gmail.com

Перелік використаних позначень та скорочень:

x_m – індуктивний опір взаємоіндукції;
k_μ – коефіцієнт насичення магнітопроводу;
k_m – коефіцієнт насичення;
I_{mr} – струм контура намагнічування.

Вступ. Задача збільшення кількості утилізації енергії вітру завжди є актуальною. Традиційно вона вирішується за рахунок зміни аеродинамічних параметрів ротора вітроустановки. Так для збільшення величини потужності на валу ротора збільшують його діаметр. Але підвищення потужності в два рази призводить до збільшення діаметра ротора в чотири рази. Такий результат викликає подальше зростання розмірів, а значить і маси інших складових вітроагрегата, тобто питома матеріалоємність конструкції зростає і знижується економічна доцільність використання даної установки. Іншим шляхом є застосування більш досконалих профілів лопатей. В [1] наведений аналіз рішень при виборі типу профілю в залежності від коефіцієнта використання енергії вітру (коефіцієнт потужності) та модуля швидкохідності. Встановлено, що перевагу необхідно надавати профілям, що мають високі вимоги до шорсткості поверхні та точності виготовлення (ламінізовані профілі). Застосування таких профілів дозволяє отримати значення коефіцієнта використання енергії вітру більше 0,5.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Другою складовою вітроелектроустановки є електромашинна частка. Переваги та недоліки застосування синхронних та асинхронних машин в генераторному режимі всебічно висвітлені в роботах [2,3,4,5]. Останнім часом детально розглядається можливість застосування асинхронної машини для автономних вітроелектроустановок. В роботі [5] встановлено, що відношення потужності в генераторному режимі до потужності машини в двигунному режимі, стає більше одиниці в залежності від числа пар полюсів та потужності машини (рис.1). Слід відмітити, що з ростом кількості пар полюсів початок перевищення одиниці зсувається вправо, що практично виключає застосування відносно тихохідних машин (1000 об./хв.) малої потужності (до 7,5 кВт) як генераторів для вітроустановок. Одним із шляхів вирішення такої задачі є вплив на величину cosφ шляхом зменшення зазору між статором і ротором в допустимих технологічних межах.

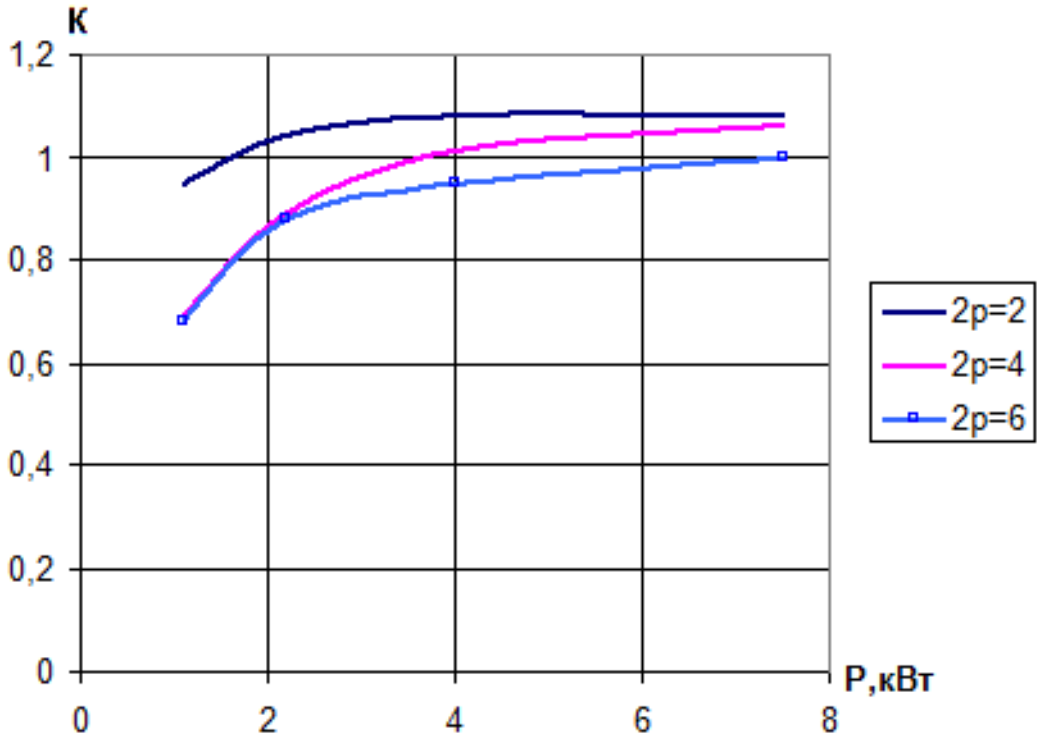


Рис. 1. Залежність коефіцієнта співвідношення потужності асинхронної машини в генераторному та двигунному режимах від її потужності.

Fig. 1. Dependence of the ratio of the power ratio of the asynchronous machine in the generator and motor modes on its power.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення потужності асинхронної машини в генераторному режимі за рахунок впливу на магнітний потік гранично припустимим зменшенням повітряного проміжку.

Результати досліджень. Методика розрахунку характеристики асинхронної машини у режимі двигуна та генератора має доволі громіздкий формат, але дає можливість отримати повний набір реальних параметрів заступної схеми для номінального режиму роботи двигуна та задаючись діапазоном зміни ковзання, отримати реальні значення робочих характеристик: потужностей, струмів, усіх складових суми втрат, енергетичних параметрів двигуна, у тому числі у номінальному режимі. Після цього, змінюючи знак та значення ковзання отримують робочі характеристики машини в генераторному режимі роботи. Обмеженням є номінальне значення струму обмотки статора. При цьому відбувається зміна значення та фази результуючої електрорушійної сили (ЕРС) від результуючого поля в повітряному проміжку та зміна параметрів контуру намагнічування.

На кафедрі електромеханіки НТУУ КПІ було проведено вдосконалення методики розрахунку параметрів і характеристик асинхронних машин с короткозамкненим ротором (АМ), що подане в [6], на базі уточнених Т-подібних заступних схем. В таких заступних схемах в контурі намаг-

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

нічування паралельно приєднані один змінний індуктивний опір, що пов'язаний з результуючим полем взаємоіндукції, та декілька змінних активних опорів, значення яких пов'язані із змінами основних та додаткових (поверхневих та пульсаційних) втрат в магнітопроводах статора і ротора.

Значення змінного індуктивного опору взаємоіндукції xm залежить від насичення магнітопроводу, що змінюється при зміні режиму роботи асинхронної машини.

Алгоритм розрахунку індуктивного опору взаємоіндукції xm реалізовано в середовищі MATHCAD з урахуванням змін індукції та напруженості магнітного поля у відповідності до таблиць намагнічування зубців та ярем магнітопроводів статора і ротора. При задаванні змін ЕРС Eδ в діапазоні від 0 до 1,5 Un розраховується значення магнітного потоку Фδ, індукції в зубцях та ярмах статора і ротора, знаходиться відповідне значення напруженості магнітного поля та магніторушійної сили (МРС) на усіх ділянках магнітопроводу, сумарну МРС та коефіцієнт насичення магнітопроводу kμ, реактивну складову струму контуру намагнічування. За відношенням ЕРС Eδ від результуючого поля у повітряному проміжку до реактивної складової струму намагнічування визначають значення змінного індуктивного опору взаємоіндукції xm та коефіцієнт насичення km для будь-якого значення ЕРС Eδ.

Значення активних опорів контуру намагнічування розраховують за алгоритмом, в якому також вхідною величиною є ЕРС Eδ при частоті напруги живлення 50 Гц, а також масі заліза зубців та ярем статора і ротора. Для данного значення ЕРС Eδ розраховують основні та додаткові (поверхневі та пульсаційні) втрати в магнітопроводах статора і ротора. За відношенням квадрату ЕРС до втрат в залізі магнітопроводу ri50 = m·Eδ2/pi50, визначають значення змінних активних опорів контуру намагнічування, що паралельно з'єднані між собою. Таким чином отримується активна складова струму контуру намагнічування для частоти напруги живлення 50 Гц.

Робочі характеристики машини в режимі двигуна і генератора розраховують при задаванні значення ковзання в діапазоні від -0,1 до+0,1 з кроком, що забезпечує достатню точність. При цьому задають перше - максимальне можливе значення ЕРС Eδ для генераторного режима. Для кожного значення ЕРС визначають величину опору xm, коефіцієнт насичення km та реактивну складову струму контуру намагнічування Imr, що дає можливість визначити частоту ковзання та частоту перемагнічування ротора та складові змінних активних опорів контуру намагнічуван-ня. Таким чином отримують значення активної складової струму в контурі намагнічування Ima. За коефіцієнтом насичення km вираховують зміну індуктивного опору розсіювання обмотки ротора, що дозволяє визначити струми ротора та статора та значення напруги на обмотці статора. Мінімізація різниці цієї величини з напругою мережі, отримують значення робочої характеристики (суму втрат, ККД, фазний струм статора та коефіцієнт потужності) для будь-якого режиму роботи асинхронної машини.

При розрахунках, що були проведені за даною методикою, повітряний проміжок був зменшений в межах 0,05 мм, але, не досягав гранично допустимого значення 0,25 мм. Потужність машини приймалась від 1,1 до 4,0 кВт, як найбільш доцільною для малих вітроустановок для умов нашої країни, з числом пар полюсів 1,2 та 3. Результати розрахунку залежності коефіцієнта використання асинхронної машини в генераторному режимі наведені в табл.1 та на рис. 2.

Таблиця 1. Порівнянні розрахункові показники асинхронних машин в двигунному та генераторному режимах.

Table 1. Comparative calculation of asynchronous machines in engine and generator modes.

Число пар полюсів, p	P_{2d}, кВт	δ_1, мм	δ_2, мм	η_d	$\cos\varphi_d$	η_g	$\cos\varphi_g$	$\frac{\cos\varphi_g}{\cos\varphi_d}$	K
1	1,1	0,35	0,3	0,787	0,918	0,79	0,737	0,803	1,020
	2,2	0,35	0,3	0,845	0,906	0,85	0,8	0,883	1,045
	4	0,45	0,4	0,867	0,897	0,87	0,794	0,885	1,021
2	1,1	0,25	0,25	0,787	0,833	0,75	0,549	0,659	0,837
	2,2	0,25	0,25	0,806	0,846	0,805	0,684	0,809	1,003
	4	0,3	0,25	0,853	0,868	0,86	0,8	0,922	1,080
3	1,1	0,25	0,25	0,748	0,746	0,72	0,507	0,680	0,909
	2,2	0,3	0,25	0,827	0,785	0,82	0,671	0,855	1,034
	4	0,3	0,25	0,798	0,869	0,8	0,713	0,820	1,028

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Зменшення повітряного проміжку призвело до невеликого збільшення коефіцієнтів потужності генератора та двигуна $\cos\varphi_g$ і $\cos\varphi_d$ та їх відношення за рахунок зменшення струму намагнічування, що незначно вплинуло на ККД двигуна, в основному за рахунок збільшення додаткових втрат від пульсацій магнітного поля в зубцях та на поверхні магнітопроводів.

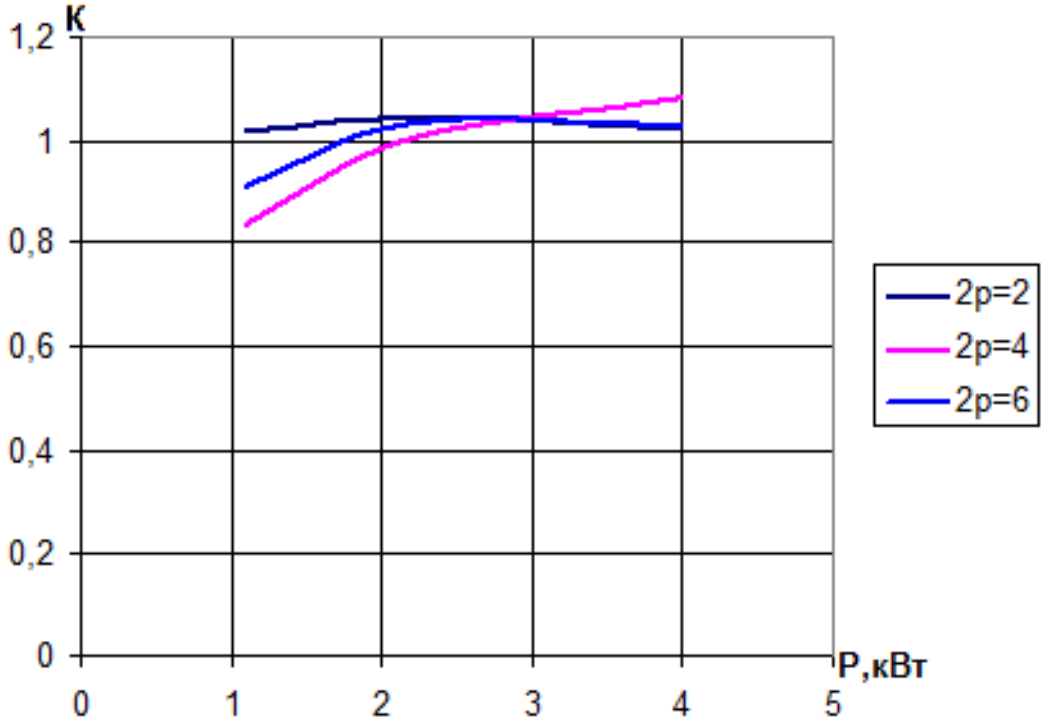


Рис. 2. Залежність коефіцієнта співвідношення потужності модернізованої асинхронної машини в генераторному та двигунному режимах від її потужності.

Fig. 2. Dependence of the power ratio of the modernized asynchronous machine in the generator and motor modes on its power.

Порівняння цих результатів з даними, що наведені на рис.1 для діапазону потужності 1,1…4 кВт, показує збільшення коефіцієнта використання для: 2p=2 до 7%, 2p=4 до 18%, а для 2p=6 до 23%. Тобто при застосуванні більш тихохідних машин зберігається тенденція, що отримана в [5] із збільшенням відносних показників.

Висновки. При проведенні модернізації асинхронної машини за рахунок зменшення повітряного проміжку між статором та ротором розрахунково встановлено, що це дає збільшення потужності в генераторному режимі від 7 до 23% в залежності від кількості пар полюсів машини.

1. *Головко В.М., Коханєвич В.П., Шихайлов М.О., Зінченко Т.В.* Аналіз характеристик параметрів лопаті ротора автономної вітроенергетичної установки. Відновлювана енергетика. 2013. №3. С. 49-53.

2. *Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И.* Неисчерпемая энергия. Кн. 1. Ветроэлетрогенераторы. Учебник. Харков. Нац. Аэрокосм. ун-т Харьк. авиац. ин-т. Севаст. 2003. 400 с.

3. *Брыль А.А., Васько П.Ф., Пекур П.П.* Система генерирования электрической энергии на основе асинхронных машин с короткозамкнутым ротором для автономных ветроэлектрических установок. Регулируемые асинхронные двигатели. сб. науч. трудов. К. Ин-т электродинамики АН Украины. 1992. С. 39-44.

4. *Мхитарян Н.М., Кудря С.А., Перминов Ю.Н., Буденный В.Ф.* Анализ некоторых особенностей синхронных и асинхронных генераторов, используемых в качестве автономных источников энергии. Відновлювана енергетика. 2010. № 2. С. 7-9.

5. *Мазуренко Л.И., Лищенко А.И.* Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономныхэнергоустановок. К. Наукова думка. 2011. 272 с.

6. *Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Могелюк С.О.* Характеристики асинхронных машин с короткозамкнутым ротором в режимах двигателя и генератора. К. 2017. [Електронний ресурс]. URL: http://jour.fea.kpi.ua/article/view/130953/126684.

REFERENCES

1. *Golovko V.M., Kokhanevich V.P., Shikhaylov M.O., Zinchenko T.V.* Analiz kharakteristik parametriv lopati rotora avtonomnoi vitroyenergetichnoi ustanovki. [Analysis of the characteristics of the rotor blades parameters of the autonomous wind power installation]. Vidnovluvana energetika. 2013. No. 3. Pp. 49-53. [in Ukrainian].

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

2. *Krivtsov V.S., Oleynikov A.M., Yakovlev A.I.* Neischerpemaya energiya. [Wind power generators]. Book 1. Vetroeyeletrogeneratory. Textbook. Kharkov. Nats. Aerokosm. un-t. Khark. aviats. in-t. Sevast. 2003. 400 p. [in Russian].

3. *Bryl A.A., Vasko P.F., Pekur P.P.* Sistema generirovaniya elektricheskoy energii na osnove asinkhronnykh mashin s korotkozamknutym rotorom dlya avtonomnykh vetroelektricheskikh ustanovok. Reguliruyemyye asinkhronnyye dvigateli. [A system for generating electrical energy based on asynchronous machines with short-circuited rotor for autonomous wind farms. Adjustable induction motors]. sat. scientific works. K. In-t. elektrodinamiki AN Ukrainy. 1992. Pp. 39-44. [in Russian].

4. *Mkhitaryan N.M., Kudrya S.A., Perminov Yu.N., Budennyy V.F.* Analiz nekotorykh osobennostey sinkhronnykh i asinkhronnykh generatorov, ispolzuyemykh v kachestve avtonomnykh istochnikov energii. [Analysis of some features of synchronous and asynchronous generators used as stand-alone energy sources]. Vidnovluvana energetika. 2010. No. 2. Pp. 7-9. [in Russian].

5. *Mazurenko L.I., Lishchenko A.I.* Asinkhronnyye generatory s ventilnym i ventilno-yemkostnym vozbuzhdeniyem dlya avtonomnykhenergoustanovok. [Asynchronous generators with valve and valve-capacitive excitation for autonomous power plants]. K. Naukova dumka, 2011. 272 p. [in Russian].

6. *Galinovskiy A.M., Dubchak Ye.M., Mogelyuk S.O.* Kharakteristiki asinkhronnykh mashin s korotkozamknutym rotorom v rezhimakh dvigatelya i generatora. [Characteristics of asynchronous machines with short-circuited rotor in engine and generator modes]. K. 2017. [Electronic resource]. URL: http://jour.fea.kpi.ua/article/view/130953/126684. [in Russian].

ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ВЕТРОУСТАНОВКИ ЗА СЧЕТ УМЕНЬШЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА МЕЖДУ СТАТОРОМ И РОТОРОМ

В.М. Головко[1], докт. техн. наук, проф., **Е.М. Дупчак**[2], ст. препод., **А.Ю. Заморока**[2], магистрант

[1]Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094, ул. Гната Хоткевича, 20А, г. Киев, Украина.

[2]Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», 03056, пр. Победы, 36, г. Киев, Украина.

Увеличение мощности ветроустановки при минимальных конструкционных изменениях всегда было приоритетным направлением исследований в ветроэнергетике. Жесткая зависимость мощности на валу ротора ветроустановки от аэродинамических характеристик лопасти известны и воплощены в инженерные решения. Электромашинная часть ветроустановки комплектуется общепромышленным исполнением синхронных или асинхронных генераторов, преимущества и недостатки применения которых всесторонне известны. Также установлено, что отношение мощности в генераторном режиме к мощности машины в двигательном режиме становится больше единицы в зависимости от числа пар полюсов и мощности машины.

Работа посвящена определению повышения мощности асинхронной машины в генераторном режиме за счет влияния на магнитный поток предельно допустимого уменьшения воздушного зазора между статором и ротором. В данной работе использована усовершенствованная методика расчета параметров и характеристик асинхронных машин с короткозамкнутым ротором на базе уточненных Т-образных схем замещения. В таких схемах замещения в контуре намагничивания параллельно присоединены одно переменное индуктивное сопротивление, связанное с результирующим полем взаимоиндукции и несколько переменных активных сопротивлений, значения которых связаны с изменениями основных и дополнительных (поверхностных и пульсационных) потерь в магнитопроводах статора и ротора. При расчетах, проведенных по данной методике, воздушный промежуток был уменьшен в пределах 0,05мм, но не достигал предельно допустимого значения 0,25мм. Мощность машины принималась от 1,1 до 4,0 кВт, как наиболее целесообразной для малых ветроустановок для условий нашей страны, с числом пар полюсов 1,2 и 3. Сравнение результатов с известными данными, для диапазона мощности 1, 1 ... 4 кВт показывает увеличение коэффициента использования для: 2p = 2 до 7%, 2p = 4 до 18%, а для 2p = 6 до 23%. Библ. 6, табл. 1, рис. 2

Ключевые слова: *ветроустановка, асинхронный генератор, энергетические характеристики ветроустановки.*

Стаття надійшла до редакції 26.11.19
Остаточна версія 17.03.20

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

УДК 621.548 DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).42-51

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ (600÷3600) КВТ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Ю.Н. Перминов[1], канд. техн. наук, **Е.А. Монахов[2], Л.П. Волков[3]**

[1]Институт возобновляемой энергетики НАН Украины,
02094, ул. Гната Хоткевича, 20А, г. Киев, Украина.
[2]Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
03056, пр. Победы, 36, г. Киев, Украина.
[3]Институт экологического управления и сбалансированного природопользования,
02002, ул. Никольско-Слободская, 6-Д, г. Киев, Украина.

В статье на основе оценки характеристик некоторых ветрозон Украины [1] и применяемой при проектировании скорости ветра за рубежом проведено сравнение основных параметров ветрогенераторов. Для этого по определенному алгоритму [4-9] был рассчитан ряд синхронных генераторов мощностью от 600 до 3600 кВт с ориентиром на мощности машин, выпускаемых «Заводом крупных электрических машин» (г. Каховка), но за базовую конструкцию при расчетах принят генератор, представленный в [2]. Особенностью конструкции этого генератора – отсутствие ярма статора (корпуса). Корпусом генератора является пакет статора с обмоткой, поэтому он представляет собой модуль головки ветроустановки, это позволяет уменьшить его массу и габариты.

До настоящего времени наиболее широко применились асинхронные генераторы с мультипликаторами для повышения частоты вращения, учитывая, что частота вращения ветроколеса уменьшается с повышением мощности ветроустановки и составляет всего несколько оборотов в минуту. С увеличением частоты вращения уменьшается электромагнитный момент, объем и масса генератора, но увеличиваются соответствующие параметры мультипликатора. В последние годы наметилась тенденция применения безредукторних синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов, что позволяет упростить конструкцию агрегата, повысить надежность установки, исключить необходимость обслуживания редуктора (мультипликатора) и потери на возбуждение. В связи с этим, в работе проведено сравнение указанных вариантов выполнения агрегатной части ветроустановок по электромагнитным параметрам, массе и габаритам.

Изменение геометрических соотношений генератора определяет его электромагнитные параметры, поэтому отмечены оптимальные отношения диаметров корпуса и ротора, ширины паза и зубца, определена зависимость геометрии зубцовой зоны и мощности от принятого числа пазов на полюс и фазу (q); обоснована возможность применения «меандровой» обмотки в связи с малым расчетным значением числа витков в секции. Такая обмотка позволяет упростить технологию её изготовления, возможность увеличения коэффициента заполнения паза и мощности при решении технологических вопросов изготовления. Библ. 9, рис. 3.

Ключевые слова: *синхронные генераторы; асинхронные генераторы; мощность ветроустановки; частота вращения; электромагнитный момент; постоянные магниты; числов пазов на полюс и фазу; коэффициент заполнения паза.*

DESIGN PERMANENT MAGNET WINDGENERATOR OF INCREASED POWER (600÷3600) KW

Y. Permynov[1], candidate of technical sciences, **E. Monakhov[2], L. Volkov[3]**

[1] Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv, Ukraine.
[2] National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
03056, 37 Peremohy Av., Kyiv, Ukraine.
[3]Institute of ecological management and balanced nature management,
02002, Nikolsko-Slobidska str., 6 D, Kyiv, Ukraine.

Based on the assessment of the characteristics of some wind zones in Ukraine [1] and used abroad the wind speed in the design of windgenerators, the paper provides comparison of the main parameters of wind generators. According to a certain algorithm [4–9], a number of synchronous generators with a capacity of 600 to 3600 kW were calculated with a reference to the power of machines manufactured by the Large Electric Machine Plant (Kakhovka). The design presented in the paper [2] was taken as a basic design, which has not a case. The yoke of the stator plays role of the case. The stator with winding plays role of a module of the head of a wind turbine, that allows to reduce its weight and dimensions.

At the present time asynchronous generators with gears have been most widely used for increasing the speed, because the rotation speed of wind wheel decrease with power increase and is only a few revolutions per minute. With increasing speed, the electromagnetic torque, volume and mass of the generator decrease, but the corresponding parameters of the multiplier increase. In recent years, there has been a tendency to use gearless synchronous generators with permanent magnet excitation, which simplifies the

© Ю.Н. Перминов, Е.А. Монахов, Л.П. Волков, 2020

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

design of the unit, improves the reliability of the installation, eliminates the need for maintenance of the gearbox (multiplier) and excitation losses. In this regard, the work compares these options for the implementation of the modular part of wind turbines in terms of electromagnetic parameters, mass and dimensions.
A change in the geometric relationships of the generator determines its electromagnetic parameters, therefore, the optimum ratios of the diameters of the stator and the rotor, the width of the slot and the tooth are determined, the dependence of the geometry of the tooth zone and power on the accepted number of slot per pole and phase (q) is determined; the possibility of using a "meander" winding due to the small calculated value of the number of turns in the section is substantiated. Such a winding allows to simplify the technology of its manufacture, gives the possibility of increasing the fill factor of the slot and power. Ref. 9, fig. 3.
Keywords: *synchronous generators; asynchronous generators; wind generator power; rotation speed; electromagnetic torque; permanent magnets; slots per pole and phase; slot filling coefficient.*



Ю.Н. Перминов
Y. Permynov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института возобновляемой энергетики НАН Украины.
Образование: окончил в 1968 г. Киевский политехнический институт по специальности «Электрические машины и аппараты».
Научная сфера: ветрогенераторы, ветроустановки малой мощности, гидрогенераторы, устройства с постоянными магнитами.
Публікации: 85.
ORCID: 10000–0001–5604–8327
Контакты: тел./факс: +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Author information: candidate of technical sciences, Senior Researcher at Institute for Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.
Education: graduated from the Kiev Polytechnic Institute in 1968 with a degree in Electrical Machines and Apparatuses.
Research area: wind power systems, small capacity wind units, hydrogenerators, devices with permanent magnets
Publications: 85.
ORCID: 10000–0001–5604–8327
Contacts: phone./fax: +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net



Е.А. Монахов
E. Monakhov

Сведения об авторе: асистент кафедры электромеханики КПИ им. И. Сикорского, Киев.
Образование: окончил в 2012 г. Киевский политехнический институт по специальности «Электрические машины и аппараты».
Научная сфера: машины с постоянными магнитами, синхронные генераторы, малые электростанции, гидроэлектростанции.
Публикации: 24.
ORCID: 0000-0001-8408-8051
Контакты: тел./факс: +38-095-317-61-15
e-mail: emonachov@gmail.com

Author information: assistant of department of electomechanics in Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
Education: graduated from the Kyiv Polytechnic Institute in 2012 with the specialization «Electrical machines and apparatus».
Research area: permanent magnet machines, synchronous generators, small energy plants, hydropower plants.
Publications: 24.
ORCID: 0000-0001-8408-8051
Contacts: phone/fax: +38-095-317-61-15
e-mail: emonachov@gmail.com



Л.П. Волков
L. Volkov

Сведения об авторе: старший научный сотрудник отдела научно-методологического обеспечения Института экологического управления и сбалансированного природопользования, г. Киев.
Образование: окончил в 1959 г. Московский энергетический институт (МЭИ) по специальности «Электрификация промышленных предприятий».
Научная сфера: электропривод, электрические машины.
Публикации: 20.
ORCID: 0000-0003-1988-9666
Контакты: тел./факс: +38-044-206-28-09
e-mail: volleo35@gmail.com

Author information: senior staff scientist of scientific-methodological support department in Institute of ecological management and balanced nature management, Kiev.
Education: graduated the Moscow energy institute in 1959 with specialization «Electrification of industrial enterprises».
Research area: electric drive, electrical machines.
Publications: 20.
ORCID: 0000-0003-1988-9666
Contacts: phone/fax: +38-044-206-28-09
e-mail: volleo35@gmail.com

Перечень используемых обозначений и сокращений:

$M_э$	– электромагнитный момент;	v	– скорость воздушного потока;
P	– мощность генератора;	k	– к.п.д. ветроколеса;
A	– линейная нагрузка;	D	– диаметр ветроколеса;
B_δ	– индукция в рабочем зазоре;	ϖ	– угловая частота вращения;
D_a	– диаметр ротора;	z'	– коэффициент быстроходности;
l_a	– активная длина ротора;	S	– площадь ометаемой поверхности;
ρ	– плотность воздуха;	f	– частота напряжения.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Введение. Одним из основных факторов, определяющих мощность ветроустановки, является скорость ветрового потока. В Украине в наиболее активных ветрозонах скорость ветра – (4,5-5) м/с [1], поэтому с учётом порывов ветра при проектировании ветрогенераторов для Украины принимается усредненное значение скорости – 8 м/с. В зарубежной практике принимается скорость ветра – (12-14) м/с, учитывая применение установок на побережьях (или с выносом в море) и в наиболее активных зонах на материках. Так как мощность ветрового потока определяется кубом скорости, то при таких исходных параметрах при проектировании генераторов их массогабаритные показатели и цена существенно отличаются. До настоящего времени в мощных установках применялись асинхронные генераторы с мультипликаторами для увеличения частоты их вращения, что позволяет при заданной мощности установки пропорционально уменьшить электромагнитный момент и объем ротора при принятых удельных электромагнитных нагрузках (индукции в зазоре и линейной нагрузке). Уменьшение объема ротора сопровождается уменьшением габаритов и массы всего генератора. Однако, при этом растут габариты и масса мультипликатора. Такая взаимосвязь факторов, определяющих массогабаритные показатели всего агрегата, снижение его надёжности и необходимость обслуживания мультипликатора обусловили целесообразность разработки безредукторного синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов, отличающегося простотой конструкции, отсутствием потерь на возбуждение и надёжностью.

Постановка задачи. В статье рассмотрены некоторые возможные решения задачи создания синхронных ветрогенераторов с возбуждением от постоянных магнитов. Для этого необходимо: учесть усредненное значение скорости ветра при их применении в Украине или за рубежом (табл. 1); оценить целесообразность применения мультипликаторов в агрегате ветроустановки; определить особенности изменение геометрических соотношений зубцовой зоны статора, связанные с малой скоростью вращения генератора в установке без мультипликатора и при этом расмотреть возможные варианты выполнения обмоток; определить оптимальные соотношения основных геометрических размеров – диаметра ротора и статора; учесть особенности проектирования магнитной системы с постоянными магнитами.

Таблица 1. Сравнительные характеристики ветроустановок при разных скоростях ветра (8; 12) м/с.

Table 1. Comparison of windturbine characteristics at different wind speed (8; 12) m/s.

V, м/с			ГСС-630К	ГСБ-630К	ГСБ-630М	ГСБ800	СБ-1100	ГСБ1100L
			300 кВт	630 кВт	800 кВт	1000 кВт	2750 кВт	3600 кВт
8 м/с	S	($м^2$)	3004	6309	8012	10015	27541	36054
	D	(м)	61,8	89,6	101	113	187	214
	ω	рад/с	1,81	1,25	1,1	0,97	0,6	0,53
	n	об/мин	17,2	12	10,5	19	6	5
	$M_э$	Н·м	166000	506000	719000	1000000	4500000	6700000
	U	В	690	690	690	1000	1000	1000
	f	Гц	50	50	50	50	50	50
	$D_р$	м	2,8	4	4,6	5,1	8,5	9,7
	$l_р$	м	0,85	1,2	1,38	1,53	2,55	2,9
	Dк	м	3,22	4,6	5,29	5,86	9,77	11,15
12 м/с	S	($м^2$)	347	729	926	1157	1591	4166
	D	(м)	21	30	34	38	45	73
	ω	рад/с	8	5,6	5	4,5	3,8	2,3
	n	об/мин	76	53,5	48	43	36	22
	$M_э$	Н·м	37500	112500	160000	222000	723000	1565000
	U	В	690	690	690	1000	1000	1000
	f	Гц	50	50	50	50	50	50
	$D_р$	м	1,7	2,5	2,8	3,1	4,6	5,9
	$l_р$	м	0,51	0,75	0,84	0,93	1,38	1,77
	$D_к$	м	1,95	2,87	3,22	3,56	5,29	6,78

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

В табл. 1 приняты следующие обозначения: S – площадь ометаемой поверхности ветроколеса ($м^2$), D – диаметр ветроколеса (м), ω – угловая частота вращения ветроколеса (рад/с), n – скорость вращения ветроколеса (об/мин), $M_э$– электромагнитный момент генератора (Н·м), U – напряжение генератора (В), f – частота напряжения (Гц), $D_р$ – диаметр ротора генератора (м), $L_р$ – активная длина ротора генератора (м), $D_к$ – диаметр корпуса генератора (м).

Одним из основных факторов, определяющих массогабаритные показатели, а также стоимость цену ветроустановки является скорость ветрового потока. В Украине составлены карты ветрозон [1], позволяющие определить усредненные скорости ветрового потока в различных регионах. Установлено, что наибольшие скорости ветра наблюдаются в Херсонской области, Крыму, Карпатах, где скорость ветра изменяется от 4,5 до 5 м/с, а порывы ветра – до 8 м/с и более, которые составляет примерно 20% общего времени работы установки. Поэтому при проектировании генераторов применительно к Украине принимается расчётная скорость ветра около 8 м/с. В зарубежной практике предполагается, что скорость ветра составляет – 12-14 м/с, учитывая их использование в наиболее активных зонах материков, на побережьях морей и океанов и выноса их в море. Принятые скорости ветра обуславливает существенную разницу расчётных параметров установок.

