

DOI: 10.63527/1607-8829-2025-4-12-26

Тріфонов Д.М. (<https://orcid.org/0000-0001-9723-269X>),
Добровольський О.С. (<https://orcid.org/0000-0003-0048-1388>),
Романенко М.П. (<https://orcid.org/0009-0006-8366-6714>),
Марченко П.К. (<https://orcid.org/0009-0000-3870-2815>)

Національний транспортний університет,
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, Київ, 01010, Україна

Автор-кореспондент: Тріфонов Д.М., e-mail: d.trifonov@ntu.edu.ua

Термоелектрична система оптимізації температури повітря на впуску автомобіля TOYOTA PRIUS: моделювання та оцінка ефективності

У статті представлено комплексне дослідження застосування термоелектричних модулів для адаптивного двоспрямованого регулювання температури повітря на впуску бензинового двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) гібридного автомобіля Toyota Prius (XW30), що працює на бензоетанольному паливі. Проаналізовано вплив низьких температур навколишнього повітря на паливно-економічні та екологічні показники автомобіля, фізико-хімічні властивості біоетанолу, а також особливості гібридної енергетичної установки. На основі розрахунків необхідної кількості термоелектричних модулів запропоновано схему термоелектричної системи, що підтримує оптимальну температуру повітря на впуску автомобіля Toyota Prius з інтеграцією із системою рекуперації енергії гальмування. Наведено результати математичного моделювання роботи системи. Показано, що запропонована адаптивна термоелектрична система є перспективною технологією для підвищення ефективності та адаптації сучасних ДВЗ до використання альтернативних палив в умовах посилення екологічних вимог.

Ключові слова: гібридна енергетична установка, двигун внутрішнього згоряння, пуск та прогрівання холодного двигуна, температура повітря у впускному колекторі, термоелектричний модуль, адаптивне терморегулювання, бензоетанольне паливо, паливно-економічні та екологічні показники.

Вступ

Світ стоїть перед потрійним викликом: зростаючий попит на енергію, загострення екологічних проблем (зокрема, зміна клімату та забруднення повітря) та нестабільність

Цитування: Тріфонов Д.М., Добровольський О.С., Романенко М.П., Марченко П.К. (2025). Термоелектрична система оптимізації температури повітря на впуску автомобіля TOYOTA PRIUS: моделювання та оцінка ефективності. Термоелектрика, (4), 13–27. <https://doi.org/1607-8829-2025-4-12-26>

на ринках палива [1]. Транспортний сектор значною мірою залежить від ДВЗ, які є ключовим споживачем викопних видів палива та джерелом викидів забруднювальних речовин і парникових газів [2].

У цьому контексті пошук способів підвищення ефективності існуючих технологій, особливо бензинових ДВЗ, які залишаються домінуючими на легковому транспорті, набуває критичного значення.

Однією з перспективних стратегій є використання альтернативних палив, зокрема бензоетанольних сумішей [3, 4]. Біоетанол, отриманий з біомаси, пропонує потенціал зменшення викидів CO₂ та підвищення октанового числа палива. Однак його використання супроводжується певними технічними труднощами, головним чином пов'язаними з його випаровуваністю та високою теплою пароутворення.

Саме в цьому контексті перспективною є технологія підігріву повітря на впуску, яка при правильному застосуванні, особливо з бензоетанольними сумішами, може стати потужним каталізатором для поліпшення енергетичних, екологічних та паливно-економічних показників ДВЗ, перш за все при модернізації вживаних автомобілів в умовах експлуатації.

Використання термоелектричних модулів для прецизійного, швидкого та двоспрямованого управління температурою повітря на впуску ДВЗ дозволить суттєво оптимізувати процеси сумішоутворення, горіння та наповнення циліндрів двигуна при застосуванні бензоетанольного палива. Це, у свою чергу, призведе до комплексного підвищення енергетичної ефективності, паливної економічності та зниження викидів забруднювальних речовин, зокрема CO₂ у відпрацьованих газах. [5, 6]

Тому дослідження, присвячені вивченню впливу умов експлуатації автомобільних транспортних засобів із застосуванням альтернативних видів палива на їх експлуатаційні показники, є важливим науковим завданням, яке зумовлює можливість широкого впровадження альтернативних видів палива у майбутньому.

Аналіз попередніх досліджень

Як зазначалося раніше, застосування альтернативних видів палив, зокрема заміщення частини товарного бензину біоетанолом, яке, виходячи з особливостей фізико-хімічних властивостей, які відрізняються від властивостей бензину, вимагає додаткових технічних рішень для забезпечення поліпшення експлуатаційних характеристик ДВЗ у різних умовах експлуатації, таких як низькі або надвисокі температури навколишнього повітря (рис. 1).

