

ЕЛЕКТРОУСТАНОВКА З ТВЕРДОТІЛЬНИМ ТЕПЛОВИМ ДВИГУНОМ НА ОСНОВІ СПЛАВІВ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ З НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛА

В.В. Козирський^{1*}, докт. техн. наук, **А.В. Жильцов^{2**}**, докт. техн. наук,
В.Я. Бунько^{3*}**, канд. техн. наук

¹ ALOTEK Technology sp.z.o.o.,
Zadabrowie 311, Krakowska 11, 37-716, Orly, Poland,

² Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,

³ Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів та природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»,
вул. Академічна, 20, Бережани, Тернопільська обл., 47501, Україна.

E-mail: VBunko@gmail.com.

Роботу присвячено дослідженню процесів перетворення низькопотенційної теплової енергії в електричну з використанням твердотілого теплового двигуна на основі сплавів з пам'яттю форми (SMA). Актуальність тематики зумовлена значними втратами низькотемпературного тепла в промислових та енергетичних системах і необхідністю підвищення енергоефективності автономних джерел живлення. Як приводні елементи застосовано пружини зі сплаву NiTi, що реалізують оборотні аустенітно-мартенситні фазові перетворення та забезпечують безпосереднє перетворення теплової енергії в механічну роботу. Метою роботи є розроблення фізично обґрунтованої математичної моделі теплового двигуна з урахуванням циклічного нагрівання й охолодження, термомеханічного гістерезису, інерції механічної системи та електромеханічної взаємодії з генератором, а також оцінка енергетичних характеристик установки генерації електроенергії. Запропоновано трирівневий підхід до моделювання, що включає аналітичну квазістатичну модель для інженерних оцінок, квазістаціонарну модель балансу моментів задля визначення ustalених режимів та повну динамічну систему диференціальних рівнянь, яка враховує нестационарний теплоперенос, фазову кінетику та інерційні ефекти. Результати моделювання підтвердили адекватність запропонованої моделі та показали формування самостабілізованих режимів обертання й насичення потужності. Встановлено, що спрощені підходи забезпечують консервативну оцінку енергетичних показників, тоді як повна динамічна модель більш точно відтворює перехідні процеси та реальні експлуатаційні характеристики; розбіжність між моделями не перевищує 15–20 %. Досліджено вплив двостороннього ефекту пам'яті форми, який у діапазоні температур 70–80 °C може підвищувати електричну потужність на 20–30 %. Отримані результати підтверджують перспективність використання SMA-двигунів задля утилізації низькопотенційного тепла та створення компактних автономних систем малої генерації електричної енергії. Бібл. 20, рис. 7.

Ключові слова: сплави з пам'яттю форми, тепловий двигун, електрогенерація.

Вступ. Актуальність утилізації низькопотенційної теплової енергії (до 100 °C) обумовлена значними втратами тепла у промислових та енергетичних системах, а також необхідністю підвищення енергоефективності та зменшення викидів парникових газів [1, 2]. Традиційні теплові цикли мають низький коефіцієнт корисної дії за малих температурних напорів, що стимулює пошук альтернативних підходів до перетворення теплової енергії [3, 4].

Одним із перспективних напрямів є використання сплавів з пам'яттю форми (SMA – Smart Memory Alloys), здатних здійснювати оборотні термомеханічні фазові перетворення та безпосередньо перетворювати теплову енергію в механічну роботу [5, 6]. Теоретичні засади створення теплових двигунів на основі SMA були закладені у класичних роботах [7, 8], а подальший розвиток цього напрямку показав можливість ефективної роботи таких двигунів за малих температурних градієнтах [9, 10].

© Козирський В.В., Жильцов А.В., Бунько В.Я., 2026

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0001-6780-9750>; ** <https://orcid.org/0000-0002-1688-7879>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-9403-8135>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Останні дослідження підтверджують перспективність застосування SMA-двигунів для генерації електричної енергії з низькопотенційних джерел тепла [4, 10–12]. Разом з тим більшість опублікованих робіт базується на спрощених квазістатичних моделях, що не враховують динамічні ефекти, циклічний тепломасообмін і термомеханічний гістерезис матеріалу [13, 14].

Метою роботи є розроблення фізично обґрунтованої математичної моделі теплового двигуна з приводними пружинами зі сплаву NiTi, яка враховує циклічний нагрів і охолодження, термомеханічний гістерезис фазового переходу, динаміку обертання та електромеханічну взаємодію з генератором, а також оцінка енергетичних характеристик електроустановки під час роботи з низькопотенційними джерелами тепла [10, 15].

Матеріали та методи дослідження. Як приводні елементи використано пружини зі сплаву NiTi, фізичні та термомеханічні властивості яких детально описано у роботах [5, 16, 17]. Сплави цієї групи характеризуються значною величиною допустимої оборотної деформації, високою питомою механічною енергією та вузькою петлею температурного гістерезису, що робить їх придатними для використання у теплових двигунах [6, 9, 18].