Мощность ветрового потока определяется зависимостью:

$$P = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3 \cdot k}{2 \cdot \eta}, \qquad (1)$$

где v – скорость ветрового потока (м/с); $\rho = 1,3$ $кг/м^3$ – плотность воздуха; S – площадь ометаемой поверхности ветроколеса ($м^2$); $k \approx 0,38 \div 0,4$ – коэффициент использования ветрового потока; η – к.п.д. генератора.

Из (1) определяются площадь ометаемой поверхности

$$S = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot v^3 \cdot k}, \qquad (2)$$

диаметр ветроколеса

$$D = \sqrt{\frac{S}{0,785}}, \text{ (м)}, \qquad (3)$$

угловая частота вращения ветроколеса

$$\varpi = \frac{z' \cdot v}{R}, \; рад/с, \qquad (4)$$

где $z' \approx (4,5-6)$ – коэффициент быстроходности осевого ветроколеса, представляющий отношение линейной скорости вращения концов лопастей колеса к скорости набегающего потока, а R – радиус ветроколеса (м).

По угловой частоте вращения (4) и заданной частоте выходного напряжения (*f*) определяются число пар полюсов магнитной системы генератора

$$p = \frac{f \cdot 60}{n} \qquad (5)$$

и электромагнитный момент генератора

$$M_э = \frac{P}{\varpi}. \qquad (6)$$

Из формулы для электромагнитного момента

$$M_э = \alpha_i \cdot A_{ср} \cdot B_{\delta ср} \cdot \pi \cdot D_p^3 \cdot \lambda, \text{ (Н·м)} \qquad (7)$$

определяется диаметр ротора

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{M_э}{\alpha_i \cdot A_{ср} \cdot B_{\delta ср} \cdot \pi \cdot \lambda}}, \text{ (м)}, \qquad (8)$$

где: α_i – коэффициент полюсного перекрытия; $A_{ср} \approx 13 \cdot 10^3$ (А/м) – линейная нагрузка; $B_{\delta ср} \approx 0,78$ (Тл) – средняя величина индукции в рабочем зазоре; $\lambda = \frac{L_p}{D_p}$ – отношение активной длины ротора к диаметру;

Величины удельных электромагнитных нагрузок ($A_{ср}$, $B_{\delta ср}$) приняты на основе опыта проектирования и результатов испытаний машин с возбуждением от постоянных магнитов [2]. По проведённому алгоритму (1)-(7) был рассчитан ряд генераторов без мультипликаторов мощностью от 300 до 3600 кВт с ориентиром на мощно-

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

сти электрических машин, выпускаемых «Заводом крупных электрических машин» (г. Каховка), но за базовую конструкцию при расчётах принят генератор, представленный в [2]. Особенность конструкции этого генератора – отсутствие ярма статора (корпуса). Корпусом генератора является пакет статора с обмоткой, поэтому он представляет собой модуль головки ветроустановки, корпус которой является корпусом генератора, что позволяет уменьшить его массу и габариты. Ротор генератора представляет собой многополосную радиальную магнитную систему с магнитами NdFeB, отличающихся высоким уровнем магнитных параметров: остаточная индукция B_r=(0.93-1.1)Тл, коэрцитивная сила – H_c=(930-1100) кА/м, что позволяет минимизировать массогабаритные показатели генератора. Статор генератора – пазовый с всыпной двухслойной обмоткой, но как будет показано ниже, могут быть и другие варианты обмоток. Для улучшения агрегатирования генератора в головку ветроустановки он выполнен уплощённой конструкции, с малым отношением активной длины ротора к его диаметру.

Приведенные в табл.1 результаты расчётов основных геометрических размеров ветроколес и генераторов мощностью (300-3600) кВт на разных скоростях ветра (8; 12) м/с показывают существенно завышенную массу и габариты генераторов и ветроколес на меньшей скорости ветрового потока. Поэтому для повышения эффективности ветроустановок целесообразно увеличивать высоту опор для использования потоков воздуха с большей скоростью, однако, при этом растёт стоимость и усложняется монтаж установки. Эффективность ветроустановки может быть также повышена за счет агрегатной части в целом и генератора в частности.

До настоящего времени наиболее широко применялись асинхронные генераторы с мультипликаторами для повышения частоты вращения, учитывая, что частота вращения ветроколеса уменьшается с повышением мощности установки и составляет всего несколько оборотов в минуту (табл.1), а электродвижущая сила генератор пропорциональна частоте его вращения. С увеличением частоты вращения уменьшается электромагнитный момент (6) и объем генератора, однако при этом увеличиваются объем и масса, усложняется конструкция мультипликатора и растут габариты всей агрегатной части установки. Поэтому в последние годы стали применяться синхронные генераторы мегаваттной мощности (6 MBT, GE, Haliade offshore wind turbine; 7 МВт MSPMG) с возбуждением от постоянных магнитов типа NdFeB без мультипликаторов. Такие генераторы отличаются простотой конструкции, отсутствием потерь на возбуждение, надёжностью, что позволяет их использование в суровых климатических условиях. Примером может служить ветроустановка NW 100/19, разработанная фирмой Northern при участии NASA, научного фонда (NSF), министерства энергетики (NREL) и компании Siemens-Westinghouse. Модель NW 100/19 специально разработана для работы в экстремальных условиях (Аляска) имеет характеристики, которые облегчают её использование для работы в автономных и изолированных от централизованной электрической сети системах. Она отличается от традиционных ВЭУ отсутствием трансмиссии, постоянным шагам лопастей, минимальным количеством движущихся и чувствительных к внешним воздействиям частей, простотой конструкции ротора, который представляет собой «колесо со спицами», на обечайки которого размещены постоянные магниты как составляющие части радиальной магнитной системы.

Общие характеристики асинхронных генераторов с мультипликаторами и синхронных безредукторных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов могут быть более полно представлены в табл. 2. В табл. 2 приведены сравнительные параметры двух ветроустановок одинаковой мощности – 600 кВт с асинхронным генератором и мультипликатором – серийно выпускавшейся установки «TURBOWINDS T600-48» и расчетные значения параметров синхронного генератора без мультипликатора с возбуждением от постоянных магнитов NdFeB, конструкция которого описано ранее [2].

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Таблица 2. Сравнительные характеристики асинхронного генератора с трансмиссией и синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитах при равных мощностях и скорости ветра 12 м/с.

Table 2. Comparative characteristics of asynchronous gearbox generator and permanent magnet synchronous gearless generator with equal power.

Тип генератора	N	$D_к$, м	$k_б$	$n_к$, об/мин	$P_н$, кВт	$n_н$, об/мин	$M_н$, Н·м	$U_н$, В	$I_{фн}$, А	η	$D_р$, м	$l_р$, м
Асинхронный (с трансмиссией)	3	48	4,6	24	600	1500	4000	690	326	0,9	0,64	0,74
	$D_м$, м	$l_м$, м	$m_г$, т	$m_м$, т	∑m, т	A, А/м	$B_δ$, Тл	cosφ	$P_{уд}$, кВт/м^2	l_0, м	$D_{кг}$, м	$l_{кг}$, м
	1,45	1,63	3	5,4	8,4	8200	0,8	0,89	5,3	3	0,9	1,4
Тип генератора	N	$D_к$, м	$k_б$	$n_к$, об/мин	$P_н$, кВт	$n_н$, об/мин	$M_н$, Н·м	$U_н$, В	$I_{фн}$, А	η	$D_р$, м	$l_р$, м
Синхронный (без трансмиссии)	3	46	4,6	24	600	24	238	690	309	0,96	3,4	0,2
	$D_м$, м	$l_м$, м	$m_г$, т	$m_м$, т	∑m, т	A, А/м	$B_δ$, Тл	cosφ	$P_{уд}$, кВт/м^2	l_0, м	$D_{кг}$, м	$l_{кг}$, м
	-	-	8	-	8	10	0,8	0,94	5,5	0,3	3,5	0,3

В табл. 2 приняты следующие обозначения: N – количество лопастей ветроколеса, $D_к$ – диаметр ветроколеса, $k_б$ – коэффициент быстроходности ветроколеса, $n_к$ – частота вращения ветроколеса, $\eta_к$ – к.п.д. ветроколеса, $P_н$ – номинальная мощность ветроустановки, $n_н$ – частота вращения генератора, $M_н$ – номинальный момент генератора, $U_н$ – номинальное фазное напряжение, $I_{фн}$ – номинальный фазный ток, η – к.п.д. генератора, $D_р$ – диаметр ротора генератора, $l_р$ – активная длина ротора генератора, $D_м$ – диаметр корпуса мультипликатора, $l_м$ – длина корпуса мультипликатора, $m_г$, – масса генератора, $m_м$ – масса мультипликатора, ∑m – общая масса агрегата, A – линейная нагрузка, $B_δ$ – индукция в рабочем зазоре, cosφ – коэффициент мощности, $P_{уд}$ – удельные потери с поверхности корпуса без торцов, l_0 – общая длина агрегата, $D_{кг}$ – диаметр корпуса генератора, $l_{кг}$ – длина корпуса генератора.

Как видно из табл. 2, при равных скоростях ветра, одинаковых мощности установок, геометрических размерах и конструкциях ветроколес і сравнимых удельных электромагнитных нагрузках генераторов ($B_δ$, A), асинхронный генератор с мультипликатором и синхронный генератор без мультипликатора (безкорпусной) имеют сравнимые массы, но при этом существенно отличаются габаритами: асинхронный генератор с мультипликатором имеет суммарный осевой размер – 3 м при диаметрах корпуса генератора $D_{кг}$≈0,9м и корпуса мультипликатора – $D_м$≈1,45 м; синхронный генератор (безкорпусной, с возбуждением от постоянных магнитов) имеет диаметр корпуса – $D_{кг}$≈3,5, осевой размер $l_{кг}$≈0,3м. При этом, учитывая указанные преимущества такой конструкции, можно считать её более перспективный и необходимо решать вопросы оптимального проектирования для повышения эффективности синхронного генератора со возбуждением от постоянных магнитов. Для этого был проведён расчёт ряда генераторов мощностью от 20 кВт до 2000 кВт.

Такой подход позволяет установить геометрические соотношений генераторов близкие к оптимальным с учётом требуемых номинальных параметров (напряжения и его частоты, частоты вращения ветроколеса, коэффициента полезного действия, габаритов генератора) без различных допущений с учётом насыщения участка магнитной цепи, допустимых электромагнитных нагрузок (удельного теплового потока, плотности тока, температуры), требований агрегатирования генератора в головку ветроустановки и возможных технологических ограничений при изготовлении генератора.

Одно из основных требований к электрическим генераторам – высокий удельный момент и мощность, определяемых отношением этих параметров к объему (массе) устройства. Так при заданном диаметре корпуса генератора (пакета статора) увеличение диаметра ротора происходит увеличение полного магнитного потока ($pФ_δ$) и уменьшения полного тока (j(Nq)), где j – допустимая по опыту проектирования плотность тока в обмотке, Nq – полное сечение токового слоя, определяемое числом проводников (N) и сечением проводника. Электромагнитный момент (исходя из технического задания – скорости ветра и мощности ветроустановки) генератора, определяется произведением полного магнитного потока на полной ток (7). При этом необходимо, чтобы

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

индукция в спинках статора и ротора не превышала значений выше колена кривой намагничивания применяемой марки стали. Подобные закономерности наблюдаются и непосредственно в зоне зубец – паз. Ограничением полезного потока зубцовых машинах с радиальной магнитной системой является насыщение зубцов, поэтому расширение зубцов сопровождается увеличением полезного потока, но при определённом зубцовом делении (зубец и паз) происходит сужение паза, то есть уменьшается сечения проводников (Nq) и полного тока. В результате должно быть выдержано оптимальное соотношение ширины зубца и паза. В табл. 3 приведены результаты расчётов указанного ряда генераторов, позволяющие определить приемлемые геометрические соотношения генераторов рассматриваемой конструкции при их проектировании.

Таблица 3. Изменение геометрических соотношений генераторов мощностью (20-2000) кВт.

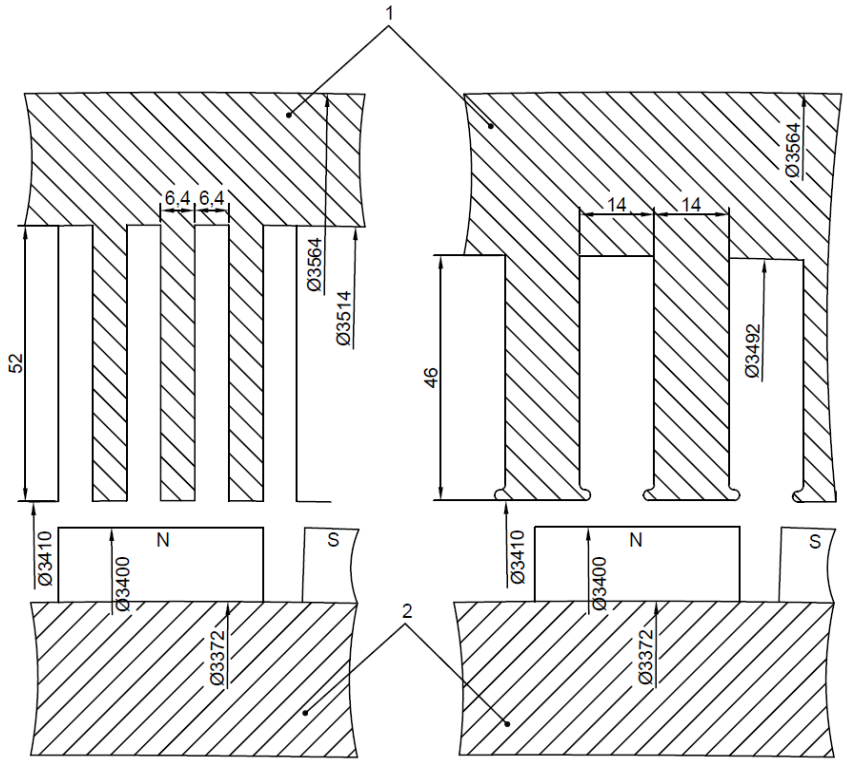
Table 3. The change of the geometry relationships with powers of (20-2000) kW.

P	n	$U_ф$	f	$D_к$	$D_р$	b_z	$b_п$	$b_z/b_п$	$h_п$	$h_я$	δ	λ	$D_к/D_р$	$P_{уд}$	θ
кВт	об/мин	В	Гц	мм	мм	мм	мм	о.е.	мм	мм	мм	о.е.	о.е.	Вт/м^2	град.
20	100	220	30	819	700	12	10	1,2	20	20	1,5	0,3	1,08	3000	45
50	50	220	50	1271	1180	6	5	1,2	28	15	2,5	0,3	1,077	4200	65
120	32	220	50	1849	1723	6,5	6	1,06	45	17	3	0,3	1,073	5500	80
600	14	690	50	3431	3251	4,24	4	1,06	56	20,5	4	0,3	1,055	5600	81
2000	8	690	50	4642	4420	6,3	6	1,05	75	30	6	0,3	1,05	5650	82

В таблице 3 приняты следующие обозначения: n – частота вращения ветроколеса (генератора), $U_ф$ – фазное напряжение, f – частота выходного напряжения, $D_к$ – диаметр корпуса генератора, который в рассматриваемой конструкции равен диаметру пакета статора, $D_р$ – диаметр ротора генератора, b_z – ширина зубца, $b_п$ – ширина паза, $b_z/b_п$ – относительное значения ширины зубца и ширины паза, $h_п$ – глубина паза, $h_я$ – толщина пакета статора, δ – полный немагнитный зазор, λ – отношение активной длины ротора к его диаметру, $D_к/D_р$ – относительные значения диаметров корпусов статора и ротора, $P_{уд}$ – удельные потери с внешней поверхности статора, θ – превышение температуры статора над температурой окружающей среды.

Как видно из табл. 3, генераторы повышенной мощности имеют небольшие ширину паза и зубца (b_z и $b_п$) при большой глубине паза ($h_п$). Данное обстоятельство объясняется прежде всего низкой частотой вращения безредукторных ветрогенераторов (табл.1). Поэтому при заданной частоте напряжения (f) и определённой частоте вращения ветроколеса необходимо большое число полюсов магнитной системы (5), что обуславливает малую величину зубцового деления, а следовательно, малые величины ширины зубца и паза. Сравнительно большая глубина паза определяется при этом большими токами, требуемым полным сечением токового слоя (Nq) с увеличением мощности генераторов. Такая геометрия зубцовой зоны может сопровождаться технологическими трудностями изготовления пакета статора и обмотки, поэтому были проведены расчёты генератора мощностью 600 кВт с разным значением числа пазов на полюс и фазу (q=0,3;0,5;1). Уменьшение “q” сопровождается увеличением зубцового деления, ширины зубца и паза (рис. 1а – q=1, рис. 1б – q=0.5), но при этом несколько уменьшается мощность генератора (рис. 2), так как изменяется коэффициент распределения обмотки [3].

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)



а) **б)**

Рис. 1. Фрагмент магнитной системы генератора мощностью 600 кВт: 1 – пакет статора; 2 – ярмо ротора.

Fig. 1. Fragment of magnetic system of 600 kW generator: 1 – stator core, 2 – rotor yoke.

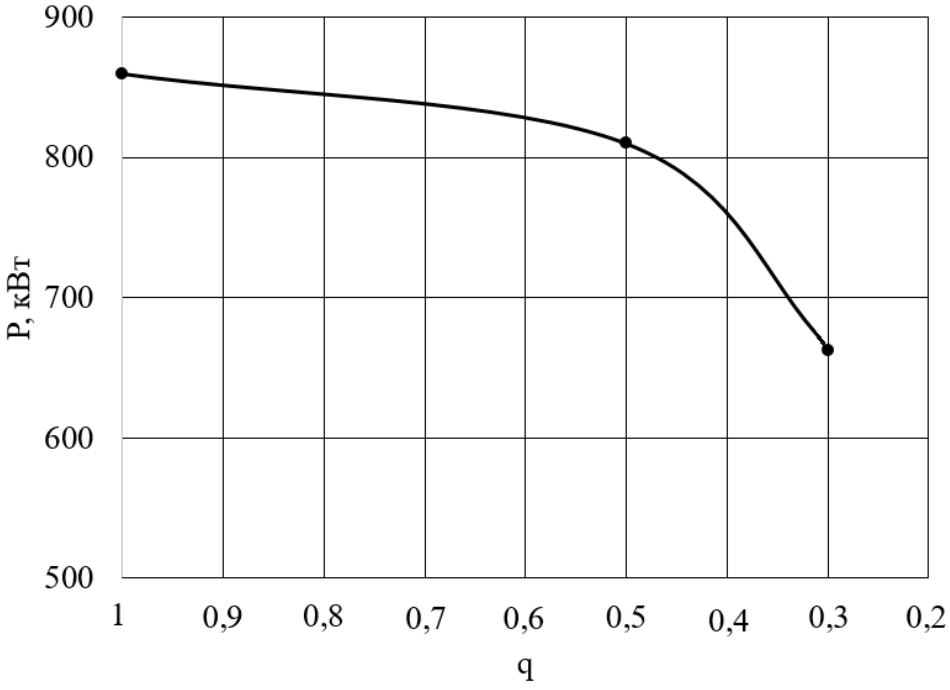


Рис. 2. Зависимость мощности генератора от числа пазов на полюс и фазу (q).

Fig. 2. Power dependence on the quantity of slots per pole and phase (q).

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Для упрощения изготовления обмотки при больших токах и сечении проводников и малой ширине паза может применяться, как вариант, всыпная двухслойная обмотка из нескольких параллельных ветвей в фазе и параллельных проводников в секции для уменьшения сечения элементарного проводника. Как показали расчёты машин при определении числа витков секции по известной формуле [3]

$$E = 4,44 \cdot f \cdot W_{ф} \cdot Ф \cdot k_{об} \qquad (8)$$

число витков в секции – W_c=0,5 с большим требуемым сечением фазного провода с одним проводником в пазу обусловит возможность выполнения трехфазной обмотки в виде трёх независимых меандров, разнесённых по высоте глубокого паза в трёх плоскостях (рис. 3) для исключения пересечения меандров большого сечения в лобовых частях обмотки и сдвинутых на 120° электрических градусов.

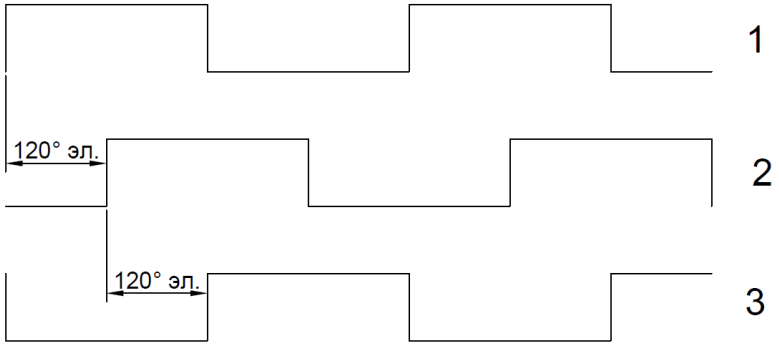


Рис. 3. Меандровая обмотка (q=1, W_c=0,5).

Fig. 3. Meander winging (q=1, W_c=0,5).

В этом случае каждая фаза будет представлять собой один непрерывный меандр, выполненный кабелем (шиной), что позволит устранить необходимость соединения секции в фазе и уменьшить потери в лобовых частях, так будет устранена одна лобовая часть в сравнение с витком.

В этом случае расчёт электродвижущей силы фазы может быть выполнен по формуле:

$$E = B_{\delta ср} \cdot l_a \cdot v \text{, (м)}, \qquad (9)$$

где $B_{\delta ср}$ – индукция в рабочем зазоре; l_a – суммарная активная длина проводников в фазе (без лобовых частей); v – линейная скорость вращения ротора.

Выводы. 1. Проведено сравнение основных параметров синхронный генератор модульной конструкции с возбуждением от постоянных магнитов при разных скоростях ветрового потока.

2. Проведено сравнение асинхронных генераторов с мультипликаторами и синхронных безредукторных генераторов с постоянными магнитами (безкорпусных) по массогабаритным показателям при равных мощностях.

3 пределено оптимальное по электромагнитным параметрам соотношение диаметра корпуса к диаметру ротора в заданных габаритах в генераторах модульной конструкции.

4. Определено оптимальное соотношение ширины паза и зубца, при котором обеспечивается максимальный электромагнитный момент генератора в заданных габаритах.

5. Расчётным путём установлены допустимые по нагреву удельные потери с внешней поверхности генераторов модульной конструкции мощностью от 50 до 2000 кВт.

6. Оценка возможности применения «меандровой» обмотки в синхронных генераторах повышенный мощности.

1. *Кудря С.О.* та інш. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. К. ВіолПринт. 2008. 55 с.

2. *Кудря С.О., Перминов Ю.М., Коханевич В.П.* Патент на винахід № 106673. Україна. МПК H02K 16/00. H02K 21/22. Вітроелектрична установка модульної конструкції. № a2013 01473. заял. 07.02.13. опубл. 25.09.14. Бюл. №9.

3. *Костенко М.П., Пиотровский Л.М.* Электрические машины. Часть 2. М. Л. издательство «Энергия». 1965. С. 43-55.

4. *Перминов Ю.Н., Конахевич В.П., Шихайлов Н.А., Перминова С.Ю.* Определение параметров и основных размеров генераторов для приливных электростанций малой

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

мощности (до 1000 кВт). Відновлювальна енергетика. 2017. № 3(50). С. 66-72.

5. *Кудря С.А., Перминов Ю.Н., Буденный В.Ф.* О методах расчета магнитных систем с постоянными магнитами. Відновлювальна енергетика. 2009. № 4(19) С. 40-43.

6. *Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н.* Электрические машины с постоянными магнитами. М. Энергия. 1964. 208 с.

7. *Арнольд Р.Р.* Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. М. Энергия. 1969. 260 с.

8. *Буль Б.К.* Основы теории и расчета магнитных цепей. М. Энергия. 1964. 154 с.

9. *Перминов Ю.Н., Монахов Е.А.* Сравнение вариантов конструкций синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для ветроустановок. Відновлювана енергетика. 2019. № 2(57). С. 54-60.

REFERENCES

1. *Kudrya S.* Atlas energetichnogo potencialy vidnovluvanikh dzherel energii Ukraini. [Atlas of energy potential of renewable energy sources in Ukraine]. Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine. K. VioletPrint. 2008. 55 p. [in Ukrainian].

2. *Kudrya S.O., Perminov Yu.M., Kokhanevich V.P.* Patent na vynakhid № 106673. Ukrayina. MPK H02K 16/00. H02K 21/22. Vitroelektrychna ustanovka modulnoyi konstruktsiyi. № a2013 01473. [Patent for invention No. 106673. Ukraine. IPC H02K 16/00. H02K 21/22. Windmill installation of modular structure. A2013 01473]. stated. 07.02.13. published 25.09.14. Bul. № 9. [in Ukrainian].

3. *Kostenko M.P., Piotrovskiy L.M.* Elekticheskie mashini. Chast 2. [Electrical machines. Part 2]. Moscow. Russia. Energiya. Pp. 43-55. [in Russian].

4. *Perminov Yu., Konahevich V., Shihaylov N., Perminova S.* Opredelenie parametrov i osnovnyih razmerov generatorov dlya prilivnyih elektrostantsiy maloy moschnosti (do 1000 kVt). [Determination of parameters and basic dimensions of the generator of low power tidal plants (up to 1000 kW)]. Vidnovluvana energetika. 2017. No. 3(50). Pp. 66-72. [in Russian].

5. *Kudrya S., Perminov Yu., Budyonnyi V.* O metodakh rascheta magnitnikh system s postoyanimi magnitami. [About calculation mathods of the magnetic systems with permanent magnets]. Vidnovluvana energetika. 2009. No. 4(19). Pp. 40-43 [in Russian].

6. *Balagurov V., Galteev F., Larionov A.* Elekticheskie mashini s postoyanimi magnitami. [Permanent magnet machines]. Moscow. Russia. Energiya. 1964. 208 p. [in Russian].

7. *Arnold R.* Rashet i proektirovanie magnitnikh system s postoyanimi magnitami. [Calculation and design the magnetic systems with permanent magnets]. Moscow. Russia. Energiya. 1969. 260 p. [in Russian].

8. *Bul B.* Osnovi teorii i rascheta magnitnikh cepej. [Basics of theory and calculation of magnetic circuits]. Moscow. Russia. Energiya. 1964. 154 p. [in Russian].

9. *Perminov Yu., Monakhov Y.S.* Sravnenie variantov konstrukciy sinkhronnikh generator s vozbuzhdeniev ot postoyanikh magnitov dlya vetroustanovok. [Design comparison of synchronous permanent magnet generator for windturbines]. Vidnovluvana energetika. 2019. No. 2(57). Pp. 54-60. [in Russian].

ПРОЕКТУВАННЯ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ ПІДВЩИННОЇ ПОТУЖНОСТІ (600÷3600) КВТ ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ВІД ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ

Ю.Н. Перминов[1], канд.техн.наук, **Є.А. Монахов[2], Л.П. Волков[3]**

[1]Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
02094, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Киев, Україна.
[2]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
03056, пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна.
[3]Інститут екологічного управління та збалансованого природовикористування,
02002, вул. Нікольсько-Слобідська, 6-Д, м. Київ, Україна.

У статті на основі оцінки характеристик деяких вітрозон України [1] і застосованої при проектуванні швидкості вітру за кордоном проведено порівняння основних параметрів вітрогенераторів. Для цього за певним алгоритмом [4-9] був розрахований ряд синхронних генераторів потужністю від 600 до 3600 кВт з орієнтиром на потужності машин, що випускаються «Заводом великих електричних машин» (м. Каховка), але за базову конструкцію при розрахунках прийнятий генератор, представлений в [2]. Особливістю конструкції цього генератора - відсутність ярма статора (корпусу). Корпусом генератора є пакет статора з обмоткою, тому він являє собою модуль головки вітроустановки, це дозволяє зменшити його масу і габарити.

До теперішнього часу найбільш широко застосували асинхронні генератори з мультиплікаторами для підвищення частоти обертання, враховуючи, що частота обертання вітроколеса зменшується з підвищенням потужності вітроустановки і становить всього кілька обертів в хвилину. Зі збільшенням частоти обертання зменшується електромагнітний момент, об'єм і маса генератора, але збільшуються відповідні параметри мультиплікатора. В останні роки намітилася тенденція застосування безредукторних синхронних генераторів зі збудженням від постійних магнітів, що дозволяє спростити конструкцію агрегату, підвищити надійність установки, виключити необхідність обслуговування редуктора (мультиплікатора) і втрати на збудження. У зв'язку з цим, в роботі проведено порівняння зазначених варіантів виконання агрегатної частини вітроустановок по електромагнітним параметрам, масою і габаритами.

Зміна геометричних співвідношень генератора визначає його електромагнітні параметри, тому відмічені оптимальні відношення діаметрів корпусу і ротора, ширини паза і зубця, визначена залежність геометрії зубцеву зони і потужності від прийнятого числа пазів на полюс і фазу (q); обґрунтована можливість застосування «меандрової» обмотки в зв'язку з малим розрахунковим значенням числа витків в секції. Така обмотка дозволяє спростити технологію її виготовлення, можливість збільшення коефіцієнта заповнення паза і потужності при вирішенні технологічних питань виготовлення. Бібл. 9, рис. 3.

Ключові слова: *синхронні генератори, асинхронні генератори, потужність вітроустановки, частота обертів, електромагнітний момент, постійні магніти, число пазів на полюс і фазу, коефіцієнт заповнення паза.*

Стаття надійшла до редакції 23.12.19
Остаточна версія 11.03.20

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

УДК 556.552 DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).52-60

ВНЕШНИЙ ВОДООБМЕН В ПОЛЕЗНОМ ОБЪЕМЕ СРЕДНЕДНЕПРОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ПРОЕКТНЫХ И ЕГО СОВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ

Е.В. Обухов, докт. экон. наук, канд. техн. наук, професор, акад. МАНЭБ, УО (Одесса)

65039, ул. Среднефонтанская, 30а, г. Одесса, Украина.

Проблемой водохранилищ в настоящее время является их функционирование в условиях изменяющегося климата. Управление водными ресурсами водных объектов, оценка состояния и происходящих в них процессов требуют постоянного мониторинга и анализа. Цель работы – исследование интенсивности внешнего водообмена на Среднеднепровском водохранилище, горизонтальной и вертикальной составляющих водообмена, а также хозяйственного использования объекта. На основе водобалансовых составляющих исследована интенсивность внешнего водообмена в полезном объеме водохранилища в проектных и его современных параметрах с учетом водности года за весь период эксплуатации: многоводный 1970 г., маловодный 1972 г. и очень маловодный 2015 г. Определены коэффициенты интенсивности и показатели внешнего водообмена по каждому месяцу года, месяцы с максимальной и минимальной интенсивностями внешнего водообмена во временных единицах и основной фактор влияния на него – боковая приточность в водохранилище. Максимальная интенсивность внешнего водообмена в водохранилище в очень маловодном году в весенний и осенний периоды эксплуатации ухудшилась по отношению к многоводному году в четыре раза. Установлено, что чем больше коэффициент интенсивности внешнего водообмена, тем меньше показатель внешнего водообмена во временных единицах и интенсивнее происходят смена и самоочищение воды в водохранилище. Если показатель внешнего водообмена меньше единицы, то смена нормативных водных ресурсов водохранилища будет происходить меньше чем за год. Результаты исследований могут быть полезными при разработке режимов эксплуатации водохранилища в условиях изменения климата. Библ. 4, табл. 1, рис. 5
Ключевые слова: *водохранилище, водный баланс, водообмен, интенсивность, коэффициент.*

EXTERNAL WATER EXCHANGE IN USEFUL VOLUM MIDDLEDNIEPER RESERVOIR IN THE PROJECT AND ABOUT ITS PARAMETERS

E. Obukhov, doctor of economic sciences, candidate of technical sciences, professor, academician of IAEMLPS, Ukraine Department

65039, 30a Srednefontanskaya St., Odessa, Ukraine.

A curren t problem of reservoirs is their functioning in conditions of a changing climate. In such conditions, water resources management of water bodies as well as assessment their state and ongoing processes require permanent monitoring and analysis. The aim of the author of the present work was to study the intensity of external water exchange of the Middlednieper (Dneprodzerzhinsk) reservoir, the horizontal and vertical components of the water cycle and the economic use of the water body. On the basis of water balance components, the intensity of external water exchange in the useful volume of the reservoir in its design and modern parameters is studied, taking into account the water content of the year for the entire period of its operation: high-water 1970, low-water 1972 and very low-water 2015.

