

10.31653/smf46.2023. 92-100

Просянок В.В., Берестовой І.О.,

Національний університет «Одеська морська академія»

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ СУДНА З ГІБРИДНИМ ПНЕВМОЕЛЕКТРИЧНИМ ДВИГУНОМ І ОЦІНКА ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Міжнародне судноплавство спричиняє близько 3% світових обсягів викидів парникових газів, і за даними ІМО, ця частка до 2050 року може збільшитися до 18%. Згідно цілей Паризької угоди в рамках Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (UNFCCC) країни ЄС та Європарламент прийняли новий кліматичний закон, відповідно до якого в Євросоюзі до 2030 року планують скоротити викиди вуглекислого газу в атмосферу щонайменше на 55%, у порівнянні з рівнем кінця 2020 р. [1]. Крім того, додаток VI до Конвенції МАРПОЛ передбачає суттєве посилення норм викидів відпрацьованих газів суднових енергетичних установок за окислам сірки (SO_x) й азоту (NO_x). Визначено особливі райони контролю викидів – Emission Control Areas (ECA), до яких сьогодні належать: Балтійське та Північне моря (ECA 1), прибережні води США та Канади (ECA 2), Середземне море (ECA 3), узбережжя Японії (ECA 4) та ряд інших акваторій. Процес створення екологічних зон є незворотними в подальшому розповсюджуватиметься на інші регіони світу, моря та річки

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як і інші технології, що не використовують спалювання палива, використання транспортних засобів на стисненому повітрі дозволяє зменшити викиди в наслідок згоряння палива за рахунок акумулювання стисненого повітря на централізованих електростанціях або на вітроелектростанціях [2], що значно зменшує та полегшує процес утилізації викидів.

Достатньо давно використовуються транспортні засоби в яких в якості рушійної сили використовується стиснене повітря. Відомий шахтовий локомотив на стисненому повітрі [3]. Він має акумулятор стисненого повітря об'ємом 25 м³ робочим тиском 20 МПа. Робочий тиск перед пневмодвигуном становить 2,0÷1,4 МПа. При потужності двигуна в 51,5 кВт на одній зарядці забезпечується пробіг у 6 км. коефіцієнт корисної дії (ККД) машини оцінювався близько 24%.

Технологія акумулювання стисненого повітря широко застосовується у повітря - акумуляторних газотурбінних установках [4]. На великій кількості транспортних засобів стиснене повітря використо-

ується для запуску основного двигуна. Завдяки високій питомій роботі стисненого повітря, виконати пуск потужного двигуна (ДВЗ, ГТУ) виявляється ефективніше за допомогою стисненого повітря, ніж електроприводу. Так, при початковому тиску в 12 МПа та кінцевому 2 МПа теоретична робота витраченого 1 м³ при ізотермічному розширенні сягає приблизно 22000 кДж.

Відомі сучасні моделі міських малолітражок з пневмодвигунами: MDI One Flow Air (Франція), Peugeot 2008 Hybrid Air, OneCAT (Індія) тощо. Інженерами продовжуються дослідження вдосконалення застосування пневмодвигунів в автобудуванні. Наприклад авторами статті [5] розглянуто різні фактори, що впливають на надійність пневмодвигуна для використання на транспорті у зв'язку з різними умовами експлуатації та при використанні його в режимі рекуперативного гальмування. При гальмуванні автомобіля пневмодвигун може працювати в режимі компресора, тим самим поповнюючи запас стисненого повітря в балонах. Ймовірно, можна використовувати цю можливість пневмодвигуна при інерційному гальмуванні судна.

Проводяться також дослідження удосконалення конструкції пневмодвигуна для застосування на транспорті. У статті [6] проведено дослідження характеристик роторно-поршневого пневмодвигуна при використанні у складі енергетичної установки транспортного пристрою. Для підвищення експлуатаційних та економічних показників транспортної енергетичної установки що використовує енергію стисненого повітря запропоновано регулювання робочого тиску повітря у впускному ресивері роторно-поршневого пневмодвигуна.

Незважаючи на те, що перші спроби оснастити морський транспорт двигуном, який працює на стисненому повітрі, було зроблено ще на початку позаминулого століття [7], окрім побудови кількох підводних суден справа так і не зрушила. Крім того, пневматичні двигуни застосовувались також у приводі морських торпед [8], правда вони перестали використовувати стиснене повітря під час Другої світової війни, бо вахтовим було надто легко виявити бульбашки на поверхні.