Експериментальні дослідження термомеханічних характеристик SMA-пружин, а також попередні результати створення теплових двигунів на їхній основі наведено в роботах [13, 15], що стало вихідною базою для побудови математичної моделі у даній роботі.

Чисельне розв’язання системи диференціальних рівнянь виконано у програмному середовищі Python з використанням методів Рунге-Кутти четвертого-п’ятого порядку, що широко застосовуються для моделювання динаміки нелінійних термомеханічних систем [19].

Математична модель. У процесі дослідження характеристик установки генерації електричної енергії з твердотільним тепловим двигуном на основі приводних елементів зі сплаву з пам’яттю форми застосовано три рівні математичного моделювання, які відрізняються ступенем фізичної деталізації та складністю. Такий підхід дає змогу перевірити узгодженість результатів, оцінити вплив прийнятих спрощень та забезпечити надійність кінцевих висновків.

1. Аналітична квазістатична модель. Аналітична квазістатична модель використовується для попередньої інженерної оцінки потужності теплового двигуна та встановлення загального характеру залежності енергетичних параметрів від температури теплоносія. Модель призначена для: швидких оцінок; аналізу масштабування; вибору базових геометричних параметрів.

У моделі приймаються такі спрощення: сила, що розвивається SMA-пружиною, є лінійною функцією температури у діапазоні фазового переходу; оберти робочого колеса задаються емпіричною залежністю від температури; теплова та механічна інерція системи не враховується; процес вважається квазістатичним.

Математичний запис.

Сила однієї пружини:

$$F_{SMA}(T) = F_{\max} \frac{T - T_s}{T_f - T_s}, \quad T_s \leq T \leq T_f; \quad (1)$$

крутний момент

$$M_{SMA}(T) F_{SMA}(T) m = \sin \sum \alpha_i; \quad (2)$$

механічна потужність

$$P_{\text{мех}}(T) = M_{SMA}(T) \omega(T); \quad (3)$$

електрична потужність

$$P_{\text{ел}}(T) = \eta_{\Sigma} P_{\text{мех}}(T), \quad (4)$$

де T – температура SMA-пружини, °C; T_s , T_f – температури початку і закінчення відновлення форми пружини, °C; $F_{\max}$ – максимальна експериментальна сила SMA-пружини, Н; m – плече прикладання сили (ексцентриситет), м; α_i – кут між силою i -тої пружини та дотичною, рад; $\omega(T)$ – кутова швидкість робочого колеса, рад/с; η_{Σ} – сумарний ККД механіко-електричного перетворення, в.о.; $P_{\text{мех}}(T)$ – механічна потужність, Вт.

2. Квазістаціонарна модель балансу моментів. Квазістаціонарна модель призначена для уточнення енергетичних характеристик з урахуванням взаємодії двигуна з електричним генератором. Вона використовується для: оцінки впливу електричного навантаження; визначення усталених обертів; аналізу режимів роботи генератора.

Основні припущення: процес розглядається як послідовність усталених станів; теплові процеси вважаються миттєвими відносно механічних. Враховується баланс крутних моментів; інерційні члени у рівнянні руху не враховуються.

Математичний запис.

Усталений режим визначається умовою

$$M_{SMA}(T) = M_{gen}(\omega) + M_f, \quad (5)$$

де

$$M_{gen}(\omega) = k_t \frac{k_e \omega - U_L}{R_g},$$

після знаходження ω визначається

$$P_{el} = \eta_{\Sigma} M_{SMA} \omega, \quad (6)$$

де $M_{SMA}(T)$ – крутний момент SMA-пружины, Н·м; $M_{gen}(\omega)$ – гальмівний момент електричного генератора, Н·м; M_f – момент механічних втрат (тертя, опір у підшипниках), Н·м; k_e – коефіцієнт електропружної сили генератора, В·с/рад; U_L – електрична напруга на затискачах споживача, В; R_g – внутрішній опір генератора, Ом.

3. *Повна динамічна ODE-модель (Ordinary Differential Equations)*. Повна динамічна модель є основною моделлю дослідження і використовується задля: аналізу перехідних процесів; дослідження самозапуску; визначення реальних усталених режимів; порівняння з експериментом.

Основні припущення: теплові та механічні процеси є нестационарними; температура SMA визначається рівнянням теплопереносу; враховується термомеханічний гістеріз фазового переходу; враховується інерція механічної системи; генератор моделюється як електромеханічне навантаження.

Математичний запис.

