

ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СУМІШЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО І БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВ

Шпак Оксана., к.т.н., доц., Юхненко Вадим, магістр

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

Регіна Калпокайте-Дікувієне, Лабораторія дослідження та випробування матеріалів, Литовський енергетичний інститут, Литва

e-mail: oksana.i.shpak@lpnu.ua, vadym.yukhnenko.mavks.2024@lpnu.ua, Regina.Kalpokaite-Dickuviene@lei.lt

Анотація

Запропоновано нову методологію оптимізації складу суміші дизельного та біодизельного палива із застосуванням генетичного алгоритму, який визначає оптимальне відсоткове співвідношення компонентів. Основними складниками біопаливної суміші є дизельне паливо та біодизель, виготовлений на 100% із біоресурсів. Оцінювання отриманої суміші здійснювалося за допомогою функції придатності, що враховувала показник густини палива. Результати моделювання можуть бути корисними для подальшого виробництва та дослідження нових паливних сумішей, оскільки демонструють ефективність використання функціонального підходу порівняно з випадковими лабораторними експериментами.

Ключові слова: генетичний алгоритм; паливна суміш; біодизельне паливо, дизельне паливо.

1. Вступ

Постійне зростання попиту на паливо та обмежені запаси нафти спонукали науковців до пошуку відновлюваних і сталих джерел енергії, здатних замінити викопне паливо. Останнє має значний негативний вплив на довкілля, зокрема спричиняє глобальне потепління, зміну клімату, надмірні викиди парникових газів і вирубування лісів. Тому виникає потреба у використанні альтернативних, відновлюваних і біорозкладних видів палива, таких як біодизель.

Згідно з джерелом [1], зі зростанням світового попиту на паливо біодизель за останні десятиліття став однією з основних альтернатив традиційному дизельному паливу [2]. Його можна застосовувати у звичайних дизельних двигунах без необхідності внесення змін у систему подачі чи обробки палива. Біодизель відомий як ефективний заміник або добавка до дизельного палива, а виробляють його з жирів і олій рослинного або тваринного походження [3, 4].

Як зазначено у [5], зі зростанням глобального попиту на відновлювані джерела енергії біодизель, як екологічно чисте паливо, знаходить дедалі ширше застосування в різних галузях. Його можна безпосередньо використовувати як заміник або компонент суміші з нафтовим дизельним паливом. Біодизель активно застосовується в транспортній сфері, сільськогосподарській техніці, енергетичному обладнанні та інших секторах. Упродовж останніх років багато країн і регіонів підтримують виробництво та використання біодизеля шляхом упровадження політичних стимулів і нормативних вимог, спрямованих на зменшення залежності від викопного палива та скорочення викидів парникових газів [6–8].

2. Недоліки

Після зниження на 4,5% у 2020 році, спричиненого обмеженнями, пов'язаними з COVID-19, світове споживання енергії зросло на 5% у 2021 році. Вплив суспільного розвитку оцінювався на 3 пункти вище середнього показника 2% на рік за період 2000–2019 років [9]. Через скорочення поставок газу країною-агресором до Європи протягом останніх років, а також зростання світового попиту, ціни на енергоносії значно зросли. Історично викопне паливо було основою розвитку людства, але його широке використання створило серйозну глобальну проблему: традиційні джерела дизельного палива є обмеженими та, що критично, надзвичайно шкідливими для навколишнього середовища.

Ключовий недолік дизельного палива полягає у високих викидах парникових газів і токсичних речовин, які створюють екологічні ризики та обмежують його подальше прийняття суспільством. Через ці екологічні та ресурсні обмеження, а також на тлі зростання світового попиту та нестабільності поставок енергоносіїв, численні дослідницькі зусилля сьогодні зосереджені на підвищенні продуктивності складних паливно-енергетичних систем та оцінці альтернативних варіантів, зокрема біопалива. Сучасні вчені прагнуть запропонувати реальні, чистіші альтернативи, які можуть майже ідентично замінити традиційне дизельне паливо.

3. Мета

Метою цієї статті є розроблення спеціальної експериментальної методики, що дозволяє визначити оптимальний склад паливної суміші з найкращим показником густини.