Intensity factors and indicators of external water exchange for each month of the year, and for the months of the maximum and minimum intensity of the external water exchange during a unit of time, as well as the main factor influencing on the water exchange, viz. the lateral inflow in the reservoir have been determined. The maximum intensity of the external water exchange in the reservoir during a very dry year has deteriorated in the spring and autumn periods of its operation fourfold as compared with the one of the high-water year. It is determined that the higher the intensity of the external water exchange is, the less the indicator of the external water exchange during a unit of time is and the more intensively an exchange and self-purification of the water in the reservoir are being fulfilled. If the rate of external water exchange is less than one, then the shift of regulatory water resources of the reservoir will take place in less than a year. The results of the study can be useful in developing modes of reservoir operation in conditions of a climate change. Ref. 4, tabl. 1, fig. 5.
Keywords*: water reservoir, water balance, water exchange, intensity, ratio*

© Е.В. Обухов, 2020

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)



Е.В. Обухов
E. Obukhov

Сведения об авторе: доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор, академик МАНЭБ, УО, Одесса.
Образование: Одесский инженерно-строительный институт, инженер-гидротехник, специальность «Гидротехническое строительство речных сооружений и гидроэлектростанций.
Научная сфера: Технико-экономико-экологические проблемы в гидроэнергетике
Публикации: 235, 8 монографий.
ORCID: 0000-0002-0726 -5736
Контакты: тел./факс: +38-048-776-1-885
e-mail: ev.obukhov@googlemail.com

Author information: Doctor of economics, candidate of technical Sciences, professor, academician of IAEMLPS, Ukraine Department, Odessa.
Education: Odessa Civil Engineering institute, engineer-hydraulics, specialty “Hydraulic engineering of river structures and hydroelectric power plants”
Research area: Technical-economic-environmental problemin hydropower.
Publications: 235, 8 monographs.
ORCID: 0000-0002-0726-5736
Contacts: phone/fax: +38-048-776-1-885
e-mail: ev.obukhov@googlemail.com

Перечень используемых обозначений и сокращений:

ГЭС – гидроэлектростанция;
НПУ – нормальный подпертый уровень;
Wп – проектный полный объем водохранилища;
Wк – проектный полезный объем водохранилища;
Wк*- современный полезный объем водохранилища;
МВт – мегаватт;
кВт·ч – киловатт-час.

Введение и постановка проблемы. Проблемой водохранилищ является их функционирование в условиях изменяющегося климата и изменения их параметров в процессе продолжительной эксплуатации.

Интенсивность водообмена в водохранилищах являются одной из важнейших характеристик их состояния [1-4]. Взаимодействие гидрологических и гидродинамических процессов влияет на внешний и внутренний водообмен, на содержание растворенных веществ в водоемах, на качество воды, на интенсивность цветения воды в водохранилищах степной зоны при накоплении в них химических или биологических веществ. Целью данной работы является исследование интенсивности внешнего водообмена в полезном объеме Среднеднепровского водохранилища в проектных и его современных параметрах с учетом водности года эксплуатации, горизонтальной и вертикальной составляющих водообмена, а также его хозяйственного использования и сопоставление полученных результатов с рассчитанными ранее аналогичными показателями для помесячно заполненного водохранилища с учетом его мертвого объема [3].

Основными исходными материалами для исследования являются реальные водобалансовые показатели по Среднеднепровскому водохранилищу за многоводный (1970 г. с объемом годового руслового притока 75,55 км^3), маловодный (1972 г. – 32,67 км^3) и очень маловодный (2015 г. – 19,5 км^3) года.

Среднеднепровское водохранилище – четвертая ступень в составе Днепровского каскада, на которой осуществляется суточное и недельное регулирование стока.

Среднеднепровское водохранилище расположено на территории Кировоградской, Полтавской и Днепропетровской областей. Площадь водосбора - 434000 км^2. Среднемноголетний сток – 52 км^3. Проектная установленная мощность ГЭС – 352 МВт, среднегодовая выработка электроэнергии – 1250 млн. кВт·ч.

Проектные полная и полезная емкость водохранилища, соответственно, 2,40 и 0,3 км^3. Его площадь при отметке нормального подпертого уровня – 567 км^2, при уровне мертвого объема – 471 км^2. Длина водохранилища 149 км, максимальная ширина – 8 км, средняя ширина – 5,1 км, максимальная глубина – 16,1 м, средняя – 4,3 м. Площадь мелководий водохранилища – 182 км^2. Максимальный статический напор – 15,5 м, минимальный – 8,4 м, расчетный – 9,85 м. Расчетный расход водосбросной плотины – 20100 м^3/с. Расчетный максимальный сбросной расход через сооружения (p=0,1%) – 23300 м^3/с.

После начала реконструкции установленная мощность ГЕС составляет 388 МВт [2], а выработка электроэнергии за 2018 год – 1197,443 млн кВт·ч.

Современные площадь Среднеднепровско-

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

го водохранилища равна 526,1 км^2, а полезный объем его 0,25 км^3 [1].

Результаты исследований и их обсуждение

Интенсивность внешнего водообмена водохранилища включают как горизонтальную, так и вертикальную составляющие. К горизонтальным составляющим внешнего водообмена относят приток воды в водохранилище (по основной реке и боковой), а также сток из водохранилища через гидроузел.

Одна из вертикальных составляющих внешнего водообмена учитывает выпадение атмосферных осадков на водную поверхность водохранилища, а также испарение с его поверхности. Эта составляющая иногда существенно влияет на показатели внешнего водообмена во внутригодовом аспекте. При оценке внешнего водообмена предлагается также во внутригодовом аспекте учитывать и другие составляющие водного баланса водоема – сброс в водохранилище сточных и бытовых вод, забор воды на хозяйственные нужды.

Используя изложенную в [3] методику, по формулам Штефана В.Н., Литвинова А.С., Калинина Г.П. и Караушева А.В. и рекомендации [4] были рассчитаны коэффициенты интенсивности Кв и показатели внешнего водообмена Ту для заполненного (рис. 1) и полезного объема Среднеднепровского водохранилища в характерные по водности годы (табл. 1 и рис.2-5).

Таблица 1. Показатели внешнего водообмена Среднеднепровского водохранилища.

Table 1. Indicators foreign exchange Middlednieper reservoir.

Месяц	*$Кв_1$*	*$Ту_1$ лет*	*$Кв_2$*	*$Ту_2$ лет*	*$Кв_2$> $Кв_1$ %*	*$Кв_3$*	*$Ту_3$ лет*	*$Кв_3$> $Кв_1$ %*	*$Кв_4$*	*$Кв_4$> $Кв_1$ %*	*$Ту_4$ лет*
Многоводный 1970 год											
I	12,54	0,080	12,76	0,078	1,70	12,81	0,078	2,09	12,82	2,19	0,078
II	9,77	0,102	9,93	0,100	1,64	9,98	0,100	2,08	9,99	2,19	0,100
III	18,12	0,055	19,57	0,051	7,44	19,61	0,051	7,64	19,63	7,70	0,051
IV	**33,41**	**0,030**	**36,00**	**0,028**	**7,20**	**36,02**	**0,028**	**7,26**	**36,03**	**7,29**	**0,028**
V	32,17	0,031	32,60	0,031	1,32	32,69	0,031	1,59	32,70	1,62	0,031
VI	14,78	0,068	14,95	0,067	1,12	15,05	0,066	1,81	15,06	1,88	0,066
VII	9,57	0,104	9,71	0,103	1,45	9,86	0,101	2,98	9,87	3,11	0,101
VIII	**9,08**	**0,110**	**9,23**	**0,108**	**1,61**	**9,46**	**0,106**	**4,08**	**9,48**	**4,26**	**0,105**
IX	12,88	0,078	13,09	0,076	1,59	13,22	0,076	2,56	13,24	2,70	0,075
X	12,55	0,080	13,19	0,076	4,81	13,38	0,075	6,16	13,40	6,33	0,074
XI	10,72	0,093	11,08	0,090	3,16	11,10	0,090	3,38	11,11	3,49	0,090
XII	13,90	0.072	14,10	0.071	1.39	14,14	0.071	1.65	14,15	1.73	0.070
Маловодный 1972 год											
I	**11,34**	**0,088**	**11,44**	**0,087**	**0,87**	**11,45**	**0,087**	**0,96**	**11,46**	**1,05**	**0,087**
II	9,60	0,104	9,65	0,104	0,52	9,65	0,104	0,52	9,66	0,63	0,103
III	**4,01**	**0,249**	**4,12**	**0,243**	**2,64**	**4,16**	**0,241**	**3,53**	**4,17**	**3,83**	**0,240**
IV	5,07	0,197	5,49	0,182	7,65	5,53	0,181	8,35	5,54	8,59	0,180
V	7,03	0,142	7,29	0,137	3,58	7,39	0,135	4,85	7,40	5,04	0,135
VI	7,99	0,125	8,14	0,123	1,77	8,30	0,120	3,66	8,30	3,75	0,120
VII	8,57	0,117	8,79	0,114	2,54	8,98	0,111	4,57	8,99	4,76	0,111
VIII	9,93	0,100	10,06	0,099	1,26	10,29	0,097	3,41	10,31	3,69	0,097
IX	8,58	0,116	8,65	0,115	0,80	8,83	0,113	2,83	8,85	3,02	0,113
X	7,61	0,131	7,73	0,129	1,51	7,81	0,128	2,49	7,82	2,68	0,128
XI	8,15	0,123	8,38	0,119	2,75	8,45	0,118	3,51	8,46	3,70	0,118
XII	10,84	0,092	11,12	0.090	2.49	11,14	0.090	2.65	11,16	2.81	0,090
Очень маловодный 2015 год											
I	6,156	0,162	6,289	0,159	2,13	6,318	0,158	2,56	6,346	3,00	0,157
II	**7,564**	**0,132**	**7,783**	**0,128**	**2,81**	**7,825**	**0,128**	**3,33**	**7,867**	**3,85**	**0,127**
III	5,960	0,167	6,324	0,158	5,76	6,414	0,156	7,07	6,458	7,71	0,155

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Ме-сяц	*Кв1*	*Ту1 лет*	*Кв2*	*Ту2 лет*	*Кв2> Кв1 %*	*Кв3*	*Ту3 лет*	*Кв3> Кв1 %*	*Кв4*	*Кв4> Кв1 %*	*Ту4 лет*
IV	3,754	0,266	4,113	0,243	8,74	4,220	0,237	11,05	4,289	12,48	0,233
V	4,975	0,201	5,200	0,192	4,32	5,304	0,188	6,21	5,357	7,12	0,187
VI	3,639	0,275	3,750	0,267	2,97	3,959	0,252	8,26	4,000	9,04	0,250
VII	5,281	0,189	5,374	0,186	1,74	5,494	0,182	3,88	5,521	4,35	0,181
VIII	5,306	0,188	5,380	0,186	1,38	5,544	0,180	4,29	5,574	4,80	0,179
IX	4,298	0,233	4,358	0,229	1,39	4,480	0,223	4,07	4,518	4,87	0,221
X	**3,342**	**0,299**	**3,434**	**0,291**	**2,70**	**3,506**	**0,285**	**4,68**	**3,548**	**5,83**	**0,282**
XI	3,845	0,260	3,945	0,253	2,53	4,005	0,250	3,99	4,038	4,78	0,248
XII	5,325	0,188	5,462	0,183	2.51	5,495	0,182	3,09	5,534	3,78	0,181
Очень маловодный 2015 год*											
I	7,387	0,135	7,547	0,132	2,13	7,582	0,132	2,56	7,615	3,00	0,131
II	**9,077**	**0,110**	**9,340**	**0,107**	**2,81**	**9,390**	**0,106**	**3,33**	**9,441**	**3,85**	**0,106**
III	7,152	0,140	7,589	0,132	5,76	7,697	0,130	7,07	7,750	7,71	0,129
IV	4,505	0,222	4,936	0,202	8,74	5,064	0,197	11,05	5,147	12,48	0,194
V	5,970	0,167	6,240	0,160	4,32	6,365	0,157	6,21	6,429	7,12	0,155
VI	4,367	0,229	4,500	0,222	2,97	4,751	0,210	8,26	4,800	9,04	0,208
VII	6,337	0,158	6,449	0,155	1,74	6,593	0,152	3,88	6,625	4,35	0,151
VIII	6,367	0,157	6,456	0,155	1,38	6,653	0,150	4,29	6,689	4,80	0,149
IX	5,158	0,194	5,230	0,191	1,39	5,376	0,186	4,07	5,422	4,87	0,184
X	**4,010**	**0,249**	**4,121**	**0,243**	**2,70**	**4,207**	**0,238**	**4,68**	**4,258**	**5,83**	**0,235**
XI	4,614	0,217	4,734	0,211	2,53	4,806	0,208	3,99	4,846	4,78	0,206
XII	6,390	0,156	6,555	0,153	2.51	6,594	0,152	3,09	6,641	3,78	0,151

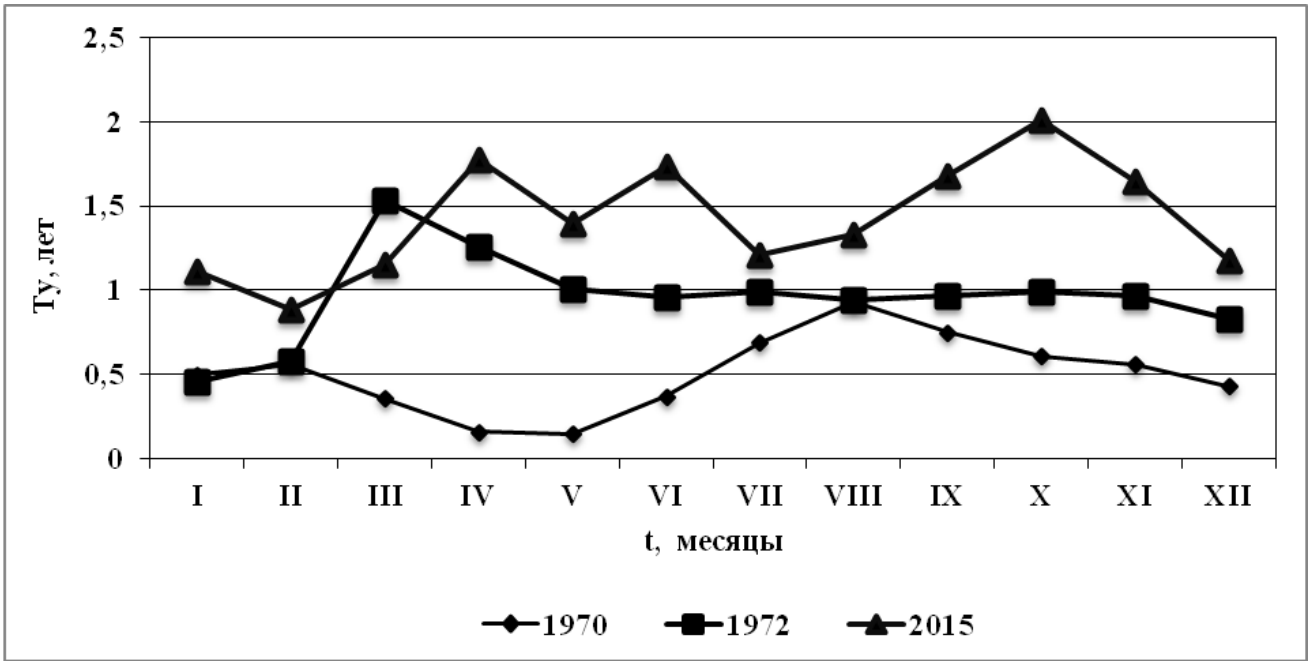


Рис. 1. График Ту=f(t) показателей внешнего водообмена в заполненном Среднеднепровском водохранилище в проектных параметрах [3].

Fig. 1. Graph Tu=f (t) indicators of external water exchange in the filled Middlednieper reservoir in the project settings [3].

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

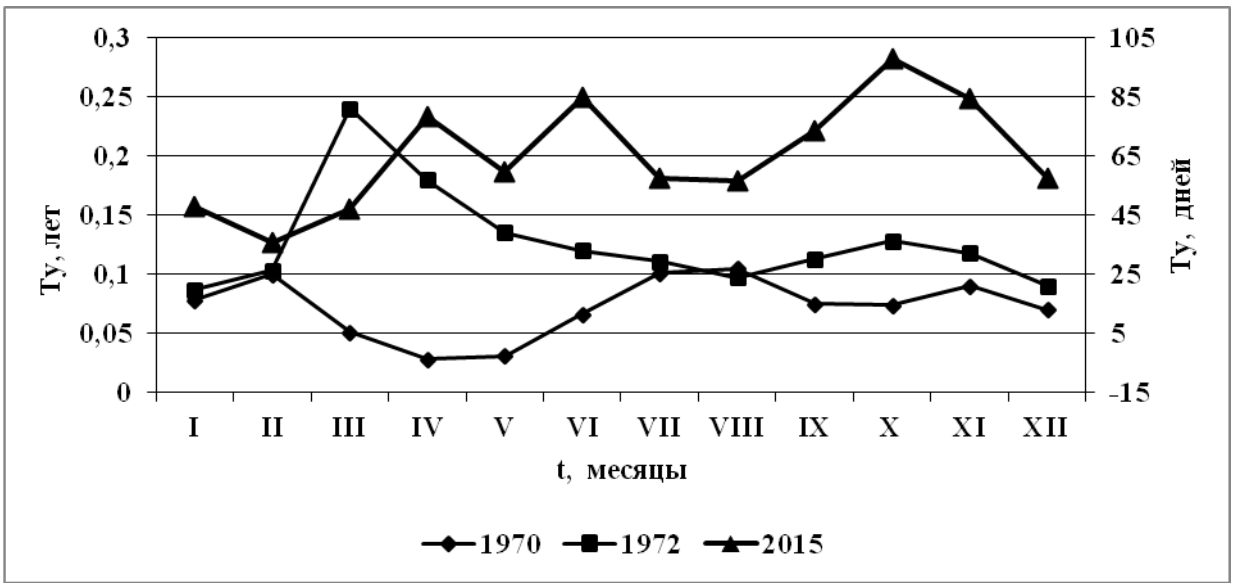


Рис. 2. График Ty=f(t) показателей внешнего водообмена в полезном объеме Среднеднепровского водохранилища в проектных параметрах.

Fig. 2. Graph Tu=f (t) indicators of external water exchange in useful volume Middlednieper reservoir in the project settings.

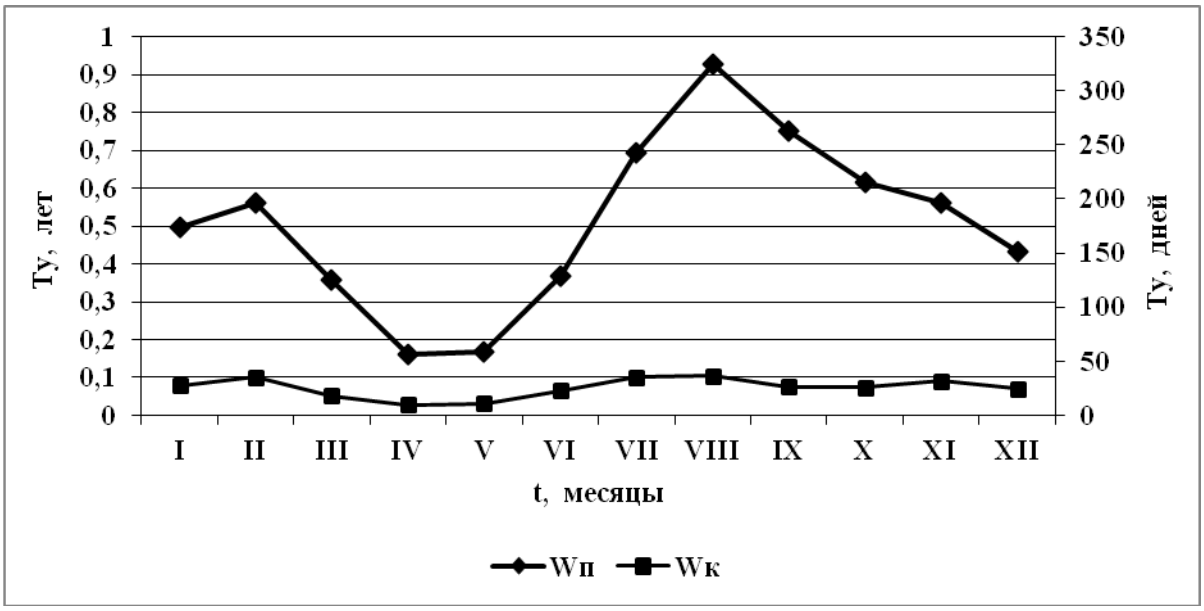


Рис. 3. График Ty=f(t) показателей внешнего водообмена в Среднеднепровском водохранилище в многоводном 1970 году.

Fig. 3. Graph Tu=f (t) indicators of external water exchange in Middlednieper reservoir in low water 1970.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

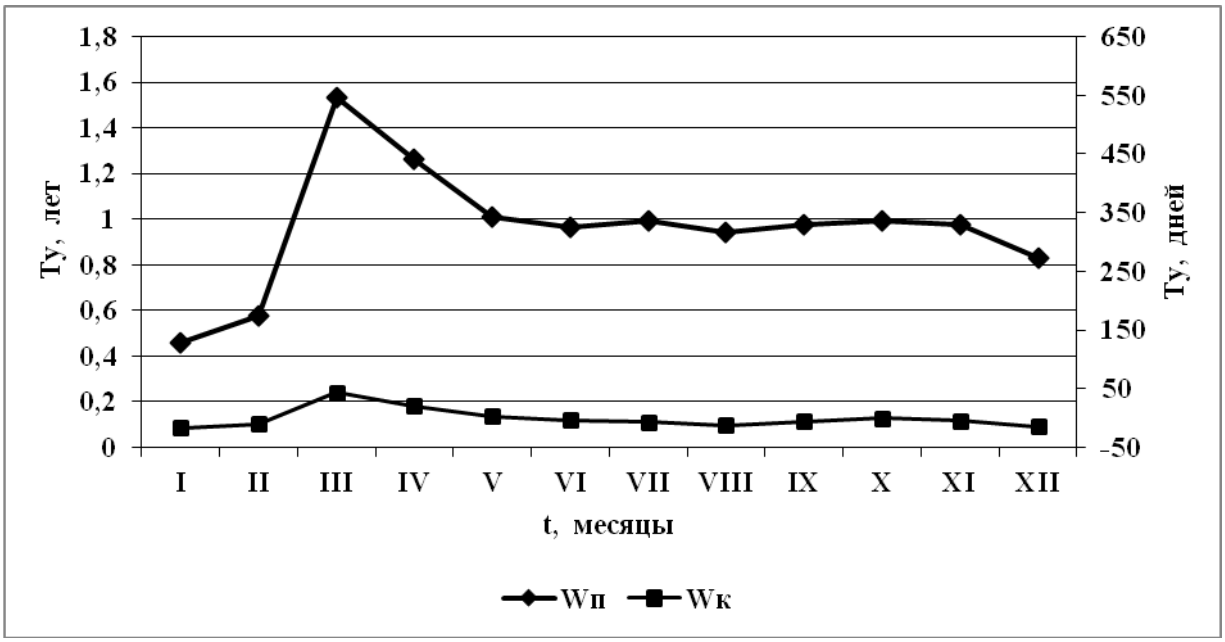


Рис. 4. График Ty=f(t) показателей внешнего водообмена в Среднеднепровском водохранилище в маловодном 1972 году.

Fig. 4. Graph Tu=f (t) indicators of external water exchange in Middlednieper reservoir in low water 1972.

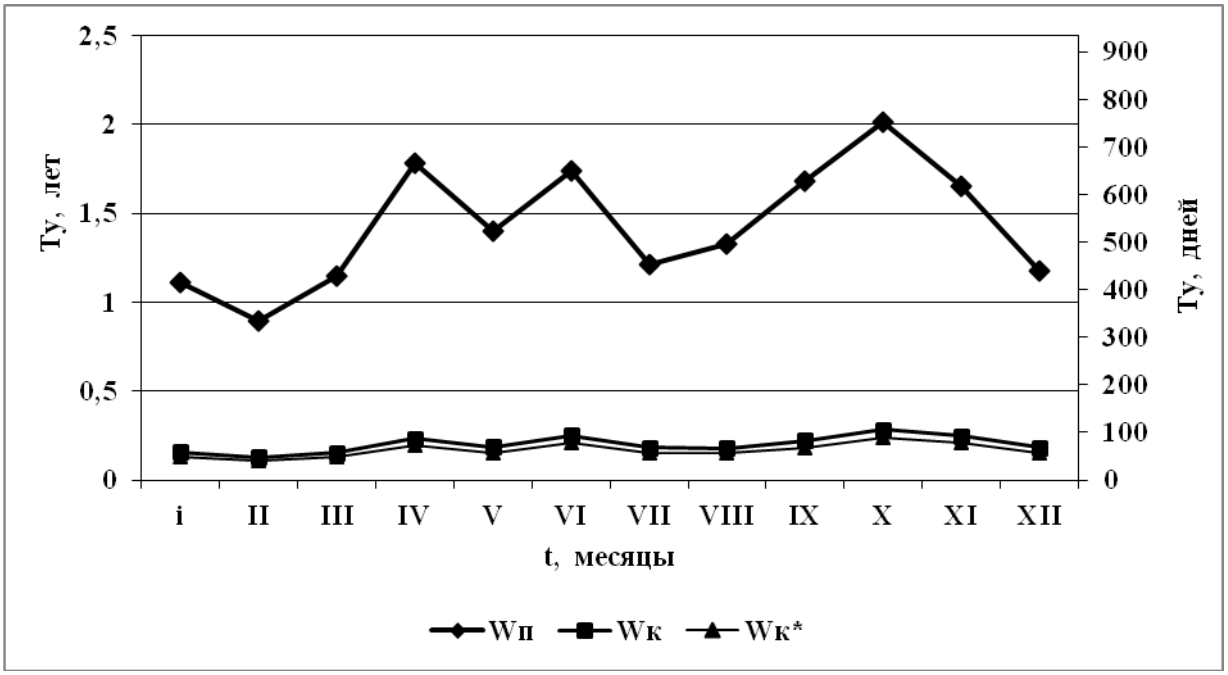


Рис. 5. График Ty=f(t) показателей внешнего водообмена в Среднеднепровском водохранилище в проектных и современных параметрах в очень маловодном 2015 году.

Fig. 5. Chart Tu=f(t) indicators of external water exchange in the Middlednieper reservoir in design and modern parameters in very low water 2015.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

В табл.1 приведены сравнительные характеристики коэффициентов интенсивности Кв и показатели внешнего водообмена Ту с постепенным учетом всех составляющих водного баланса водохранилищ: $Кв_1$ – учитывает только основной приток и сток через гидроузел; $Кв_2$ – учитывает еще боковую приточность и перекачку; $Кв_3$ – учитывает осадки и испарение с водохранилища; $Кв_4$ – учитывает сумму приходных и расходных составляющих водного баланса. Показатели внешнего водообмена Ту во временных единицах – величина, обратная соответствующим коэффициентам интенсивности Кв, которые определяются как отношение суммы притока и расхода воды из водохранилища к удвоенному среднему объему за расчетный период.

Отметим, что коэффициент интенсивности внешнего водообмена Кв с увеличением в расчетах числа составляющих водного баланса возрастает для всех месяцев, характерных по водности лет эксплуатации водохранилища, а показатель внешнего водообмена Ту снижается.

Для заполненного Wп Среднеднепровского водохранилища максимальные коэффициенты интенсивности внешнего водообмена в многоводном (1970) году наблюдаются в мае – $Кв_1$ = 6,677, $Кв_2$ = 6,766, $Кв_3$ = 6,785, $Кв_4$ = 6,787; минимальные в августе - $Кв_1$= 1,034, $Кв_2$ = 1,051, $Кв_3$ = 1,078, $Кв_4$ = 1,080.

Соответствующие показатели внешнего водообмена в мае для всех факторов равны Ту = 0,15 лет, а в августе – Ту =0,97; 0,95; 0,93; 0,93 лет (рис.1,3).

Влияние бокового притока в 1970 году наибольшее (7,44%) в марте, а наименьшее (1,12%) – в июне. Осадки и испарение оказывали максимальное влияние (более 2,4%) на интенсивность внешнего водообмена в августе, минимальное (0,06%) – в апреле. Влияние суммарных составляющих водного баланса $Кв_4$ на внешний водообмен мало отличаются от влияния $Кв_3$.

Для полезного объема Wк Среднеднепровского водохранилища максимальные коэффициенты интенсивности внешнего водообмена в многоводном (1970) году наблюдаются в апреле – $Кв_1$ = 33,407, $Кв_2$ = 35,999, $Кв_3$= 36,022, $Кв_4$ = 36,033; минимальные в августе - $Кв_1$= 9,076, $Кв_2$ = 9,225, $Кв_3$ = 9,462, $Кв_4$ = 9,480.

Соответствующие показатели внешнего водообмена в апреле для всех факторов равны Ту = 0,030 – 0,028 лет, а в августе –Ту = 0,110; 0,108; 0,106; 0,105 лет (табл 1, рис.2, 3).

Влияние бокового притока, осадков и испарения, суммарных составляющих водного баланса на интенсивность внешнего водообмена в полезном объеме в 1970 году аналогично заполненному водохранилищу.

Для маловодного (1972) года для заполненного Wп Среднеднепровского водохранилища соответствующие максимальные коэффициенты интенсивности внешнего водообмена наблюдаются в январе и равны: $Кв_1$= 2,164; $Кв_2$= 2,183; $Кв_3$= 2,185; $Кв_4$= 2,187; минимальные в марте: $Кв_1$= 0,628; $Кв_2$ = 0,645; $Кв_3$= 0,651; $Кв_4$= 0,653.

Соответствующие показатели внешнего водообмена в январе для всех факторов равны Ту = 0,46 лет, а в марте Ту = 1,59; 1,55; 1,53; 1,53 лет (рис.1, 4).

Для полезного объема Wк Среднеднепровского водохранилища соответствующие максимальные коэффициенты интенсивности внешнего водообмена в маловодном (1972) году наблюдаются в январе и равны: $Кв_1$ = 11,345; $Кв_2$ = 11,444; $Кв_3$ = 11,455; $Кв_4$ = 11,465; минимальные в марте: $Кв_1$= 4,009; $Кв_2$ = 4,118; $Кв_3$ = 4,156; $Кв_4$ = 4,169. Соответствующие показатели внешнего водообмена в январе для всех факторов равны Ту = 0,088-0,087 лет, а в марте Ту = 0,249; 0,243; 0,241; 0,240 лет (табл.1, рис. 2, 4).

Влияние бокового притока, осадков и испарения, суммарных составляющих водного баланса на интенсивность внешнего водообмена в полезном объеме в 1972 году аналогично заполненному водохранилищу.

Для очень маловодного 2015 года для заполненного Wп Среднеднепровского водохранилища максимальные коэффициенты интенсивности внешнего водообмена наблюдаются в феврале и равны: $Кв_1$= 1,074; $Кв_2$ = 1,105; $Кв_3$ = 1,111; $Кв_4$ = 1,117; минимальные – в октябре: $Кв_1$ = 0,468; $Кв_2$ = 0,481; $Кв_3$ = 0,491; $Кв_4$ = 0,497. Соответствующие показатели внешнего водообмена в феврале для всех факторов равны Ту = 0,931; 0,905; 0,900; 0,895 лет, а в октябре Ту = 2,14; 2,08; 2,04; 2,01 лет (рис.1, 5).

Для проектного полезного объема Wк Среднеднепровского водохранилища соответствующие максимальные коэффициенты интенсивности внешнего водообмена в очень маловодном (2015) году наблюдаются в феврале и равны: $Кв_1$ = 7,564; $Кв_2$ = 7,783 ; $Кв_3$ = 7,825; $Кв_4$ = 7,867;

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

минимальные в октябре: $Кв_1$ = 3,342; $Кв_2$ = 3,434; $Кв_3$ = 3,506; $Кв_4$ = 3,548. Соответствующие показатели внешнего водообмена в феврале для всех факторов равны Ту = 0,132; 0,128; 0,128; 0,127 лет, а в октябре Ту = 0,299; 0,291; 0,285; 0,282 лет (табл. 1, рис. 2, 5).

Для современного полезного объема Wк* Среднеднепровского водохранилища соответствующие максимальные коэффициенты интенсивности внешнего водообмена в очень маловодном (2015) году наблюдаются в феврале и равны: $Кв_1$ = 9,077; $Кв_2$ = 9,340; $Кв_3$ = 9,390; $Кв_4$ = 9,441; минимальные в октябре: $Кв_1$ = 4,010; $Кв_2$ = 4,121; $Кв_3$ = 4,207; $Кв_4$ = 4,258. Соответствующие показатели внешнего водообмена в феврале для всех факторов равны Ту = 0,110; 0,107; 0,106; 0,106 лет, а в октябре Ту = 0,249; 0,243; 0,238; 0,235 лет (табл. 1, рис. 5).

Влияние бокового притока, осадков и испарения, суммарных составляющих водного баланса на интенсивность внешнего водообмена в проектном и современном полезном объеме в 2015 году аналогично заполненному водохранилищу.

Сопоставляя показатели интенсивности внешнего водообмена в полезном объеме и в заполненном Среднеднепровском водохранилище в многоводном и маловодных годах его эксплуатации (рис. 1, 2) отметим заметное расхождение кривых Ту=f(t) с марта по июль и с сентября по декабрь.

Показатели внешнего водообмена в единицах времени в годовом аспекте для заполненного Среднеднепровского водохранилища в многоводном 1970 г. равны 0,031 и 0,0046 лет для его полезного объема, в маловодном 1972 г., соответственно, 0,072 и 0,0098 лет, а в очень маловодном 2015 г. – 0,113 лет или 41 день для заполненного водохранилища, 0,0158 лет или 6 дней для его проектного полезного объема Wк и 0,0131 лет или 5 дней для его современного полезного объема Wк*.