Система диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} m_s c_s \frac{dT_s}{dt} = h(\theta) A_s (T_{env} - T_s) - \dot{Q}_{tr}; \\ I \frac{d\omega}{dt} = M_{SMA}(T_s, F, \omega) - M_{gen}(\omega) - M_f; \\ F_{SMA} = F_{max} \xi(T_s, \sigma) g(\omega), \end{cases} \quad (7)$$

де

$$g(\omega) = \frac{1}{1 + \omega \cdot (\omega_c)^{-1}}, \quad \sigma = \frac{F_{SMA}}{A_s},$$

де m_s – маса SMA-пружины, кг; c_s – питома теплоємність SMA, Дж/(кг·К); $h(\theta)$ – циклічний коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·К); A_s – площа теплообміну SMA-пружины, м²; θ – кутове положення пружини на робочому колесі, рад; T_{env} – температура навколишнього середовища (вода або повітря), °С; $\dot{Q}_{tr}$ – теплові втрати (теплопровідність у кріплення, випромінювання тощо), Вт; t – час, с; I – зведений момент інерції робочого колеса та приєднаних мас, кг·м²; $M_{gen}(\omega)$ – гальмівний електромагнітний момент генератора, Н·м; M_f – момент механічних втрат (тертя), Н·м; ω_c – характерна швидкість фазового переходу SMA, рад/с; ξ – частка аустеніту, в.о.

Рівняння для сили SMA-пружины має неявний характер і розв'язується самоузгоджено з урахуванням впливу напруження на температуру фазового переходу.

Термомеханічний гістерезис фазового переходу під час нагрівання

$$\xi_h(T) = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(\frac{T - T_{A,m}}{\Delta T_h} \right) \right]; \quad (8)$$

охолодження

$$\xi_c(T) = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(\frac{T - T_{M,m}}{\Delta T_c} \right) \right], \quad (9)$$

де $T_{A,m}$, $T_{M,m}$ – середні температури фазових переходів, К; ΔT_h , ΔT_c – ширина петлі гістерезису, К.

Рівняння теплопереносу для SMA-пружины сформульовано на основі класичних підходів до нестационарного теплообміну з урахуванням прихованої теплоти фазового переходу [5, 20].

Модель термомеханічного гістерезису фазового переходу побудовано з використанням феноменологічних залежностей типу $\tanh$, що добре зарекомендували себе під час опису аустенітно-мартенситних перетворень у сплавах NiTi [6, 16, 17].

Динамічне рівняння обертання робочого колеса з урахуванням електромагнітного гальмування генератора сформульовано на основі класичних положень електромеханіки та теорії електричних машин [12].

Вихідні дані для чисельного моделювання: кількість пружин – 36 шт.; активних пружин – 18 шт.; діаметр дроту – 2 мм; температура води – 80-95 °С; оберти робочого колеса – 95-120 об/хв; передавальне число – 1:3. В основу фізичного і теоретичного моделювання установки покладено кінематичну схему, яку показано на рис. 1 і 2 [1].

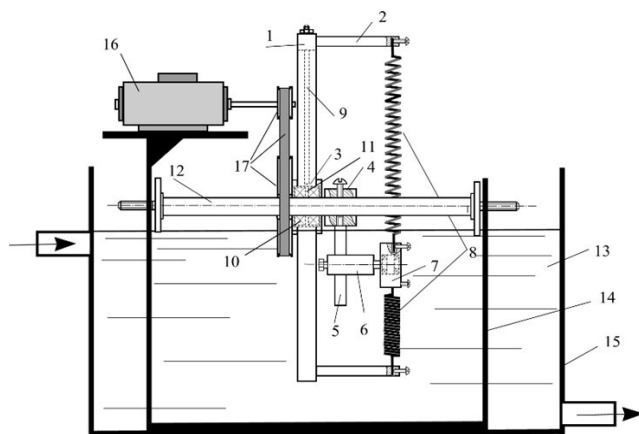


Рис. 1

Установка для генерації електроенергії на базі низькотемпературних джерел теплової енергії та фізичних властивостей сплавів з пам'яттю форми складається з: 1 – робоче колесо; 2 – стержень кріплення пружин із функціонального сплаву (ФС); 3 – втулка робочого колеса; 4 – втулка-фіксатор; 5 – стержень; 6 – повзунок; 7 – втулка; 8 – пружини із ФС; 9 – спиці робочого колеса; 10 – підшипники; 11 – стопорна втулка; 12 – вісь робочого колеса; 13 – вода; 14 – станина кріплення двигуна; 15 – ємність для води; 16 – електричний генератор; 17 – шківи та ремінна передача.

Кінематичну схему робочого колеса теплового двигуна і вектори сил пружини із ФС під час нагрівання зображено на рис. 2.