4. Новий підхід у дослідженні

Новий підхід до оптимізації складу біодизельної суміші ґрунтується на використанні методів еволюційних обчислень. Для досягнення оптимального результату застосовано генетичний алгоритм. Генетичні

алгоритми (ГА), завдяки своїй здатності до глобального пошуку та ефективності в розв'язанні нелінійних, неопуклих і дискретних задач, широко використовуються в оптимізації різноманітних промислових процесів [10].

Зазначений алгоритм вирізняється високими прогностичними можливостями та точністю, що ставить його на один рівень із найефективнішими лабораторними методами, які застосовуються у виробництві біодизеля. Окрім цього, він формує оптимальну паливну суміш, враховуючи наявність сировини та різні параметри, необхідні для прогнозування найкращого складу палива. Використання генетичного алгоритму дало змогу запропонувати підхід, заснований на поєднанні стандартного дизельного палива з біодизелем, отриманим із рослинних олій. У межах дослідження було проведено низку експериментів, результати яких надали цінну інформацію про властивості обох компонентів паливної суміші.

У даному дослідженні проаналізовано залежність між густиною палива та відсотковим вмістом компонентів у оптимальних сумішах. Встановлено, що зі зростанням густини суміші підвищується як вихідна потужність двигуна, так і ефективність використання палива. Показник густини використовується як вхідний параметр у роботі генетичного алгоритму та під час проведення відповідних експериментальних моделювань.

Новий інструмент підтримки прийняття рішень стане корисним для лабораторних досліджень, сприяючи вдосконаленню оптимальних формул паливних сумішей. Генетичний алгоритм дозволяє швидко визначити найкращу комбінацію компонентів для експериментів серед великої кількості можливих варіантів. Такий підхід підвищує ефективність процесу виробництва палива, роблячи новий тип біодизеля більш конкурентоспроможним і привабливим порівняно з іншими видами палива.

5. Моделювання суміші біопалива.

Метою моделювання є оптимізація відсоткового співвідношення дизельного палива (ω_1) та біодизельного палива (ω_2) шляхом зваженого розрахунку, тобто наближення до мінімуму, узагальненого показника, який визначається на основі нормалізованих значень густини кожного компонента. Відповідно, функціональне значення паливної суміші ($TMFV$), матиме вигляд (1):

$$TMFV = \sum_{i=1}^2 (\omega_i \times \left(\frac{d_i}{d_{max}}\right)^4 \times p_i) \quad (1)$$

де: ω_i — ваговий коефіцієнт, призначений i -му паливу щоб додатково контролювати вплив кожного палива на функцію цілі; степінь 4 — це показник мінімізації $TMFV$, який виконує функцію посилення впливу відхилення густини від максимального значення. p_i — це відсотковий вміст (частка) дизельного палива або біодизельного палива у суміші, який являється змінною оптимізації.

Завдання оптимізації сировини полягає у зменшенні функціонального показника нової паливної суміш, тобто $TMFV \rightarrow \min$.

Задамо обмеження та вихідні дані для математичної моделі (1) оптимізації суміші дизельного та біодизельного палив, де $i = 1$ відповідає дизельному паливу, а $i = 2$ — біодизельному.

Для:

- $\min$ відсоток інгредієнта, % $\leq p_i \leq \max$ відсоток інгредієнта, %;
- $i = 1$: фактична густина чистого дизельного палива $d_1 = 0,8191$ г/см³ та обмеження на відсотковий вміст дизелю у суміші лежать в межах $1\% \leq p_i \leq 99\%$;
- $i = 2$: фактична густина чистого біодизельного палива $d_2 = 0,8855$ г/см³ та обмеження на відсотковий вміст біодизелю у суміші лежать в межах $1\% \leq p_i \leq 30\%$;
- ваговий коефіцієнт ω_i ($0\% \leq \omega \leq 100\%$), який надає вагомості критерію густини.

Густина компонентів: $d_1 = 0,8191$ г/см³ (дизельне паливо при 5°C) та $d_2 = 0,8855$ г/см³ (біодизель при 5°C), використовуються для розрахунку кінцевої густини суміші за формулою:

$$0,8191 \text{ г/см}^3 \times 75\% + 0,8855 \text{ г/см}^3 \times 25\% = 0,8357 \text{ г/см}^3.$$

Звідси виходить, що густина кінцевої суміші (B25) складає 0,8357 г/см³. Оскільки 0,8357 знаходиться в межах між густиною чистого дизельного палива (0,8191) і чистого біодизельного палива (0,8855). Відповідно розрахунок є фізично прийнятним і коректним для застосування у дизельних двигунах.