Для сравнения показатели внешнего водообмена заполненных водохранилищ для многоводного 1970 года на Киевском - равен 0,062 лет, Кременчугском - 0,13 лет, Днепровском - 0,039 лет, Каховском – 0,21 лет, для маловодного 1972 года на Киевском – 0,135, Кременчугском – 0,29, Днепровском – 0,099, Каховском – 0,59 лет, а для очень маловодного 2015 года – на Киевском - 0,203, Каневском – 0,117, Кременчугском – 0,502, Днепровском – 0,144, Каховском – 0,770 лет.

Выводы. 1. Из шести водохранилищ Днепровского каскада Среднеднепровское имеет самую высокую интенсивность внешнего водообмена в пределах многоводного и маловодных годов в заполненном и в полезном объеме водохранилища.

2. При сопоставлении максимальних показателей внешнего водообмена в заполненном и в полезном объеме водохранилища в апреле многоводного года улучшение водообмена в полезном объеме составило 81,3%, в январе маловодного года – 81%, в феврале очень маловодного года (в проектных параметрах водохранилища) – 85,8%, а при сопоставлении минимальных показателей по соответствующим годам улучшение водообмена составило в августе – 88,7%, в марте – 84,3%, в октябре – 86%.

3. При сопоставлении показателей внешнего водообмена в полезном объеме водохранилища в проектних и современных его параметрах улучшение водообмена составило 16,6%.

4. Влияние бокового притока, осадков и испарения, суммарных составляющих водного баланса на интенсивность внешнего водообмена в заполненном и полезном объеме в рассматриваемые годы аналогично заполненному водохранилищу.

1. *Вишневський В., Шевчук С., Шевченко І.* Сучасні розміри дніпровських водосховищ. Водне господарство України. 2017. № 4. С. 23-29.

2. *Кліщ В.А.* Середньодніпровській ГЕС – 55. Гідроенергетика України. 2018. № 3-4. С. 8-9.

3. *Обухов Е.В.* Внешний водообмен Днепровского каскада водохранилищ. Монография. Одесса. Полиграф. 2017. 100 с.

4. *Яцык А. В., Шмаков В. М.* Гидроэкология. К. Урожай. 1992. 192 с.

REFERENCES

1. *Vishnevsky V., Shevchuk C., Shevchenko I.* Suchasni rozmiry dniprovskikh vodoskhovishch. [Modern sizes of Dnieper reservoirs]. Water economy of Ukraine. 2017. No. 4. Pp. 23-29. [in Ukraine].

2. *Klishch V.A.* Serednodniprovskiyi GES – 55. [Middlednieper hydroelectric - 55]. Hidroenergetica Ukrainy. [Hydropower in Ukraine]. 2018. No. 3-4. Pp. 8-9. [in Ukraine].

3. *Obukhov E.V.* Vneshniy vodoobmen Dneprovskogo kaskada vodokhranilishch. [External water exchange of the Dnieper cascade reservoirs]. Odessa. Poligraf. 2017. 100 p. [in Russian].

4. *Yatsyk A.V., Shmakov V.M.* Hidroeecologiya. [Hydroecology]. K. Urozhai. [Harvest]. 1992. 192 p. [in Russian].

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

ЗОВНІШНІЙ ВОДООБМІН В КОРИСНОМУ ОБ'ЄМІ СЕРЕДНЬОДНІПРОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА В ПРОЕКТНИХ ТА СУЧАСНИХ ЙОГО ПАРАМЕТРАХ

Є.В. Обухов, докт. екон. наук, канд. техн. наук, професор, акад. МАНЕБ, УВ (Одеса)

65039, вул. Середньофонтанська, 30а, м. Одеса, Україна.

Проблемою водосховищ в даний час є їх функціонування в умовах мінливого клімату. Управління водними ресурсами водних об'єктів, оцінка їх стану і процесів які відбуваються в них, вимагають постійного моніторингу та аналізу. Мета роботи автора - дослідження інтенсивності зовнішнього водообміну на Середньодніпровському (Дніпродзержинському) водосховищі, його горизонтальної та вертикальної складових, а також господарського використання об'єкта. На основі водобалансовых складових досліджено інтенсивність зовнішнього водообміну в корисному об'ємі водосховища в проектних і сучасних його параметрах з урахуванням водності року за весь період його експлуатації: багатоводний 1970 р., маловодний 1972 р. і дуже маловодний 2015 р. Визначено коефіцієнти інтенсивності і показники зовнішнього водообміну по кожному місяцю року, місяці з максимальною і мінімальною інтенсивностями зовнішнього водообміну у часових одиницях і основний фактор впливу на нього – бічна приточность у водосховищі. Максимальна інтенсивність зовнішнього водообміну у водосховищі в дуже маловодному році у весняний та осінній періоди його експлуатації погіршилася по відношенню до багатоводного року в чотири рази. Встановлено, що чим більше коефіцієнт інтенсивності зовнішнього водообміну, тим менше показник зовнішнього водообміну в часових одиницях і інтенсивніше відбуваються зміна і самоочищення води у водосховищі. Якщо показник зовнішнього водообміну менше одиниці, то зміна нормативних водних ресурсів водосховища відбуватиметься менше ніж за рік. Результати досліджень можуть бути корисними при розробці режимів експлуатації водосховища в умовах зміни клімату. Бібл. 4, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: *водосховище, водний баланс, водообмін, інтенсивність, коефіцієнт..*

Стаття надійшла до редакції 08.11.19
Остаточна версія 20.03.20



ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

УДК 621.548:621.311.214 DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).61-73

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІДРОНАСОСНОЇ СТАНЦІЇ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗА ЖИВЛЕННЯ ВІД ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З СИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ

П.Ф. Васько, докт. техн. наук, **С.Т. Пазич,** аспірант

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

Гідронасосні станції з електроприводом та живленням від вітроелектричних установок знайшли застосування на територіях, віддалених від розподільчих електромереж. Досвід експлуатації таких станцій засвідчує суттєвий вплив наявності пульсацій швидкості вітру на їх продуктивність. В рамках цього дослідження розроблена математична модель динаміки зміни подачі води багатоагрегатною гідронасосною станцією з електроприводом від асинхронних двигунів з короткозамкненою обмоткою ротора за живлення від вітроелектричної установки з синхронним генератором з урахуванням стохастичної складової зміни швидкості вітру. Дослідження динамічних процесів здійснюється на 10-и хвилинному інтервалі осереднення швидкості вітру, що є стандартизованою величиною для оцінки потужності вітроелектричної установки за збурень вітрового потоку. Модель являє собою систему нелінійних диференційних рівнянь, що описує взаємодію двох інерційних складових єдиної аероелектрогідродинамічної системи. Перша інерційна складова містить в собі вітротурбіну та синхронний генератор, а друга – асинхронний двигун та гідронасос. Взаємний вплив одної інерційної складової на іншу здійснюється через електричний зв'язок між генератором та двигуном через лінію електропередачі разом з трансформаторними підстанціями. Визначення параметрів механічного обертального руху інерційних складових виконувалось в припущенні про квазістаціонарність електромагнітних процесів в статорних і роторних контурах генератора та двигуна. Розрахунок їх електромагнітних моментів здійснювався з використанням еквівалентних заступних електричних схем обладнання з урахуванням змінної частоти обертання та довільної кількості гідроагрегатів у складі станції. Представлені результати розрахунків динаміки подачі гідронасосної станції потужністю 1 МВт в складі 5 гідроагрегатів за електроживлення від вітроустановки з синхронним явнополюсним генератором такої ж потужності за швидкості вітру менше номінального значення, рівному та більшому за номінальне значення. Вони надають можливості оцінки динамічних властивостей процесу перетворення кінетичної енергії вітру в потенціальну енергію води, накопиченої в басейні акумуляторі. На сьогодні отримані результати набувають важливого значення в зв'язку з необхідністю інтеграції значних потужностей вітроелектростанцій до складу електроенергетичних систем. Бібл. 26, табл. 3, рис. 8.
Ключові слова: *вітротурбіна, гідронасос, динаміка, інерційність, подача, синхронний генератор, стохастичність.*

MODELING DYNAMICS LOADING MODES WORK OF THE HYDRO-PUMP STATION WITH THE ELECTRIC DRIVE FROM POWER SUPPLY OF THE WIND ELECTRIC INSTALLATION WITH THE SYNCHRONOUS GENERATOR

P. Vasko, doctor of technical science, **S. Pazych,** graduate student

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

Hydro-pumped hydropower stations have been used in areas remote from the distribution grids. The experience of operating such stations demonstrates a significant impact of wind speed ripples on their performance. In the framework of this study, a mathematical model of the dynamics of water flow change by a multi-unit hydro-pump station with electric drive from asynchronous motors with a short-circuited rotor winding with power from a wind electric installation with a synchronous generator with a stochastic component of wind speed change was developed. The study of dynamic processes is carried out at a 10-minute interval of averaging wind speed, which is a standardized value for estimating the power of a wind electric installation for disturbance of wind flow. The model is a system of nonlinear differential equations describing the interaction of two inertial components of a single aero-electro-hydro-dynamic system. The first inertial component includes a wind turbine and a synchronous generator, and the second - an induction motor and a hydraulic pump. The interaction of one inertial component with another is effected through the electrical connection between the generator and the motor through the transmission line together with the transformer substations. The parameters of mechanical rotational motion of inertial components were determined using the assumption of quasi-stationarity of electromagnetic processes in the stator and rotor circuits of the generator and the motor. The calculation of their electromagnetic moments was carried out using equivalent alternate electrical circuits of the equipment, taking into account the variable speed and an arbitrary number of hydro units in the station. The results of calculations of the dynamics of the supply of a 1 MW hydro-pump station of 5 hydropower units with a synchronous pole generator of the same power at a wind speed less than the nominal value equal to and greater than the nominal value are presented. They provide an opportunity to evaluate the dynamic properties of the process of converting wind kinetic energy into the potential energy of water stored in a pool battery. The results obtained today are becoming increasingly important in view of the need to integrate significant wind power capacity into electricity systems. Ref. 26, tab. 3, fig. 8.
Keywords*: wind turbine, hydraulic pump, dynamics, inertia, flow, synchronous generator, stochasticity.*

© П.Ф. Васько, С.Т. Пазич, 2020

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)



П.Ф. Васько
P. Vasko

Відомості про автора: Доктор технічних наук за спеціальністю «Перетворення відновлюваних видів енергії», завідувач відділом гідроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАНУ
Освіта : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».
Наукова сфера: альтернативна енергетика, енергозбереження, перетворення відновлюваних видів енергії, мала гідроенергетика.
Публікації: 247.
ORCID: 0000-0001-8807-7173
Контакти: тел./факс: +38-044-206-28-09
e-mail: hydro@ive.org.ua

Author information: Doctor of Technical Sciences majoring in «Renewable Energy Transformation», Head of Hydropower Department of the Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine.
Education: National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute».
Research area: alternative energy, energy saving, conversion of renewable energy types and installations based on them, small hydropower
Publications: 247.
ORCID: 0000-0001-8807-7173
Contacts: tel./fax: +38-044-206-28-09
e-mail: hydro@ive.org.ua



С.Т. Пазич
S. Pazych

Відомості про автора: аспірант, молодший науковий співробітник відділу гідроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАНУ.
Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Спеціальність «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії».
Наукова сфера: відновлювана енергетика.
Публікації: 12.
ORCID: 0000-0002-6310-9842
Контакти: тел./факс: +38-044-206-28-09
e-mail: hydro@ive.org.ua

Author information: graduate student, junior researcher of Hydropower Engineering Department, Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine.
Education: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Specialty “Non-traditional and renewable energy sources”.
Research area: renewable energy
Publications: 12.
ORCID: 0000-0002-6310-9842
Contacts: tel./fax:+38-044-206-28-09
e-mail: hydro@ive.org.ua

Перелік використаних позначень та скорочень:

ГНС	– гідронасосна станція;	ω_2	– кутова швидкіть обертання двигуна;
ВЕУ	– вітроелектрична установка;	H_{TG}	– інерційна стала часу вітротурбіни;
J	– момент інерції;	$\varphi_л$	– кут установки лопаті;
ω_1	– кутова швидкість обертання вітротурбіни;	v	– швидкість вітру;
M_T	– момент вітротурбіни;	ή	– коефіцієнт корисної дії обладнання;
M_P	– момент насосу;	Q	– подача насоса.

Вступ. Гідронасосні станції (ГНС) з електроприводом та живленням від вітроелектричних установок (ВЕУ) знайшли застосування в системах водопостачання об’єктів, розташованих на територіях, віддалених від розподільчих електромереж. Досвід побудови та експлуатації таких ГНС узагальнено в [1], де розглянуто варіанти реалізації живлення як від окремої ВЕУ для потужності в декілька кВт, так і від вітродизельних електростанції для потужності в декілька десятків кВт. Засвідчено суттєвий вплив стохастичної складової зміни швидкості вітру на продуктивність ГНС та необхідність застосування засобів автоматизації і регулювання навантажувальних режимів. Для малопотужних варіантів успішна експлуатація досягається шляхом застосування відцентрових регуляторів частоти обертання ВЕУ та гідравлічних клапанів зворотної дії подачі насоса, проте зі збільшенням потужності виникає додаткова потреба в комутації величини навантаження, узгодженні режимів генерування і споживання енергії, вимірюванні і моніторингу параметрів, обробленні та передачі інформації. Експериментальне підтвердження наявності значних коливань генерованої потужності ВЕУ в натурних умовах експлуатації наведено також в [2,3].

На сьогодні набуває актуальності питання накопичення енергії ВЕУ в басейнах-акумуляторах гідроакумулювальних електростанцій [4-6]. В даному випадку рівень потужності таких комплексів може сягати десятків і сотень МВт, тому знання динаміки навантажувальних режимів роботи гідронасосної станції з електроприводом за живлення від вітроелектричної установки набуває важливого значення.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Постановка задачі полягає в розробленні математичної моделі динаміки зміни подачі води насосною станцією з електроприводом від асинхронних двигунів з короткозамкненою обмоткою ротора за живлення від вітроелектричної установки з синхронним генератором. Динаміка навантажувальних режимів роботи насосної станції зумовлена стохастичною складовою зміни швидкості вітру. Дослідження динамічних процесів здійснюється на 10-и хвилинному інтервалі осереднення швидкості вітру, що є стандартизованою величиною для оцінки потужності та динамічних процесів за збурень вітрового потоку [7,8].

Вихідні положення та припущення:

- моделювання динаміки навантажувальних режимів роботи здійснюється для осередненого значення швидкості вітру (v_o) в діапазоні 5-25 м/с;
- ВЕУ оснащена ідеальним регулятором кута повороту лопатей ($\varphi_Л$) в функції швидкості вітру (v), що реалізує залежність $\varphi_Л(v)$;
- зміна напряму подачі насоса Q(t), зумовлена зміною швидкості вітру v(t) не допускається, тобто: $Q(t) \geq 0$;
- частота обертання ВЕУ та подача насоса в процесі роботи не перевищують 1,1 номінального значення;
- насосна станція містить в своєму складі декілька (n) однакових електронасосних агрегатів;
- подача насоса за сталого тиску води залежить лише від його кутової швидкості обертання (ω), тому визначення залежності Q(t) потребує розрахунку ω(t).

Теоретичні положення. Для моделювання подачі насоса за зміни швидкості вітру представимо об'єкт дослідження, як динамічну двомасову аероелектрогідродинамічну систему, структурна схема якої представлена на рис.1. Подача води (Q) насосом (P) в резервуар, розташованим на певній висоті, здійснюється в результаті його обертання асинхронним двигуном (D), який отримує живлення від синхронного генератора (G) вітроустановки по лінії електропередачі (L). Система функціонує під дією вітрового потоку, кінетична енергія якого перетворюється вітровою турбіною (T) в механічну енергію обертового руху з подальшим її перетворенням в електричну енергію за допомогою синхронного генератора. Таким чином, одна із інерційних складових містить в собі вітротурбіну та синхронний генератор, а інша – асинхронний двигун та гідронасос. Взаємний вплив одної інерційної складової на іншу здійснюється через електричний зв'язок між генератором та двигуном. Структурна схема системи може містити також мультиплікатор в складі ВЕУ та редуктор в складі гідронасосного агрегата. Їх наявність не вносить нових принципових змін в роботу системи і може бути врахована при моделюванні застосуванням загальновживаних властивостей [9].

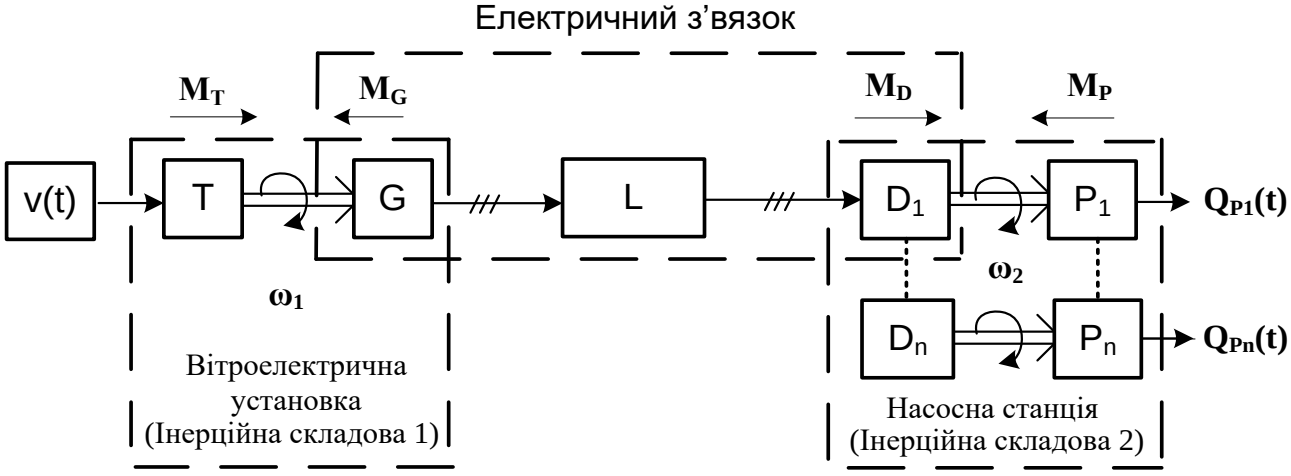


Рис. 1. Структурна схема двомасової аероелектрогідродинамічної системи.

Fig. 1. Structural diagram of two-mass aero-electric-hydro-dynanic system.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Вихідне рівняння динаміки обертового руху першої інерційної складової запишемо, згідно закону Ньютона [9], відносно осі обертання вітротурбіни в наступному виді:

$$\begin{gathered} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_T(v(t), \omega_1, \varphi_Л(v)) - \\ -M_{TT}(\omega_1) - M_{GT}(\omega_1) - M_G(\omega_1, \omega_2, n_i), \\ v(t) = v_{CP} + v'(t) = T^{-1} \int_0^T v(t)dt + v'(t), \\ J_1 = J_G + J_T, \end{gathered} \quad (1)$$

де: J_1 - сумарний момент інерції всіх обертових мас першої складової, приведений до осі вітротурбіни; J_T,J_G – моменти інерції вітротурбіни з трансмісією та генератора відповідно; ω_1 – кутова швидкість обертання вітротурбіни; M_T – аеромеханічний момент вітротурбіни; $\varphi_л$ – кут повороту лопатей вітротурбіни; M_{TT} – момент механічних втрат в елементах трансмісії та на електроживлення пристрою повороту лопатей; M_{GT} – момент втрат на тертя, вентиляцію, перемагнічування сталі, збудження генератора; M_G – момент електромагнітний генератора; ω_2 – кутова швидкість обертання насосів; n_i – кількість одночасно підключених насосів до генератора ($n_i = 1,2,\ldots,n$); v(t) – миттєве значення швидкості вітру на інтервалі осереднення; v_{CP} – осереднене значення швидкості вітру; $v^I(t)$ – стохастична складова швидкості вітру; T – інтервал осереднення, рівний 600с.

Відповідно запишемо вихідне рівняння динаміки обертового руху для другої інерційної складової відносно осі обертання двигуна насоса:

$$\begin{gathered} J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_D(U_D, \omega_1, \omega_2) - \\ -M_{DT}(\omega_2) - M_{PT}(\omega_2) - M_P(\omega_2), \\ J_2 = J_D + J_P, \end{gathered} \quad (2)$$

де: J_2 - сумарний момент інерції всіх обертових мас другої складової, приведений до осі двигуна; J_D,J_P - момент інерції двигуна та насоса відповідно, ω_2 – кутова швидкість обертання двигуна; M_D – момент електромагнітний двигуна; U_D – напруга на клемах двигуна; M_{DT} – момент механічних втрат двигуна (тертя та вентиляція); M_{PT} – момент втрат гідронасоса; M_P – момент гідродинамічний насоса.

Вирази (1),(2) являють собою, в сукупності, систему диференційних рівнянь, яка описує в загальному випадку взаємний вплив двох інерційних складових одна на одну, зумовлений наявністю стохастичної складової швидкості вітру. Для роз'язку системи необхідно визначити всі функціональні залежності від часу та кутової швидкості обертання. Стохастична складова швидкості вітру може бути лише змодельована, а характеристики обладнання – отримані від виробника. Проте доцільно зазначити, що на початковій стадії розроблення нових нетрадиційних проектів, коли виконується аналіз та вибір найбільш прийнятного варіанту, отримання зазначених вище характеристик є вкрай проблематичним. Тому в таких випадках важливим етапом обґрунтування доцільності схемо-технічного рішення є моделювання і проведення обчислювальних досліджень нових режимів роботи та властивостей об'єкту.

Розглянемо визначення та моделювання відповідних характеристик обладнання, зазначеного на рис.1.

Стохастична складова швидкості вітру визначається шляхом моделювання амплітуди поривів випадковою величиною розподіленою по нормальному закону, а тривалості поривів – по ймовірнісному розподілу за законом Пуассона [10]. Практична реалізація стохастичної моделі здійснюється згідно положень [11].

Визначення моменту інерції вітроустановки потребує використання конкретної технічної документації. Його значення також може бути отримане на основі більш доступної інформації про інерційну сталої часу вітроустановки (H_{TG}) в каталогах фірм-виробників. Орієнтовне значення H_{TG}, отримане авторами даної статті для широкої зміни номінальних потужностей сучасних ВЕУ, наведено у графічній формі на рис.2. Формула для розрахунку моменту інерції наступна:

$$J_2 = H_{TG} \frac{N_T^{nom}}{(\omega_1^{nom})^2}, \quad (3)$$

де: nom – ідентифікатор номінального значення, N_T – потужність вітротурбіни.

Механічна характеристика вітротурбіни $M_T(v(t), \omega_1,\varphi_л(v))$ та закон керування кутом повороту лопатей в функції швидкості вітру $\varphi_л(v)$ можуть бути розраховані та змодельовані згідно основних положень вітротехніки [12,13] з застосуванням універсальної аеродинамічної характеристики [14,15].

Моделювання механічної характеристики насосної станції і її подачі будемо здійснювати за

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

результатами досліджень насосного режиму роботи гідроакумулювальної електростанції, висвітлених в [16], та за даними [17] для потужного відцентрового насосу. Вони виявились практично ідентичними в відносних одиницях і наведені на рис.3. Доцільно зазначити наявність малого діапазону можливої зміни частоти обертання нижче номінального значення для забезпечення подачі насосу Q≥0. Значення моментів інерції двигуна та насоса наводяться у відповідних каталогах.

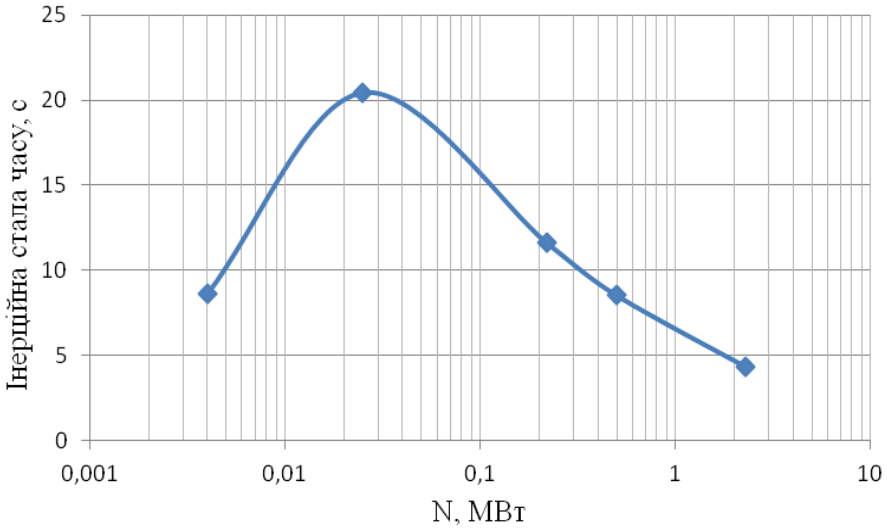


Рис. 2. Інерційна стала часу сучасних ВЕУ різної потужності.

Fig. 2. Inertia of constantly time of the modern wind turbine of different power.

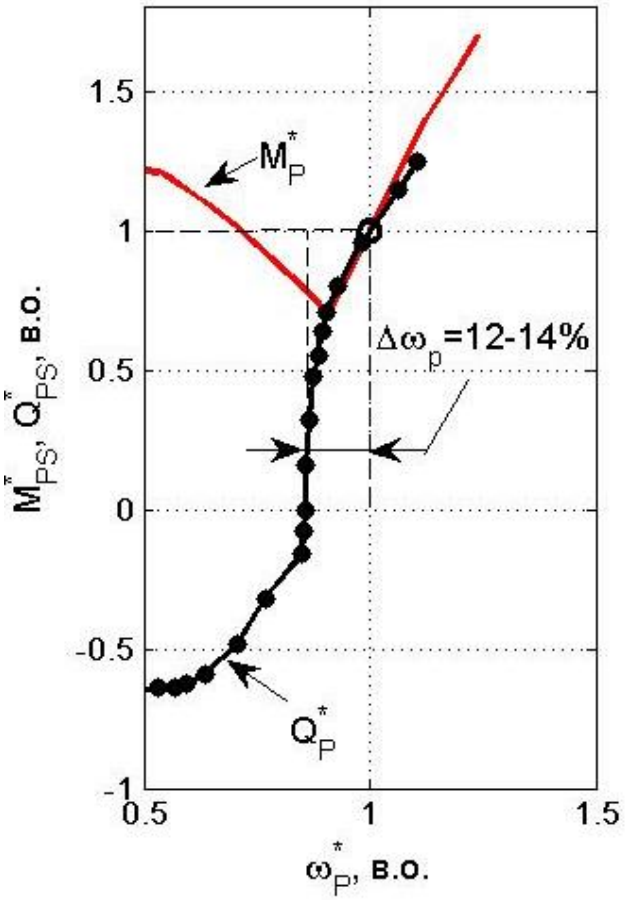


Рис. 3. Залежність моменту та подачі насоса від частоти обертання.

Fig. 3. Dependence of the torque and supply of the pump on the speed.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Функціональні залежності для моментів втрат ($M^*_{ВТР}$) елементів структурної схеми на рис.1 представимо в наступному узагальненому вигляді:

$$M^*_{ВТР}(\omega^*, M^*) = \beta_0 + \beta_1\omega^* + \\ +\beta_2(\omega^*)^2 + \beta_3(\omega^*)^3 + \beta_4 M^*, , \quad (4)$$
$$M^* = \frac{M}{M^{nom}}, \quad \omega^* = \frac{\omega}{\omega^{nom}},$$

де: (*) – ідентифікатор відносних значень, $\beta_{0,1,...4}$ – коефіцієнти пропорційності, що визначаються за паспортними даними обладнання.

Визначення параметрів механічного обертального руху інерційних складових будемо виконувати в припущенні про квазістаціонарність електромагнітних процесів в статорних і роторних контурах генератора та двигуна. З урахуванням прийнятого допущення, розрахунок їх електромагнітних моментів в (1), (2) може бути здійснений з використанням еквівалентних заступних електричних схем [18]. Згідно з теоретичними положеннями аналізу процесів в електричних машинах [19] визначення електромагнітних моментів доцільно реалізовувати також в відносних одиницях стосовно номінального значення, що і було зроблено в подальшому викладенні.

Електричний зв'язок між інерційними складовими будемо визначати з використанням еквівалентної електричної заступної схеми генератора, лінії електропередачі разом з трансформаторними підстанціями та двигунів (рис.4). Заступні схеми обладнання відповідають загальноприйнятим [20, 21] для номінальної частоти генерування електроенергії. Зміна частоти обертання ВЕУ зумовлює також зміну електрорушійної сили генератора, індуктивних опорів заступної схеми, а відповідно і електромагнітний момент двигунів насосних агрегатів, що враховано на схемі шляхом застосування додаткових множників ω_1^* та ω_2^*.

На рис.4 наведена заступна Т-подібна схема насосної станції з декількома одночасно ввімкненими асинхронними двигунами (n_i) з короткозамкненою обмоткою ротора. У випадку застосування двигуна з фазним ротором в схему вторинного контура необхідно внести додаткові зовнішні опори [9, 22].

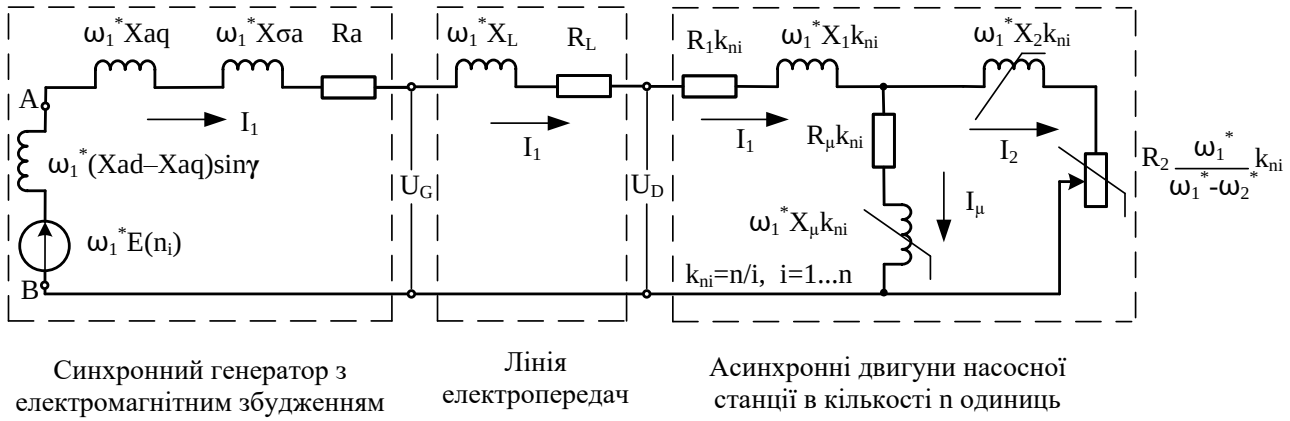


Рис. 4. Еквівалентна заступна схема електричного зв'язку ВЕУ з насосною станцією.

Fig. 4. Equivalent alternate circuit diagram of wind power installation with pumping station.

На схемі позначено: E – електрорушійна сила генератора; X_{ad}, X_{aq} – повздовжній та поперечний індуктивні опори реакції якоря; γ – кут зсуву фаз між напругою U_{AB} та струмом I_1; $X_{σa}$ - індуктивний опір розсіювання обмотки якоря; R_a – активний опір якоря СГ; R_L, X_L – активний і індуктивний опір ЛЕП; R_1, X_1, R_2, X_2 – активний та індуктивний опори обмоток статора та ротора АД; $R_μ$, $X_μ$– активний і індуктивний опір контура намагнічування АД; I_1 – струм якоря генератора та двигуна; I_2 – струм в роторі АД; $I_μ$– струм контура намагнічування.

Схема містить декілька нелінійних активних та реактивних опорів двигуна. Нелінійність індуктивного параметра контура намагнічування зумовлена зміною напруги і визначається експериментальним шляхом, або по нормалізованій характеристиці намагнічування. Зміна параметрів R_2, X_2 має місце для короткозамкнених обмоток ротора і може бути представлена наступним чином [22]:

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

$$X_2 = X_2^{nom} - \Delta X_2 \left|s\right|^{\beta_X} \frac{I_1 - 1}{I_П - 1}, \qquad 1 \le I_1 \le I_П,$$

$$R_2 = R_2^{nom} + \Delta R_2 \left|s\right|^{\beta_R} \frac{I_1 - 1}{I_П - 1}, \qquad 1 \le I_1 \le I_П, \quad (5)$$

$$0,75 \le \beta_X \le 1,25 \quad , \qquad 1,5 \le \beta_R \le 2,5 \quad ,$$

$$s = (\omega_1^* - \omega_2^*) / \omega_1^*.$$

де: X_2^{nom}, R_2^{nom} - значення опорів статорної та роторної обмоток в номінальному режимі роботи; ω_1^*, ω_2^* – кутова швидкість обертання вітротурбіни і двигуна в в.о.; $I_П$- пускове значення струму; ΔX_2, ΔR_2 - приріст параметрів, відповідний струму I_1.