Оскільки задача зменшення викидів відпрацьованих газів у судноплавстві за допомогою енергії стисненого повітря актуальна, нами було запропоновано продовжити дослідження за цим напрямом.

Постановка завдання. Мета дослідження – підвищення екологічної безпеки суден шляхом застосування пневмоелектричної судової енергетичної установки.

Викладення матеріалу дослідження. У якості головного двигуну у екологічно безпечному судні розглянуто пневмоелектричний двигун (ПЕД), що складається з пневмодвигуна, який працює на енергії стисненого повітря, яка відновлюється компресорами з приводом від електродвигуна.

Накопичення електричної енергії в акумуляторах здійснюється за допомогою сонячних батарей, установлених на судні. Застосування ПЕД імовірно дозволить суттєво зменшити викиди продуктів згоряння в атмосферу, порівняно з іншими типами головних судових двигунів, що не використовують пневматичне акумулювання [9,10].

Використання переваг пневматичного акумулювання неодмінно стикається з низкою технічних труднощів. Системи пневматичного акумулювання для водних транспортних засобів обмежені застосуванням короткого часу використання і дуже високою потужністю розряду. Крім того, при розширенні повітря в пневмоелектричній установці від тиску в акумуляторі до атмосферного, можливе випадіння вологи і навіть обмерзання деталей двигуна.

Для попередження випадіння вологи необхідно підігрівати повітря перед пневмодвигуном. Здійснити це можна у декілька способів:

– підігрівання на береговій компресорно - заправній станції з подальшим зберіганням стисненого повітря в теплоізовльованих (реципієнтах, резервуарах, балонах) баках;

підігрівання за рахунок теплоти навколишнього повітря чи забортної води.

Спрощену концептуальну структурну схему судової енергетичної установки (СЕУ) на базі пневмоелектричного двигуна подано на рис. 1.

Концептуальна модель судової енергетичної установки на базі ПЕД наступна. З берегової або плавучої компресорної станції, що акумулює в резервуарах великі об'єми стисненого повітря, переважно використовуючи енергію з відновлюваних джерел (сонячна, вітрова, гідроенергетика), гаряче стиснене повітря закачується в теплоізовльований балон основного запасу (БОЗ) судна, також частка електричної енергії передається до електричних акумуляторів встановлених на судні. З БОЗ повітря надходить до редуктору тиску (РТ) і далі повітря з тиском 8 бар обігрівается забортною водою для попередження можливого обмерзання та надходить до витратного балона (ВБ). На виході з ВБ встановлено маневровий пристрій (МП), який регулює витрати стисненого повітря для зміни потужності установ-

ки. У СЕУ на базі ПЕД можливе відновлення запасу стисненого повітря електрокомпресором (К), який працює від акумуляторів, що заряджаються за допомогою сонячних батарей, встановлених на палубі, з тиском і витратами, достатніми для забезпечення мінімальної швидкості судна.

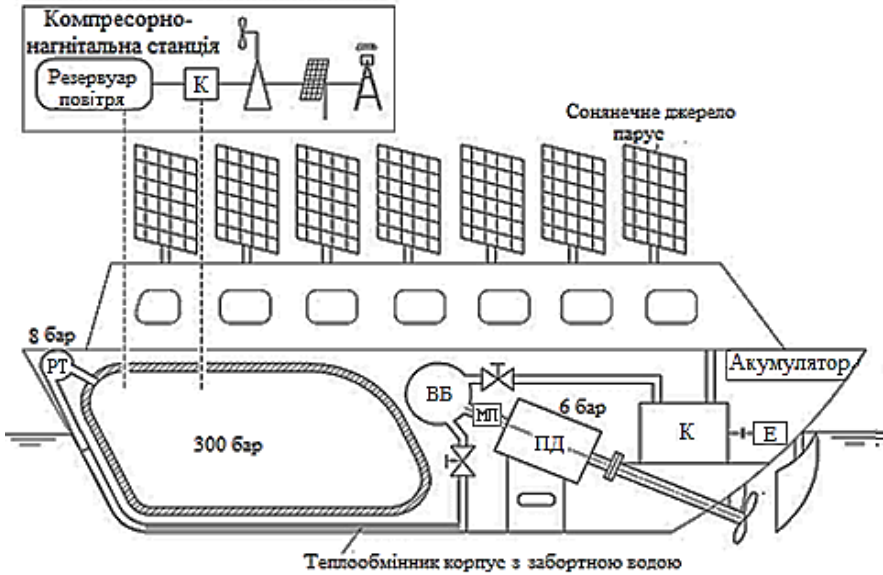


Рисунок 1. Суднова енергетична установка - пневмоелектричний двигун

На рис. 2 подано термодинамічний процес роботи установки з «гарячим» запасом стисненого повітря в БОЗ.

