

О.О. Попов, Київ

А.В. Яцишин, Київ

В.О. Ковач, Київ

В.О. Артемчук, Київ

О.В. Фаррахов, Київ

В.О. Куценко, Київ

РОТОРНО-ПНЕВМАТИЧНА ПОРШНЕВА МАШИНА ЯК ЗАСІБ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ НЕПЕРЕРВНОЇ СТАБІЛЬНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІД ДЖЕРЕЛ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Abstract. To solve the problem of stable generation of electricity from renewable energy sources, the authors proposed a new type of pneumatic engine (rotary-pneumatic piston machine), which, by theoretical calculations, has less energy loss and higher efficiency (up to 70%) than analogues. The testing results are given, namely: indicator diagrams of the engine at different values of the pressure of the working fluid at the inlet to the engine; load characteristics of the rotary piston engine; the influence of the magnitude of the pressure at the inlet of the pneumatic engine on the indicators; the influence of the degree of filling of the working cylinder on the specific indicator fuel consumption; the dependence of the motor power on the angular speed of rotation; motor torque dependence on angular speed; motor torque dependence on air pressure.

Вступ

Розвиток енергетики має вирішальний вплив на стан економіки в державі та рівень життя населення. Стратегічним інтересом нашої держави є розвиток відновлюваної енергетики. Це обумовлено низкою факторів: необхідністю у найближчому майбутньому виводити з роботи старі потужності ТЕС та АЕС, які вже відпрацювали свій проектний термін служби; енергетичною безпекою держави та критичною необхідністю зменшити енергетичну залежність від імпорتنих викопних палив; екологічною безпекою держави та кліматичною політикою. Згідно даних Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг станом частка відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) в виробництві електричної енергії України становить 3,7%.

Міжнародними зобов'язаннями України в рамках Енергетичного співтовариства та Угоди про асоціацію між Україною та ЄС передбачено стрімке зростання темпів приросту об'єктів ВДЕ. Такий вектор розвитку відзначено у Національного плану дій з відновлюваної енергетики, згідно якого до 2020 року відсоток виробництва електроенергії від ВДЕ має становити 11%, а згідно Енергетичної стратегії України до 2035 року –

мінімум 25%. А дослідження Інституту економіки та прогнозування НАН України показують економічну та технічну можливість переходу України на 91% ВДЕ вже до 2050 року [6].

Підтвердженням намірів досягнення зазначених перспектив у відновлювальній енергетиці України є нещодавні дані Національної комісії, що здійснює регулювання у сфері енергетики та комунальних послуг України, про те, на третій квартал 2019 р. введено в експлуатацію 956 МВт генеруючих потужностей, що майже в 6 разів перевищує потужність за аналогічний період 2018 р.

Плани та практика розвитку Об'єднаної енергетичної системи України наближаються до планів та практики країн-членів Європейського Союзу, де розвиток ВДЕ визначено пріоритетним напрямком. Отже, розвиток відновлюваної енергетики є визначальним для енергетичної незалежності нашої країни та виконання міжнародних зобов'язань в енергетичній та кліматичній сферах.

Для використання ВДЕ для генерації електроенергії необхідно вирішувати ряд складних проблем різного характеру. Однією з найважливіших технічних проблем є забезпечення стабільної генерації електроенергії від ВДЕ. Для вирішення даної проблеми використовуються системи на основі накопичувачів енергії різного типу: конденсаторний, пневматичний, копровий, гідравлічний (гравітаційний), маховик, свинцево-кислотний та інші. Аналіз літературних даних показав, що застосування маховиків, конденсаторів, кислотних або лужних акумуляторів пов'язано з втратами енергії при зберіганні, а також накопичувачі цих типів мають великі габарити, масу, низька питома енергоємність, високу ціну і обмежений термін експлуатації. Встановлено, що пневматичний накопичувач за всіма показниками є кращим за відповідні аналоги [7, 9].

Для ефективного перетворення накопиченої енергії стисненого повітря в корисну механічну роботу використовують пневмодвигуни різної модифікації.