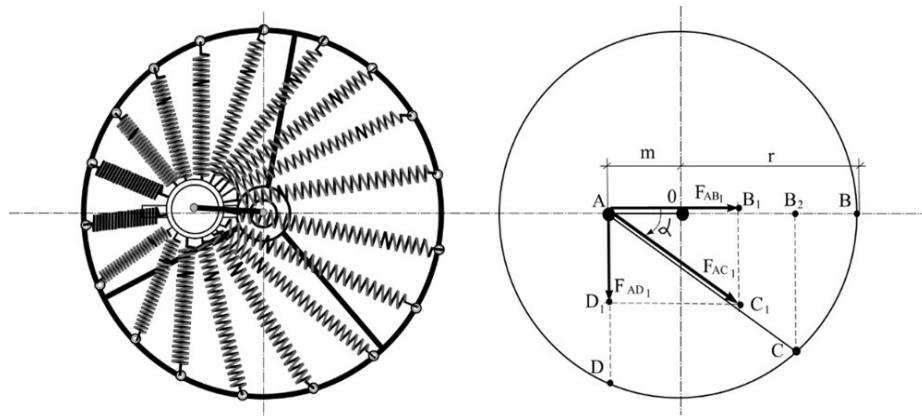


Рис. 2

Наведений на рис. 1 і 2 варіант теплового двигуна з вертикальним робочим колесом радіусом $r = 350$ мм містить 36 пружин із сплаву Ni-Ti-Cu (сплав зі звуженим термомеханічним гістерезисом і температурою початку відновлення форми $A_s \approx 50$ °С). Пружини виготовлені із проводу діаметром 2 мм, діаметр пружини 20 мм, довжина проводу 950 мм, кількість витків у пружині 15. Експериментальними дослідженнями встановлено, що одна пружина генерує реактивне зусилля 40 Н за температури 90-95 °С. Центр дії генерованих сил кожної пружини розташований у точці А, віддаленій від центра робочого колеса на відстань $m = 120$ мм (відрізок AO). Генероване зусилля пружиною, наприклад F_{AC1} , має дві складові – вертикальну F_{AD1} і горизонтальну F_{AB1} . Вертикальна складова F_{AD1} діє на плече AO і створює обертовий момент для робочого колеса. Задля генерації електричної енергії застосовано генератор G-160 (потужність 300 Вт, номінальні оберти 300 об/хв, номінальна напруга 48 В) механічно приєднаний через ремінну передачу до робочого колеса (передаточне число ремінної передачі 1:3). Температура повітря оточуючого середовища +15 °С. У ємності 15 (рис. 1) вода нагрівається від 15 до 95 °С. Вода у ємності 15 знаходиться на рівні точки А (центру робочого колеса).

Таким чином, у воді, що нагрівається, будуть перебувати 18 приводних пружин із сплаву з пам'яттю форми.

Результати чисельного моделювання. Отримані чисельні результати підтверджують, що запропонована модель адекватно описує як перехідні, так і усталені режими роботи теплового двигуна. Аналогічні закономірності самостабілізації обертів та насичення потужності відзначалися і в інших роботах, присвячених SMA-двигунам [4, 10, 14].

На рис. 3 – 5 наведено результати моделювання режимних параметрів для установки генерації механічної і електричної потужності. Зокрема, на рис. 3 відображено процес нагрівання однієї пружини у часі. Горизонтальні площадки на кривій процесу нагрівання пружини відображають процес періодичного охолодження пружини у повітрі під час кругового її руху з робочим колесом двигуна.

На рис. 4 зображено зміну обертів робочого колеса теплового двигуна у часі.

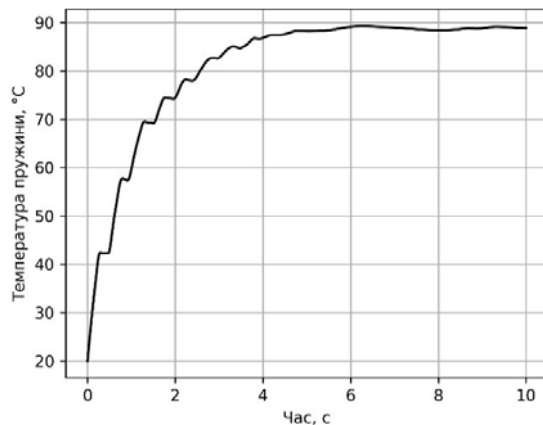


Рис. 3

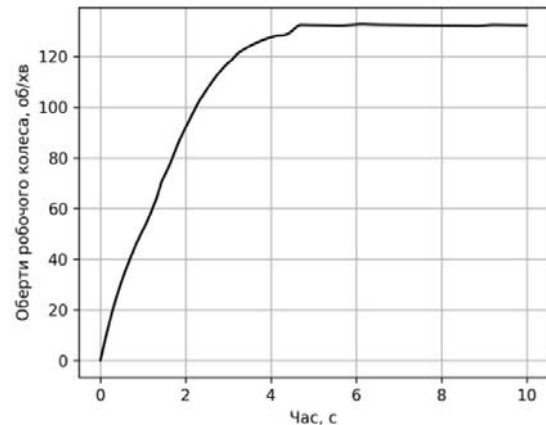


Рис. 4

Криві наростання механічної та електричної потужностей під час пуску установки показано на рис. 5. Залежність електричної потужності від температури води, отриману різними методами моделювання, показано на рис. 6.