У термодинамічному процесі лінії: 1-2 – заповнення резервуару стисненого повітря судна з компресорно-накопичувальної станції, 2-3 – дроселювання стисненого повітря з БОЗ до РБ, 3-4 – надходження повітря через МП до пневмодвигуна (ПД), 6-7 – стискання повітря в компресорі (крива умовна, з урахуванням охолодження компресора при стисканні повітря), 7-3 – охолодження повітря, 4-5 – робота ПД, перетворення потенційної енергії на механічну енергію обертання гребного валу (лінія умовна та не відображає безпосередньо цикл роботи пневмодвигуна).

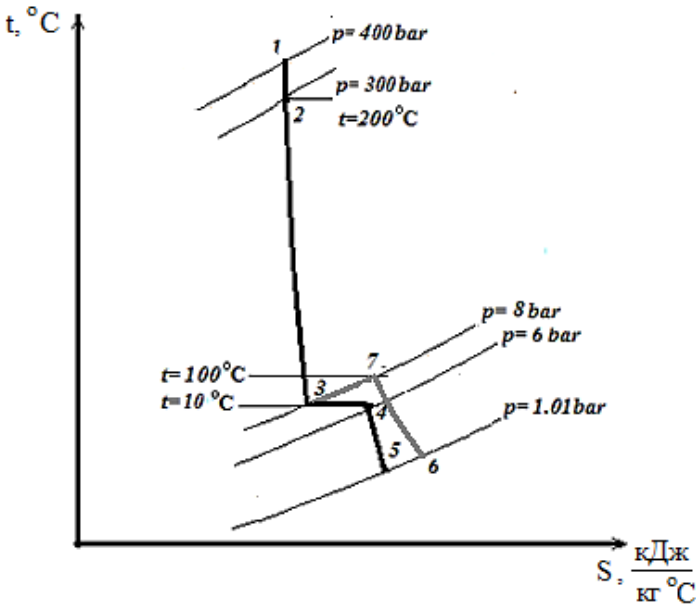


Рисунок 2. Термодинамічний процес в Т-S діаграмі СЕУ з ПЕД

Для визначення доцільності застосування ПЕД необхідно визначити можливий діапазон потужності установки, питому витрату робочого повітря, розміри БОЗ та коефіцієнт корисної дії (ККД) СЕУ. Для розрахунку прийнято такі дані: автономність плавання – 10 миль; швидкість судна – 20 вузлів; потужність головної установки – 500 кВт; тиск у БОЗ – 30 МПа; температура повітря в БОЗ – 200 °С; тиск перед ПД – 0,6 МПа; температура повітря перед пневмодвигуном +10 °С (слід зазначити, що значення температури підтвержене дослідженнями гібридної пневмоустановки для автомобіля [11], де при практично такому ж діапазоні робочих тисків температура на вході в пневмодвигун була позитивною); тиск на виході з ПД – 0,11 МПа.

Теоретичні дослідження циклу поршневого пневмодвигуна [12] установили орієнтовну питому корисну витрату повітря в межах 42÷57 кг/год на 1 кВт, при тиску повітря на вході в пневмодвигун 0,8 МПа та різних значень ступеня наповнення.

Експериментальні дослідження роботи поршневого пневмодвигуна [13] показали значення питомої витрати повітря на поршневий пневмодвигун 70÷140 кг/год на 1 кВт при тиску повітря на

вході в пневмодвигун $0,6 \div 0,9$ МПа, що з урахуванням тиску (30 МПа) та температури повітря (200 °С) у БОЗ, орієнтовно буде складати $0,3 \div 0,6$ м³/год. Згідно з прийнятими даними витрата повітря складатиме: $b_v = 500 \text{ кВт} \cdot (0,3 \div 0,6 \text{ м}^3/\text{год}) = 150 \div 300 \text{ м}^3/\text{год}$.