6. Алгоритм роботи генетичного алгоритму.

У роботі аналізується задача створення суміші біодизельного палива, яка розв'язується із застосуванням еволюційного підходу на основі ГА (рис. 1). Такі алгоритми поступово вдосконалюють хромосоми популяції протягом кількох поколінь, використовуючи механізми відбору, схрещування та мутації [11].

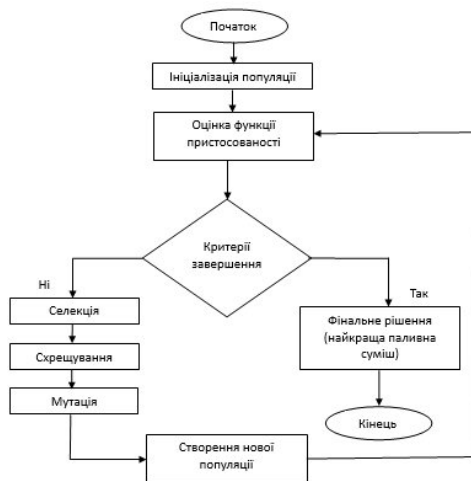


Рис.1. Блок-схема роботи генетичного алгоритму

Представлена блок-схема демонструє ітераційний процес багатокритеріальної оптимізації, побудований на принципах еволюційних обчислень ГА. Алгоритм спрямований на визначення оптимального складу паливної суміші з урахуванням множини технічних параметрів. Така алгоритмічна модель забезпечує ефективний пошук оптимальних рішень у багатовимірному просторі параметрів, беручи до уваги складні взаємозв'язки між властивостями паливної суміші, умовами експлуатації та техніко-економічними обмеженнями.

7. Генерація поколінь генетичного алгоритму.

7.1. Процес генерації поколінь. Структура генерації паливних сумішей полягає у створенні нового покоління, де кожне наступне покоління будується на основі попереднього з використанням різних стратегій оптимізації [11]. Процес генерації поколінь включає дві окремі фази. Спочатку перше покоління формується за допомогою випадкового створення життєздатних сумішей, згодом, на наступних фазах. Формування хромосом для поколінь відбувається за триетапним процесом.

Дана схема демонструє збалансовану стратегію "експлуатація-дослідження", тобто 10% припадає на збереження кращих рішень (елітне покоління), 60% – це інтенсивний локальний пошук навколо оптимуму та 30% – глобальне дослідження простору рішень. Така структура забезпечує ефективну конвергенцію алгоритму при збереженні здатності знаходити глобальний оптимум у складному багатовимірному просторі параметрів паливних сумішей.

Після створення початкової популяції впроваджується структура, що охоплює діапазон параметра оптимізації (*Integrated Particle Life Span*) $\pm IPLS$ (локальний пошук відсоткового вмісту інгредієнта, %) від найкращих відсотків хромосом. Така структура полегшує процес оптимізації, зосереджуючись на оптимальному рішенні навколо найкращої хромосоми з попереднього покоління. Кожне покоління випадковим чином вибирає нове значення *IPLS* у визначеному діапазоні. Запропонований метод орієнтований на первинну область розв'язання з попереднього покоління, отримуючи значення в діапазоні (2):

$$\{\min IPLS = 1\% : \max IPLS = \max InPer - (\min InPer + 1)\} \quad (2)$$

де *InPer* – відсотковий вміст інгредієнта; *Min (Max) Ingredient Percentage* – мінімальне (максимальне) значення відсоткового вмісту інгредієнта; *IPLS* – локальний пошук відсоткового вмісту інгредієнта, %; *Min IPLS, Max IPLS* – мінімальне та максимальне значення *IPLS* відповідно.

7.2. Співвідношення параметрів суміші. Ефективність запропонованої методології ГА оцінювалися за допомогою набору експериментів, класифікованих за температурами суміші: 5°C, 10°C, 15°C, 20°C та 25°C зосереджених на густині. У функції оцінювання TMFV значення вагомості ω_1 та ω_2 перевищує або дорівнює 50%.