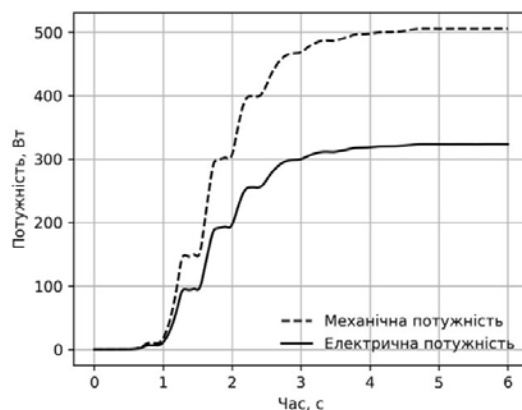


Рис. 5

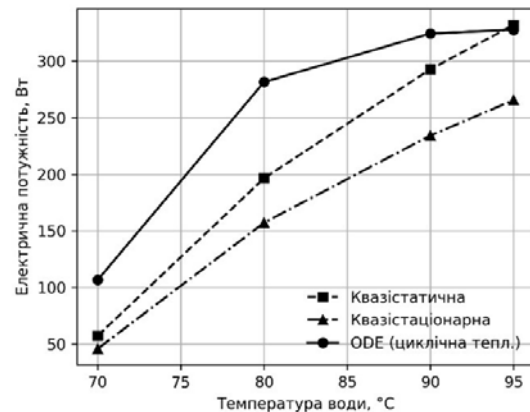


Рис. 6

Порівняння результатів чисельного моделювання електричної потужності. У роботі електрична потужність теплового двигуна на основі пружин зі сплаву з пам'яттю форми визначена трьома незалежними підходами, що відрізняються рівнем фізичної деталізації: аналітична квазістатична модель; квазістаціонарна модель балансу моментів; повна динамічна ODE-модель (з урахуванням теплопереносу та інерції).

Такий підхід дає можливість: перевірити стійкість результатів; оцінити вплив фізичних спрощень; показати еволюцію від простої інженерної оцінки до повної фізичної моделі.

1. *Характеристика методів розрахунку.*

Метод 1 – аналітична квазістатична модель: передбачає лінійну залежність сили SMA від температури, задану емпіричну залежність обертів від температури та ігнорування динаміки та теплової інерції. Цей метод дає нижню інженерну оцінку потужності.

Метод 2 – квазістаціонарна модель: враховує баланс крутних моментів, зменшення обертів під дією електричного навантаження генератора; спрощений облік тертя. Дає більш реалістичну, але все ще консервативну оцінку.

Метод 3 – повна динамічна ODE-модель: враховує нестационарний теплоперенос, термомеханічний гістерезис SMA, інерцію механічної системи, електромагнітне гальмування генератора; само-стабілізацію режиму. Цей підхід дає найбільш фізично коректний результат.

Таким чином, порівняння результатів, отриманих трьома незалежними методами моделювання, показало, що спрощені аналітичні та квазістаціонарні підходи дають консервативну оцінку електричної потужності. Найбільш фізично коректні значення отримано за допомогою повної динамічної ODE-моделі, яка враховує теплову інерцію та термомеханічний гістерезис приводних елементів. Різниця між квазістаціонарною та динамічною моделями не перевищує 15-20 % у робочому температурному діапазоні, що підтверджує узгодженість результатів.

У представлений моделі розглянуто односторонній ефект пам'яті форми. Разом з тим попередні експериментальні дослідження прототипу показали прояв двостороннього ефекту пам'яті форми (TWSME – Two-Way Shape Memory Effect) у приводних елементах, який може призводити до додаткової активної деформації під час охолодження. Вироби із SMA матеріалів мають властивість набувати двостороннього ефекту пам'яті після певної кількості циклів деформацій і нагрівання (тренування виробу). Урахування цього ефекту потребує введення власної температурної деформації та є предметом подальших досліджень.

Наближено цей ефект можна врахувати наступним чином. Додаткова самогенерована сила під час охолодження

$$F_{TW}(T) = \alpha_{TW} F_{\max} (1 - \xi(T, \sigma)), \quad (10)$$

де $\alpha_{TW} = 0,15$ – інтенсивність двостороннього ефекту (15 % від $F_{\max}$, обережна оцінка); $\xi(T, \sigma)$ – термомеханічна фазова змінна.