Розрахунок струмів та напруг електричної схеми здійснюється відповідно до положень [23] в комплексних числах.. Значення електромагнітних моментів генератора і двигунів насосної станції та параметру γ визначаються наступним чином:

$$M_G = [I_1^2 (R_a + R_L + R_1 k_{ni}) + I_2^2 R_2 \frac{\omega_1^*}{\omega_1^* - \omega_2^*} k_{ni} + I_\mu^2 R_\mu k_{ni}] / \omega_1^*,$$

$$M_D = I_2^2 R_2 \frac{\omega_1^*}{\omega_1^* - \omega_2^*} k_{ni} / \omega_1^*, \quad (6)$$

$$\sin\gamma = \frac{a}{b}, \qquad a = \omega_1^* (X_{aq} + X_{\sigma a} + X_L) + \mathrm{Im}(Z_D),$$

$$b = \sqrt{a^2 + (R_a + R_L + \mathrm{Re}(Z_D))^2},$$

де: Im,Re – уявна і дійсна складова комплексного числа відповідно; Z_D – комплексний опір відносно клемних зажимів двигуна згідно схеми на рис.4.

Так як втрати енергії на нагрівання якорних обмоток генератора і двигунів та лінії електропередачі визначаються при розрахунку заступної електричної схеми, то вони повинні бути враховані відповідним чином при визначенні моментів втрат в рівняннях руху обох інерційних складових досліджуваної системи. Для даної постановки задачі, коли зміна частоти обертання в процесі тривалої експлуатації повинна знаходитися в діапазоні (0,86 – 1,1) номінального значення, представимо моменти втрат, з урахуванням рівняння (5) та паспортних даних обладнання, наступними залежностями:

$$M_{TT}(\omega_1) = \beta_0 = (1 - \eta_T^{nom}),$$

$$M_{GT}(\omega_1) = \beta_0 + \beta_2 (\omega_1^*)^2 = [0.7 + 0.3(\omega_1^*)^2](1 - \eta_G^{nom} - Ra),$$

$$M_{DT}(\omega_2) = \beta_0 + \beta_2 (\omega_2^*)^2 = [0.5 + 0.5(\omega_2^*)^2](1 - \eta_D^{nom} - R_1 - R_2), \quad (7)$$

$$M_{PT}(\omega_2) = \beta_0 + \beta_3 (\omega_2^*)^3 = [0.3 + 0.7(\omega_2^*)^3](1 - \eta_P^{nom}),$$

де: ή – коефіцієнт корисної дії обладнання, в.о.; R_a, R_1, R_2 – активний опір обладнання згідно схеми на рис.4, в.о.

Обмеження частоти обертання та потужності ВЕУ за зміни швидкості вітру здійснюється шляхом повороту лопатей вітротурбіни ідеальним регулятором, який реалізує узагальнений закон керування [14], наведений на рис.5. Узгодження потужності ВЕУ на інтервалі осереднення швидкості вітру та потужності насосної станції здійснюється шляхом зміни кількості ввімкнених електронасосних агрегатів.

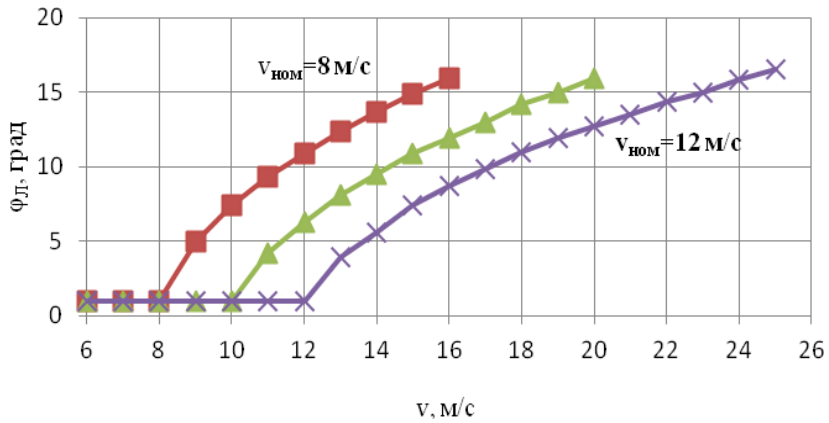


Рис. 5. Закон керування ω_1 кутом повороту лопатей.

Fig. 5. The law of control ω_1 the angle of rotation the blades.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Таким чином, визначені всі складові системи нелінійних диференційних рівнянь (1), (2). Проте необхідно зазначити, що механічна характеристика вітротурбіни представлена в абсолютних величинах, а решта у відносних стосовно своїх номінальних значень. Так як взаємодія двох інерційних складових здійснюється через взаємозв'язок електромагнітних моментів генератора і двигуна, та базове значення моменту повинно бути одне для обох складових. В подальшому викладенні для зручності аналізу результатів за базове значення моменту для обох інерційних складових прийнято розрахункове значення еквівалентного номінального моменту насосної станції (M_{PS}^{nom}). Відповідним чином визначається і номінальне значення подачі станції:

$$M_{PS}^{nom} = n\, M_p^{nom}, \qquad Q_{PS}^{nom} = n\, Q_P^{nom}. \quad (8)$$

Досвід дослідження аналогічних систем засвідчує доцільність представлення вихідних рівнянь у відносних одиницях стосовно базових значень [22, 24]. Такий перехід спрощує вирази рівнянь в результаті звільнення від постійних коефіцієнтів, спрощує аналіз результатів розрахунків, так як всі змінні представляються зручними числами в частках одиниці, що надає можливості для порівняння перебігу нестаціонарних процесів різних за потужністю систем.

Розрахункові дослідження та аналіз результатів. Розглянемо застосування розробленої математичної моделі для аналізу динаміки подачі води насосною станцією потужністю 1 МВт в складі 5 агрегатів за електроживлення від ВЕУ з синхронним явнополюсним генератором такої ж потужності. Номінальне значення швидкості вітру для установки складає 12 м/с, а закон керування кутом повороту лопатями відповідає одному із варіантів на рис.5. Інерційні сталі часу ВЕУ та електронасосного агрегату складають 6 с. та 5 с. відповідно, ККД вітротурбіни дорівнює 98%. Параметри генератора та двигуна наведені в табл.1, 2. Залежність моменту і подачі станції від частоти обертання насосів наведені на рис.3, а значення ККД насоса дорівнює 87%.

Залежність параметрів заступної схеми від кількості ввімкнених агрегатів у складі станції наведено в табл. 3.

Таблиця 1. Параметри синхронного генератора.

Table 1. Synchronous generator parameters.

R_a, в.о.	X_{ad}, в.о.	X_{aq}, в.о.	$X_{\sigma a}$, в.о.	ККД, %
0.02	0.85	0.6	0.12	95

Таблиця 2. Параметри асинхронного двигуна.

Table 2. Asynchronous motor parameters.

R_1,в.о.	X_1,в.о	R_2,в.о	X_2,в.о.	R_μ,в.о.	X_μ,в.о.	s_n,%	ККД, %
0,02	0,1	0,02	0,1	0.1	3.5	2,3	94

Таблиця 3. Параметри заступної схеми для різної кількості агрегатів.

Table 3. The coefficient parameters of the scheme the number of units.

Кількість ввімкнених агрегатів у складі насосної станції, n	5	4	3	2	1
k_{ni}, в.о.	1	1.25	1.66	2.5	5
Номінальні значення моменту та подачі насосної станції, в.о.	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2
E, в.о.	1.82	1.63	1.44	1.27	1.12
Напруга двигуна, в.о.	1				

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Розрахункові дослідження перебігу навантажувальних режимів з урахуванням стохастичної складової швидкості вітру проведено в середовищі Matlab Simulink з використанням математичних операторів для організації алгоритму розв'язку математичної моделі, блоку «Lookup Table» для введення графічних залежностей та графічного редактора для візуалізації динаміки зміни необхідних параметрів. Рішення нелінійної системи диференційних рівнянь обертового руху здійснювалось числовим методом Рунге-Кутти. Початкові значення досліджуваних змінних параметрів визначались на заданій градації осередненого значення швидкості вітру за умови $d\omega/dt=0$. В залежності від величини осередненого значення градації швидкості вітру змінювалась кількість ввімкнених насосів в складі станції відповідно від тих чи інших обмежень та обставин, наведених вище на початку статті.

Виконано аналіз кількісних результатів моделювання динаміки навантажувальних режимів роботи насосної станції для трьох випадків, які відповідають швидкості вітру менше номінального значення, рівному та більшому за номінальне значення.

В першому випадку було прийнято осереднене значення швидкості вітру v_{CP}=7 м/с. Результат моделювання наведено на рис.6, де показано миттєві значення швидкості вітру, кута повороту лопатей ВЕУ та подачі насосної станції. За даного закону керування кутом повороту лопатей його значення на досліджуваному інтервалі часу не змінюється і дорівнює 1°, за якого вітротурбіна має найбільш можливу потужність при швидкостях вітру менше номінального значення (за винятком моменту часу на 280-ій секунді, коли відбувалось короткотривале включення механізму повороту лопатей). В складі станції працює лише один гідронасосний агрегат, подача якого нестабільна і характеризується наявністю пульсацій, коефіцієнт варіації яких менший за аналогічний для швидкості вітру. Проте осереднене значення подачі станції менше за номінальне значення одного насосу.

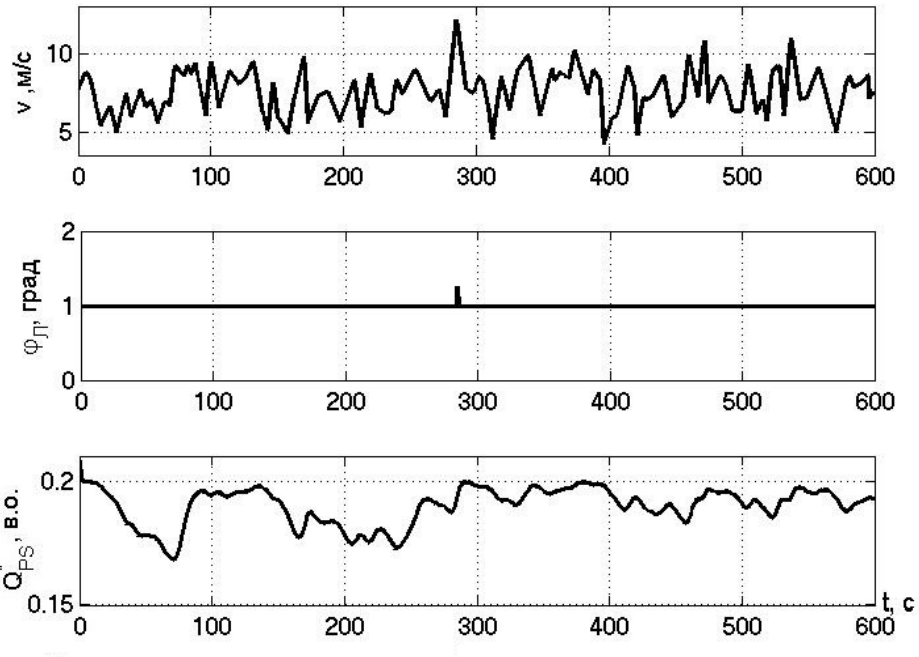


Рис. 6. Динаміка навантажувального режиму насосної станції за швидкості вітру v_{CP}=7 м/с.

Fig. 6. Dynamics of loading mode of the pumping station at wind speed v_{AV}=7 m/s.

Для другого випадку, за номінальної швидкості вітру 12 м/с, результати моделювання наведено на рис. 7. Кут повороту лопатей в процесі роботи змінюється від 1° до 6° в залежності від наявності поривів вітру. В складі станції працює 3 гідронасосні агрегати, подача яких досить стабільна на початковому інтервалі часу, проте менша за номінальну. Більш того, навіть це значення в результаті спаду швидкості на 180-ій секунді стало від'ємним, що за прийнятих вище обмежень засвідчило втрату стійкості навантажувального режиму. Тобто, навіть за номінальної швидкості вітру досягнення 60 % номінальної подачі гідронасосної станції можна вважати проблематичним.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

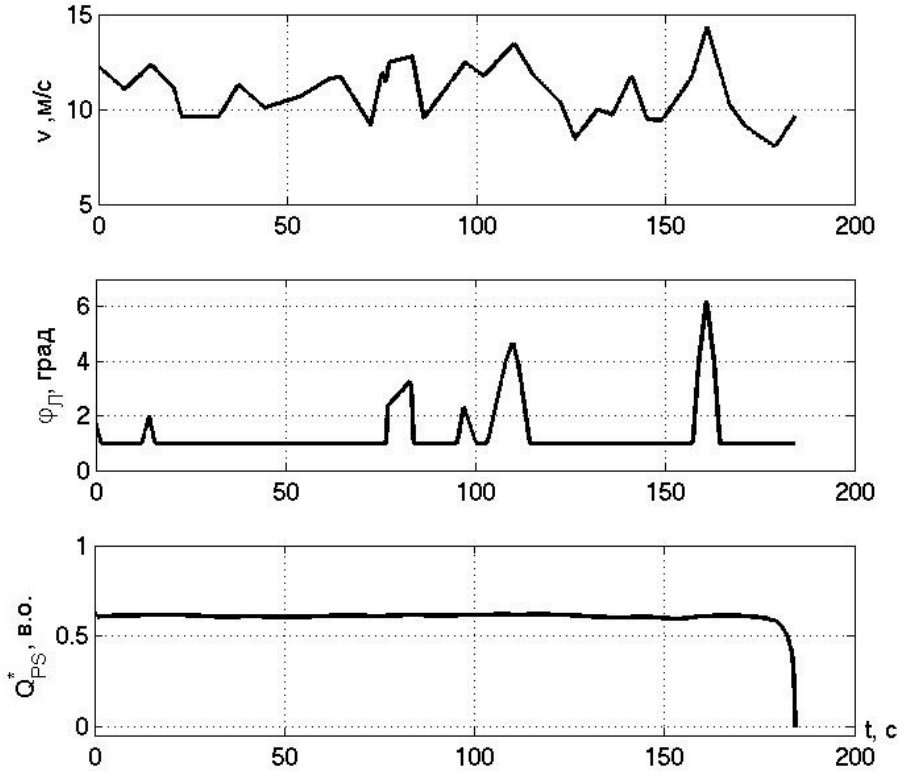


Рис. 7. Динаміка навантажувального режиму насосної станції за швидкості вітру v_{CP}=12 м/с.

Fig. 7. Dynamics of loading mode of the pumping station at wind speed v_{AV}=12 m/s.

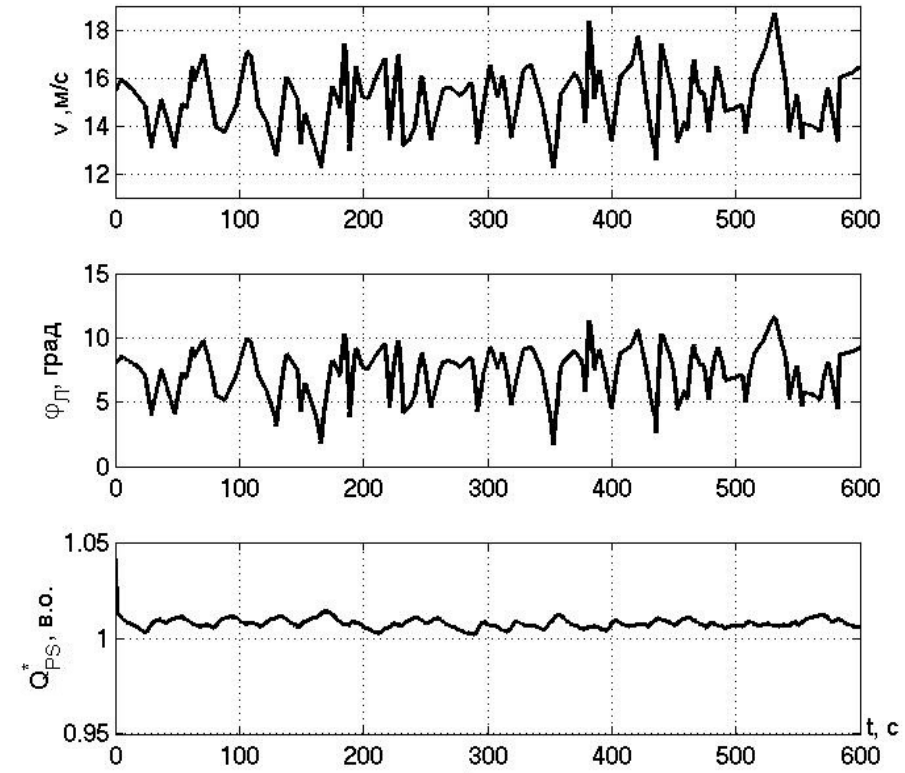


Рис. 8. Динаміка навантажувального режиму насосної станції за швидкості вітру v_0=15 м/с.

Fig. 8. Dynamics of loading mode of the pumping station at wind speed v_{AV}=15 m/s.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

За швидкостей вітру більше номінального значення досягається стабільний навантажувальний режим насосної станції з номінальною подачею завдяки регулюванню кута повороту лопатей, про що свідчать результати, наведені на рис. 8.

За результатами досліджень динаміки подачі насосної станції для різних осереднених значень швидкості вітру може бути визначена енергетична ефективність накопичення енергії ВЕУ в басейнах гідроакумулювальних електростанцій для довільного імовірнісного розподілу градацій швидкості вітру у відповідності з алгоритмами, розробленими в [25, 26].

Висновок. Розроблено математичну модель динаміки навантажувального режиму роботи гідронасосної станції з приводом насосів від асинхронних електродвигунів та живленням від вітроелектричної установки з синхронним генератором за стохастичної зміни швидкості вітру. Модель являє собою систему нелінійних диференційних рівнянь і описує динаміку обертового руху двомасової аероелектрогідромеханічної системи та надає можливості оцінки динамічних властивостей процесу перетворення кінетичної енергії вітру в потенціальну енергію води, накопиченої в басейні акумуляторі. В моделі враховано нелінійність аеродинамічної характеристики вітротурбіни від частоти обертання та кута повороту лопатей, нелінійність механічних характеристик гідронасосів від частоти обертання та нелінійність параметрів асинхронних електродвигунів від частоти обертання та напруги, довільну кількість електронасосів в складі станції.

1. *Харитонов В.П.* Автономные ветроэлектрические установки. М. ГНУ ВИЭСХ. 2006. 280 с.

2. *Васько В.П., Васько П.Ф.* Динамика нагрузочных режимов работы ветроэлектрической установки, обусловленная порывами ветра. Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. Зб. наук. праць. 2001. № 4(29). С. 140-144.

3. *Васько П.Ф., Васько В.П., Даниленко О.І., Долюк В.В.* Експериментальні дослідження режимів генерування та споживання реактивної потужності серійною вітроелектричною установкою з асинхронним генератором. Відновлювана енергетика. 2008. № 1(12). С. 34-38.

4. *Jastrzębska G.* El Hierro Renewable Energy Hybrid System: A Tough Compromise. Energies. 2018. № 11(10). 2812. 20 p. doi: 10.3390/en11102812.

5. *Васько П.Ф., Вербовий А.П, Ібрагімова М.Р., Пазич С.Т.*. Гідроакумулювальні електростанції – технологічна основа інтеграції потужних вітро- та фотоелектричних станцій до складу електроенергетичної системи України. Гідроенергетика України. -2017. № 1-2. С. 20-25.

6. *Ummels B.C., Pelgrum E., Kling W.L.* Integration of large-scale wind power and the use of energy storage in the Netherlands. Renewable Power Generation. IET. 2008. № 2. Pp.34-46.

7. IEC 61400-1:2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements. International Standard. 2005. 179 p.

8. ДСТУ IEC 61400-12-2001. Системи турбогенераторні вітряні. Частина 12. Випробування вітряних турбін для визначення енергетичних характеристик. (IEC 61400-11:1998. IDT). Введ. 01.07.2003 р. К. Держспоживстандарт України. 2003. 31 с.

9. *Воскобойник В.Э., Бородай В.А.* Основы электропривода производственных машин и комплексов. Днепропетровський Государственный ВУЗ «НГУ». 2015. 121 с.

10. *Денисенко Г.И., Васько П.Ф., Пекур П.П.* Стохастическое моделирование параметров ветра для задач ветроэнергетики. Известия АН СССР. Энергетика и транспорт М. 1990. № 2. С. 109-115.

11. *Васько П.Ф., Вербовий А.П., Пазич С.Т.* Реалізація стохастичної моделі поздовжньої складової швидкості вітру для задач вітроенергетики. Відновлювана енергетика. 2017. № 3(50). С. 54-61.

12. *Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И.* Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика. Учебник. 2004. 519 с.

13. *Абрамовский Е.Р., Городько С.В., Свиридов Н.В.* Аэродинамика ветродвигателей. Днепропетровск. Изд-во ДГУ 1987. 220 с.

14. *Пазич С.Т.* Апроксимація аеромеханічних характеристик вітрової турбіни вітроводонасосної установки в навантажувальних режимах роботи методом заміни змінних. Відновлювана енергетика. 2018. № 1(52). С. 62-69.

15. *Пазич С.Т.* Моделювання процесу заряду басейну-акумулятора гідроакумулювальної електростанції від вітроводонасосної установки. Відновлювана енергетика. 2019. № 2(57). С. 61-69. doi: 10.36296/1819-8058.2019.2(57).61-69.

16. *Аршеневский Н.Н.* Обратимые гидромашины для гидроаккумулирующих электростанций. М. Энергия. 1977. 240 с.

17. *Степанов А. И.* Центробежные и осевые насосы. М. Машгизд. 1960. 464 с.

18. *Вольдек А.И.* Электрические машины. 2-е изд. Л. Энергия. 1974. 840 с.

19. *Важнов А.И.* Переходные процессы в машинах переменного тока. Л. Энергия. 1980. 256 с.

20. *Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И.* Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник. М. Энергоиздат. 1982. 504 с.

21. *Копылов И.П., Клокова К.К.* Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Т. 1. М. Энергоатомиздат. 1988. 456 с.

22. *Брыль А.А., Васько В.П., Васько П.Ф., Соловьев П.Б.* Математическое моделирование нестационарных электромеханических процессов гидроэлектрических агрегатов малых ГЭС с различными типами генераторов при параллельной работе с электросистемой. Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 3. С. 143-150.

23. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учеб. для электротехн., энерг. приростроит. спец. вузов 9 изд. перераб. и доп. М. Высш. шк. 1996. 638 с.

24. *Mohanpurkar M., Ouroua A., Hovsapian R., Luo Y., Singh M., Muljadi E., Gevorgian V., Donalek P.* Real-time co-

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

simulation of adjustable-speed pumped storage hydro for transient stability analysis. Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 154. Pp. 276-286. doi: 10.1016/j.epsr.2017.08.010.

25. *Васько П.Ф.* Розрахунок показників технічної ефективності застосування вітроелектричних установок за результатами строкових вимірювань швидкості вітру. Технічна електродинаміка. 2001. № 6. С. 45-49.

26. *Брыль А.А., Васько П.Ф., Пекур П.П.* Определение технических показателей эффективности использования ветроэлектрических агрегатов в Украине. Энергетика и электрификация. 1995. № 2. С. 48-51.

REFERENCE

1. *Haritonov V.P.* Avtonomnyie vetroelektricheskie ustanovki. [Autonomous wind power plants]. Moscow. 2006. 280 p. [in Russian].

2. *Vasko V.P., Vasko P.F.* Dinamika nagruzochnyih rezhimov rabotyi vetroelektricheskoy ustanovki, obuslovlennaya poryivami vetra. [Dynamics of loading modes of the wind-electric installation, caused by gust of wind]. Bulletin of the Donbas State Academy of Civil Engineering and Architecture. Collection of scientific work. 2001. № 4(29). Pp. 140-144. [in Ukrainian].

3. *Vasko P.F., Vasko V.P., Danylenko O.I., Doliuk V.V.* Eksperymentalni doslidzhennia rezhymiv heneruvannia ta spozhyvannia reaktyvnoi potuzhnosti seriinoiu vitroelektrychnoiu ustanovkoiu z asynkhronnym heneratorom. [Experimental studies of the modes of generation and consumption of reactive power by a serial wind-driven installation with an asynchronous generator]. Vidnovluvana energetika. 2008. № 1(12). Pp. 34-38. [in Ukrainian].

4. *Jastrzębska, G.* El Hierro Renewable Energy Hybrid System: A Tough Compromise. Energies. 2018. № 11(10). 2812. 20 p. doi: 10.3390/en11102812. [in English].

5. *Vasko P.F., Verboviy A.P., IbragImova M.R., Pazych S.T.* GIdroakumulyuvalnI elektrostantsiyi – tehnologIchna osnova Integratsiyi potuzhnih vItro- ta fotoelektrichnih stantsIy do skladu elektroenergetichnoyi sistemi Ukrayini. [Pumped hydroelectric energy storage – technological basis of integration of powerful wind and photoelectric power stations into the power system of Ukraine]. Hydropower of Ukraine. 2017. № 1-2. Pp. 20-25. [in Ukrainian].

6. *Ummels B.C., Pelgrum E., Kling W.L.* Integration of large-scale wind power and the use of energy storage in the Netherlands. Renewable Power Generation. IET. 2008. № 2. Pp.34-46. [in English].

7. IEC 61400-1:2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements. International Standard. 2005. 179 p. [in English].

8. IDSTU IEC 61400-12-2001. Systemy turboheneratorni vitryani. Chastyna 12. [Wind turbine generator systems. Part 12]. Wind turbine power performance testing. (IEC 61400-11:1998. IDT). Vved. 01.07.2003. K. Gospotrebstandart Ukrainy. 2003. 31 p. [in Ukrainian].

9. *Voskoboynik V.E., Boroday V.A.* Osnovyi elektroprivoda proizvodstvennyih mashin i kompleksov. [Fundamentals of electric drive of production machines and complexes]. Dnepropetrovsk. State University «NSU». 2015. 121 p. [in Russian].

10. *Denisenko G.I., Vasko P.F., Pekur P.P.* Stohastricheskoe modelirovanie parametrov vetra dlya zadach vetroenergetiki. [Stochastic simulation of wind parameters for wind power projects]. Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR Energy and Transport. 1990. № 2. Pp. 109-115. [in Russian].

11. *Vasko P.F., Verbovyi A.P., Pazych S.T.* Realizatsiia stokhastychnoi dvoparametrychnoi modeli pozdovzhnoi skladovoi shvydkosti vitru dlia zadach vitroenerhetyky. [Implementation of a stochastic two-parameter model of the longitudinal component of the wind speed for wind power problems]. Vidnovluvana energetika. 2017. № 3(50). Pp. 54-61. [in Ukrainian].

12. *Krivtsov V.S., Oleynikov A.M., Yakovlev A.I.* Neischerpaemaya energiya. Kn. 2. Vetroenergetika [Inexhaustible energy. B. 2. Wind power]. Textbook. 2004. 519 p. [in Russian].

13. *Abramovskiy E.R., Gorodko S.V., Sviridov N.V.* Aerodinamika vetrodvigateley. [Aerodynamics of wind turbines]. Dnepropetrovsk. Publisher DGU. 1987. 220 p. [in Russian].

14. *Pazych S.T.* Aproksimatsiya ayeromekhanichnikh kharakteristik vitrovoï turbini vitrovodonasosnoï ustanovki v navantazhuvalnikh rezhimakh roboti metodom zamini zminnikhs. [Approximation of aeromechanical characteristics of the wind turbine of a wind pump installation in the load operation modes by the method of changing the variables]. Vidnovluvana energetika. 2018. № 1(52). Pp.62-69. [in Ukrainian].

15. *Pazych S.T.* Modeliuvannia protsesu zariadu baseinu-akumuliatora hidroakumuliuvalnoi elektrostantsii vid vitrovodonasosnoi ustanovky. [Modeling of the charge process of the upper reservoir of the pump hydroelectric energy storage from the wind pump installation]. Vidnovluvana energetika. 2019. № 2(57). Pp. 61-69. doi: 10.36296/1819-8058.2019.2(57).61-69. [in Ukrainian].

16. *Arshenevskyi N.N.* Obratymые hydromashynы dlia hydroakkumulyruiushchykh эlektrostantsyi. [Reversible hydraulic machines for pumped hydroelectric energy storage]. Leningrad, Energia. 1977. 240 p. [in Russian].

17. *Stepanoff A.I.* Tsentrobezhnyie I osevyienasosyi. [Centrifugal and axial flow pumps]. Moscow. Mashgiz. 1960. 464 p. [in Russian].

18. *Voldek A.I.* Elektricheskie mashiny. [Electric machines]. 2 edition. L. Energy. 1974. 840 p. [in Russian].

19. *Vazhnov A.I.* Perehodnyie protsessyi v mashinah peremennogo toka. [Transients in alternating current machines]. Leningrad. Energia. 1980. 256 p. [in Russian].

20. *Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I.* Asinhronnyie dvigateli serii 4A. [Electric Machine Reference 4A]. Reference book. Moscow. Energoizdat. 1982. 504 p. [in Russian].

21. *Kopyilov I.P., Klokova K.K.* Spravochnik po elektricheskim mashinam. V 2 t. / T. 1. [Electric Machine Reference. in 2 vol./Vol. 1]. Moscow. Energoatomizdat. 1988. 456 p. [in Russian].

22. *Bryl A.O., Vasko V.P., Vasko P.F., Solovyov P.B.* Matematicheskoye modelirovaniye nestatsionarnykh elektromekhanicheskikh protsessov gidroelektricheskikh agregatov malykh GES s razlichnymi tipami generatorov pri parallel'noy rabote s elektrosistemoy. [Mathematical modeling of non-stationary electromechanical processes of hydroelectrical hardware for small hydro power stations with different types of generators at parallel functioning with electric system]. Alternative Energy and Ecology ISJAEE. 2013. № 3. Pp. 143-150.

23. *Bessonov L.A.* Teoreticheskie osnovyi elektrotehniki. Elektricheskie tsepi: Ucheb. dlya elektrotehn., energ., pripo-

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

rostroit. spets. vuzov –9 izd., pererab. i dop. [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electric circuits]. Moscow. High school. 1996. 638 p. [in Russian].

24. *Mohanpurkar M., Ouroua A., Hovsapian R., Luo Y., Singh M., Muljadi E., Gevorgian V., Donalek P.* Real-time co-simulation of adjustable-speed pumped storage hydro for transient stability analysis. Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 154. Pp. 276-286. doi: 10.1016/j.epsr. 2017.08.010. [in English].

25. *Vasko P.F.* Razrakhunok pokaznykiv tekhnichnoyi efektyvnosti zastosuvannya vitroelektrychnykh ustanovok za rezul'tatamy strokovykh vymiryuvan' shvydkosti. [Calculation of the technical efficiency of the application of wind power installations based on the results of term velocity measurements].Technical electrodynamics. 2001. №6. Pp.45-49. [in Ukrainian].

26. *Bryl A.A., Vasko P.F. Pekur P.P.* Opredelenie tehnicheskih pokazateley effektivnosti ispolzovaniya vetroelektricheskih agregatov v Ukraine. [Definition of technical indicators of efficiency of use the wind-electric aggregates in Ukraine]. Energy and electrification. 1995. № 2. Pp. 48-51. [in Russian].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОНАСОСНОЙ СТАНЦИИ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ПИТАНИЕМ ОТ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

П.Ф. Васько, doctor of technical science, **С.Т. Пазыч,** graduate student

Институт возобновляимой энергетики НАН Украины,
02094 ул. Гната Хоткевича, 20А, м. Киев, Украина.

Гидронасосные станции с электроприводом и питанием от ветроэлектрических установок нашли применение на территориях, удаленных от распределительных электросетей. Опыт эксплуатации таких станций свидетельствует существенное влияние наличии пульсаций скорости ветра на их производительность. В рамках этого исследования разработана математическая модель динамики изменения подачи воды многоагрегатного Гидронасосн станцией с электроприводом от асинхронных двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора питанимая от ветроэлектрической установки с синхронным генератором с учетом стохастической составляющей изменения скорости ветра. Исследование динамических процессов осуществляется на 10-и минутном интервале осреднения скорости ветра, является стандартизированной величиной для оценки мощности ветроэлектрической установки по возмущений ветрового потока. Модель представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывающей взаимодействие двух инерционных составляющих единой аероелектрогидродинамичнои системы Первая инерционная составляющая содержит в себе ветротурбину и синхронный генератор, а вторая - асинхронный двигатель и гидронасос. Взаимное влияние одной инерционной составляющей на другую осуществляется через электрический связь между генератором и двигателем через линию электропередачи вместе с трансформаторными подстанциями. Определение параметров механического вращательного движения инерционных составляющих выполнялось в предположении о квазистационарнисть электромагнитных процессов в статорных и роторных контурах генератора и двигателя. Расчет их электромагнитных моментов осуществлялся с использованием эквивалентных заступни электрических схем оборудования с учетом переменной частоты вращения и произвольного количества гидроагрегатов в составе станции. Представлены результаты расчетов динамики подачи гидронасосной станции мощностью 1 МВт в составе 5 гидроагрегатов за электропитание от ветроустановки с синхронным явнополюсним генератором такой же мощности при скорости ветра меньше номинального значения, равном и большем номинального значения. Они предоставляют возможности оценки динамических свойств процесса преобразования кинетической энергии ветра в потенциальную энергию воды, накопленной в бассейне аккумуляторе. На сегодня получены результаты приобретают важное значение в связи с необходимостью интеграции значительных мощностей ветроэлектростанций в состав электроэнергетических систем. Библ. 8, табл.8, рис. 4.