На основі аналізу отриманих даних для подальших розрахункових досліджень приймаємо за мінімальну температуру повітря на впуску – мінус 15 °С, за максимальну – +60 °С. (ураховано можливе підвищення температури в підкапотному просторі на 15...25 °С через інтенсивне тепловиділення ДВЗ). Оскільки оптимальна температура впускного повітря становить 30...40 °С, виникає потреба в її підтриманні в цьому діапазоні в різних режимах роботи ДВЗ. (рис. 2)

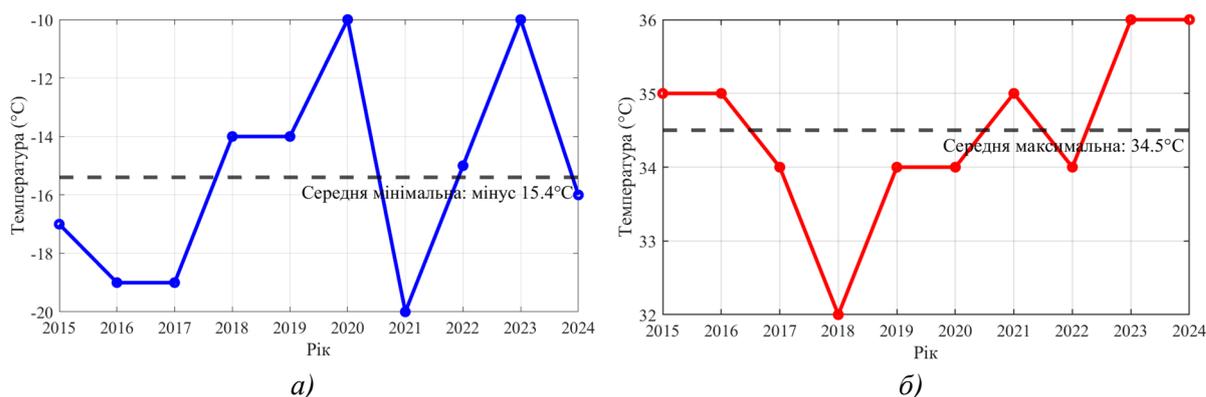


Рис. 1. Середні мінімальні (а) та максимальні температури (б) в м. Києві за період 2015–2024 років [7]

У разі використання бензоетанольних палив марки E40...E85 в автомобілі Toyota Prius (XW30) виявляються два основні виклики. Перший – ускладнений запуск холодного ДВЗ і подовжений час прогрівання через високу теплоту випаровування етанолу (844 кДж/кг проти 350 кДж/кг у бензині). Другий – детонаційні явища при максимальному навантаженні через підвищену температуру повітря на впуску. Використання сумішей E0...E20 практично не впливає на робочий процес ДВЗ [8].

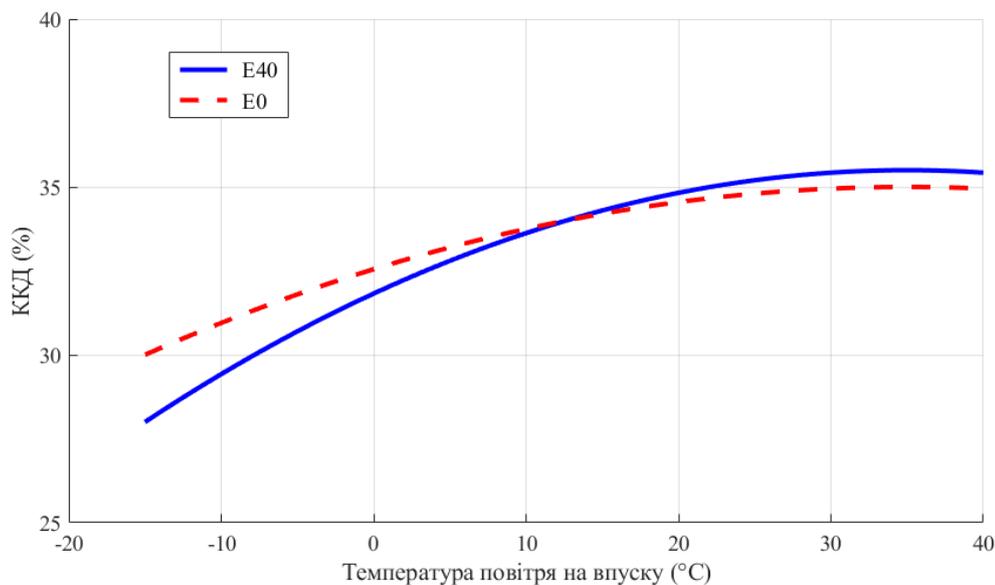


Рис. 2. Загальний ККД двигуна залежно від температури на впуску: E40 (60 % бензин + 40 % біоетанол), E0 (100 % бензин + 0 % біоетанол) (чисельне моделювання та візуалізацію результатів здійснено в середовищі MATLAB)

Виходячи з аналізу термодинамічних властивостей бензоетанольних сумішей, встановлено такі оптимальні середні температури повітря на впуску двигуна [9]:

1. В режимах пуску холодного двигуна збільшення температури до рівня +15 °C та прогріванні до +40 °C (компенсація теплоти пароутворення етанолу та зменшення механічних втрат).

2. В режимі максимальної потужності зменшення температури повітря до +40 °C

(підвищення коефіцієнта наповнення та запобігання можливості детонації).

Вибір конкретного методу підтримання цих температур залежить від конструктивних особливостей енергетичної установки автомобіля, умов експлуатації та економічної доцільності застосування того чи іншого методу [9–15].

Поширені методи терморегуляції повітря на впуску ДВЗ:

- штатна система рециркуляції відпрацьованих газів (Exhaust Gas Recirculation, EGR);
- електричний нагрівальний елемент (Positive Temperature Coefficient, PTC);
- тепловий акумулятор на основі матеріалів із фазовим переходом (Phase Change Material, PCM accumulator);
- адаптивний підігрівач повітряного фільтра;
- термоелектричний модуль.

Кожен із цих методів має свої переваги й обмеження з огляду на швидкість реакції, енергоефективність та складність впровадження.