Після повного фазового переходу аустеніту в мартенсит ($\xi \rightarrow 0$) виникає активна сила без зовнішнього навантаження – фізична сутність TWSME. Відповідно, крутний момент у ODE-моделі буде визначатися

$$M_{SMA}^{TW} (F_{\max} \xi + F_{TW}) g(\omega) m = \sin \sum \alpha_i. \quad (11)$$

Чисельне моделювання електричної потужності з урахуванням ефекту TWSME показано на рис. 7, який характеризує вплив двостороннього ефекту пам'яті форми на електричну потужність теплового двигуна.

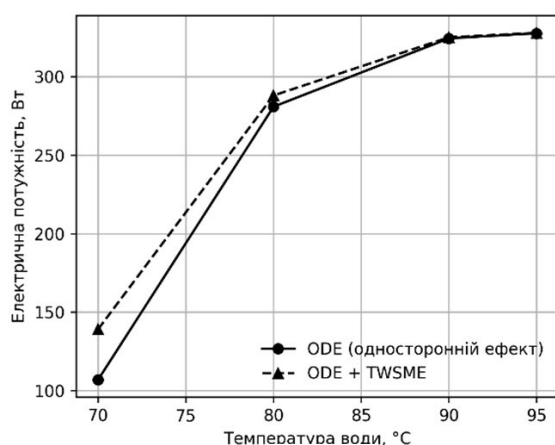


Рис. 7

Вплив двостороннього ефекту пам'яті форми шляхом введення спрощеної самогенерованої силової складової показав, що за температур теплоносія в діапазоні 70-80 °C електрична потужність може зростати на 20-30 %, тоді як за температури понад 90°C вплив цього ефекту практично зникає. Це свідчить про перспективність використання «навчених» SMA-елементів задля утилізації низькопотенційного тепла, але повноцінне моделювання TWSME потребує введення додаткової внутрішньої змінної – власної температурної деформації та відповідної експериментальної ідентифікації параметрів, що виходить за межі даної роботи і є предметом подальших досліджень.

Обговорення результатів. Отримані результати чисельного моделювання дають можливість зробити низку принципових висновків щодо фізики процесів та ефективності роботи теплового двигуна з приводними елементами зі сплаву з пам'яттю форми. Передусім встановлено, що часткове занурення приводних SMA-пружин у теплоносії не лише не знижує енергетичних характеристик установки, а навпаки – формує стійкий циклічний режим нагрівання та охолодження, який є необхід-

ною умовою виникнення нетто-крутного моменту. Такий режим роботи добре узгоджується з експериментальними спостереженнями для подібних конструкцій, наведеними в роботах [13, 15], і підтверджує доцільність використання вертикальної компоновки робочого колеса.

Важливим результатом є встановлення ролі термомеханічного гістерезису фазового переходу SMA як активного фізичного механізму генерації механічної роботи. На відміну від традиційного трактування гістерезису як джерела втрат у даній установці саме різниця термомеханічних шляхів у процесі нагрівання та охолодження приводних елементів забезпечує виникнення результуючого обертового моменту. Таким чином, гістерезис є не паразитним, а функціональним чинником роботи твердотілого теплового двигуна, що узгоджується з теоретичними положеннями, викладеними у [4, 9].

Порівняння трьох рівнів математичного моделювання показало, що аналітична квазістатична та квазістаціонарна моделі балансу моментів забезпечують консервативну оцінку електричної потужності і можуть ефективно використовуватися на етапі попереднього інженерного проектування. Водночас повна динамічна ODE-модель, яка враховує нестационарний теплоперенос, інерцію механічної системи та електромеханічну взаємодію з генератором, дає змогу коректно описати перехідні процеси, самозапуск і самостабілізацію режимів роботи установки. Різниця між результатами квазістаціонарної та динамічної моделей у робочому температурному діапазоні не перевищує 15-20 %, що свідчить про внутрішню узгодженість підходів та достовірність отриманих числових оцінок.

Окремої уваги заслуговує аналіз впливу двостороннього ефекту пам'яті форми (TWSME). Навіть у спрощеній феноменологічній постановці показано, що за температур теплоносія 70-80°C TWSME може забезпечити істотне зростання електричної потужності установки, що особливо важливо для утилізації низькопотенційного тепла. Водночас зменшення впливу цього ефекту за вищих температур є фізично обґрунтованим наслідком повного аустенітного перетворення. Повноцінне врахування TWSME потребує введення додаткової внутрішньої змінної – власної температурної деформації матеріалу та експериментальної ідентифікації відповідних параметрів, що обґрунтовано винесено за межі даної роботи.

Загалом результати моделювання підтверджують, що запропонована установка здатна ефективно перетворювати низькопотенційну теплову енергію у механічну та електричну з вихідною потужністю, достатньою для практичних застосувань у системах утилізації відпрацьованого тепла.