До основних переваг пневмодвигунів можна віднести: низькі масогабаритні показники; пожежну безпеку; можливість зворотного ходу; стійкість до зовнішнього механічного впливу та вібрації; простоту конструкції; високу надійність та ремонтпридатність, низький рівень робочого шуму тощо. Їх основними недоліками є: низький коефіцієнт корисної дії (ККД) за рахунок багатократного перетворення енергії; охолодження двигуна внаслідок розширення повітря; обмеженість енергоємності заправних балонів та високу витрату стисненого повітря. Для побудови ефективних автономних енергокомплексів генерування електроенергії на основі ВДЕ необхідно вдосконалювати конструкції пневмодвигунів для забезпечення менших втрат енергії та збільшення ККД їх роботи [2, 10].

Постановка задачі

В роботі [4] авторами запропоновано вирішення проблеми стабільної генерації електроенергії від ВДЕ шляхом розробки та застосування роторно-пневматичної поршневої машини (РППМ) з високим коефіцієнтом корисної

дії. Ідея базувалась на наступних розрахунках: енергоємність стисненого повітря при тиску 1000–2000 бар порівнянна з енергоємністю вуглеводневого палива; 1 літр рідкого повітря має 0,6 МДж енергії або 2-3 більше ніж у самого кращого акумулятора; рідке повітря при переході у газоподібний стан створює тиск до 1000 кг/см²; існуючі компресори та ємності для зберігання газів дозволяють без зайвих проблем створити тиск 300 і більше кг/см².

В [4] описано структуру та принцип роботи даної машини, в графічному вигляді зображено різні її перерізи, описано можливості та перспективи використання даної машини для створення ефективної системи акумулявання та генерації енергії. В даній статті наведено результати ґрунтовного дослідження параметрів роботи РППМ.

Матеріали дослідження

У розробленій конструкції РППМ (табл. 1), для розподілу повітря використовуються впускні та випускні отвори, перекриття яких здійснюється центральним ротором.

Таким чином центральний ротор виконує функцію золотника та корпусу, в якому рухаються поршні. Застосування золотникового розподілу повітря забезпечує досить просту та компактну конструкцію. При цьому завдяки запропонованій конструкції механізму руху значення відносного мертвого об'єму є незначним $\varepsilon_0 = 0,015$ та обумовлене лише технологічними зазорами. Також завдяки наявності у конструкції центрального кулачкового вала є можливість регулювати фази газорозподілу та режими роботи двигуна за рахунок ступеня наповнення циліндра [1, 3].

Таблиця 1

Основні параметри зразка РППМ

№ з.п.	Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
1.	Діаметр циліндра	мм	44
2.	Хід поршня	мм	17,5
3.	Відношення S/D	–	0,4
4.	Кількість циліндрів	–	12
5.	Робочий об'єм	см ³	320,6
6.	Відносний мертвий об'єм	–	0,015

Двигун має 12 рівномірно розміщених циліндрів, що забезпечує врівноваженість двигуна та можливість пуску при будь-якому положенні ротора.

Роторно-поршневий двигун є короткоходовим, тобто відношення ходу поршня S до діаметра циліндра D дорівнює $S/D = 0,4$. Це дало змогу зробити двигун більш компактним та легким. Згідно з рекомендаціями [5, 8] зі зменшенням S/D зменшується і середня швидкість поршня, що, у свою чергу, зменшує втрати тиску при впуску та знижує протитиск на випуску. На

рис. 1 наведені індикаторні діаграми роботи РППМ при різному значенні тиску робочого тіла на вході в двигун.

Робота пневмодвигуна за навантажувальною характеристикою подана на рис. 2. Значення тиску робочого тіла на вході в РППМ змінювалося у межах 1,0...1,9 МПа, а частота обертання вихідного вала $n = 500 \text{ хс}^{-1}$, при цьому індикаторна потужність двигуна складала 0,91...1,62 кВт.