Ключевые слова: *ветротурбина, гидронасос, динамика, инерционность, подача, синхронный генератор, стохастичность.*

Стаття надійшла до редакції 24.02.20
Остаточна версія 12.03.20

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

УДК 621.483 DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).74-85

АНАЛІЗ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ І ГЕОТЕРМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ УКРАЇНИ

А.А. Барило

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

На основі матеріалів «Державного інформаційного геологічного фонду України» створено базу даних геотермальних об'єктів, в яку увійшло 655 об'єкта, які охоплюють 12 адміністративних областей України і близько 54 % існуючих родовищ вуглеводнів. Основними геотермічними і гідрогеологічними характеристиками об'єктів бази даних є: глибина залягання, літологія і склад порід, геологічний вік порід, товщина продуктивного горизонту, пластова температура і пластовий тиск, дебіт свердловини, зниження рівня води у водоносному горизонті під час випробування, мінералізація, газовий склад і вміст природного газу у підземних водах.

Аналіз гідрогеологічних і геотермічних характеристик геотермальних об'єктів виконано на основі структурно-гідрогеологічного принципу, тобто усі об'єкти розглядались стосовно крупних гідрогеологічних структур з єдиними регіональними межами і умовами формування родовищ підземних вод. Було проаналізовано чотири гідрогеологічні структури: Закарпатський внутрішній прогин, Прикарпатський передгірний прогини, Дніпровсько-Донецький артезіанський басейн та Причорноморський артезіанський басейн. Для кожної структури побудовано діаграми розподілу пластових температур, глибин залягання і мінералізації підземних вод в геотермальних об'єктах бази даних.

Аналіз показав, що умови формування геотермальних родовищ в першу чергу залежать від теплового фону земних надр, але на процеси формування родовищ дуже істотний вплив має глибина залягання кристалічного фундаменту, розташування областей живлення і розвантаження термоводоносних горизонтів, глибина сучасного водообміну, літологічний склад водовмісних порід.

Створена база даних геотермальних об'єктів України може бути використана під час вибору першочергових проектів освоєння геотермальних ресурсів, а також для стратегічного планування геотермальної галузі в цілому. Бібл. 10, рис. 14.

Ключові слова: *геотермальний об'єкт, електрона база даних, геотермічна характеристика, гідрогеологічна характеристика, діаграма розподілу.*

ANALYSIS OF HYDROGEOLOGICAL AND GEOTHERMIC CHARACTERISTICS OF THE GEOTHERMAL OBJECTS OF UKRAINE

A. Barylo

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

On the basis of the materials of the State Geological Information Fund of Ukraine, a database of geothermal objects was created, which included 655 objects, covering 12 administrative regions of Ukraine and about 54% of the existing hydrocarbons. The main geothermal and hydrogeological characteristics of the database objects are: depth of productive horizon, lithology and composition of rocks, geological age of rocks, thickness of productive horizon, aquifer temperature and reservoir pressure, well flow, water level drop in aquifer during testing, mineralization, gas composition and natural gas content in groundwater.

The analysis of hydrogeological and geothermal characteristics of geothermal objects was performed on the basis of the structural-hydrogeological principle. That is, all objects were considered in relation to large hydrogeological structures with unified boundaries and conditions of groundwater deposits formation, such as: Transcarpathian Bend, Procarpathian Bend, Dneprovsko-Donetsk artesian basin and Black Sea artesian basin. For each structure, diagrams of the distribution of formation temperatures, depths of deposition and mineralization of groundwater in geothermal objects of the database are constructed.

The analysis showed that the conditions of the geothermal deposits generation primarily depend on the thermal subsoil background. But very significant influence have the crystalline basement depth, the location of areas of supply and unloading of geothermal horizons, the depth of modern water exchange, lithologic composition of water containing rocks.

The database of geothermal objects of Ukraine can be used during the selection of priority geothermal projects for the development, as well as for strategic planning of the geothermal industry as a whole. Ref. 10, fig. 14.

Keywords: *geothermal object, electronic database, geothermal characteristics, hydrogeological characteristics, distribution diagram.*

© А.А.Барило, 2020

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)



А.А. Барило
A. Barylo

Відомості про автора: науковий співробітник відділу геотермальної енергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України.
Освіта: Київський Державний університет, факультет гідрогеології та інженерної геології.
Наукова сфера: відновлювана енергетика, геотермальна енергетика, використання тепла довкілля.
Публікації: 58.
ORCID: 0000-0001-7981-6464
Контакти: тел./факс: +38 (044) 206-28-09
e-mail: geotherm@ukr.net

Author information: researcher at Geothermal Energy Department, Institute of Renewable Energy of National Academy of Sciences of Ukraine.
Education: Kyiv National University, Faculty of Hydrology and Engineering Geology.
Research area: renewable energy, geothermal energy, use of environmental heat.
Publications: 58.
ORCID: 0000-0001-7981-6464
Contacts: phone/fax: +38 (044) 206-28-09
e-mail: geotherm@ukr.net

Вступ. В ході проведення пошуково-розвідувальних робіт на нафту, природний газ і конденсат виконуються гідрогеологічні дослідження, які виявляють глибинні водоносні горизонти, що містять термальну воду. Ці відомості дають попередню інформацію про можливість формування геотермальних родовищ та мають принципове значення на початковому етапі розвитку геотермальних проектів. Особливо вони важливі при виборі першочергових для освоєння геотермальних об'єктів, а також для стратегічного планування геотермальної галузі в цілому.

Однак в даний час цей масив даних практично не використовується. Перш за все це пояснюється тим, що інформацією володіють геологічні організації, які не зацікавлені в розвитку геотермальної енергетики та в наданні відомостей щодо термоводоносних горизонтів України.

Проте, в останні роки в зв'язку зі збільшенням інтересу до відновлюваних джерел енергії, в тому числі геотермальних, ситуація почала змінюватися. Геологічні організації шукають нові можливості для використання вироблених і непродуктивних на вуглеводні свердловин, проводиться узагальнення геотермічної інформації, збираються дані щодо свердловин, які виявили термальні води.

Метою дослідження є створення електронної бази даних геотермальних об'єктів України, аналіз гідрогеологічних і геотермічних характеристик для визначення загальних закономірностей і специфічних особливостей умов залягання та формування запасів гідротермальних родовищ.

Постановка завдання. Під гідротермальним об’єктом розуміється горизонт одновікових в геологічному відношенні порід, що містить термальні води, який був розкритий свердловиною, випробуваний, і були отримані його попередні гідрогеологічні та геотермічні характеристики. З вищезазначеного визначення випливає, що одна свердловина може розкрити декілька геотермальних об'єктів.

До основних гідрогеологічних і геотермічних характеристик геотермального об’єкту належать: глибина залягання, літологія і склад порід, геологічний вік порід, товщина продуктивного горизонту, пластова температура і пластовий тиск, дебіт свердловини, зниження рівня води у водоносному горизонті під час випробування, мінералізація, газовий склад і вміст природного газу у підземних водах[1-3].

На жаль на практиці під час пошуково-розвідувальних робіт в нафтових і газових свердловинах не завжди проводиться повний комплекс досліджень водоносного горизонту, тому деякі з необхідних характеристик можуть бути відсутні. У цьому випадку визначальним для внесення до бази даних є фактичний приплив, тобто наявність термальних вод. Якщо геотермічні дослідження горизонту не проводилися, то в базу даних увійшли розрахункові характеристики, які визначалися за середнім для свердловини(або для родовища) геотермічним градієнтом. В базу даних увійшли водоносні горизонти, пластова температура яких перевищує 50ºС [4].

База даних геотермальних об’єктів України. На основі фондових матеріалів «Державного інформаційного геологічного фонду України» [5-10] зібрано дані та створено електрону базу геотермальних об’єктів України. На теперішній час база даних налічує 655 геотермальних об’єкта. На діаграмі (рис. 1.) показані адміністративні області України, які представлені базою даних. Як видно з діаграми, інформацію зібрано по 12 областях, найбільша кількість припадає на Полтавську, Львівську, Івано-Франківську та Херсонську областях. Зауважимо, що на даний час близько 54 % існуючих родовищ вуглеводнів увійшли до бази даних [5].

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

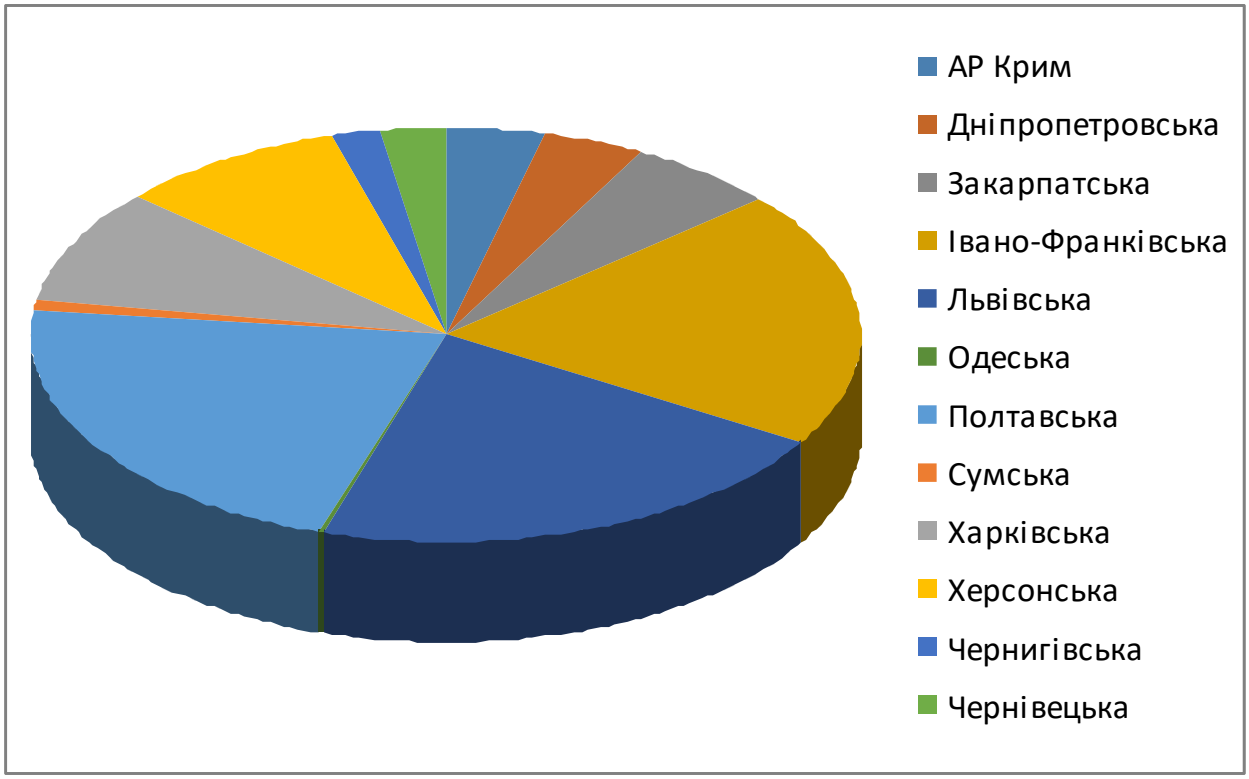


Рис. 1. Розподіл геотермальних об'єктів електроной бази даних за адміністративними областями України.

Fig. 1. Geothermal objects distribution of electronic database by administrative regions of Ukraine.

Аналіз геотермічних і гідрогеологічних характеристик. Аналіз геотермічних і гідрогеологічних характеристик об’єктів проводиться з метою визначення загальних закономірностей формування запасів та знаходження специфічних особливостей умов залягання геотермальних родовищ.

В основу аналізу покладено структурно-гідрогеологічний принцип, тобто усі геотермальні об’єкти бази даних прив'язуються до конкретних крупних гідрогеологічних структур (I-шого порядку), які представляють собою елементи підземної гідросфери, обмежені природними гідрогеологічними границями, і мають єдині умови формування підземних вод.

Усі геотермічні свердловини, які увійшли до бази даних, відносяться до наступних гідрогеологічних структур:

- Закарпатський внутрішній прогин;
- Прикарпатський передгірний прогин;
- Дніпровсько-Донецький артезіанський басейн;
- Причорноморський артезіанський басейн.

Зібрана інформація була проаналізована для кожної гідрогеологічної структури за такими позиціями:

- глибина залягання кристалічного фундаменту,
- величина глибинного теплового потоку,
- регіональні області живлення і розвантаження геотермального горизонту,
- тип колектору,
- гідродинамічний режим продуктивного горизонту,
- глибина залягання і товщина продуктивного горизонту,
- пластова температура.
- водозбагаченість горизонту,
- мінералізація термальних вод.

Зауважимо, що залягання кристалічного фундаменту є важливим показником, за яким побічно можна судити про максимальні глибині залягання термоводоносних горизонтів, оскільки складається фундамент з щільних непроникних метаморфизованих порід, в яких дуже рідко і обмежено у просторі формуються водоносні горизонти. Крім того, породи фундаменту характери-

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

зуються високою теплопровідністю (коефіцієнти теплопровідності 3,5 Вт/м·ºС і більше), тому в його надрах тепло не накопичується.

Закарпатський внутрішній прогин. У межах структури встановлено 38 геотермальних об'єкта. Незважаючи на високий геотермічний фон даної території (величина глибинного теплового потоку Закарпатського внутрішнього прогину досягає 120 мВт/ м^2 (рис. 2.), середній геотермічний градієнт становить 5 ºС/100 м. [2, 3], а для деяких родовищ він дорівнює 7-8 ºС/100 м. Переважна пластова температура геотермальних об'єктів змінюється в діапазоні від 40 до 70 (рис. 4.).

Перш за все це можна пояснити невисокою глибиною буріння свердловин. Як видно з рис. 3, глибина залягання геотермальних об'єктів, які увійшли до бази даних, не перевищує 3 км і в середньому становить 1000-2000 м.

Крім того, формування термоводоносних горизонтів обмежує високе розташування кристалічного фундаменту. Так наприклад, абсолютні позначки фундаменту в межах Берегівського блоку складають всього 400 -1000 м [4].

Регіональною областю живлення глибоких водоносних горизонтів є зона Складчастих Карпат, по розломах і порушеннях яких холодні атмосферні води потрапляють у водоносні горизонти і охолоджують останні. Тому родовищ крупних термальних вод на території Складчастих Карпат не спостерігається.

Колектори у переважної більшості мають тріщино - поровий або тріщино - жильний тип з дуже нерівномірними фільтраційними властивостями як у розрізі, так і за простяганням. Водовмісні породи представлені вулканогенними утвореннями, рідше метаморфічними. Термоводоносні горизонти приурочені до зон тріщинуватості.

Як видно з рис. 5., за величиною мінералізації чітко виділяється два типи підземних вод: відносно слабко мінералізовані підземні води з мінералізацією до 50 г/л і розсоли з мінералізацією від 100 до 140 г/л. Походження розсолів найчастіше пов'язано з присутністю в розрізі відкладень кам'яної солі.

Продуктивні горизонти напірні, статичні рівні встановлюються на глибині до 20 м від поверхні землі. Не рідко спостерігається явище газліфта.

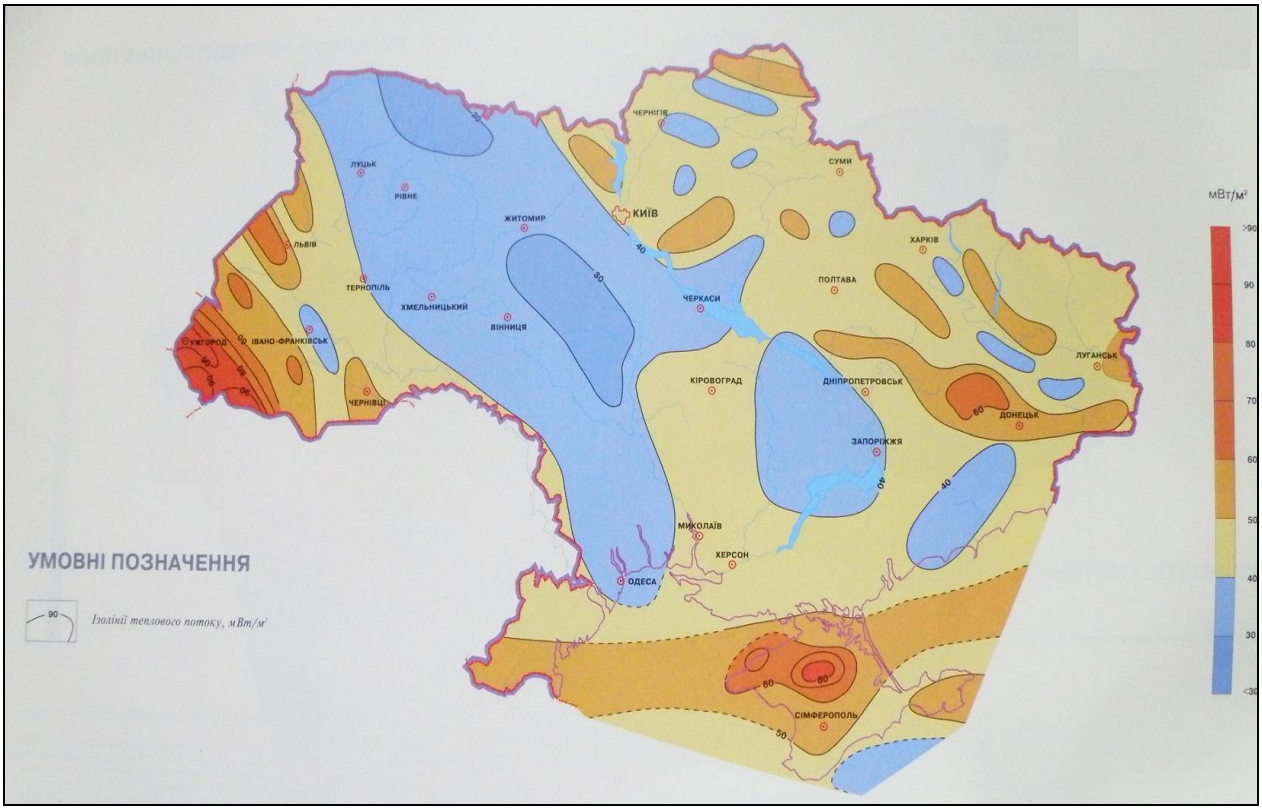


Рис. 2. Розподіл величин глибинного теплового потоку на території України, мВт/м^2, [6].

Fig. 2. Distribution of deep heat flux values on the territory of Ukraine, mW/m^2 , [6].

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

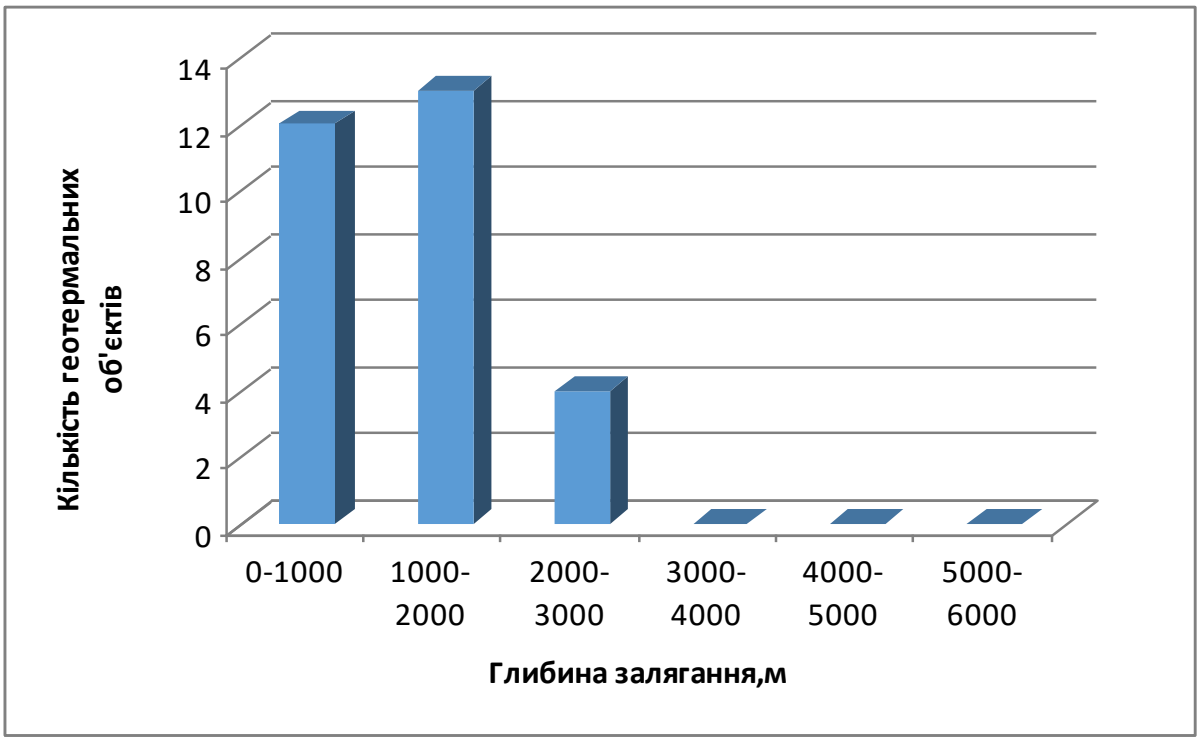


Рис. 3. Розподіл глибин залягання у геотермальних об'єктах Закарпатського внутрішнього прогину.

Fig. 3. Aquifer depth distribution in the geothermal objects of Transcarpathian region.

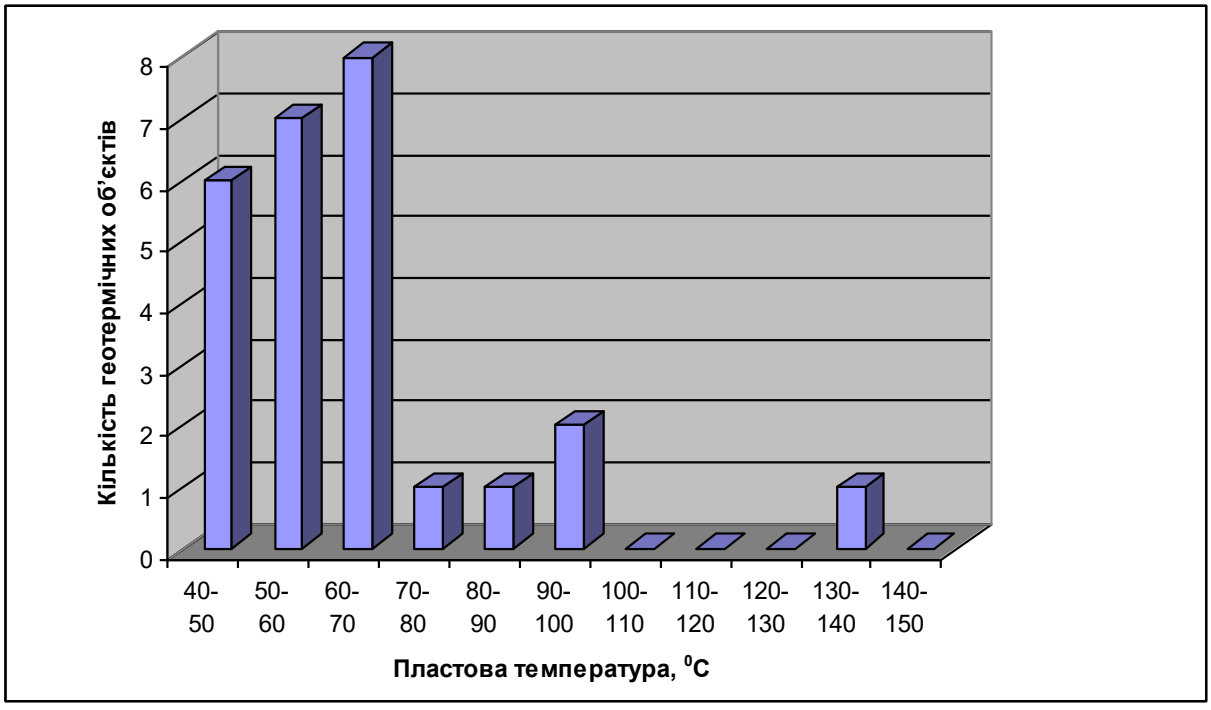


Рис. 4. Розподіл пластових температур у геотермальних об'єктах Закарпатського внутрішнього прогину.

Fig. 4. Aquifer temperature distribution in the geothermal objects of Transcarpathian region.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

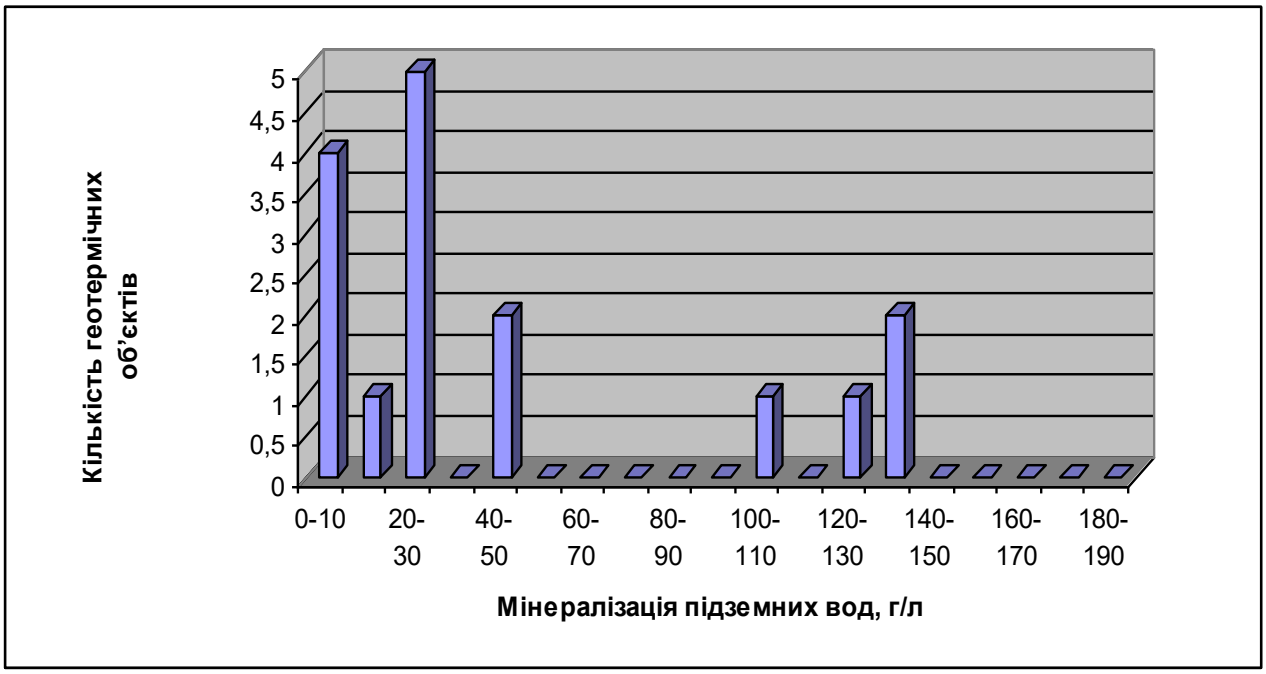


Рис. 5. Розподіл мінералізації підземних вод у геотермальних об'єктах Закарпатського внутрішнього прогину.

Fig. 4. Aquifer mineralization distribution in the geothermal objects of Transcarpathian region.

Прикарпатський передгірний прогин. На території цієї структури розташовано 129 геотермальних об'єктів Івано-Франківської області, 138 об'єктів Львівської області та 16 об'єктів Чернівецької області.

Основною областю живлення для Прикарпатського прогину за рахунок інфільтрації атмосферних опадів є південно-західний схил Волино- Подільської плити, де водоносні горизонти практично виходять на денну поверхню. Далі вони занурюються в напрямку до Карпат, збільшується потужність осадової товщі. Відповідно змінюється глибина залягання фундаменту від 1- 2 км в прибортової частині до 10 км в осьовій частині прогину.

Осадовий чохол прогину дуже структурно неоднорідний. З низу в гору у ньому виділяють три поверхи: докембрійсько-палеозойський, мезозойсько-палеогеновий і неогеновий. Перший представлений слабко метаморфізованими глинистими сланцями і кварцитовими пісковиками, другий - теригенними флішовими породами, а третій – піщано-глинистими утвореннями.

Тому геотермальні об'єкти, які представляють Прикарпатський прогин, дуже різноманітні. Найбільш представлений в базі даних третій, верхній від поверхні, структурний поверх осадового чохла, з яким пов'язано більшість геотермальних об'єктів і родовищ.

Найбільш прогрітою є внутрішня частина прогину, яка безпосередньо примикає до Складчастих Карпат. Середні геотермічні градієнти змінюються від 2,3- 3,5 ºС/100 м.

Розподіл мінералізації підземних вод в об'єктах бази даних має строкатий характер. Це вказує на дуже різноманітне походження їх хімічного складу, яке залежіть насамперед від складу водовмісних порід, глибини залягання та відкритості горизонту для водного обміну. Зауважимо, що товщина соленосної формації у внутрішній зоні Прикарпатського прогину змінюється від 2250 до 6500 м. Теригенно-карбонатна формація потужністю до 2000 - 3000 м поширена в основному в зовнішній зоні прогину. Найбільша кількість об'єктів потрапила у діапазон 90-100 г/л.

Колектора також дуже різноманітні за типом, але переважно мають порово- пластовий і тріщино - пластовий тип. Горизонти напірні, статичні рівні встановлюються на глибинах від 150 м нижче до 100 м вище гирла свердловини.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

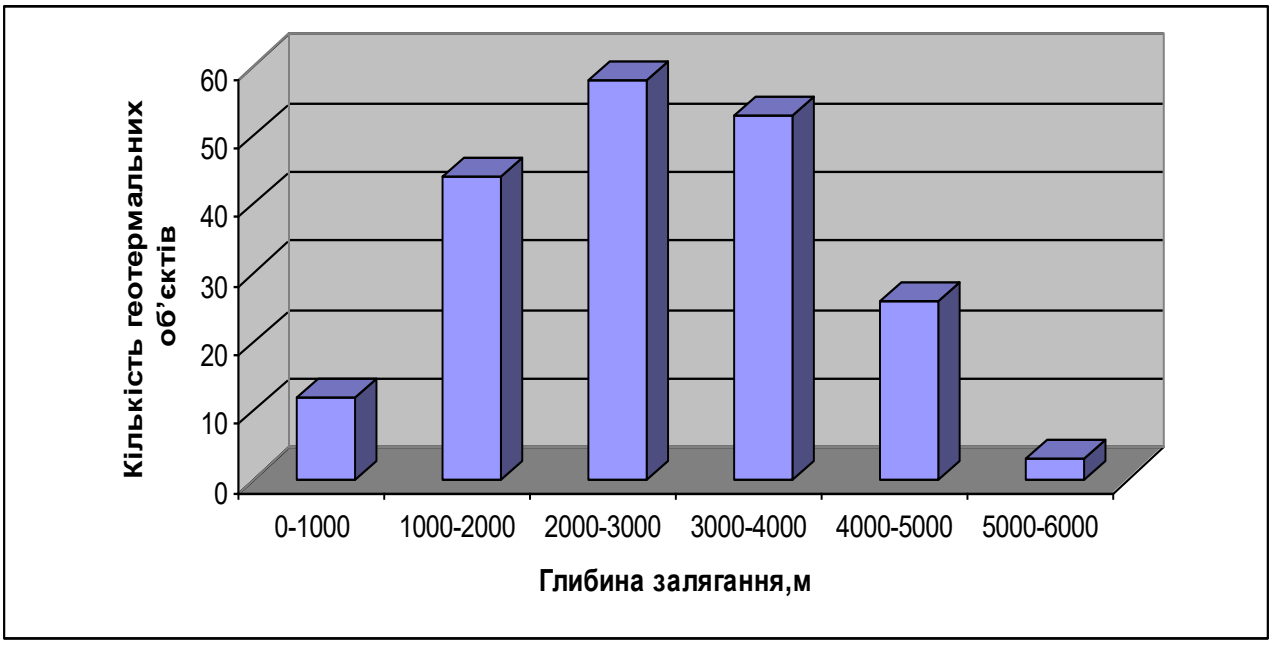


Рис. 6. Розподіл глибин залягання геотермальних об'єктів Прикарпатського прогину.

Fig. 6. Aquifer depth distributions in the geothermal objects of the Carpathian bend.

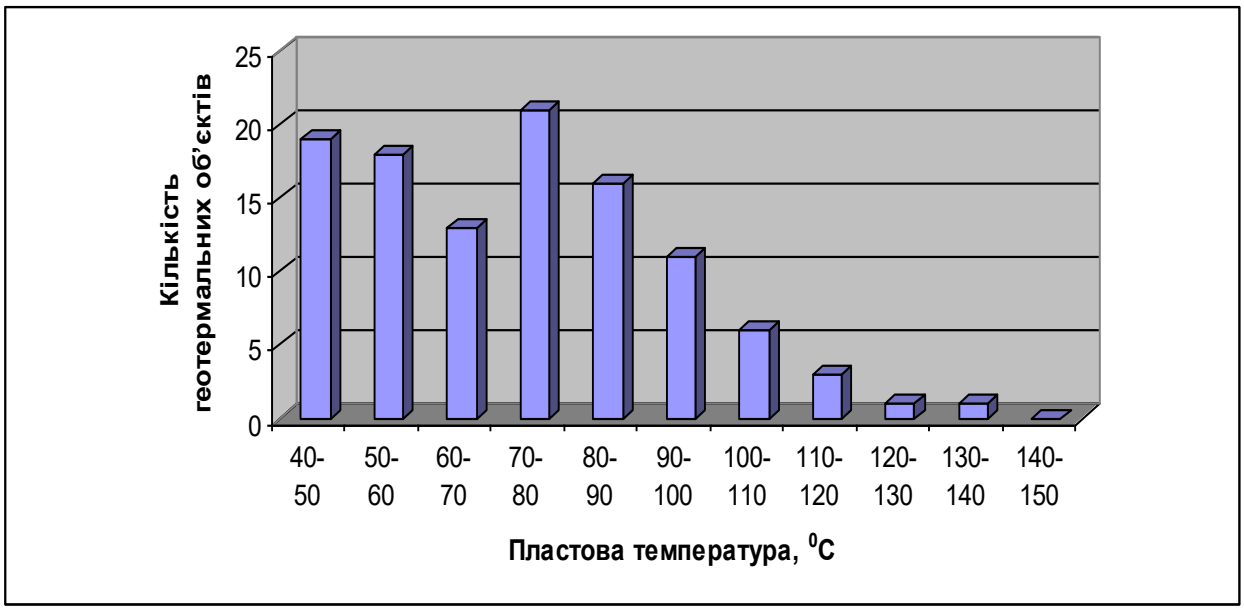


Рис. 7. Розподіл пластових температур у геотермальних об'єктах Прикарпатського прогину.