За думкою авторів, найефективнішим технічним рішенням для застосування бензоетанольних сумішей є саме термоелектрична терморегуляція повітря на впуску. Вона дозволяє:

- забезпечити надійний пуск холодного ДВЗ і прискорення процесу відновлення його теплового режиму;
- скоротити час виходу каталітичного нейтралізатора (КН) на режим ефективного функціонування;
- при навантаженнях охолоджувати повітря до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, підвищуючи коефіцієнт наповнення, детонаційний запас та знижуючи викиди NO_x .

На основі аналізу конструктивних особливостей гібридного автомобіля *Toyota Prius* (XW30) умов його експлуатації в м. Київ, а також вартості модифікації системи паливоподачі та дообладнання двигуна з метою максимізації ефективності застосування бензоетанольного палива пропонується встановлення термоелектричних модулів як додаткового обладнання для підтримання оптимальної температури повітря на впуску.

Найбільш значущі переваги термоелектричних модулів [9]:

- компактні масо-габаритні розміри, що дозволяють інтегрувати їх у обмежені простори підкапотного відсіку;
- відсутність рухомих частин, мінімальні вимоги до технічного обслуговування;
- висока швидкість нагріву та охолодження при достатньо низькому енергоспоживанні, що забезпечує оперативну реакцію на зміну режимів роботи ДВЗ;
- висока енергоефективність, що сприяє загальному підвищенню паливної економічності автомобіля та продовженню терміну служби акумуляторної батареї (АБ)

З огляду на вищевикладене, термоелектричні модулі поєднують простоту інтеграції з високою гнучкістю регулювання температури повітря на впуску, що робить їх оптимальним рішенням для адаптації автомобіля *Toyota Prius* до роботи на бензоетанольних сумішах.

Гібридна енергетична установка автомобіля *Toyota Prius* має унікальні можливості

для інтеграції термоелектричних систем:

- високовольтна шина (напруга тягової АБ становить 201.6 В);
- можливість рекуперації енергії гальмування – енергія, витрачена, наприклад, на розгін автомобіля від 0 до 60 км/год, може бути частково відновлена під час гальмування. Обсяг відновленої енергії може становити близько 0.02...0.035 кВт·год електричної енергії, яка надалі акумулюється в модулі електрохімічних конденсаторів;
- зменшення навантаження на високовольтну АБ, в режимі пуску холодного ДВЗ застосуванням модуля електрохімічних конденсаторів;
- інтелектуальне управління через CAN-інтерфейс.

Застосування термоелектричних модулів часто дозволяє отримати просте рішення складних технічних задач управління тепловою енергією і забезпечує суттєві переваги перед альтернативними технологіями (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння з альтернативними технологіями [9–11]

Параметр	Термоелектричні модулі	Електричний РТС-нагрівач	Охолоджувач (інтеркулер)
Швидкість відгуку, с	<1	1...3	>10
Енергоефективність, %	60...70	30...40	–
Масо-габаритні розміри	дуже компактні	складніше інтегруються	вимагає значного простору
Техобслуговування	мінімальне	мінімальне	періодична заміна рідини, чистка
Інтелектуальне керування	через CAN-шину, PID- алгоритми	спрощене реле	без активного керування

Результати дослідження

Зважаючи на вимоги щодо мінімізації втручання в конструкцію ДВЗ та систем, що забезпечують його роботу, а також сучасні технологічні рішення, авторами на основі раніше розробленої термоелектричної системи [9, 16] запропоновано схему із модулем електрохімічних конденсаторів (рис. 3). Розроблена система забезпечує поліпшення експлуатаційних характеристик гібридного автомобіля в умовах екстремальних температур навколишнього повітря шляхом автоматизованого підтримання оптимальної температури повітря на впуску.

Розробка враховує особливості конструкції гібридної енергетичної установки та передбачає використання модуля електрохімічних конденсаторів, який, акумулюючи електричну енергію під час гальмування, живить термоелектричні модулі в таких режимах:

1. пуск холодного двигуна;
2. прогрів двигуна;
3. робота на максимальних навантаженнях.