Густина інгредієнтів становила 0,8191 г/см³ для дизельного палива та 0,8883 г/см³ для біодизельного палива із соняшникової олії при 5°C та 0,8891 г/см³ для біодизельного палива з ріпакової олії при 5°C та змінюється залежно від температури від 5 до 25°C (табл. 1).

Таблиця 1. Мінімальний та максимальний відносний склад суміші (%), густина

Температура палива	Min, %	Max, %	Густина, г/см ³
Дизельне паливо 5°C	1	99	0,8191
Біодизель (з соняшникової олії) 5°C	1	30	0,8883
Біодизель (з ріпакової олії) 5°C	1	30	0,8891
Дизельне паливо 10°C	1	99	0,8206

Біодизель (з соняшникової олії) 10°C	1	30	0,8835
Біодизель (з ріпакової олії) 10°C	1	30	0,8855
Дизельне паливо 15°C	1	99	0,8220
Біодизель (з соняшникової олії) 15°C	1	30	0,8815
Біодизель (з ріпакової олії) 15°C	1	30	0,8821
Дизельне паливо 20°C	1	99	0,8234
Біодизель (з соняшникової олії) 20°C	1	30	0,8774
Біодизель (з ріпакової олії) 20°C	1	30	0,8785
Дизельне паливо 25°C	1	99	0,8249
Біодизель (з соняшникової олії) 25°C	1	30	0,8726
Біодизель (з ріпакової олії) 25°C	1	30	0,8755

При температурному діапазоні: 5 - 25°C з кроком 5°C густина дизельного палива коливається в межах 0,8191 - 0,8249 г/см³, біодизельного палива із соняшникової олії – 0,8883 - 0,8726 г/см³, а біодизельного палива з ріпакової олії – 0,8891 - 0,8755 г/см³.

Загальні показники густини біодизеля з ріпакової та соняшникової олій наведені у табл. 2.

Таблиця 2. Загальні показники густини біодизеля з ріпакової та соняшникової олій

Тип сировини	Густина (кг/м ³)	Температура вимірювання	Стандарт/Примітки
Норма для біодизеля	860–900	Різна (зазвичай 15°C або 20°C)	Українські та європейські стандарти (наприклад, EN 14214 вимагає 900 кг/м ³ при 15°C).
Ріпаковий біодизель	860–900	15°C або 20°C	Ріпакова олія є однією з найбільш поширених основ для біодизеля в Європі.
Соняшниковий біодизель	≈876	20°C	Фактичний показник, отриманий у лабораторних умовах.

Виходячи з порівняльного аналізу фізико-хімічних властивостей, зокрема густини, встановлено, що біодизель отриманий з ріпакової олії (RME) та соняшникової олії (SME), демонструють практично ідентичні значення в робочому діапазоні температур. Ці значення відповідають встановленим нормативним вимогам для біодизельного палива (FAME). З огляду на схожу густину RME та SME, а також для оптимізації дослідницького процесу, подальші дослідження будуть зосереджені виключно на ріпаковому біодизелі як репрезентативному об'єкті.

8. Результати експерименту

Проведені випробування для оцінки ефективності запропонованого генетичного алгоритму включало значну кількість незалежних симуляцій для певної температури та різних комбінацій вагових коефіцієнтів (ω_1 та ω_2). у табл. 3 представлені експериментальні результати для діапазону температур від 5°C до 25°C, де кожний стовпець містить інформацію про: комбінацію вагових коефіцієнтів ω_1 та ω_2 , інгредієнт дизельного палива у відсотках (%) у суміші, відсоток інгредієнта біодизельного палива у суміші (%), значення функції оцінки суміші *TMFV* та густину суміші.