Кількість повітря, що буде витрачена на автономне плавання, визначається за формулою, (1):

$$V = \frac{b_v \cdot L}{c} \text{ м}^3, \quad (1)$$

де, L – автономність, миль;

c – швидкість судна, миль/год.

При проходженні судном з потужністю пневмодвигуна 500 кВт відстані 1 миля зі швидкістю 20 миль необхідний об'єм БОЗ складе $7,5 \div 15$ м³.

З урахуванням формули об'єму циліндра орієнтовно 11 м³ – це балон з радіусом $0,8$ м і довжиною $5,5$ м. Циліндричний балон з запасом на 10 миль повинен мати радіус $1,7$ м і довжину $12,5$ м.

Оскільки ПЕД являє собою гібридну установку, то дальність автономного плавання також залежить від рівня енергії, накопиченої в акумуляторних батареях, що були зарядженні на стаціонарній береговій станції та додатково заряджаються під час рейсу за допомогою сонячних батарей або вітрогенератора. Ймовірно заряду, накопиченого в батареях, повинно вистачати для забезпечення мінімальної швидкості судна додатково на такий же перехід судна, як і при використанні енергії стисненого повітря. Крім того, для форсування швидкості судна можливе використання електрорушійної установки.

ККД СЕУ на базі ПЕД можна оцінити як ККД комплексної установки. Взявши запасену в БОЗ пневмоенергію повітря в якості загального приходу енергії, а механічну енергію на валу ПЕД як корисну, втрати, що виникають у цьому ланцюжку, можна класифікувати як:

- втрати при дроселюванні повітря з БОЗ до ВБ;
- гідравлічні втрати;
- втрати при зберіганні (витік);
- механічні втрати у пневмопристроях;
- електричні втрати на електропристроях.

Оціночний ККД визначимо як добуток відповідних ККД пневмо та електропристроїв, що входять до енергетичної установки судна, (2):

$$\eta_{\text{пэд}} = \eta_{\text{др}} \cdot \eta_{\text{гидр}} \cdot \eta_{\text{ут}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{ед}}, \quad (2)$$

де, $\eta_{\text{др}}$ – ККД процесу дроселювання від БОЗ до ВБ(близько 90%);

$\eta_{\text{гидр}}$ – ККД, що враховує гідравлічні втрати (близько 90%);

$\eta_{\text{ут}}$ – ККД, що враховує витік (близько 95%);

$\eta_{\text{дв}}$ – ККД пневмодвигуна (50%);

$\eta_{\text{ед}}$ – ККД електропристроїв (95%).

Таким чином, повний ККД ПЕД, розрахований за (2), буде на рівні 37%, але слід також урахувати ККД компресорної станції, що виявляється також достатньо низьким (на рівні 40%). Сумарний ККД ПЕД у цьому випадку складе близько 14,6 %.

Враховуючи низьку ефективність (ККД) сучасних сонячних батарей (12÷15%) і вітрогенераторів [14], ККД всього процесу перетворення енергії в гібридній установці здається дуже низьким. Проте, враховуючи факт, що в СЕУ з ПЕД не використовується органічне (ядерне або інше паливо, що не відновлюється), забезпечується висока екологічна чистота, отримані значення ККД можуть виявитися прийнятними з урахуванням перспектив подальшого вдосконалювання.

Застосування СЕУ з ПЕД на «екологічно безпечних судах» потребує комплексного, масштабного технічного підходу. Потрібна відповідна технічна інфраструктура, розробка надскладних інженерних проєктів. Це вочевидь дорогі та з підвищеним терміном окупності інвестиції. Але це неминуча плата за екологічну чистоту морського транспорту. Як ми сьогодні бачимо, в сучасному світі технології не стоять на місці. В найближчій перспективі стиснене повітря можна отримати за допомогою лише «зеленої» енергетики, суттєво збільшиться його тиск і температура, з'являться нові, менш дорогі та з більшою ємністю акумулятори. На наш погляд, ККД установки може досягти прийнятних значень і СЕУ, що працює на пневмоелектричному акумуляуванні, буде використовуватиметься на судах прибережного і внутрішнього плавання.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Діапазон застосування СЕУ з ПЕД – це плавзасоби, що можуть працювати в портових акваторіях, на річках, каналах, де існують підвищені вимоги до викидів. Ймовіріше за все, це будуть паромні судна, пасажирські катери, річкові трамваї, судна екологічного напрямку, службові катери, портові збиральники та бункерувальники.