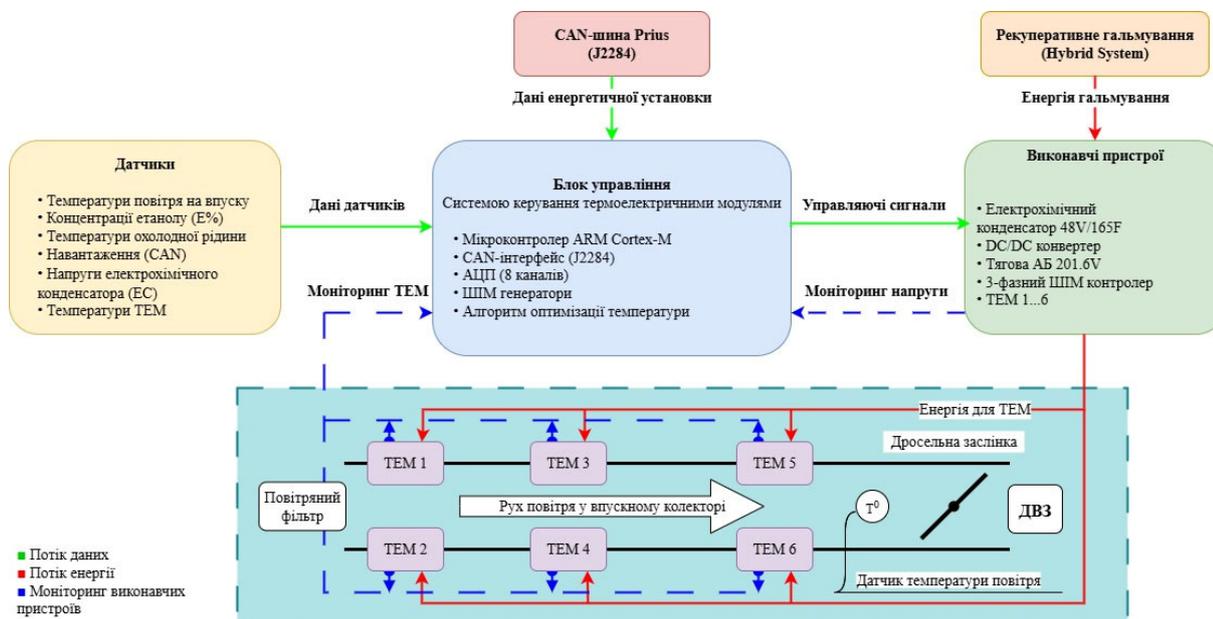


Рис. 3. Запропонована схема термоелектричної системи

Для проведення розрахункових досліджень визначено вихідні дані (табл. 2):

1. Автомобіль *Toyota Prius* (XW30), гібридна енергетична установка THS-II (*Toyota Hybrid System II*), бензиновий двигун 2ZR-FXE, об'єм 1.8 л [17,18].
2. Бензоетанольне паливо марки E40 (60 % бензин + 40 % біоетанолу). Використання марки E85 потребує глибшої модернізації енергетичної установки через підвищену агресивність етанолу щодо гуми й алюмінію та вимагає частіших діагностичних перевірок ДВЗ.

Таблиця 2

Вихідні дані для подальших розрахунків

Режим роботи ДВЗ	Оберти колінчастого валу, хв ⁻¹	Тривалість, с	Зміна температури, °С
Холодний пуск	250	5	збільшення на 30
Прогрів	900	300	збільшення на 55
Максимальна потужність	5200	30	зменшення на 20

3. Режими роботи ДВЗ:

- пуск холодного двигуна: до 5 с.;
- прогрів: до 300 с. (до досягнення температури охолоджувальної рідини близько 70 °С);
- максимальна потужність: до 30 с.

4. Зміни температури, ΔT (°C) – різниця між кінцевою та початковою температурами у вказаних режимах роботи ДВЗ:

- пуску: нагрівання $\Delta T = 30^\circ$ (від мінус 15°C до $+15^\circ\text{C}$);
- прогрівання: нагрівання $\Delta T = 55^\circ$ (від мінус 15°C до $+40^\circ\text{C}$);
- максимальна потужність: охолодження $\Delta T = 20^\circ$ (від $+60^\circ\text{C}$ до $+40^\circ\text{C}$).

Подальшу обробку даних, статистичний аналіз, чисельне моделювання та візуалізацію результатів (графіки, діаграми) здійснено в середовищі MATLAB із використанням його вбудованих програмних і обчислювальних можливостей.

Під час проведення розрахункових досліджень у середовищі MATLAB не враховувалися такі чинники:

1. теплові втрати в трубопроводах;
2. динаміка зміни відносної вологості повітря;
3. вплив висоти над рівнем моря;
4. експлуатаційні характеристики повітряного фільтра;
5. втрати тиску на впуску.

За результатами розрахунків отримано такі дані (табл. 3).

Таблиця 3

Розрахункова кількість ТЕМ, необхідна для стабілізації температури повітря на впуску в умовах змінних режимів роботи ДВЗ

Режим роботи ДВЗ	Об'ємна витрата повітря, Q_v , м ³ /с	Масова витрата повітря, Q_m , кг/с	Сумарна витрата повітря, кг	Теплова потужність $P_{heat/cool}$, Вт	Теплова енергія E_{heat} , кДж	Електрична потужність ТЕМ з урахуванням COP,	Кількість ТЕМ
Холодний пуск	0.003 2	0.004 3	0.006 6	нагрів 129.7	нагрів 0.7	185.3	1
Прогрів	0.009 7	0.013	1.37	нагрів 725.0	нагрів 217.5	1035.7	4
Максимальна потужність	0.067	0.07	2.16	охолодження 1413.0	охолодження 42.4	2826.1	6

На підставі проведеного аналізу особливостей гібридної енергетичної установки, фізико-хімічних властивостей біоетанолу та сучасних термоелектричних модулів [17–20] визначено критерії вибору ТЕМ для системи підтримання оптимальної температури повітря у впускному колекторі гібридного автомобіля Toyota Prius (табл. 4). Також окреслено можливі варіанти ТЕМ для застосування в обраному автомобілі (табл. 5).

Таблиця 4

Критерії вибору термоелектричного модуля для системи стабілізації температури повітря на впуску та рекомендовані значення його параметрів

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
1	2	3
Масо-габаритні розміри	мм	компактні, придатні для інтеграції у впускний колектор
Робоча напруга, U	В	36...48
Максимальний струм, I	А	15
Теплопродуктивність, Q_h	Вт	600...800 (при $\Delta T = 0\text{ }^\circ\text{C}$)
Холодопродуктивність, Q_c	Вт	300...500 (при $\Delta T = 0\text{ }^\circ\text{C}$)
Максимальна ΔT між сторонами	$^\circ\text{C}$	≥ 60
Температурний діапазон	$^\circ\text{C}$	мінус 30...+85
Споживана потужність	Вт	180
Коефіцієнт енергоефективності (COP)		
- нагрівання:	-	> 0.7
- охолодження:	-	> 0.5
1	2	3
Механічна стійкість та надійність		
- вібростійкість:	-	$\geq 5g$ (ISO 16750-3).
- герметизація:		захист від вологи та пилу (IP67)
Матеріали:		
- корпус:	-	анодований алюміній
- елементи:		Bi_2Te_3
- ізоляція:		керамічна підкладка
Сумісність з керуванням		
- ПД-регулятори:	-	інтеграція з CAN-шиною автомобіля для адаптивного ШІМ.
- датчики:		підтримка термопар типу К або цифрових сенсорів (DS18B20).
Термін служби	годин	висока циклічна стійкість (понад 50000 циклів)