Висновки.

1. Розроблено фізично обґрунтовану багаторівневу математичну модель твердотілого теплового двигуна з приводними пружинами зі сплаву з пам'яттю форми, яка поєднує аналітичний, квазістаціонарний та повний динамічний підходи і дає можливість комплексно аналізувати робочі режими установки.

2. Повна динамічна ODE-модель враховує нестационарний теплоперенос, циклічний нагрів і охолодження приводних елементів, термомеханічний гістерезис фазового переходу, інерцію механічної системи та електромеханічне навантаження генератора, що забезпечує високу фізичну адекватність чисельних результатів.

3. Встановлено, що циклічне занурення SMA-пружин у теплоносії формує стабільний циклічний тепловий режим і не обмежує ефективність роботи двигуна. Термомеханічний гістерезис виступає ключовим джерелом нетто-крутного моменту та є необхідною умовою функціонування твердотілого теплового двигуна.

4. Проведене порівняння трьох методів моделювання продемонструвало, що спрощені квазістатичні підходи дають консервативну оцінку електричної потужності, тоді як повна динамічна модель забезпечує найбільш фізично коректний опис процесів. Узгодженість результатів підтверджує достовірність отриманих оцінок.

5. Встановлено, що двосторонній ефект пам'яті форми потенційно може суттєво підвищити електричну потужність установки у діапазоні низьких температур теплоносія. Це відкриває перспективи застосування навчених SMA-елементів для ефективнішої утилізації низькопотенційного тепла.

6. Визначені результати підтверджують перспективність використання теплових двигунів на основі сплавів з пам'яттю форми у системах децентралізованої генерації та утилізації відпрацьованого тепла і створюють надійну теоретичну основу для подальших експериментальних досліджень і оптимізації конструкції установки.

ELECTRICAL INSTALLATION WITH A SOLID-STATE THERMAL ENGINE BASED ON SHAPE MEMORY ALLOYS FOR GENERATING ELECTRICITY FROM LOW-POWER HEAT SOURCES

V.V. Kozyrskyi¹, A.V. Zhyltsov², V.Ya. Bunko³

¹ ALOTEK Technology sp.z.o.o.,

Zadabrowie 311, Krakowska 11, 37-716, Orly, Poland.

² Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

56, Beresteyskiy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.

³ Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

«Berezhany Agrotechnical Institute»,

20, Akademichna Str., Berezhany, Ternopil region, 47501, Ukraine.

E-mail: VBunko@gmail.com.

*The work is devoted to the study of processes of conversion of low-potential thermal energy into electrical energy using a solid-state heat engine based on shape memory alloys (SMA). The relevance of the topic is due to significant losses of low-temperature heat in industrial and energy systems and the need to improve the energy efficiency of autonomous power sources. NiTi alloy springs are used as drive elements, which implement reversible austenite-martensite phase transformations and ensure the direct conversion of thermal energy into mechanical work. **The aim** of the work is to develop a physically based mathematical and numerical model of a heat engine, taking into account cyclic heating and cooling, thermomechanical hysteresis, the inertia of the mechanical system and electromechanical interaction with the generator, as well as to evaluate the energy characteristics of the power generation plant. A three-level approach to modelling is proposed, including an analytical quasi-static model for engineering estimates, a quasi-stationary moment balance model for determining steady states, and a complete dynamic system of differential equations that takes into account non-stationary heat transfer, phase kinetics, and inertial effects. Numerical integration was performed in Python using fourth- and fifth-order Runge–Kutta methods. The simulation results confirmed the adequacy of the proposed model and showed the formation of self-stabilised rotation modes and power saturation. It was found that simplified approaches provide a conservative estimate of energy performance, while the full dynamic model more accurately reproduces transient processes and real operating characteristics; the discrepancy between the models does not exceed 15–20%. The influence of the bilateral shape memory effect, which in the temperature range of 70–80 °C can increase electrical power by 20–30 %, was investigated. The expediency of partial immersion of SMA elements in the coolant to ensure stable cyclic heat exchange was demonstrated. The results obtained confirm the prospects of using SMA engines for the utilisation of low-potential heat and the creation of compact autonomous systems for small-scale electricity generation. References 20, figures 7.*

Keywords: shape memory alloys, heat engine, electricity generation.