За певних умов СЕУ з ПЕД може бути працездатною рушійною установкою малих плавзасобів (дедвейт не більше 500 т.) з невисокою автономністю плавання (не більше 20 миль), яка дозволяє на 100% скоротити викиди у порівнянні з традиційними двигунами. Низька ефективність СЕУ з ПЕД пов'язана з більшими затратами енергії при стисканні, нагріванні робочого тіла, втратами пов'язаними з витоком і дроселюванням повітря. Для збільшення автономності плавання та ККД СЕУ з ПЕД необхідно: збільшувати швидкість судна за рахунок розробки спеціальної конструкції корпусу (наприклад, катамаран з гондолами - балонами); підвищувати температуру і тиск в БОЗ; використовувати балони з сучасних карбонових матеріалів; застосовувати новітні «екологічні» технології для підігрівання повітря перед пневмодвигуном.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Механізми зменшення викидів CO₂. Економічна правда. URL: <https://www.epravda.com.ua/projects/ekonomika-bez-vykydiv/2021/03/31/672462/> (дата звернення: 18.04.2023).
2. Energy Bags Under The Sea To Be Tested To Store Off-Shore Wind URL: <https://cleantechnica.com/2011/04/18/energy-bags-under-the-sea-to-be-tested-to-store-off-shore-wind/> (дата звернення: 18.04.2023).
3. Beckmann G., Gilli P.V. Thermal Energy Storage: Basics-design-applications to Power Generation and Heat Supply. New York: Springer-Verlag. 1984. 232 p.
4. Мокін Б. І., Чепурний М. М., Мокін О. Б. Повітряна акумулююча електростанція з двома повітросховищами різного тиску. *Наукові праці ВНТУ*, 2008, №1. С. 79 – 85.
5. Яцина М.М. Забезпечення надійності функціонування та підвищення ефективності пневмодвигунів на транспорті з рекуперацією енергії. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2018. Вип. 3 (110). С. 1–7.
6. Ткач М.Р., Митрофанов О.С., Проскурін А.Ю., Познанський А.С. Дослідження параметрів роботи роторно-поршневого пневмодвигуна транспортної енергетичної установки. *Науково-технічний журнал Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" «Двигуни внутрішнього згорання»*. 2020. № 1. С. 3 – 8.

7. Le sous – marin le plongeur URL: <http://francois.delboca.free.fr/fsplonge.html> (дата звернення: 18.04.2023).
8. The 1/20th scale naval model – torpedoes. URL: [https://www.bluebird-electric.net/Bluebird Boats Ships Systems/Torpedoes Model Electric Radio Controlled Making Firing Systems.htm](https://www.bluebird-electric.net/Bluebird%20Boats%20Ships%20Systems/Torpedoes%20Model%20Electric%20Radio%20Controlled%20Making%20Firing%20Systems.htm) (дата звернення: 18.04.2023).
9. Просянок В.В. Оценка эффективности применения пневматического аккумуляирования в качестве рабочего тела судовых турбоагрегатов. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2013. № 1(8). С. 54 – 61.
10. Просянок В.В. Пневматическое аккумуляирование для гидрореактивного эжекционного движителя. *Науково-технічний збірник Національного університету «Одеська морська академія» «Суднові енергетичні установки»*. 2015. №35. С. 153 – 162.
11. О выборе параметров поршневого пневмодвигателя, работающего в составе гибридной энергоустановки автомобиля. А.Н. Туренко, В.А. Богомолов, Ф.И. Абрамчук, А.И. Харченко, А.И. Шилов. *Збірник наукових праць Харківського національного автомобільно - дорожнього університету «Автомобільний транспорт»*. 2008. № 22. С. 7 – 16.
12. Нечипорук М.В. Визначення показників пневмодвигуна для гібридної силової установки міського легкового автомобіля. М.В. Нечипорук., Ю.А. Воробйов, В.Б. Пода. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2019. Вип. 85. С. 83 – 92
13. Стенд для випробування і дослідження пневмодвигунів. Ф. І. Абрамчук, О. І. Воронков, А. І. Харченко та ін. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2011. № 2. С. 110 – 117.
14. Twidell J. *Renewable Energy Resources: 4th Edition*. London: Routledge, 2021. 774 p.