Таблиця 5

Можливі варіанти термоелектричних модулів [19, 20]

Типи модулів*	$T_h, \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$	$Q_{max}, \text{ Вт}$	$U_{max}, \text{ В}$	$I_{max}, \text{ А}$	$T_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$
Altec-СМ-1-Р-ІЕІU	27	70...74	45...205	30.8...225	0.005...5.7	150...200
TEC1-28826	30	68	524.16	34.92	26	150...200

*Спеціальні з підвищеною ефективністю та підвищеною робочою напругою

Математичне моделювання у середовищі MATLAB було проведено з метою визначення впливу температури повітря на впуску на основні параметри роботи двигуна Toyota Prius 2ZR-FXE на паливі E40 у режимі прогріву. Розрахунки показали такі значення ключових показників.

1. Вплив на якість паливно-повітряної суміші. (табл. 6)

Таблиця 6

Вплив підвищення температури повітря на впуску на якість паливно-повітряної суміші в режимі прогріву

Параметр	Температури повітря на впуску	
	мінус 15 °С	+ 40 °С
Ступінь випаровування E40	60...70%	95...98%
Швидкість фронту полум'я, v	25 м/с	35 м/с
Коефіцієнт надлишку повітря, λ	0.85...0.95	0.98 ± 0.02

2. Вплив на насосні втрати внаслідок зміни кута відкриття дросельної заслінки (табл. 7, рис. 4).

Таблиця 7

Насосні втрати двигуна 2ZR-FXE при використанні палива марок E0 і E40 в межах температур на впуску мінус 15 °С...+40 °С

Температура на впуску, °С	Кут відкриття дросельної заслінки, %		Насосні втрати, кВт	
	E40	E0	E40	E0
-15	13.0	10.2	3.441	3.464
0	15.0	12.0	3.421	3.450
15	18.3	14.7	3.382	3.424
25	20.3	17.0	3.356	3.399
40	21.4	21.2	3.340	3.343

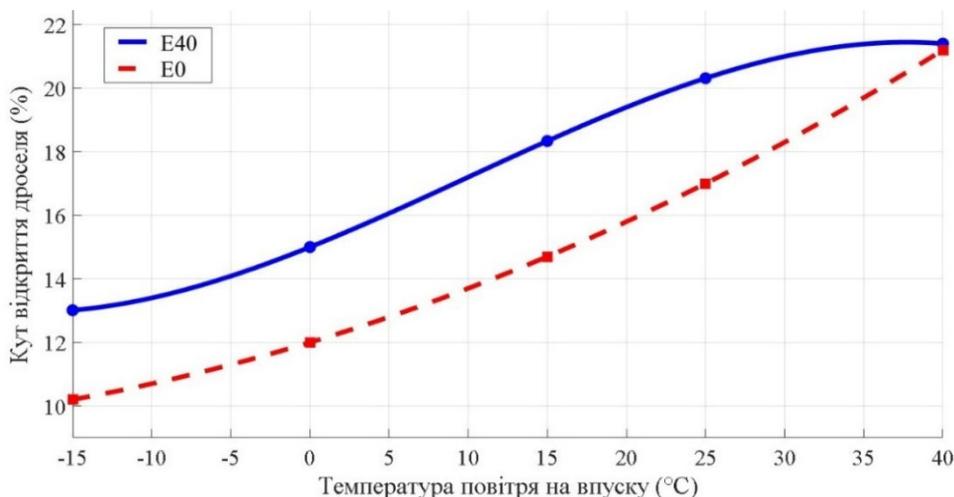


Рис. 4. Кут відкриття дросельної заслінки в залежності від температури на впуску

Підігрів повітря на впуску до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ при використанні палива марки Е40 може забезпечити зниження насосних втрат на 0.101 кВт (2.94%).

3. Вплив на час та швидкість прогрівання двигуна та динаміку зміни температури охолоджуючої рідини. (рис. 5)

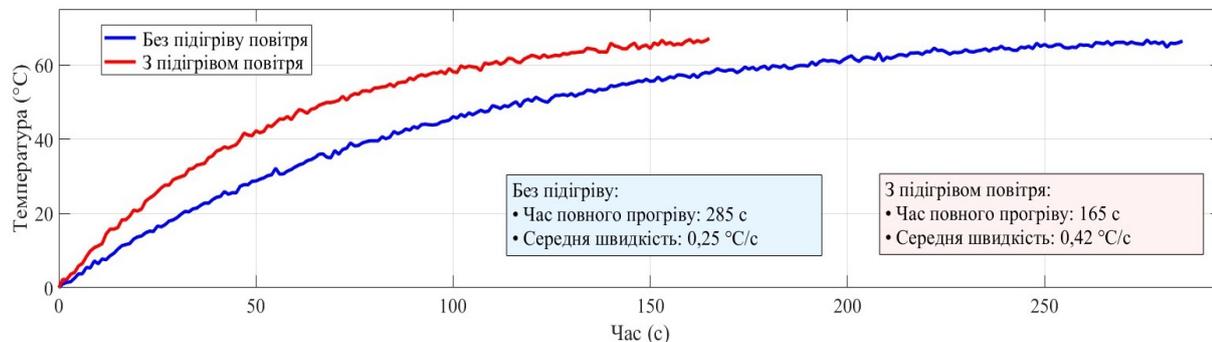


Рис. 5. Динаміка зміни температури охолоджуючої рідини

Підігрів повітря на впуску до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ при використанні палива марки Е40 може забезпечити збільшення середньої швидкості прогріву ДВЗ на $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ (68%) та скорочення загального часу прогріву від початкової температури $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до цільової $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 120 с (42%).