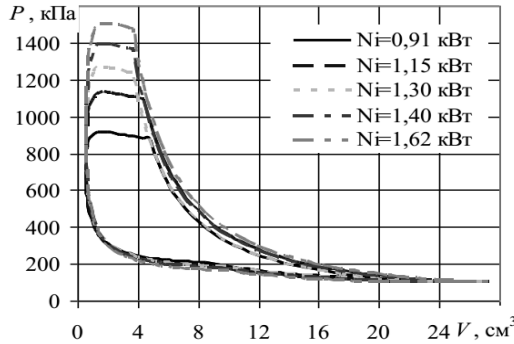


Рис. 1. Індикаторні діаграми РППМ при різних значеннях тиску робочого тіла на вході в двигун [3]

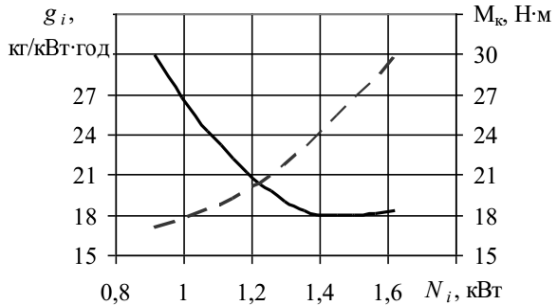


Рис. 2. Навантажувальна характеристика РППМ [3]

Зміна індикаторних показників РППМ залежно від величини тиску на вході в двигун наведена на рис. 3. З графіка видно, що з підвищенням тиску на впуску середній індикаторний тиск зростає майже пропорційно з 172 кПа до 310 кПа, при цьому індикаторний ККД РППМ лежить у межах 0,43...0,72. Також з підвищенням тиску на вході в двигун зменшується питома індикаторна витрата повітря із 29,9 до 18,4 кг/кВт·год.

Досить низькі значення питомої індикаторної витрати стисненого повітря й високі значення індикаторного ККД обумовлені конструктивними особливостями запропонованого РППМ, які поєднують переваги поршневих та роторних двигунів.

У запропонованому РППМ, як і для всіх ротаційних двигунів, мертвий

об'єм фактично не є мертвим, а відповідає роботі виштовхування при тиску впуску в компресорному циклі. Так, для поршневих двигунів значення мертвого об'єму може досягати до 25 % робочого об'єму ($\varepsilon_0 = 0,35 \dots 0,45$), що обумовлене, насамперед, характером розподілу повітря [11–13]. Мертвий об'єм у поршневих двигунах утворюється за рахунок повітряних каналів та зазору між торцем циліндра та поршнем. При використанні у поршневих двигунах клапанного розподілу з гідравлічним приводом та електронним керуванням можливо значно знизити величину мертвого об'єму [14–16], однак це призведе до ускладнення конструкції двигуна.

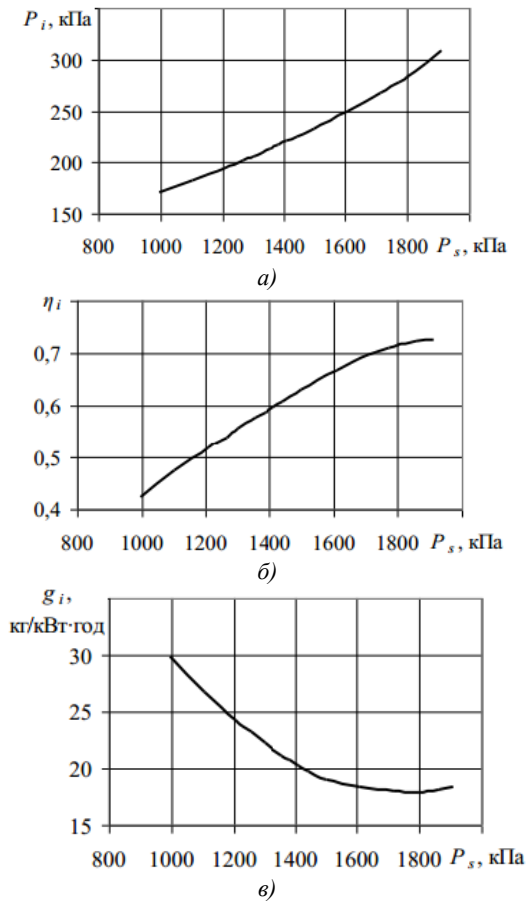


Рис. 3. Вплив величини тиску на вході в РППМ на індикаторні показники [3]:
a – середній індикаторний тиск; *б* – індикаторний ККД;
в – питома індикаторна витрата палива