1. Kozyrskyi V., Bunko V. Experimental Studies of Elements from the Functional Intermetallic Cu-Al-Mn for Construction of a Heat Engine and Power Plant. *Problems of the Regional Energetics*. 2025. No 3(67). Pp. 162-173. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.3-67.14>.
2. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. *Progress in Materials Science*. 2005. Vol. 50. Issue 5. Pp. 511-678. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.10.001>.
3. Lagoudas D.C. Shape Memory Alloys. New York, NY: Springer, 2008. 436 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47685-8>.
4. Md. Ismail Hossain, Rabbi M.S., Ali M.T. Shape memory alloys in modern engineering: progress, problems, and prospects. *RSC Advances*. 2025. Vol. 15. Issue 40. Pp. 33046-33100. DOI: <https://doi.org/10.1039/d5ra04560f>.
5. Prashant Kumar, Ravi Anant Kishore, Deepam Maurya, Colin J. Stewart, Reza Mirzaeifar, Eckhard Quandt, Shashank Priya. Shape memory alloy engine for high efficiency low-temperature gradient thermal to electrical conversion. *Applied Energy*. 2019. Vol. 251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.080>.
6. Wakjira J.F. The VT1 shape memory alloy heat engine design. *Virginia Tech*. 2001. 107 p. URL: <http://hdl.handle.net/10919/31196> (accessed at 10.01.2026)
7. Schiller E.H. Heat engine driven by shape memory alloys. *Virginia Tech*. 2002. 80 p. URL: <http://hdl.handle.net/10919/35185> (accessed at 10.01.2026)
8. Arthur Adeodato, Brenno T. Duarte, Luciana Loureiro S. Monteiro, Pedro Manuel C.L. Pacheco, Marcelo A. Savi. Synergistic use of piezoelectric and shape memory alloy elements for vibration-based energy harvesting. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. Vol. 194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106206>.
9. Ma J., Karaman I., Noebe R.D. High temperature shape memory alloys. *International Materials Reviews*. 2010. Vol. 55(5). Pp. 257-315. DOI: <https://doi.org/10.1179/095066010X12646898728363>.

10. Liping Kang, Hui Qian, Yuancheng Guo, Chenyang Ye, Zongao Li. Investigation of Mechanical Properties of Large Shape Memory Alloy Bars under Different Heat Treatments. *Materials*. 2020. Vol. 13(17). DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13173729>.
11. Zanolini C., Giuliani P., Chrysanthou A. Martensitic–Austenitic phase transformation of Ni–Ti SMAs: Thermal properties. *Intermetallics*. 2012. Vol. 24. Pp. 106-114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.01.026>.
12. Dong Sun, Shuyong Jiang, Peng Lin, Bingyao Yan, Hao Feng, Ming Tang, Yanqiu Zhang. High yield stress and narrow phase transformation hysteresis of thermomechanical-processing NiTiCu shape memory alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2024. Vol. 897. Article no 146340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146340>.
13. Abdelmoneim El Naggari, Maged A. Youssef. Shape memory alloy heat activation: State of the art review. *AIMS Materials Science*. 2020. Vol. 7(6). Pp. 836-858. DOI: <https://doi.org/10.3934/matersci.2020.6.836>.
14. Dong Cao, Chao Liu, Zhigang Yang, Sida Zhang. A power generation device based on shape memory alloy and piezoelectric ceramic. *Materials Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 301. Article no 127598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127598>.
15. Shadab Ahmad, Abdul Wahab Hashmi, Jashanpreet Singh, Kunal Arora, Yebing Tian, Faiz Iqbal, Mawaheb Al-Dossari, M. Ijaz Khan. Innovations in additive manufacturing of shape memory alloys: Alloys, microstructures, treatments, applications. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 32. Pp. 4136-4197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.213>.
16. H.M. Wasi Uddin, Qazi Riti Mahpara Progoti, Mahadesh Chandro Mondal, Shifat E. Arman, Sadit Bihongo Malitha. Adaptive nickel–titanium shape memory alloy for smart systems: Mechanisms, manufacturing, and applications across biomedical, aerospace, civil, and energy. *Materials Today Communications*. 2026. Vol. 50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.114564>.
17. Kozyrskyi V.V., Kaplun V.V., Voloshyn S.M. Functional intermetallics in power plants. Kyiv: *Kompynt*, 2021. 347 p.
18. Chikhareva M., Vaidyanathan R. A Thermal, Mechanical, and Materials Framework for a Shape Memory Alloy Heat Engine for Thermal Management. *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13(15). DOI: <https://doi.org/10.3390/nano13152159>.
19. Sivasanghari Karunakaran, Dayang Laila Abang Abdul Majid, Che Nor Aiza Jaafar, Muhammad Hussain Ismail, Husam Yahya Imran. Heating Techniques of Shape Memory Alloy (SMA) – A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2022. Vol. 99(2). Pp. 207-220. DOI: <https://doi.org/10.37934/arfm.99.2.207220>.
20. Adrian Petru Teodoru, Bogdan Pricop, Leandru-Gheorghe Bujoreanu. Development of an alternating heat engine, actuated by shape memory alloys. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 72. Part 2. Pp. 607-614. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.226>.

Надійшла 10.02.2026

Прийнята 16.02.2026