Fig. 7. Aquifer reservoir temperatures distribution in the geothermal objects of the Carpathian bend.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

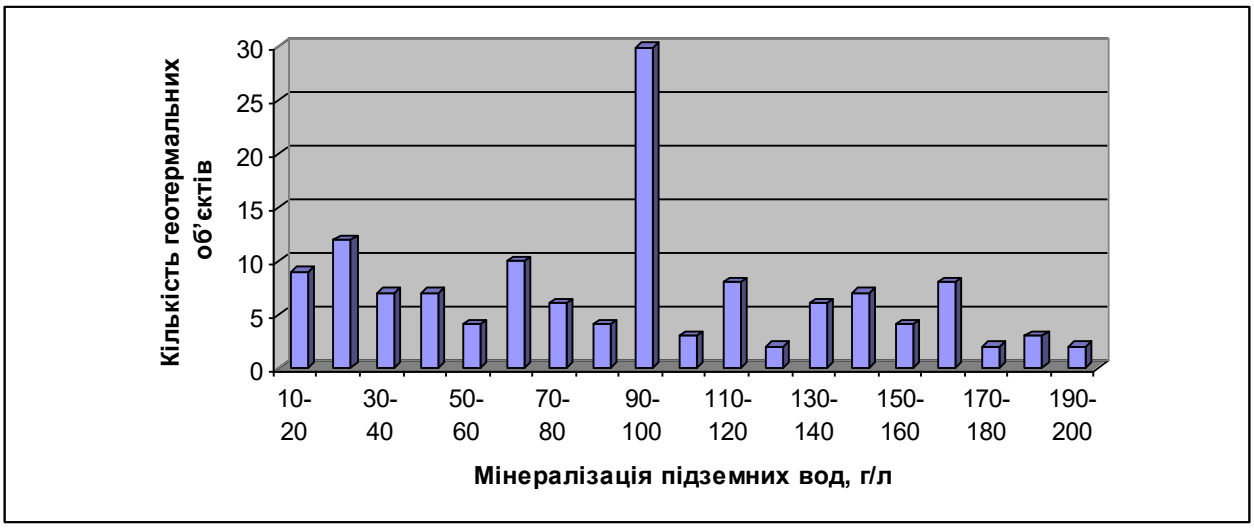


Рис. 8. Розподіл мінералізації підземних вод у геотермальних об'єктах Прикарпатського прогину.

Fig. 8. Underground mineralization distribution in the geothermal objects of the Carpathian bend.

Дніпровсько-Донецький артезіанський басейн. На території цієї структури розташовано 143 геотермальних об'єктів Полтавської області, 6 об'єктів Сумської області, 13 об'єктів Чернігівської та 58 об'єктів Харківської області.

Дніпровсько-Донецька западина є складно побудований грабен, виконаний палеозойськими і мезокайнозойськими осадовими породами загальною потужністю від 2 до 12 км. Регіональної областю живлення є схили щитів, з якими вона з'єднується з околиць.

Загальний тепловий фон її надр невисокий (до 3 ºС/100 м), однак глибоке занурювання кристалічного фундаменту і наявність потужних осадових відкладень на значній глибині з гарними фільтраційними властивостями, які чергуються з водотривкими глинистими горизонтами, створює в цілому сприятливі умови для формування родовищ термальних вод. Температура безпосередньо залежить від глибини залягання горизонту. Тому переважна глибина залягання геотермальних об'єктів змінюється від 1500 до 5000 м і вище, а пластова температура – від 60 до 110 ºС.

У центральній частині Дніпровсько-Донецької западини до глибини 5-5,5 км спостерігаються горизонти пластового типу з відносно високими колекторським властивостями, які мають широке поширення по площі.

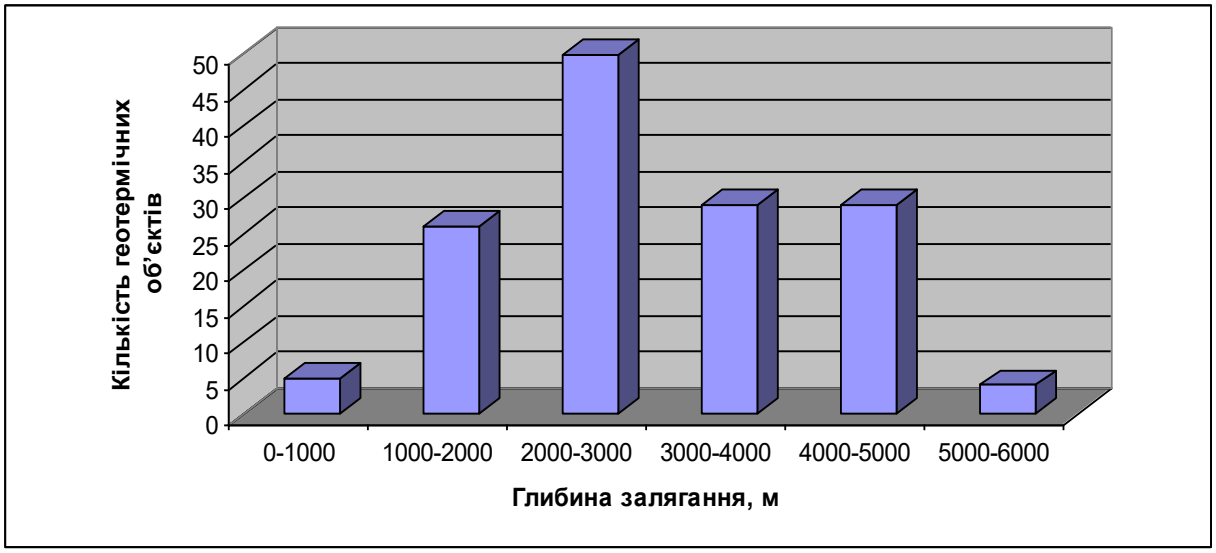


Рис. 9. Розподіл глибин залягання геотермальних об'єктів Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну.

Fig. 9. Aquifer depth distributions in geothermal the objects of the Dnieper-Donetsk artesian basin.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

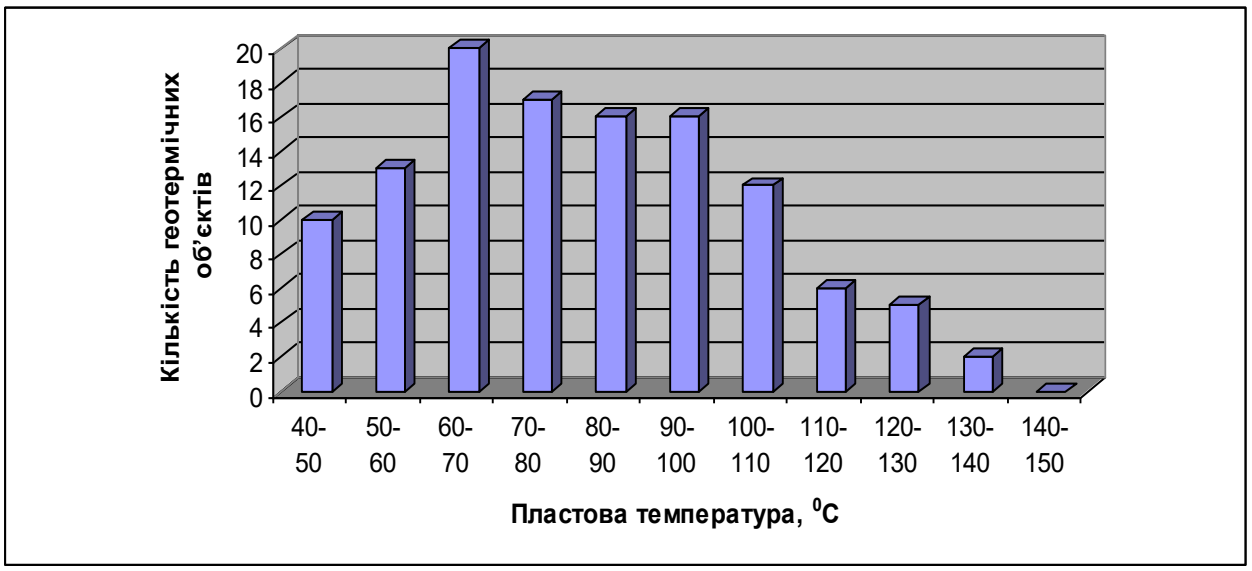


Рис. 10. Розподіл пластових температур у геотермальних об'єктах Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну.

Fig. 10. Aquifer reservoir temperatures distribution in the geothermal objects of the Dnieper-Donetsk artesian basin.

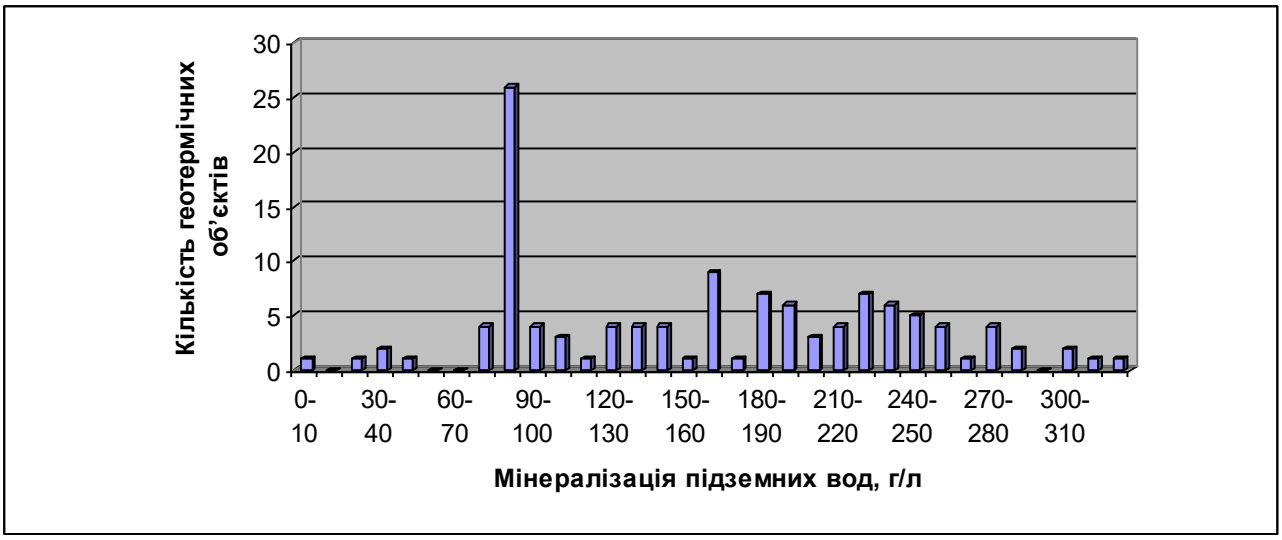


Рис. 11. Розподіл мінералізації підземних вод у геотермальних об'єктах Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну.

Fig. 11. Underground mineralization distribution in the geothermal objects of the Dnieper-Donetsk artesian basin.

Причорноморський артезіанський басейн. На території цієї структури розташовано 59 геотермальних об'єктів Херсонської області, 3 об'єкта Одеської області та 25 –АР Крим.

Основною областю живлення водоносних горизонтів є південний схил Українського кристалічного масиву. Поверхня кристалічного фундаменту нахилена з півночі на південь від Українського щита в сторону Чорного моря. В районі Одеської та Херсонської областей фундамент занурюється на глибину до 2000 м. Тому геотермальні об'єкти мають відносно невелику глибину залягання і пластові температури (рис. 10 і рис. 11). Середній геотермічний градієнт складає 2,5 ºС/100 м. Найбільш прогрітою є південна частина Херсонської області.

Основні термоводоносні горизонти приурочені до осадових утворень крейдяного, палеогенового і неогенового віку, представлені пісковиками, вапняками і аргілітами, тобто продуктивні горизонти мають переважно пластовий тип. Горизонти високо напірні, статичні рівні встановлюються на глибинах ± 50 м від гирла свердловин.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

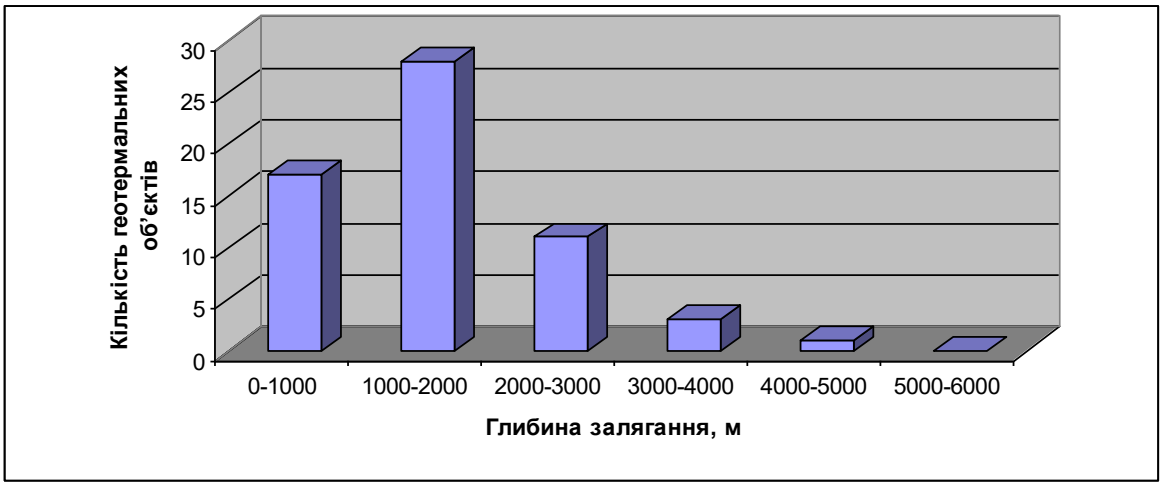


Рис. 12. Розподіл глибин залягання геотермальних об'єктів Причорноморського артезіанського басейну.

Fig. 12. Aquifer depth distributions in the geothermal objects of the Black Sea artesian basin.

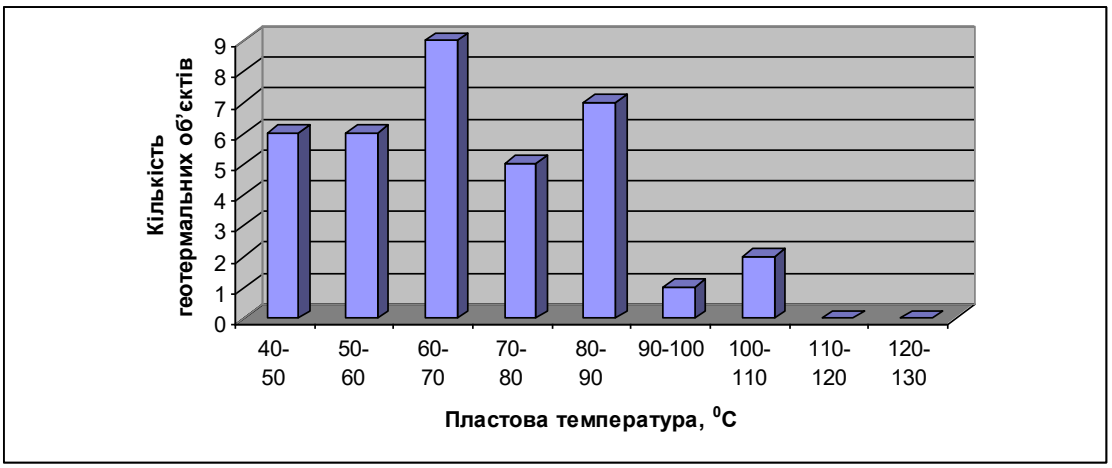


Рис. 13. Розподіл пластових температур у геотермальних об'єктах Причорноморського артезіанського басейну.

Fig. 13. Aquifer reservoir temperatures distribution in the geothermal objects of the Black Sea artesian basin.

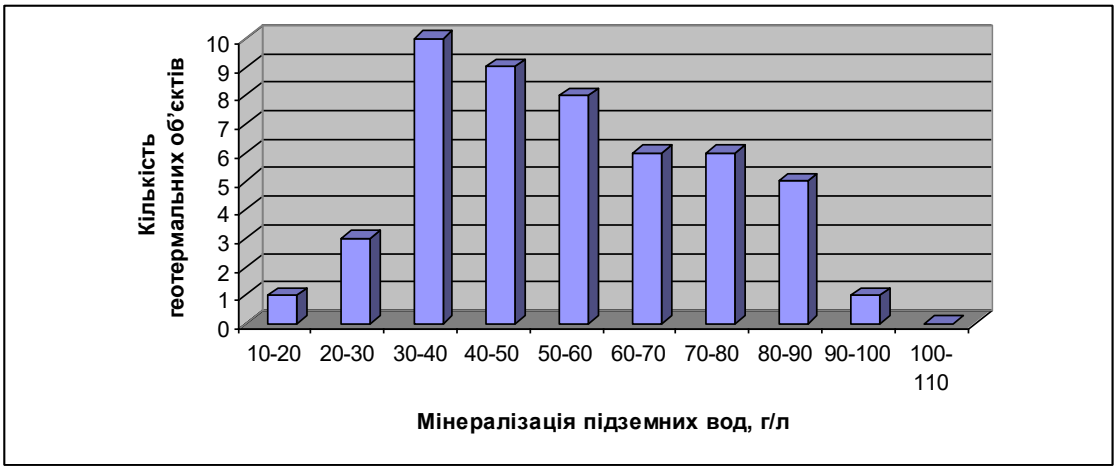


Рис. 14. Розподіл мінералізації підземних вод у геотермальних об'єктах Причорноморського артезіанського басейну.

Fig. 14. Underground mineralization distribution in the geothermal objects of the the Black Sea artesian basin.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Висновки. 1. На основі матеріалів «Державного інформаційного геологічного фонду України» створено електрону базу геотермальних об'єктів України. База даних налічує 652 геотермальних об'єкта і охоплює 54 % існуючих родовищ вуглеводнів.

2. Визначено, що до основних гідрогеологічних і геотермічних характеристик геотермального об'єкту належать: глибина залягання, літологія і склад порід, геологічний вік порід, товщина продуктивного горизонту, пластова температура і пластовий тиск, дебіт свердловини, зниження рівня води у водоносному горизонті під час випробування, мінералізація, газовий склад і вміст природного газу у підземних водах.

3. Побудовано діаграми розподілу пластових температур, глибин залягання і мінералізації підземних вод в геотермальних об'єктах бази даних

4. Аналіз геологічних і геотермічних характеристик об'єктів бази даних показав, що умови формування геотермальних родовищ в першу чергу залежать від теплового фону земних надр, але на процеси формування родовищ істотно впливає глибина залягання кристалічного фундаменту, літологічний склад порід і розташування області живлення та розвантаження термоводоносних горизонтів.

1. *Барило А.А.* Особливості класифікації геотермальних ресурсів. Відновлювана енергетика. 2009. № 3(18). С. 56-59.

2. *Барило А.А., Морозов Ю.П.* Оцінка енергетичного потенціалу окремих геотермальних родовищ України. Відновлювана енергетика. 2017. № 1(48). С. 72-79.

3. *Морозов Ю.П., Барило А.А.* Первоочередные объекты практического использования геотермальных месторождений Украины. Альтернативная энергетика и экология. Саров. 2014. № 2(142). С. 112-116.

4. *Морозов Ю.П.* Добыча геотермальных ресурсов и аккумулирование теплоты в подземных горизонтах. К. Наукова думка. 2017. 197 с.

5. *Іванюта М.М.* Атлас нафтових і газових родовищ України (в 6 т.). Львів. Вид-во «Центр Європи». 1998. Т.1-3. 1421 с., Т.4-5. 707 с., Т.6. 224 с.

6. *Галецький Л.С.* Атлас геологія і корисні копалини України. К. НАНУ. Мін. екології та природних ресурсів України. 2001. 168 с.

7. *Соболевский Э.Э.* Оценка запасов термальних вод УССР. Звіт центральної комплексної тематичної експедиції. кн. 1-3. 1979. Кн. 1. 189 с.

8. *Колодій В.В., Паньків Р.П.* Гідрогеологія нафтових і газових родовищ Карпатської нафтогазоносної провінції (в межах України). Звіт Західної НГРЕ. 2005. кн.1-5. Кн. 1. 176 с.

9. *Гордієнко В.В., Гордієнко І.В., Завгородня О.В., Усенко О.В.* Теплове поле території України. К. Знання України. 2002. 168 с.

10. *Гордієнко В.В., Гордієнко І.В., Завгородня О.В. та інш.* Геотермический атлас Украины. К. ІГФ НАНУ. 2004. 59 с.

REFERENCES

1. *Barylo A.A.* Osoblyvosti klasyfikatsii heotermalnykh resursiv. [Features of classification of geothermal resources]. Vidnovluvana energetika. 2009. No. 3(18). Pp. 56-59. [in Ukrainian].

2. *Barylo A.A., Morozov Yu.P.* Otsinka enerhetychnoho potentsialu okremykh heotermalnykh rodovyshch Ukrainy. [Assessment of energy potential of individual geothermal deposits in Ukraine]. Vidnovluvana energetika. 2017. No. 1(48). Pp. 72-79. [in Ukrainian].

3. *Morozov Yu.P., Barilo A.A.* Pervoocherednyie obektyi prakticheskogo ispolzovaniya geotermalnyih mestorozhdeniy Ukrainyi. [Priority objects of practical use of geothermal deposits of Ukraine]. Alternativnaya energetika i ekologiya. Sarov. 2014. No. 2. Pp. 112-116. [in Russian].

4. *Morozov Yu.P.* Dobyicha geotermalnyih resursov i akkumulirovanie teplotyi v podzemnyih gorizontah. [Geothermal mining and heat storage in underground horizons]. Naukova Dumka. Kyiv. 2017. 197 p. [in Russian].

5. *Ivaniuta M.M.* Atlas naftovykh i hazovykh rodovyshch Ukrainy (v 6 t.). [Atlas of Oil and Gas Deposits of Ukraine (6 v.)]. Tsentr Yevropy. Lviv. 1998. Vol. 1-3. 1421 p. Vol. 4-5. 707 p. Vol. 6. 224 p. [in Ukrainian].

6. *Haletskyi L.S.* Atlas heolohiia i korysni kopalyny Ukrainy. [Atlas Geology and Minerals of Ukraine]. Minysterstvo ekolohii ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. Kyiv. 2001. 168 p. [in Ukrainian].

7. *Sobolevskyi Ye.Ye.* Otsenka zapasov termalnykh vod USSR. [Estimation of thermal water reserves of the USSR].Report of the Central Comprehensive Thematic Expedition. book 1-3. 1979. book 1. 189 p. [in Russian].

8. *Kolodii V.V., Pankiv R.P.* Hidroheolohiia naftovykh i hazovykh rodovyshch Karpatskoi naftohazonosnoi provintsii (v mezhakh Ukrainy). [Hydrogeology of oil and gas fields of Carpathian oil and gas province (within Ukraine)]. Zvit Zakhidnoi NHRE [Western Oil and Gas Expedition Report]. book 1-5. 2005. book 1. 176 p. [in Ukrainian].

9. *Hordiienko V.V., Hordiienko I.V., Zavhorodnia O.V., Usenko O.V.* Teplove pole terytorii Ukrainy. [Thermal field of the territory of Ukraine]. Znannia Ukrainy. K. 2002. 168 p. [in Ukrainian].

10. *Hordiienko V.V., Hordiienko I.V., Zavhorodnia O.V. and others* Geotermicheskiy atlas Ukrainyi. [Geothermal Atlas of Ukraine]. K. IHF NANU. [Institute of Geophysics]. 2004. 59 p. [in Russian].

АНАЛИЗ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОТЕРМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ УКРАИНЫ

А.А. Барило

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

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

На основе материалов «Государственного информационного геологического фонда Украины» создана база данных геотермальных объектов, в которую вошло 652 объекта, которые охватывают 12 административных областей Украины и около 54 % существующих месторождений углеводородов. Основными геотермическими и гидрогеологическими характеристиками объектов базы данных являются: глубина залегания, литология и состав пород, геологический возраст пород, толщина продуктивного горизонта, пластовая температура и пластовое давление, дебит скважины, понижение уровня воды в водоносном горизонте при испытании, минерализация, газовый состав и содержание природного газа в подземных водах.

Анализ гидрогеологических и геотермических характеристик геотермальных объектов выполнен на основе структурно-гидрогеологического принципа, то есть все объекты рассматривались относительно крупных гидрогеологических структур с едиными границами и условиями формирования месторождений подземных вод, а именно: Закарпатский внутренний прогиб, Прикарпатский предгорный прогиб, Днепровско-Донецкий артезианский бассейн и Причерноморский артезианский бассейн. Для каждой структуры построены диаграммы распределения пластовых температур, глубин залегания и минерализации подземных вод в геотермальных объектах базы данных.

Анализ показал, что условия формирования геотермальных месторождений в первую очередь зависят от теплового фона земных недр, но на процессы формирования месторождений очень существенное влияние оказывают: глубина залегания кристаллического фундамента, расположение областей питания и разгрузки термоводоносных горизонтов, глубина современного водообмена, литологический состав водовмещающих пород.

База данных геотермальных объектов Украины может быть использована при выборе первоочередных для освоения геотермальных объектов, а также для стратегического планирования геотермальной отрасли в целом. Библ. 10, рис. 14.

Ключевые слова: *геотермальный объект, электронная база данных, геотермическая характеристика, гидрогеологическая характеристика, диаграмма распределения*

Стаття надійшла до редакції 15.02.20
Остаточна версія 16.03.20



ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

УДК 532.529: 517.4 DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).86-95

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ВОЗДУШНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Б.Б. Рохман, докт. техн. наук, **М.М. Нехамин**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

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

На основе системы уравнений, описывающей процесс конверсии угля в парокислородной смеси, построена нестационарная модель воздушной газификации твердого топлива в фиксированном слое с учетом межфазного конвективного теплообмена, радиационно-кондуктивного теплопереноса твердой фазы, лучистого и кондуктивного теплообмена слоя со стенкой реактора, гетерогенных химических реакций, сил тяжести и аэродинамического сопротивлении. Предложенная модель позволяет получить детальную информацию о геометрических, аэродинамических, тепловых и физико-химических параметрах воздушной газификации твердого топлива в неподвижном слое при различных давлениях в любой момент времени. Эта информация может быть использована при конструировании реакторов на стадиях эскизного, технического и рабочего проектирования, пуско-наладочных режимах и работе газогенератора на скользящих нагрузках, когда процесс воздушной газификации угля является нестационарным. Показано, что: а) основной процесс газификации коксозольных частиц протекает на малом участке фиксированного слоя 91 мм, что приводит к понижению температуры твердой фазы на 160 °С и концентрация $CO_2 \rightarrow 0$, вследствие чего оставшаяся часть интервала газификации ~ 185 мм является малоэффективной; б) участок окислительной зоны, где температура коксозольных частиц достигает максимального значения, очень узок и составляет ~ 34–41 мм; в) во временном интервале 1951–4052 с, где происходит интенсивное перемещение границ зон окисления и газификации по высоте слоя, состав синтетического газа (по объему) на выходе из реактора остается практически постоянным: CO = 34,32 % и N_2 = 65,66 %. Библ. 8, рис. 6.

Ключевые слова: *неподвижный слой, уголь, теплопроводность, воздушная газификация, кондуктивный, радиационный, температура.*

THEORETICAL STUDY OF NONSTATIONARY AIR GASIFICATION OF SOLID FUEL IN A FIXED BED AT ATMOSPHERIC PRESSURE

B.B. Rokhman, doctor of technical sciences, **M.M. Nekhamin,** candidate of technical sciences, senior researcher

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

Based on the system of equations describing the process of coal conversion in the steam-oxygen mixture, a non-stationary model of air gasification of solid fuel in a fixed bed was constructed with allowance of 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 chemical reactions, gravity and aerodynamic force. The proposed model provides detailed information on the geometric, aerodynamic, thermal, and physicochemical parameters of air gasification of solid fuel in a fixed bed at different pressures at any time. This data can be used in the draft, technical and detailed reactors designing, commissioning and operation of the gas generator on sliding loads, when the process of air coal gasification is non-stationary. It has been shown that: a) the main gasification process of coke-ash particles occurs in a small area of a fixed bed of 91 mm, which leads to a decrease in the temperature of the solid phase by 160 °C and a concentration of $CO_2 \rightarrow 0$, as a result of which the remaining part of the gasification interval of ~ 185 mm is ineffective; b) the section of the oxidation zone, where the temperature of the coke-ash particles reaches its maximum value, is very narrow ~ 34–41 mm; c) in the time interval of 1951–4052 s, where intensive displacement of the boundaries of the oxidation and gasification zones along the bed height occurs, the composition of the synthetic gas (by volume) at the reactor exit remains almost constant: CO = 34,32% and N_2 = 65,66 %. Ref. 8, fig. 6.

Keywords*: fixed bed, coal, thermal conductivity, air gasification, conductive, radiation, temperature.*

© Б.Б. Рохман, 2020

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)



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 аэро-динамики, тепломассообмена и химического реагирования поли-дисперсного 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: tel.: +38-044-425-53-77
e-mail: Brolene@yahoo.com



М.М. Нехамин
M. Nekhamin

Сведения об авторе: старший научный сотрудник Института угольных энерготехнологий НАН Украины, кандидат технических наук.
Образование: 28 мая 1965 г. окончил Харьковский авиационный институт, а 01.11.1970 – аспирантуру Института электродинамики НАН Украины. Работал в институтах Академии Наук Украины в должностях младшего научного сотрудника, старшего инженера, руководителя группы, старшего научного сотрудника. 21 апреля 1982 г. защитил диссертацию кандидата технических наук.
Научная сфера: численное моделирование процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках.
Публикации: более 70 научных работ.
ORCID: 0000-0003-3679-321X
Контакты: тел.: +38-044-295-40-57
e-mail: nmark@i.ua

Author information: senior staff scientist of Institute of Coal Energy Technologies of NAS of Ukraine, candidate of technical sciences.
Education: Finished the Kharkov aviation institute on May, 28 1965 and post-graduate course of Institute of electrodynamics of NAS of Ukraine on 01.11.1970. Worked in the institutes of Academy of Sciences of Ukraine in positions of junior scientist, senior engineer, leader of group, senior staff scientist. Protected dissertation of candidate of engineering sciences on April, 21 1982.
Research area: numeral modeling of processes of aerodynamics, heat and mass transfer in power plants.
Publications: more than 70 scientific papers.
ORCID: 0000-0003-3679-321X
Contacts: tel.: +38-044-295-40-57
e-mail: nmark@i.ua

Перечень используемых обозначений и сокращений:

- a – степень черноты частицы;
- B – расход, кг/ч;
- C – концентрации газовых компонентов, кмоль/м^3;
- c – теплоемкость, кДж/(кг·К);
- D – коэффициент диффузии, м^2/с;
- H – высота (м) или массовая доля водорода;
- h – коэффициент конвективного теплообмена, 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);
- 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) или лучистого теплообмена, (кДж/(с·м^2·К));
- δ – диаметр частицы, м;
- ε – порозность слоя;
- λ – коэффициент теплопроводности, кДж/(с·м·К);
- η – кинематическая вязкость газа, м^2/с;
- μ – молекулярная масса, кг/кмоль;
- ρ – плотность, кг/м^3;
- τ – время, с;
- Φ – параметр модели теплопроводности зернистого слоя.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Индексы нижние:

ash	− зола;
air	– воздух;
bed	− слой;
C	− углерод;
CO, CO_2, H_2O, N_2, O_2	− окись и двуокись углерода, водяной пар, азот, кислород;
C + O_2, C + 0,5O_2, C + CO_2	− гетерогенные реакции;
CO + O_2	− гомогенная реакция;
conv	− конвективный теплообмен;

Индексы верхние:

cond	− кондуктивный теплообмен;
w	− поверхность;
CO_2→см, O_2→см, CO→см	− диффузия углекислого газа, кислорода, окиси углерода в газовую смесь;
D	− диффузия;
g	− газ;
max	− максимальное значение;
p	− частица;
p→w	− передача тепла от частиц к стенке;
эф	− эффективный;
0	− начальные условия.
rad	− лучистый теплообмен.

Введение. В работах [1, 2] построена двумерная модель и проведены численные исследования нестационарного процесса парокислородной газификации дробленных частиц шубаркольского каменного длиннопламенного угля под давлением 3 Мпа в неподвижном слое при различных соотношениях массовых долей компонентов парокислородной смеси: H_2O/O_2 = 45/55, H_2O/O_2 = 40/60 и H_2O/O_2 = 72/28.