Таблиця 3. Експерименти густин сумішей для діапазону температур 5°C – 25°C

Температура палива	ω_1 та ω_2	Дизель, %	Біодизель, %	TMFV	Густина, г/см ³
5 °C	50% / 50%	75,00%	25,00%	-0,0771	0,8340
	60% / 40%	74,99%	25,01%	-0,2267	0,8355
	70% / 30%	74,98%	25,02%	-0,4167	0,8358
	80% / 20%	74,97%	25,03%	-0,6378	0,8366
	90% / 10%	74,95%	25,05%	-0,8451	0,8379
10 °C	50% / 50%	75,01%	24,99%	-0,0727	0,8349
	60% / 40%	74,99%	25,01%	-0,2588	0,8357
	70% / 30%	74,96%	25,04%	-0,4506	0,8364
	80% / 20%	74,96%	25,04%	-0,6428	0,8378
	90% / 10%	74,93%	25,07%	-0,8322	0,8381
15 °C	50% / 50%	75,00%	25,00%	-0,0715	0,8356

	60% / 40%	74,98%	25,02%	-0,2684	0,8361
	70% / 30%	74,97%	25,03%	-0,4754	0,8369
	80% / 20%	74,94%	25,06%	-0,6682	0,8380
	90% / 10%	74,92%	25,08%	-0,8481	0,8384
20 °C	50% / 50%	75,01%	24,99%	-0,0704	0,8367
	60% / 40%	74,99%	25,01%	-0,2791	0,8373
	70% / 30%	74,96%	25,04%	-0,4984	0,8379
	80% / 20%	74,96%	25,07%	-0,6709	0,8386
	90% / 10%	74,93%	25,09%	-0,8687	0,8390
25 °C	50% / 50%	75,02%	24,98%	-0,0681	0,8371
	60% / 40%	75,00%	25,00%	-0,2981	0,8375
	70% / 30%	74,96%	25,04%	-0,5603	0,8382
	80% / 20%	74,92%	25,08%	-0,6991	0,8389
	90% / 10%	74,88%	25,12%	-0,8852	0,8397

Вагові коефіцієнти ω_1 та ω_2 завжди в сумі дорівнюють 100%. Відсоток інгредієнтів дизельного палива коливається від 74,89% до 75,02%, а відсоток інгредієнтів біодизельного палива становить 24,98 – 25,12 %. Значення функції оцінювання $TMFV$ коливаються в межах від -0,8852 до -0,0681 та негативно підкреслює критерій густини. $TMFV$ за вказаних температур є від'ємними, але близькими до 0 (особливо при $\omega_1=50\%$ та $\omega_2=50\%$ при різних значеннях температур), що призводить до нейтральної оцінки критерію.

Діапазон значень критерію густини, які коливаються в межах від 0,8340 г/см³ до 0,8397 г/см³, відповідає обмеженням міжнародного стандарту ASTM D1298-99: 0,8200 г/см³ – 0,8450 г/см³.

Оптимальна суміш за температури 20 °C, коли $\omega_1=10\%$, $\omega_2=90\%$: відсоток дизельного палива: 74,88%; відсоток біодизельного палива: 25,12%; $TMFV$: -0,8852; густина суміші: 0,8397 г/см³.

У серії з 1000 незалежних випробувань найнижче зареєстроване значення загальної функції суміші ($TMFV$) становило -0,8852, тоді як найвище досягнуте значення $TMFV$ становило -0,8753. Різниця між мінімальним і максимальним значеннями $TMFV$ становить 0,0099. Тим часом середнє значення $TMFV$ у всіх випробуваннях становить -0,8802 зі стандартним відхиленням 0,0018 (рис. 5 (a)).

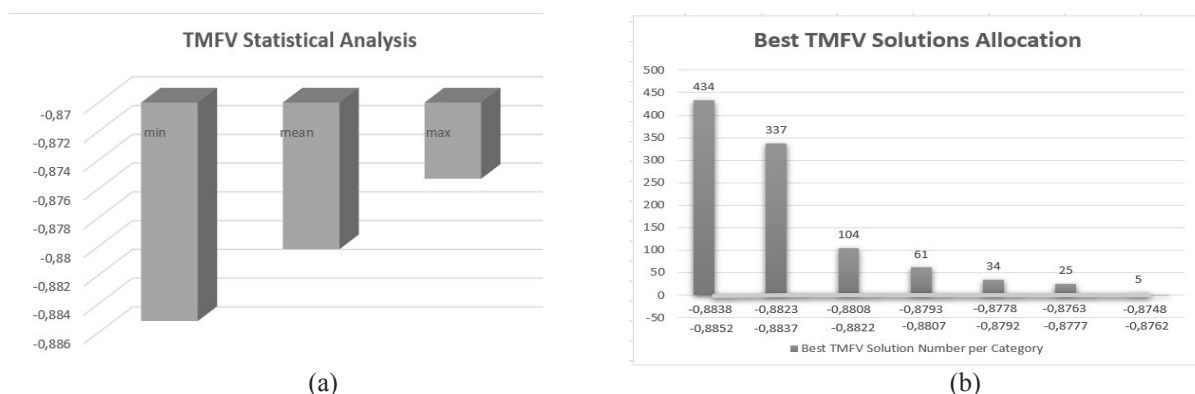


Рис. 5. (a) - статистичний аналіз $TMFV$, (b) - розподіл найкращих рішень $TMFV$.