4. Вплив на динаміку витрати палива під час прогріву двигуна (рис. 6)

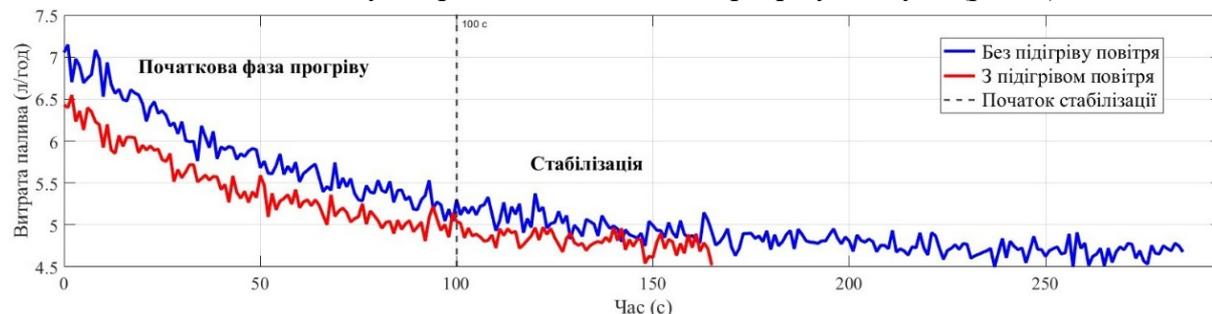


Рис. 6. Динаміка витрати палива під час прогріву двигуна 2ZR-FXE

Загальна витрата палива за прогрів:

- без підігріву повітря 317.40 г ;
- з підігрівом повітря 183.79 г .

Економія палива завдяки підігріву:

- абсолютна економія 133.61 г ;
- відносна економія 42.1% .

5. Вплив на викиди забруднювальних речовин, у тому числі CO_2 , з відпрацьованими газами ДВЗ (табл. 8, рис. 7).

Подальші дослідження планується зосередити на поєднанні моделювання, експериментальної перевірки та оптимізації конструктивних і алгоритмічних рішень адаптивної термоелектричної системи.

Передбачено проведення теплотехнічного моделювання впускного тракту з урахуванням аеродинамічних і теплових втрат, впливу вологості, конденсації, обмерзання та зміни щільності повітря для оцінки ефективності теплообміну.

Планується створення карт коефіцієнта енергетичної ефективності (COP) термоелектричних модулів залежно від перепаду температур, теплового навантаження та режимів живлення з метою оптимізації керування. На алгоритмічному рівні передбачається впровадження прогнозних стратегій на основі даних CAN-інтерфейсу та параметрів руху для адаптивного регулювання температури повітря на впуску залежно від навантаження, температури навколишнього повітря, стану заряду модуля електрохімічних конденсаторів та тягової АБ.

Таблиця 8

Викиди забруднювальних речовин і очікувана ефективність від підвищення температури повітря на впуску в режимі прогріву двигуна 2ZR-FXE при роботі на паливі марки E40

Речовина	Температура на впуску		Очікувані результати впровадження запропонованого методу	
	мінус 15 °С	+40 °С	Зменшення викидів	Ефективність, %
CO ₂ , г/(кВт·год)	950.0	780.0	170.0	17.9
CO, г/(кВт·год)	18.5	9.8	8.7	47.0
NO _x , г/(кВт·год)	8.2	5.5	2.7	32.9
C _m H _n , г/(кВт·год)	3.1	1.7	1.4	45.2