Ще одним параметром, який у значній мірі впливає на ефективну витрату енергії стисненого повітря, є ступінь наповнення ε_1 (відношення об'єму робочого циліндра в момент закінчення наповнення до повного об'єму). У більшості поршневих двигунів із золотниковим розподілом повітря ступінь наповнення не регулюється, що призводить до значних втрат повітря при регулюванні режиму роботи двигуна. У запропонованій конструкції РППМ передбачена можливість регулювання у досить широкому діапазоні цього параметра за рахунок повороту кулачкового вала. Так, при зменшенні значення ступеня наповнення ε_1 спостерігається зниження питомої витрати стисненого повітря при деякому падінні середнього індикаторного тиску внаслідок зменшення площі індикаторної діаграми [17, 19, 21]. На рис. 4 наведено залежність змінення питомої індикаторної витрати повітря від ступеня наповнення робочого циліндра РППМ.

Енергія стисненого повітря акумулюється у балонах під високим тиском, який може досягати 40...50 МПа. Робочий тиск у більшості пневодвигунів значно менший, тому необхідно використовувати понижуючі газові редуктори. Однак зниження тиску в редукторі супроводжується ефектом Джоуля-Томсона, тобто зниженням температури робочого тіла при дроселюванні. Також зниження температури відбувається і в робочому циліндрі двигуна та органах випуску відпрацьованого робочого тіла. Зниження температури негативно впливає і на роботу системи змащення.

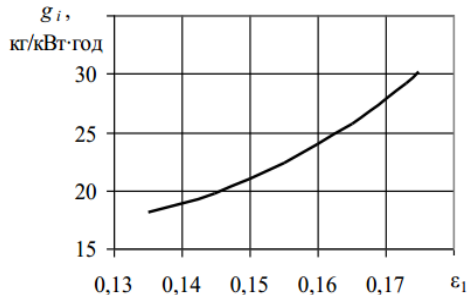


Рис. 4. Вплив ступеня наповнення робочого циліндра на питому індикаторну витрату палива [3]

Значення ступеня наповнення також має безпосередній вплив на змінення найнижчої температури циклу [18]. Зниження його значення призводить до підвищення меж застосування тиску стисненого повітря на вході в двигун [20]. У запропонованій конструкції РППМ значення ступеня наповнення може варіюватися у досить широких межах та досягати свого мінімального значення на рівні $\varepsilon_1 = 0,135$, що, у свою чергу, дозволяє використовувати більш високі значення тиску на вході в двигун без попереднього підігріву.

Ще одним параметром, який впливає на ефективність роботи двигуна, є організація процесу випуску відпрацьованого повітря. Випуск відпрацьованого повітря в РППМ відбувається з меншими втратами. Це обумовлено тим, що площа перетину випускних отворів після їх відкриття не залежить від кута повороту ротора. Однак варто відзначити, що досягнення високих ефективних показників РППМ напряду залежать від якості й точності виготовлення, що, у свою чергу, впливає на зниження втрат стисненого повітря та ККД.

Також на рис. 5 – 7 показані результати виконаних авторами додаткових експериментів з тестовою РППМ [4, 22].