Ефективність методу проілюстровано на рис. 5 (b), де більшість оптимальних рішень, яка становить 936 сумішей, знаходяться в діапазоні від -0,8852 до -0,8793 $TMFV$ (де -0,8852 є мінімальним $TMFV$). Виходячи з розподілу найкращих рішень, лише 64 суміші (6,4%) мали значення між -0,8792 та -0,8748 (максимальне $TMFV$ суміші -0,8753).

Щодо густини суміші представлений у табл. 5, то мінімальна густина суміші становить 0,8397 г/см³, а максимальна густина суміші – 0,8442 г/см³ у запропонованих 1000 окремих випробувань. Середня густина суміші становить 0,8422 г/см³ зі стандартним відхиленням 0,0045, з різницею 0,0029 між мінімальною та максимальною густинами (рис. 6 (a)).

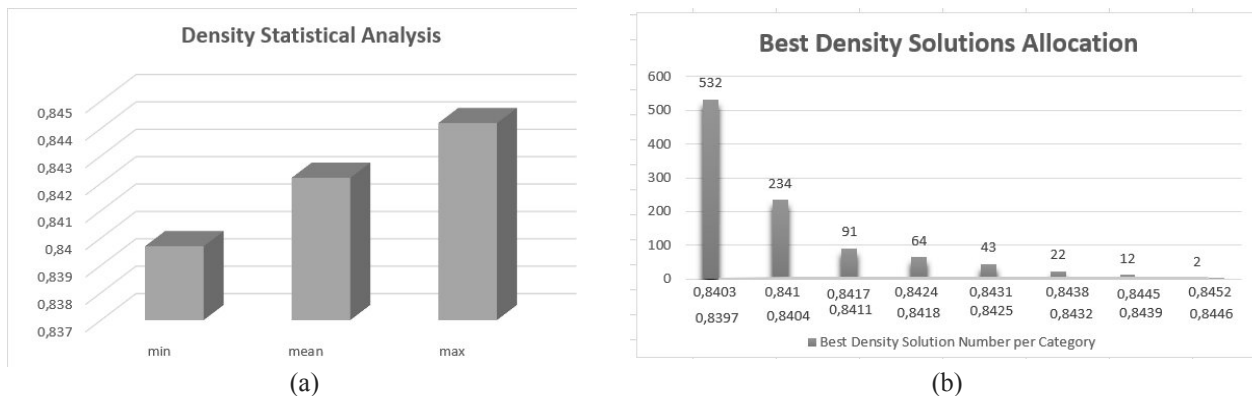


Рис. 6. (а) статистичний аналіз густини та (б) розподіл найкращих рішень для густини.

Розподіл сумішей з найкращою густиною представлено на рис. 6 (б). Більшість найкращих сумішей - 921, знаходяться в межах між 0,8397 г/см³ та 0,8424 г/см³ (мінімальна густина суміші 0,8397 г/см³), порівняно із загальною кількістю 79, які були між 0,8425 г/см³ та 0,8452 г/см³ (максимальна густина суміші 0,8431 г/см³).

Висновки

Таким чином, розроблення нового методу виробництва біодизеля з використанням дизельного та біодизельного палива за допомогою генетичного алгоритму (ГА) засвідчує що:

1. оптимізація сумішей проводилась ітераційними експериментами при температурах 5 – 25°C;
2. відсотковий вміст компонентів визначався через коефіцієнти ω_1 та ω_2 , що відображають пріоритет кожного палива у суміші;
3. досягнуто мінімізації витрат і тривалості виробництва;
4. отримано екологічно чисті та конкурентоспроможні суміші біодизеля;

Еволюційний підхід ГА демонструє свою здатність адекватно вирішувати складні проблеми паливних сумішей і може бути рекомендований як придатний та ефективний підхід для вирішення нових проблем виробництва біодизельного палива.