В настоящей работе рассматривается случай воздушной газификации частиц каменного угля в неподвижном слое при атмосферном давлении. Предполагается, что все летучие вещества выделяются в пиролизере, расположенном вне слоя, а в слое происходит термохимическая переработка коксозольного остатка. Для описания слоевого процесса была разработана нестационарная модель, базирующаяся на теоретических представлениях, изложенных в [1].

В отличие от стационарного процесса, где распределение параметров по высоте слоя не зависит от времени, здесь рассматривается случай невозобновляемой загрузки коксозольных частиц, вследствие чего процесс газификации становится неустановившимся и характеризуется изменяющимися во времени полями температур и концентраций двухфазной среды в слое.

В соответствии с изменениями, претерпеваемыми топливом в процессе термохимической переработки, неподвижный слой коксозольных частиц можно условно разделить на три зоны (рис. 1). Первая из них (поз. *2*), примыкающая к колосниковой решетке, формируется из частиц золы и шлака, образующихся в результате горения и газификации твердого топлива, и предназначена для защиты колосников от перегрева. Над шлаковой подушкой располагается окислительная зона (поз. *3*), где практически весь кислород на очень небольшом участке слоя расходуется на конверсию углерода согласно реакциям, C+O_2=CO_2 и C+0,5O_2=CO. Этот диапазон характеризуется максимальным уровнем температур из-за высоких значений тепловыделения гетерогенных реакций. В восстановительной зоне поз. *4* углекислый газ взаимодействует с углеродом по эндотермической реакции C+CO_2=2CO, что приводит к уменьшению температуры коксозольных частиц. По этой причине, с учетом высоких значений энергии активации скорость реакции C+CO_2 =2CO уменьшается, благодаря чему протяженность указанной области возрастает и становится значительно большей по сравнению с окислительной зоной.

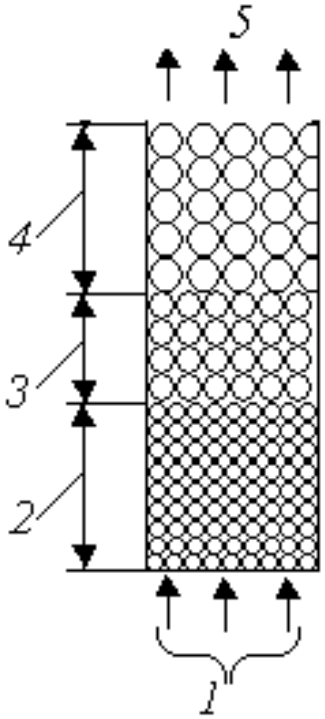


Рис. 1. Схема воздушной газификации твердого топлива в неподвижном слое: *1* – горячий воздух; *2* – шлаковая подушка; *3* – зона окисления; *4* – зона газификации; *5* –выход синтетического газа.

Fig. 1. Scheme of air gasification of solid fuel in a fixed bed: *1* – hot air; *2* – slag pad; *3* – oxidation zone; *4* – gasification zone; *5* – syngas outlet.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

Постановка задачи. Предлагаемая модель основана на следующих допущениях: 1) процесс нестационарный; 2) газовая смесь в реакторе состоит из кислорода, диоксида и оксида углерода, азота; 3) дисперсная фаза включает монодисперсные частицы сферической формы; 4) выход летучих происходит вне слоя; 5) гетерогенные реакции горения и газификации протекают на поверхности коксозольных частиц, что приводит к уменьшению их размера; 6) усадка неподвижного слоя за счет термохими-ческой переработки твердого топлива не учиты-вается; 7) газ движется в режиме идеального вытеснения; 8) стехиометрическая схема реакций включает в себя три гетерогенные реакции:$C+O_2 = CO_2$, $C+0{,}5O_2 = CO$ и $C+CO_2 = 2CO$; 9) гомогенная реакция $CO + 0{,}5O_2 = CO_2$ не учитывается, так как ее скорость $r_{CO+O_2} = 2{,}239\cdot10^{12} C_{CO} C_{H_2O}^{0,5} C_{O_2}^{0,25} \cdot \exp\left[-167{,}4\cdot10^3 / \left(L_g T_g\right)\right]$ равна нулю [3-6] из-за отсутствия в газе водяного пара температура жидкоплавкого состояния золы каменного угля t_3 = 1500–1570 °С (экибастузкий разрез).

Слой прогревается высокотемпературной смесью дымовых газов и воздуха до температуры воспламенения частиц, расположенных в узкой области, примыкающей к решетке. Далее происходит отключение теплоносителя и подача вместо него горячего дутья с температурой t_{air} = 350 °С. За начало отсчета τ = 0 выбрано время воспламенения твердой фазы.

Основные уравнения. Система уравнений, описывающая процесс воздушной газификации коксозольных частиц в плотном слое может быть представлена в следующем виде.

Уравнение неразрывности для кислорода

$$\frac{\partial C_{O_2}}{\partial \tau} + \frac{\partial (u_g C_{O_2})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D_{O_2 \to см} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial z} \right] - \frac{6(k_{C+O_2} + k_{C+0.5O_2}) C_{O_2}^w (1-\varepsilon)}{\delta}. \quad (1)$$

Уравнение неразрывности для диоксида углерода

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial \tau} + \frac{\partial (u_g C_{CO_2})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D_{CO_2 \to см} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial z} \right] + \frac{6(k_{C+O_2} C_{O_2}^w - k_{C+CO_2} C_{CO_2}^w)(1-\varepsilon)}{\delta}. \quad (2)$$

Уравнение неразрывности для окиси углерода

$$\frac{\partial C_{CO}}{\partial \tau} + \frac{\partial (u_g C_{CO})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D_{CO \to см} \frac{\partial C_{CO}}{\partial z} \right] + \frac{12(k_{C+0.5O_2} C_{O_2}^w + k_{C+CO_2} C_{CO_2}^w)(1-\varepsilon)}{\delta}. \quad (3)$$

Уравнение изменения диаметра коксозольных частиц

$$\frac{d\delta}{d\tau} = -\left[(k_{C+O_2} + 2k_{C+0.5O_2}) C_{O_2}^w + k_{C+CO_2} C_{CO_2}^w\right] \frac{2\mu_C}{\rho_p}. \quad (4)$$

Уравнение сохранения количества движения газовой фазы

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

$$- \frac{1{,}75\rho_g (1-\varepsilon) u_g^2}{\delta \varepsilon^3}. \quad (5)$$

Уравнение теплового баланса коксозольных частиц

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

$$\rho_{\text{p}}(1-\varepsilon)\frac{\partial c_{\text{p}}t_{\text{p}}}{\partial\tau}=\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda_{\text{эф}}\frac{\partial t_{\text{p}}}{\partial z}\right]+\left[(k_{\text{C+O}_2}Q_{\text{C+O}_2}+k_{\text{C+0,5O}_2}Q_{\text{C+0,5O}_2})C^{\text{w}}_{\text{O}_2}-k_{\text{C+CO}_2}C^{\text{w}}_{\text{CO}_2}Q_{\text{C+CO}_2}-\right.$$

$$\left.-h_{\text{conv}}(t_{\text{p}}-t_{\text{g}})\right]\frac{6(1-\varepsilon)}{\delta}-Q^{\text{rad}}_{\text{p}\to\text{w}}-Q^{\text{cond}}_{\text{p}\to\text{w}}. \qquad (6)$$

Уравнение сохранения энергии несущей среды

$$\frac{\partial\rho_{\text{g}}c_{\text{g}}t_{\text{g}}}{\partial\tau}+\frac{\partial(\rho_{\text{g}}u_{\text{g}}c_{\text{g}}t_{\text{g}})}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda_{\text{g,эф}}\frac{\partial t_{\text{g}}}{\partial z}\right]+h_{\text{conv}}(t_{\text{p}}-t_{\text{g}})\frac{6(1-\varepsilon)}{\delta}, \qquad (7)$$

где эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ находится по формуле [7]

$$\frac{\lambda_{\text{эф}}}{\lambda_{\text{g}}}=\varepsilon\left(1+\frac{\alpha_{\text{rad,g}}\delta}{\lambda_{\text{g}}}\right)+\frac{1-\varepsilon}{\dfrac{1}{1/\Phi+\dfrac{\alpha_{\text{rad,p}}\delta}{\lambda_{\text{g}}}}+\dfrac{2\lambda_{\text{g}}}{3\lambda_{\text{p}}}}, \qquad (8)$$

коэффициент теплоотдачи излучением от частицы через газ мимо соседних зерен определяется согласно выражению [7]

$$\alpha_{\text{rad,g}}=0{,}227\cdot10^{-9}\left[\frac{1}{1+\varepsilon(1-a_{\text{p}})/(2a_{\text{p}}(1-\varepsilon))}\right](t_{\text{p}}+273)^3, \qquad (9)$$

коэффициент теплоотдачи излучением между соседними частицами [7] –

$$\alpha_{\text{rad,p}}=0{,}227\cdot10^{-9}\frac{a_{\text{p}}(t_{\text{p}}+273)^3}{2-a_{\text{p}}}, \qquad (10)$$

Концентрации газовых компонентов на поверхности частицы и коэффициенты массообмена находятся как [8]

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

$$C^{\text{w}}_{\text{CO}}=\frac{\alpha_{\text{D,CO}}C_{\text{CO}}+2(k_{\text{C+0,5O}_2}C^{\text{w}}_{\text{O}_2}+k_{\text{C+CO}_2}C^{\text{w}}_{\text{CO}_2})}{\alpha_{\text{D,CO}}},\ \alpha_{\text{D,O}_2}=\frac{D_{\text{O}_2\to\text{см}}\,\text{Nu}}{\delta}, \qquad (11)$$

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

Граничные условия на входе в слой ($z = 0$) для уравнений (1)–(3) и (5)–(7) находятся из выражений:

$$\frac{\partial t_{\text{p}}}{\partial z}=C_{\text{CO}_2}=C_{\text{CO}}=0,\ C_{\text{O}_2}=C_{\text{O}_2 0},\ u_{\text{g}}=u_{\text{g0}},\ t_{\text{g}}=t_{\text{g0}}, \qquad (12)$$

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

на выходе из слоя ($z = H_{bed}$) –

$$\frac{\partial t_g}{\partial z} = \frac{\partial C_{O_2}}{\partial z} = \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial z} = \frac{\partial C_{CO}}{\partial z} = \frac{\partial u_g}{\partial z} = 0,\ t_p = t_{p0} = 700\ °C. \quad (13)$$

Результаты численных расчетов. Обсудим результаты расчета процесса воздушной газификации при атмосферном давлении дробленных коксозольных частиц каменного угля с зольностью 30 % диаметром δ_0 = 9 мм и плотностью ρ_p = 1350 кг/м^3 ($B_{N_2 0}$ = 145 кг/ч, $B_{O_2 0}$ = 43,3 кг/ч и t_{air} = 350 °С) в реакторе с неподвижным слоем порозностью ε = 0,4, высотой 0,415 м и сечением слоя 0,1256 м^2.

В кислородной зоне 0,105 м < z < 0,139 м (τ = 1951 с) наблюдается интенсивная конверсия коксозольных частиц в воздухе за счет окислительных и восстановительных гетерогенных реакций. Здесь тепловыделение экзотермических реакций $C+O_2 = CO_2$ и $C+0{,}5O_2 = CO$ превалирует над теплопогло-щением эндотермической реакции $C+CO_2 = 2CO$, вследствие чего температура частиц t_p возрастает с 350 °С до максимального значения 1509,5 °С, концентрация C_{O_2} падает с 0,00419 кмоль/м^3 до 0,000676 кмоль/м^3, содержание компонентов CO_2 и CO повышается и достигает следующих значений: $C_{CO_2,max}$ = 0,000225 кмоль/м^3 и C_{CO} = 0,00163 кмоль/м^3 (рис. 2–4, кривые *2*).

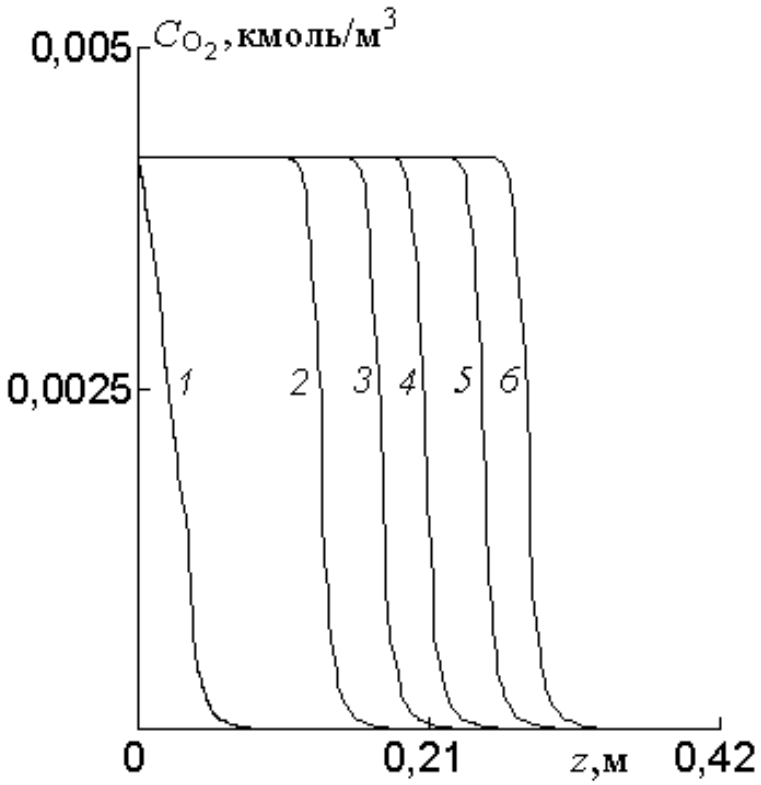


Рис. 2. Распределение концентрации кислорода по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени:
1 – 600 с; *2* – 1951 с; *3* – 2551 с; *4* – 3002 с; *5* – 3602 с; *6* – 4052 с.

Fig. 2. Oxygen concentration distribution over the height of the fixed bed depending on time:
1 – 600 s; *2* – 1951 s; *3* – 2551 s; *4* – 3002 s; *5* – 3602 s; *6* – 4052 s.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

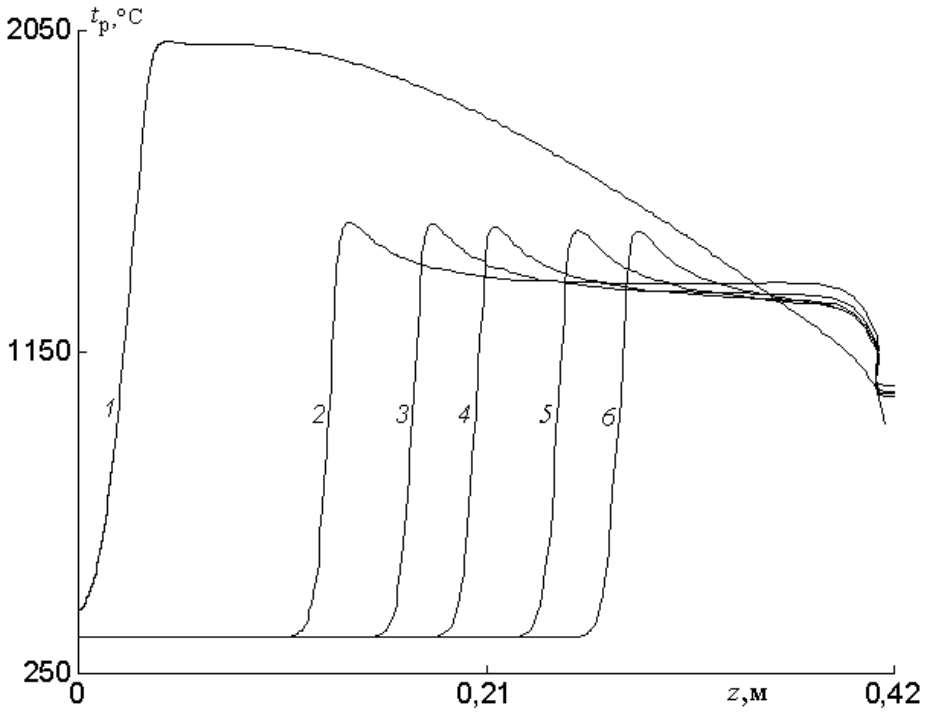


Рис. 3. Распределение температуры частиц по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 3. Particle temperature distribution over the height of the fixed bed as a function of time (notations are the same as in Fig. 2).

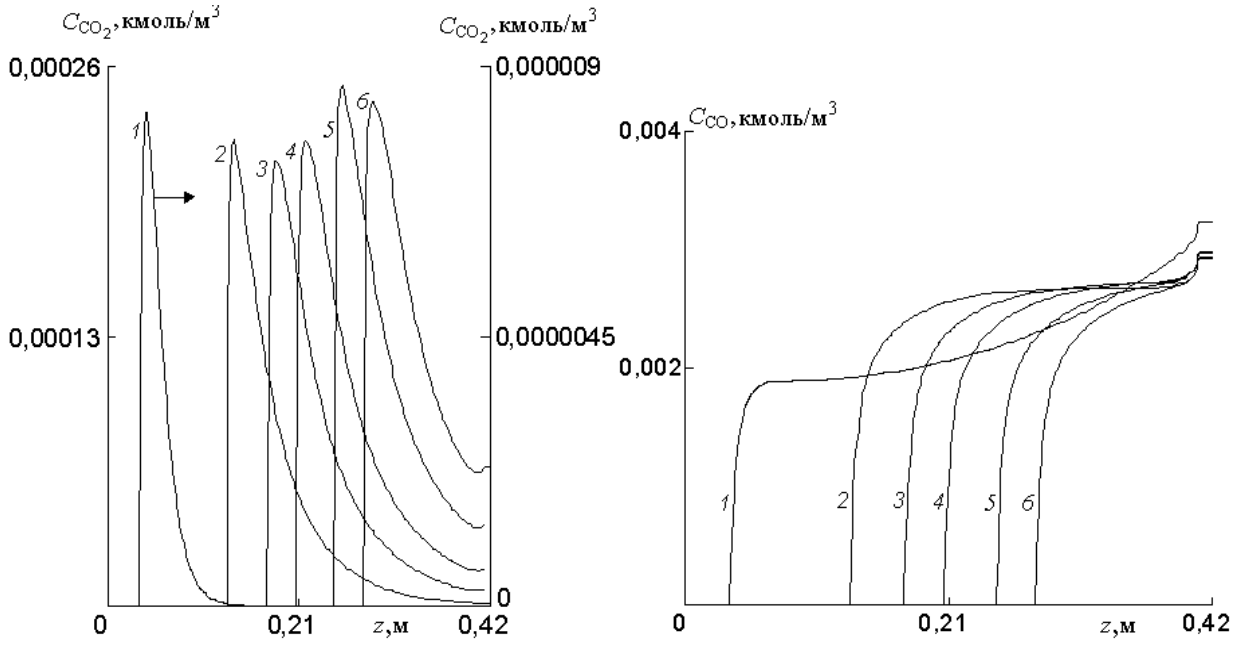


Рис. 4. Распределение концентраций компонентов газа CO_2 и CO по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 4. CO_2 and CO concentrations distribution over the height of the fixed bed depending on time (notations are the same as in Fig. 2).

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

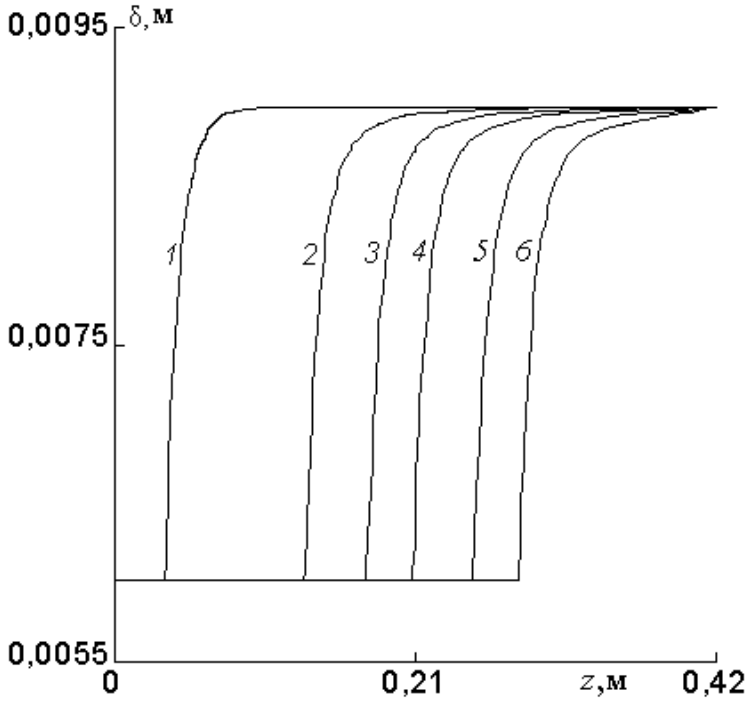


Рис. 5. Распределение диаметра частиц по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 5. Particle diameter distribution over the height of the fixed bed depending on time (notations are the same as in Fig. 2).

В этом интервале происходит резкое убывание функции $\delta(\tau,z)$ из-за конверсии коксозольных частиц за счет гетерогенных реакций, благодаря чему диаметр дискретной фазы уменьшается с δ = 7,34 мм до минимального размера частиц δ_{ash} = 6,02 мм, состоящих из золы (рис. 5, кривая *2*). Полученный таким образом инертный материал формирует шлаковую подушку поз. *2* (рис. 1), которая защищает колосники от перегрева.

В окислительно-восстановительной области реагирования 0,139 м < z < 0,156 м, где происходит интенсивный отвод тепла от дробленки за счет конвективного межфазного теплообмена и концентрация C_{O_2} стремительно убывает до минимального значения, теплопоглощение эндотермической реакции превосходит тепловыделение экзотермических реакций, в результате значения t_p и C_{CO_2} снижаются до 1445 °С и 0,000169 кмоль/м^3, величина C_{CO} возрастает до 0,002174 кмоль/м^3, а диаметр частиц уменьшается с 8,54 мм до 7,34 мм.

Бескислородную восстановительную зону 0,156 м < z < 0,415 м можно условно разделить на три характерных диапазона. В первом из них 0,156 м < z < 0,23 м величина C_{CO_2} убывает до минимального значения из-за протекания гетерогенной эндотермической реакции, благодаря чему концентрация C_{CO} повышается до 0,0026 кмоль/м^3, температура t_p снижается до 1350 °С, а диаметр частиц δ уменьшается с 9 мм до 8,54 мм. На втором участке 0,23 м < z < 0,39 м, где скорость реакции $C+CO_2=2CO$ близка к нулю, параметры рабочего процесса практически не изменяются. В третьем диапазоне 0,39 < z < 0,415 м величина t_p уменьшается из-за влияния граничного условия (см. (13)), что приводит к возрастанию зависимости $C_{CO}(\tau, z)$.

Конвективный теплообмен между твердой и газовой фазами обеспечивает резкое возрастание функции $t_g(\tau, z)$ с 350 °С до максимального значения 1407,3 °С (рис. 6, кривая *2*).

С течением времени высота шлаковой подушки повышается ($\Delta z_{ash}(\tau$ = 600 с) = 35,3 мм, $\Delta z_{ash}(\tau$ = 4052 с) = 283 мм), вследствие чего зоны окисления и газификации смещаются вверх по вертикальной оси z (рис. 2–6, ср. кривые *1* и *6*). При этом в интервале 1951 с < τ < 4052 с состав генераторного газа на выходе из реактора изменяется незначительно: R_{CO} = 34,32 %, R_{N_2} = 65,66 % (рис. 4, ср. кривые *2* и *6*).

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

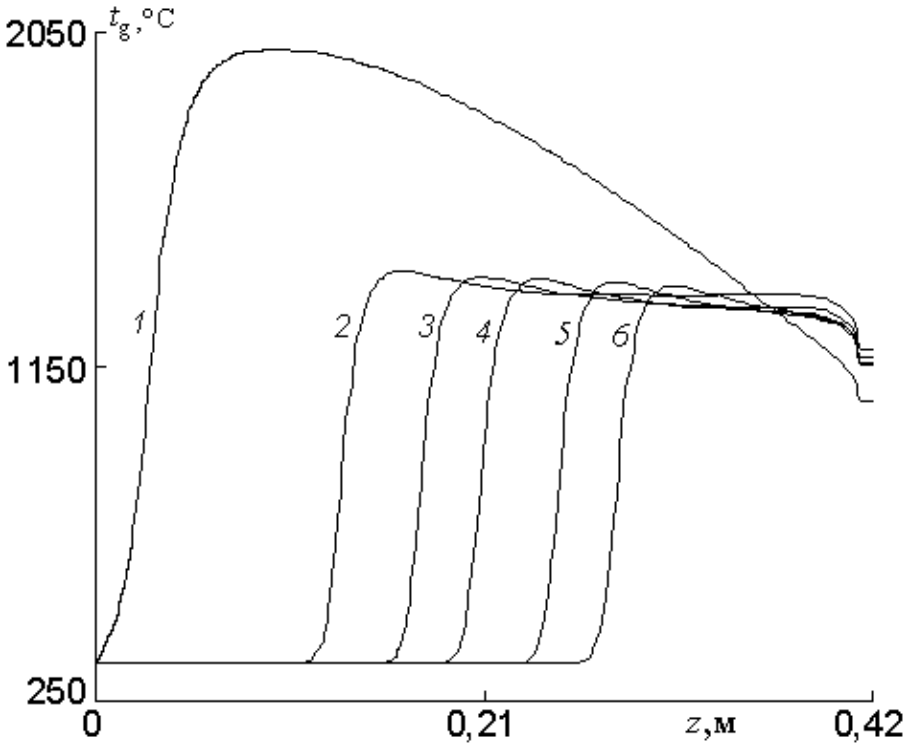


Рис. 6. Распределение температуры газа по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 6. Gas temperature distribution over the height of the fixed bed as a function of time (notations are the same as in Fig. 2).

Выводы. 1. Предложенная модель позволяет получить детальную информацию о геометрических, аэродинамических, тепловых и физико-химических параметрах воздушной газификации твердого топлива в неподвижном слое при различных давлениях 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 скользящих нагрузках, когда процесс воздушной газификации угля является нестационарным.

Показано, что:

а) интервал окислительной зоны, где температура коксозольных частиц достигает максимального значения, очень узок и составляет ~ 34–41 мм;

б) основной процесс газификации коксозольных частиц протекает на малом участке фиксированного слоя Δz_{bed} = 91 мм, что приводит к понижению температуры твердой фазы на 160 °С и концентрации $CO_2 \rightarrow 0$, вследствие чего оставшаяся часть интервала газификации Δz_{bed} = = 185 мм является малоэффективной;

в) на участке 1951 с < τ < 4052 с, где происходит интенсивное перемещение границ зон окисления и газификации по высоте слоя, состав синтетического газа на выходе из реактора остается практически постоянным: R_{CO} = 34,32 % и R_{N_2} = 65,66 %.

1. *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. Відновлювана енергетика. 2019. № 1(56). С. 61-71.

2. *Рохман Б.Б.* Двумерная модель процесса газификации твердого топлива в неподвижном слое под давлением. 2. Численные результаты термохимической переработки шубаркольского каменного угля при отношении массовых долей в парокислородной смеси H_2O/O_2 = 72/28. Відновлювана енергетика. 2019. № 2(57). С. 91-98.

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.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

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

8. *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.

REFERENCES

1. *Rokhman B.B.* Dvumernaya model processa gazifikacii tverdogo topliva v nepodvizhnom sloe pod davleniem. 1. Issledovanie konversii shubarkolskogo kamennogo uglya v parokislorodnoj smesi pri otnoshenii massovyh dolej H_2O/O_2=45/55. [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]. Vidnovluvana energetika. 2019. No. 1(56). Pp. 61-71.[in Russian].

2. *Rokhman B.B.* (2019). Dvumernaya model processa gazifikacii tverdogo topliva v nepodvizhnom sloe pod davleniem. 2. Chislovye rezultaty termohimicheskoj pererabotki shubarkolskogo kamennogo uglya pri sootnoshenii massovyh dolej H_2O/O_2=72/28. [Two-dimensional model of the solid fuel gasification in a fixed bed under presser. 2. Numerical results of thermal-chemical processing of Shubarkol coal at a ratio of mass fractions H_2O/O_2=72/28]. Vidnovluvana energetika. № 2(57). Pp. 91–98. [in Russian].

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. [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. Vol. 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. Vol. 26. Pp. 7195-7219. [in English].

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

7. *Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А.* Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л. Химия. 1979. 176 с. [in English].

8. *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].

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПРОЦЕСУ ПОВІТРЯНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ТВЕРДОГО ПАЛИВА В НЕРУХОМОМУ ШАРІ ПРИ АТМОСФЕРНОМУ ТИСКУ

Б.Б. Рохман, докт. техн. наук, **М.М. Нехамін,** канд. техн. наук, старший науковий співробітник

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

На основі системи рівнянь, яка описує процес конверсії вугілля в парокисневій суміші побудовано нестаціонарну модель повітряної газифікації твердого палива у фіксованому шарі з урахуванням міжфазного конвективного теплообміну, радіаційно-кондуктивного теплопереносу твердої фази, променистого і кондуктивного теплообміну шару зі стінкою реактора, гетерогенних хімічних реакцій, сил тяжіння і аеродинамічного опору. Запропонована модель дозволяє отримати детальну інформацію про геометричні, аеродинамічні, теплові і фізико-хімічні параметри повітряної газифікації твердого палива в нерухомому шарі при різних тисках в будь-який момент часу. Ця інформація може бути використана при конструюванні реакторів на стадіях ескізного, технічного та робочого проектування, пусконалагоджувальних режимах і роботі газогенератора на ковзних навантаженнях, коли процес повітряної газифікації вугілля є нестаціонарним. Показано, що: а) основний процес газифікації коксозольних частинок відбувається на малій ділянці фіксованого шару 91 мм, що призводить до зниження температури твердої фази на 160 °С і концентрація $CO_2 \rightarrow 0$, внаслідок чого решта інтервалу газифікації ~ 185 мм є малоефективною; б) ділянка окислювальної зони, де температура коксозольних частинок досягає максимального значення, є дуже вузькою і становить ~ 34-41 мм; в) у часовому інтервалі 1951-4052 с, де відбувається інтенсивне переміщення границь зон окислення і газифікації по висоті шару, склад синтетичного газу (за об'ємом) на виході з реактора залишається практично незмінним: CO = 34,32% і N_2= 65,66 %. Бібл. 8, рис. 6.

***Ключові слова**: нерухомий шар, вугілля, теплопровідність, повітряна газифікація, кондуктивний, радіаційний, температура.*

Стаття надійшла до редакції 28.12.18
Остаточна версія 18.03.20

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

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 15.01.2108 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** – 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 15.01.2108 анотація повинна бути обсягом не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова).

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

4. Кожна публікація не англійською мовою супроводжується **блоком 1 англійською мовою**, включно з англомовною анотацією (згідно з наказом МОН №32 від 15.01.2108 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.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

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 подвійне сліпе рецензування незалежними експертами. 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

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

XXI МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ "ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У XXI СТОЛІТТІ"

14 - 15 травня 2020 року, м. Київ, пр. Перемоги, 37

Шановні колеги!

Оргкомітет конференції запрошує Вас взяти участь в XXI міжнародній науково-практичній конференції "ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У XXI СТОЛІТТІ", яку заплановано провести **14-15 травня 2020 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 КПІ ім. Ігоря Сікорського та ННК «Інститут прикладного системного аналізу», Мала академія наук.

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	▪ Геотермальна енергетика
▪ Комплексні системи з ВДЕ	▪ Освітня діяльність
▪ Вітроенергетика	▪ Воднева енергетика
▪ Сонячна енергетика	▪ Енергетика довкілля (теплові насоси)
▪ Енергія біомаси	▪ Розумні мережі
▪ Гідроенергетика	

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.

ISSN 1819-8058 (Print)
ISSN 2664-8172 (Online)

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 2020 року за адресою: **tezy.ive@gmail.com**

Підтвердження Вашої участі у конференції, заповнивши реєстраційну форму, надсилати не пізніше 10 травня 2020 року за факсом або електронною поштою **info@ive.org.ua** до Оргкомітету.

Кращі статті будуть рекомендовані до публікації у провідних фахових журналах України та Польщі.

- **ДРУК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ — 300 грн**
- **ОРГВНЕСОК ДЛЯ УЧАСТІ У КОНФЕРЕНЦІЇ:**
  - ✓ **ДЛЯ СТУДЕНТІВ ТА АСПІРАНТІВ — 200 грн.**
  - ✓ **ІНШИХ УЧАСНИКІВ — 720 грн.**
  - ✓ **ДЛЯ ШКОЛЯРІВ ДРУК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ ТА УЧАСТЬ – БЕЗКОШТОВНО**

Термін оплати – до 10 травня 2020 року за умови безготівкового розрахунку.
РОЗРАХУНКОВИЙ РАХУНОК ОРГАНІЗАТОРА:
ДП МНТЦ вітроенергетики ІВЕ НАНУ, ЄДРПОУ 30973289, МФО 380805, р/рах. UA 58 3808 0500 0000 0026 0054 27307 у АТ “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.ve.org.ua

Друкується згідно з рекомендацією Вченої ради Інституту відновлюваної енергетики НАНУ, протокол № 7 від 23.03.20.
Підписано до друку 23.03.2020. 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.