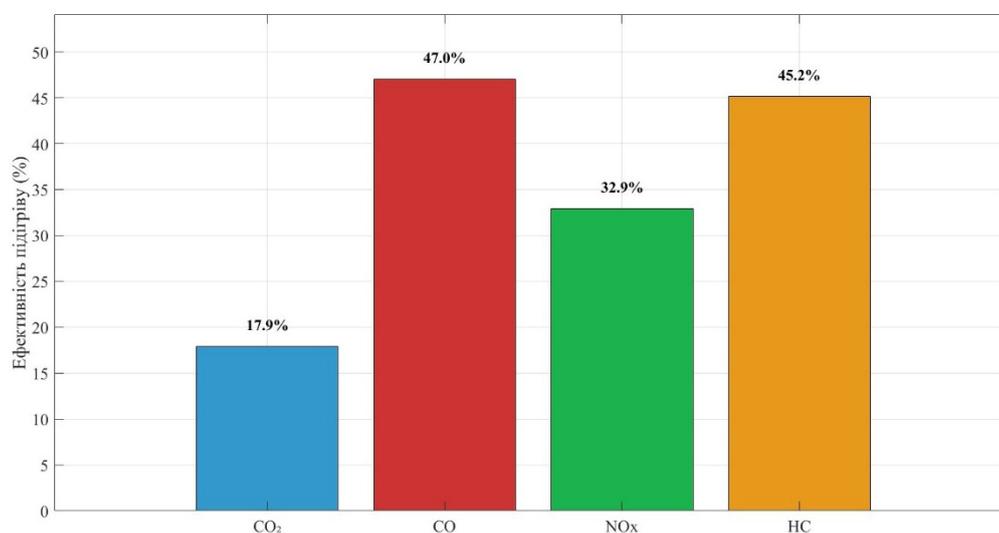


Рис. 7. Ефективність підігріву повітря на впуску

Експериментальна частина досліджень включатиме стендові та дорожні випробування у різних кліматичних умовах, зокрема в міських зимових циклах із частими холодними пусками, а також оцінку надійності ТЕМ (вібраційну стійкість, термоциклювання, герметичність, стійкість до агресивних середовищ). Заплановано проведення аналізу життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) та економічної ефективності впровадження системи, включаючи оцінку викидів CO₂ за підходом «від джерела до коліс» (Well-to-Wheel, WTW) та розрахунок терміну її окупності.

Висновки

1. У роботі досліджено можливості підвищення ефективності застосування бензоетанольних паливних сумішей у гібридних автомобілях на прикладі *Toyota Prius* шляхом інтеграції термоелектричної системи підігріву повітря на впуску. Це має важливе значення для зменшення залежності автомобільного транспорту від викопних видів палива та зниження негативного впливу на довкілля.
2. Встановлено, що термоелектричні модулі є перспективною технологією для автомобільної промисловості, здатною підвищити енергоефективність та екологічні показники. Запропонована система підігріву повітря на впуску забезпечує оптимізацію теплового режиму двигуна при роботі на бензоетанольних сумішах, що дозволяє компенсувати їхні недоліки, пов'язані з випаровуваністю та високою теплою пароутворення.
3. Реалізація адаптивного терморегулювання повітря на впуску в гібридних автомобілях сприяє підвищенню паливної економічності, зниженню викидів забруднювальних речовин та розширенню можливостей використання вуглецево-нейтральних біоетанольних палив у різних умовах експлуатації.
4. Математичне моделювання режиму прогріву в середовищі MATLAB для двигуна *Toyota Prius 2ZR-FXE* при використанні палива E40 показало такі результати:
 - скорочення часу відновлення теплового режиму на 42 %;
 - збільшення середньої швидкості прогріву ДВЗ на 68 %;
 - підвищення паливної економічності на 42.1 %;
 - загальне зменшення викидів шкідливих речовин (CO , NO_x , C_mH_n) на 41.7 % та CO_2 на 17.9 %.
5. Перспективним є проведення експериментальних випробувань запропонованої системи в реальних умовах експлуатації, а також дослідження її ефективності для інших типів альтернативних палив і різних моделей гібридних та традиційних автомобілів.

Інформація про авторів

Трифонов Д.М. – Доцент кафедри двигунів та теплотехніки, кандидат технічних наук, доцент.

Добровольський О.С. – Професор кафедри двигунів та теплотехніки, кандидат технічних наук, доцент.

Романенко М.П. – Аспірант кафедри двигунів та теплотехніки.

Марченко П.К. – Аспірант кафедри двигунів та теплотехніки.

Література

1. Europe's Environment: The Seventh Pan-European Environmental Assessment – brochure [Electronic resource]// UNECE. – Access mode: <https://unece.org/environment-policy/publications/europes-environment-seventh-pan-european-environmental->

- assessment-2 (date of application: 29.08.2025).
2. New EU car registrations [Electronic resource] // ACEA. – 24.07.2025. – Access mode: <https://www.acea.auto/pc-registrations/new-car-registrations-1-9-in-h1-2025-battery-electric-15-6-market-share/> (date of application: 29.08.2025).
 3. Dandasena T., Shahi S. A Renewable Biofuel-Bioethanol: A Review // *Journal of Advanced Zoology*. – 2023. – Vol. 44, S3. – DOI: <https://doi.org/10.17762/jaz.v44iS3.2388> (date of application: 29.08.2025).
 4. Ovchynnikov D.V. Bioethanol as a motor fuel: advantages and disadvantages // *Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences»*. – 2017. – Issue 1 (37). – 300–307. – Access mode: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/37/300.pdf> (date of application: 29.08.2025).
 5. Dmitrichenko M., Gutarevych Y., Trifonov D., Syrota O., & Shuba E. (2021). On the prospects of using thermoelectric coolers to maintain optimal air temperature in the intake manifold of internal combustion engine for improving its performance characteristics. *Journal of Thermoelectricity*, (2), 89–96. DOI: <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2021-2-89-96>. (date of application: 29.08.2025).
 6. Gutarevich Yu.F., Shuba E.V., Syrota O.V., Trifonov D.M., Ovchinnikov D.V. The influence of air heating at the intake on the energy and environmental performance of a transport engine when operating on alcohol-containing gasoline at low temperatures. *Bulletin of the National Transport University. Series "Technical Sciences"*. Issue 3 (50). P. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-3-50-046-056> (date of application: 29.08.2025).
 7. Weather statistics. Climatic data by years and months [Electronic resource] // Meteopost. – Access mode: <https://meteopost.com/weather/climate/> (date of application: 29.08.2025).
 8. Qiu T., Zhao Y., Lei Y., Chen Z., Guo D., Shi F., Wang T. Experimental Research on Regulated and Unregulated Emissions from E20-Fuelled Vehicles and Hybrid Electric Vehicles // *Atmosphere*. – 2024. – Vol. 15, No. 6. – Article 669. – DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos15060669> (date of application: 29.08.2025).
 9. Dmytrychenko, M., Gutarevych, Y., Trifonov, D., Syrota, O., Shuba, E., & Kukhtyk, N. (2022). Use of a thermoelectric device to maintain optimal air temperature at the intake of a spark-ignition engine when operating on alcohol-containing gasoline. *Journal of Thermoelectricity*, (1), 55–63. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2022-1-55-63> (date of application: 29.08.2025).
 10. PTC Heating Technology // What is PTC? – Access mode: <https://www.industrial-eu.dbk-group.com/ptc-heating-technology> (date of application: 29.08.2025).
 11. Abramchuk F.I., Gutarevich Y.F., Dolganov K.E., Timchenko I.I. Automobile engines: a textbook for students of the specialty "Automobiles and the automotive industry" of higher educational institutions. – K.: Aristey, 2004. – 438 p. <https://drive.google.com/file/d/1YNV6osend12ePFREbEbVkf5uikyil4ma/view> (date of application: 29.08.2025).
 12. Trifonov D.M., Verbovsky V.S., Hrytsuk I.V. (2015). Use of a phase transition thermal accumulator to ensure cold engine start-up and its warming up by improving mixture