Перспективи

- Подальший розвиток ГА та дослідження додаткових факторів для підвищення якості палива.
- Можливість застосування технології до інших компонентних сумішей біодизелю.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність фінансових чи інших потенційних конфліктів інтересів щодо цієї роботи.

Посилання

1. Marina Corral Bobadilla, Roberto Fernández Martínez, Rubén Lostado Lorza, Fátima Somovilla Gómez, Eliseo P. Vergara González Optimizing Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Genetic Algorithm-Based Support Vector Machines. // URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/2995/>. Energies 2018, 11(11), 2995; <https://doi.org/10.3390/en11112995/>
2. Lopes, M.V.; Barradas Filho, A.O.; Barros, A.K.; Viegas, I.M.A.; Silva, L.C.O.; Marques, E.P.; Marques, A.L.B. Attesting compliance of biodiesel quality using composition data and classification methods. Neural Comput. Appl. 2017, 1–13. [Google Scholar] [CrossRef]
3. Betiku, E.; Okunsolawo, S.S.; Ajala, S.O.; Odedele, O.S. Performance evaluation of artificial neural network coupled with generic algorithm and response surface methodology in modeling and optimization of biodiesel production process parameters from shea tree (Vitellaria paradoxa) nut butter. Renew. Energy 2015, 76, 408–417. [Google Scholar] [CrossRef]
4. Lautenbach, S.; Volk, M.; Strauch, M.; Whittaker, G.; Seppelt, R. Optimization-based trade-off analysis of biodiesel crop production for managing an agricultural catchment. Environ. Model. Softw. 2013, 48, 98–112. [Google Scholar] [CrossRef]
5. Wenbo Ai Haeng Muk Cho Predictive Models for Biodiesel Performance and Emission Characteristics in Diesel Engines: A Review. Energies 2024, 17(19), 4805; <https://doi.org/10.3390/en17194805>
6. Su, Y.; Zhang, P.; Su, Y. An Overview of Biofuels Policies and Industrialization in the Major Biofuel Producing Countries. Renew. Sustain. Energy Rev. 2015, 50, 991–1003. [Google Scholar] [CrossRef]
7. Souza, T.A.Z.; Pinto, G.M.; Julio, A.A.V.; Coronado, C.J.R.; Perez-Herrera, R.; Siqueira, B.O.P.S.; da Costa, R.B.R.; Roberts, J.J.; Palacio, J.C.E. Biodiesel in South American Countries: A Review on Policies, Stages of Development and Imminent Competition with Hydrotreated Vegetable Oil. Renew. Sustain. Energy Rev. 2022, 153, 111755. [Google Scholar] [CrossRef]

8. Giakoumis, E.G.; Dimaratos, A.M.; Rakopoulos, C.D.; Rakopoulos, D.C. Combustion Instability during Starting of Turbocharged Diesel Engine Including Biofuel Effects. *J. Energy Eng.* 2017, 143, 4016047. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
9. Katoch, S.; Chauhan, S.S.; Kumar, V. A Review on Genetic Algorithm: Past, Present, and Future. *Multimed. Tools Appl.* 2021, 80, 8091–8126. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
10. Kyriklidis, C.; Dounias, G. Evolutionary computation for resource leveling optimization in project management. In *Integrated Computer-Aided Engineering*; IOS Press: Amsterdam, The Netherlands, 2016; Volume 23, pp. 173–184. [[Google Scholar](#)]
11. Kyriklidis, C.; Kyriklidis, M.-E.; Loizou, E.; Stimoniaris, A.; Tsanaktsidis, C.G. Optimal Bio Marine Fuel production evolutionary Computation: Genetic algorithm approach for raw materials mixtures. *Fuel* 2022, 323, 124232. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

ISSN: 2617-846X (online)

Шпак Оксана Іванівна

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2093-9029>

Юхненко Вадим Валерійович

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0015-2063>

Регіна Калпокайте-Дікувієне

Номер ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6946-0879>

Дата отримання статті -08.10.25.

Дата отримання фінального варіанту – 20.11.25.

Дата публікації- 30.12.25.