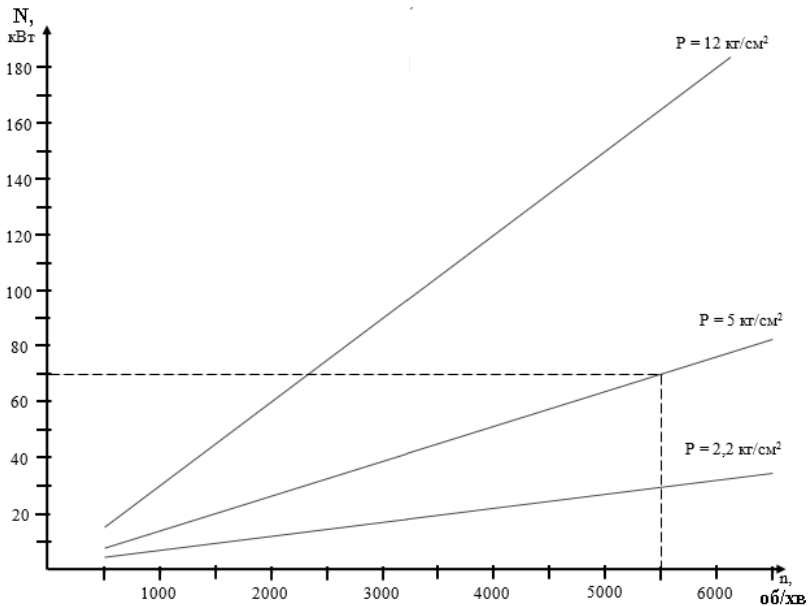


Рис. 5. Залежність потужності мотора від кутової швидкості обертання

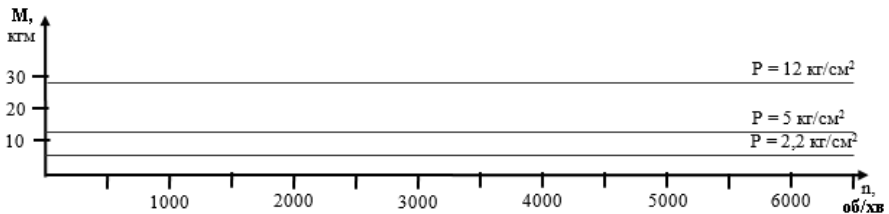


Рис. 6. Залежність крутного моменту мотора від кутової швидкості обертання

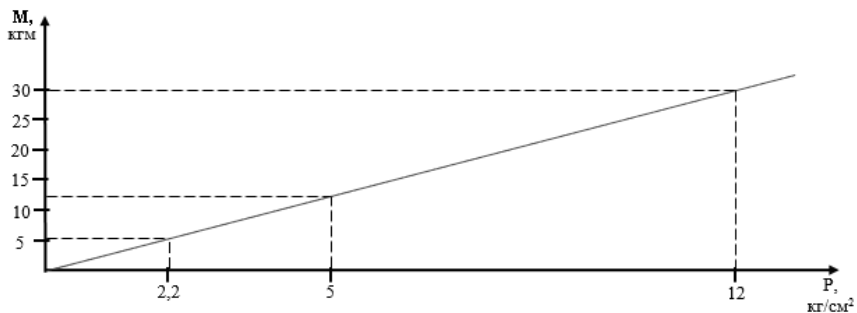


Рис. 7. Залежність крутного моменту мотора від тиску повітря

Висновки

Розробка та використання високоефективних силових приводів з високим ККД придатних для перетворення потенціальної енергії накопиченого стисненого повітря у кінетичну енергію ротора, призначеного для прямого або опосередкованого приведення у дію генераторів електричної енергії, дозволить значно підвищити ефективність використання ВДЕ. Використання енергетичних комплексів на основі РППМ дозволить забезпечити стабільну генерацію електроенергії від ВДЕ, що на сьогоднішній день є великою проблемою.

Наведено результати тестування розробки, а саме: індикаторні діаграми РППМ при різних значеннях тиску робочого тіла на вході в двигун; навантажувальну характеристику роторно-поршневого двигуна; вплив величини тиску на вході в РППМ на індикаторні показники; вплив ступеня наповнення робочого циліндра на питому індикаторну витрату палива; залежність потужності мотора від кутової швидкості обертання; залежність крутного моменту мотора від кутової швидкості обертання; залежність крутного моменту мотора від тиску повітря.

1. *Зиневич В.Д.* Уравнение динамики и термодинамики поршневых пневмодвигателей // Изв. Вузов, Горный журнал. -1969. - № 9. - С. 103-109.
2. *Карамов Д.Н.* Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии / Д.Н. Карамов // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 9. – С. 133-140.
3. *Тимошевський Б.Г.* Дослідження параметрів роботи роторно-поршневого двигуна / Б.Г. Тимошевський, О.С. Митрофанов // Двигатели внутреннего сгорания. - 2019. - № 1. - С. 3-8.
4. *Попов О.О.* Розроблення роторно-пневматичної поршневої машини для побудови автономних електрогенеруючих комплексів на основі відновлювальних джерел енергії / О.О. Попов, А.В. Яцишин, В.О. Ковач, В.О. Артемчук, О.В. Фаррахов, В.О. Куценко // Математичне моделювання та інформаційні технології. – 2019. – Вип. 87. – С. 69–76.
5. *Попов О.О.* Кількісний аналіз стану довкілля на техногенно забруднених територіях / О.О. Попов, А.В. Яцишин, В.О. Артемчук // Моделювання та інформаційні технології. – 2014. – Вип. 73. – С. 3-16.
6. Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року [Електронний ресурс]: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 01.10.2014 № 902-р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80> (дата

звернення 08.12.2019). – Назва з екрана.