- formation. *Academic journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 3(45), 18–27. <https://journals.nupp.edu.ua/znп/article/view/172> (date of application: 29.08.2025).
13. Mykhailovsky V.Ya., Maksymuk M.V. (2015). Rational capacities of thermogenerators for pre-starting heaters of vehicles. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 65–74. http://jt-old.ite.cv.ua/jt/jt_2015_04_uk.pdf.
14. Maksymuk M.V. (2017). On the optimization of thermoelectric modules of an automobile pre-heater. *Journal of Thermoelectricity*, 1, 57–67. http://jt-old.ite.cv.ua/jt/jt_2017_01_uk.pdf (date of application: 29.08.2025).
15. Dmytrychenko M.F., Gutarevych Y.F., Trifonov D.M., Syrota O.V., Shuba E.V. (2018). On the prospects of using thermoelectric generators with the cold start system of an internal combustion engine with a thermal battery. *Journal of Thermoelectricity*. 4, 49–54. http://jt-old.ite.cv.ua/jt/jt_2018_04_uk.pdf (date of application: 29.08.2025).
16. System for starting a cold internal combustion engine and accelerating its thermal mode when using alcohol and alcohol-containing fuels: pat. 157973 Ukraine: MPK F02N 19/00 / Gutarevych Yu.F., Dobrovolskyi O.S., Trifonov D.M., Syrota O.V., Shuba E.V., Potemkin R.O., Marchenko P.K.; applicant and patent owner National Transport University. – No. u202409876; appl. 15.08.2024; publ. 18.12.2024, Bull. No. 51/2024.
17. Toyota Launches Third-generation Prius [Electronic resource] // Toyota Global Newsroom. – Access mode: <https://global.toyota/en/newsroom/toyota/22684821.html> (date of application: 29.08.2025).
18. Toyota 2ZR-FE/FAE/FXE 1.8L Engine Specs, Problems & Reliability [Electronic resource] // Ziptek Auto Parts. – Access mode: <https://ziptekautoparts.com/News/Toyota-2ZR-FE-FAE-FXE-1-8L-Engine-Specs-Problems-Reliability.html> (date of application: 29.08.2025).
19. Thermoelectric modules ALTEC [Electronic resource] // Institute of Thermoelectricity. – Access mode: http://ite.ite.cv.ua/wp-content/uploads/2021/12/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC.%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D0%B8_%D0%90%D0%BB%D1%82%D0%B5%D0%BA-%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D0%BB_ite.pdf (date of application: 29.08.2025).
20. TEC1-28826 [Electronic resource] // ZJCX Tech. – Access mode: <https://www.zjcxtech.com/products-item/tec1-288-series/> (date of application: 29.08.2025).

Submitted: 31.08.25

D. Trifonov (<https://orcid.org/0000-0001-9723-269X>),
O. Dobrovolskiy (<https://orcid.org/0000-0003-0048-1388>),
M. Romanenko (<https://orcid.org/0009-0006-8366-6714>),
P. Marchenko (<https://orcid.org/0009-0000-3870-2815>)

National transport university, 1 Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str.,
Kyiv, 01010, Ukraine

Thermoelectric System for Intake Air Temperature Optimization in Toyota Prius: Modeling and Efficiency Assessment

This study presents a comprehensive investigation into the application of thermoelectric modules for adaptive, bidirectional control of intake air temperature in the gasoline internal combustion engine (ICE) of a hybrid Toyota Prius (XW30) operating on gasoline–ethanol fuel blends. The research analyses the impact of low ambient temperatures on fuel economy and environmental performance when using bioethanol-based fuels, the physicochemical properties of bioethanol, and the operational characteristics of the hybrid powertrain. Based on the calculated number of thermoelectric modules required, a system design is proposed that integrates with the vehicle’s regenerative braking system to improve energy efficiency. Mathematical modelling results of the proposed thermoelectric system are presented, demonstrating its potential to enhance ICE adaptability to alternative fuels under varying environmental conditions. The findings indicate that such an adaptive thermoelectric system can contribute to improved fuel efficiency, reduced emissions, and compliance with increasingly stringent environmental regulations.

Keywords: hybrid powertrain; internal combustion engine (ICE); cold start and engine warm-up; intake air temperature; thermoelectric module (TEM); adaptive thermal management; gasoline–ethanol fuel; bioethanol; regenerative braking; fuel economy; environmental performance; alternative fuels; vehicle energy efficiency.

Надійшла до редакції 31.08.25