7. *Титко Р.* Відновлювальні джерела енергії (досвід Польщі для України): навч. посіб. / Р. Титко, В.М.Калініченко. – Варшава, Краків, Полтава: OWG, 2010. – 530 с.
8. *Удалов С.Н.* Возобновляемые источники энергии / С.Н. Удалов. – Новосиб.: НГТУ, 2014. – 459 с.
9. *Федоренко В.Ф.* Возобновляемые источники энергии: тенденции и перспективы развития: Научный аналитический обзор / В.Ф.Федоренко, В.С.Тихонравов, Н.П.Мишуров. – М.: Росинформарготех, 2015. – 128 с.
10. *Шерьязов С.К.* Возобновляемые источники в системе энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей: монография / С.К. Шерьязов. – Челябинск: ЧГАУ, 2008. – 300 с.
11. *Яцишин А.В.* Комп'ютерні засоби прогнозування техногенних навантажень на атмосферу / А.В. Яцишин, О.О. Попов, В.О. Артемчук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – Вип. 5/2 (41). – С. 33–36.
12. *Яцишин А.В., Куцан Ю.Г., Артемчук В.О., Каменева І.П., Попов О.О., Ковач В.О.* Принципи та методи управління екологічною безпекою на основі інтелектуального аналізу даних мережі моніторингу атмосферного повітря // Електронне моделювання. 2019. № 4(41). С. 85-101.
13. *Abouzahr I.* Loss of power supply probability of standalone wind electric conversion systems: A closed form solution approach / I. Abouzahr, R. Ramakumar // IEEE Transactions on energy conversion. – 2017. – Vol. 5, № 3. – P. 445-451.
14. *Bakirtzis A.G.* A probabilistic method for the evaluation of the reliability of stand alone wind energy systems / A.G. Bakirtzis // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2016. – Vol. 7, № 1. – P. 99-107.
15. *Ciang C.C.* Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods / C.C. Ciang, J. Lee, H. Bang // Measurement science and technology. – 2018. – Vol. 19, № 12. – P. 1-20.
16. *Flemming M.L.* New lightning qualification test procedure for large wind turbine blades / M.L. Flemming, S. Troels // International conference lightning and static electricity. – Blackpool, U.K., 2003. – P. 36.1-36.10.
17. *Iatsyshyn A.V.* The methodology of future specialists teaching in ecology using methods and means of environmental monitoring of the atmosphere's surface layer / A.V. Iatsyshyn, O.O. Popov, V.O. Kovach, V.O. Artemchuk // Information Technologies and Learning Tools. – 2018. – Iss. 66 (4). – P. 217-230.
18. *Kovach V.* Toxic Soil Contamination and Its Mitigation in Ukraine / V. Kovach, G. Lysychenko // Soil Science Working for a Living. – Cham: Springer, 2017. – P. 191–201.
19. *Petrone G.* Reliability issues in photovoltaic power processing systems / G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Veerachary // Transactions on industrial electronics. – 2018. – Vol. 55, № 7. – P. 2569-2580.
20. *Popov O.* Conceptual Approaches for Development of Informational and Analytical Expert System for Assessing the NPP impact on the Environment / O. Popov, A. Iatsyshyn et al. // Nuclear and Radiation Safety. – 2018. – Iss. 3(79). – P. 56-65.
21. *Reid Thomas R.* Renewable energy - pushing gas turbine components to their cycling limit / Thomas R. Reid // Power Engineering. – 2015. – Iss. 9, Vol. 119. – 8 p.
22. *Rosner D.* Experiencing renewable energy: design and implementation of a mobile educational laboratory / D. Rosner, M. Catuneanu, R. Tataroiu, C. Safta, M. Bucicoiu // Scientific Bulletin-University Politehnica of Bucharest. – 2014. – Iss. 3, Vol. 76. – P. 197-206.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3859637>

Поступила 26.09.2019р.