

УДК 338.45:622.691.4

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.4\(502\).14](https://doi.org/10.15589/znп2025.4(502).14)

METHOD FOR REDUCING GAS CONSUMPTION IN A HYBRID GAS TURBINE-ELECTRIC DRIVE OF A GAS PUMPING UNIT

МЕТОД ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ ГАЗУ В ГІБРИДНОМУ ГАЗОТУРБІННО-ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПРИВОДІ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Oleksandr I. Reznikov

o.i.reznikov@khai.edu

ORCID: 0009-0000-7514-8585

О. І. Резніков,

аспірант

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків

Abstract. Purpose. The article presents the development and scientific justification of a method for reducing natural gas consumption in the operation of a gas pumping unit (GPU) by optimally distributing the load between the gas turbine drive and the electric drive. The purpose of the study is to increase the energy efficiency of the GPU without the need for physical modernization of the equipment, by improving control algorithms.

Method. A mathematical optimization model for daily periodicity is proposed, in which the variable α_t , which contains the share of the load on the electric drive at time t , is determined by the method of sequential quadratic programming

(SLSQP). The selected objective function is daily gas consumption $\sum_{t=1}^{24} \frac{L_t(1-\alpha_t)}{\eta_{ef}}$, where L_t is the load at hour t , $\eta_{ef} = 0,35$

is the effective coefficient of the gas turbine unit. The model takes into account the restrictions on the total electric power ($(\alpha_t L_t \leq P_{max}^{ea})$), daily electricity consumption limits $\alpha_t L_t \leq E_t$, as well as boundary conditions $\alpha_t \in [0,1]$. An effective software implementation of the solution in Python using the SciPy library was implemented. The application of the nonlinear optimization method SLSQP with support for inequalities made it possible to achieve superlinear convergence and a reliable number of iterations when modeling the load distribution problem in a hybrid system.

Results. The obtained modeling results demonstrated the economic and environmental feasibility of using the hybrid scheme. The implementation of an optimized load management strategy between gas turbine and electric drives provided monthly savings of 16,400–18,200 UAH, which is equivalent to over 1.5 million UAH per year per unit. This approach is accompanied by a significant reduction in CO₂ emissions. The model showed high stability of convergence and adaptability to load changes, demonstrating readiness for implementation in the conditions of Ukrainian infrastructure without additional capital investments in equipment.

Scientific novelty. The scientific novelty consists in using the SLSQP method for the problem of optimal load distribution between gas and electric drives of gas turbines, which allows minimizing natural gas costs under real constraints on capacity and energy consumption. The integration of stochastic load forecasting, variability of electricity tariffs (peak / night modes) is proposed, as well as the combination of a hybrid scheme with renewable energy sources (batteries, solar generation). This opens up the possibility of transitioning from deterministic to stochastic optimization (for example, SLSQP + multilayer simulation) and expanding the model to a multi-cluster configuration of several gas turbines within gas pipelines.

Practical importance. The implementation of the proposed approach does not require physical modernization of the equipment, since optimization is achieved by reconfiguring the control system. This ensures high stability, flexibility and quick payback of the solution, as well as low investment risks. Further improvement of the model through the integration of renewable energy sources can increase the energy autonomy of the system and reduce dependence on fluctuations in market tariffs.

Key words: gas pumping unit; turbine; drive; gas; load; economy.

Анотація. Мета. У статті представлено розробку й наукове обґрунтування методу зниження витрат природного газу в роботі газоперекачувального агрегату (ГПА) шляхом оптимального розподілу навантаження між газотурбінним приводом і електроприводом. Метою дослідження є підвищення енергоефективності ГПА без необхідності фізичної модернізації обладнання, за рахунок удосконалення алгоритмів керування.

Методика. Запропоновано математичну модель оптимізації на добову періодичність, у якій змінна α_t , що містить частку навантаження на електропривод у час t , визначається методом послідовного квадратичного

програмування (SLSQP). Обрана цільова функція – щоденні витрати газу $\sum_{t=1}^{24} \frac{L_t(1-\alpha_t)}{\eta_{ef}}$, де L_t – навантаження в годину t , $\eta_{ef} = 0,35$ – ефективний коефіцієнт газотурбінного агрегату. У моделі враховано обмеження на сумарну електропотужність ($\alpha_t L_t \leq P_{max}^{el}$), добові ліміти електроспоживання $\alpha_t L_t \leq E_t$, а також межові умови $\alpha_t \in [0, 1]$. Реалізовано ефективну програмну реалізацію рішення в Python із використанням бібліотеки SciPy. Застосування методу нелінійної оптимізації SLSQP із підтримкою нерівностей дозволило досягти надлінійної збіжності та надійного числа ітерацій при моделюванні задачі розподілу навантаження в гібридній системі.

Результати. Отримані результати моделювання засвідчили економічну та екологічну обґрунтованість застосування гібридної схеми. Впровадження оптимізованої стратегії управління навантаженням між газотурбінним і електричним приводами забезпечило щомісячну економію 16 400–18 200 грн, що еквівалентно понад 1,5 млн грн на рік на один агрегат. Такий підхід супроводжується значним скороченням викидів CO₂. Модель показала високу стабільність збіжності й адаптивність до зміни навантажень, демонструючи готовність до впровадження в умовах української інфраструктури без додаткових капіталовкладень у техніку.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає у використанні методу SLSQP для задачі оптимального розподілу навантаження між газовим і електричним приводами ГПА, що дозволяє досягти мінімізації витрат природного газу за реальних обмежень на потужність і енергоспоживання. Запропоновано інтеграцію стохастичного прогнозування навантажень, варіабельності тарифів на електроенергію (режими «пік / ніч»), а також поєднання гібридної схеми з відновлюваними джерелами енергії (акумулятори, сонячна генерація). Це відкриває можливість переходу від детермінованої до стохастичної оптимізації (наприклад, SLSQP + багат шарова імітація) та розширення моделі на багатокластерну конфігурацію декількох ГПА у межах газопроводів.

Практична значимість. Реалізація запропонованого підходу не вимагає фізичної модернізації обладнання, оскільки оптимізація досягається шляхом переналаштування системи керування. Це забезпечує високу стійкість, гнучкість та швидку окупність рішення, а також низькі інвестиційні ризики. Подальше удосконалення моделі через інтеграцію відновлюваних джерел енергії здатне підвищити енергетичну автономність системи та знизити залежність від коливань ринкових тарифів.

Ключові слова: газоперекачувальний агрегат; турбіна; привід; газ; навантаження; економія.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Зниження витрат енергоносіїв і зменшення екологічного впливу стало стратегічним пріоритетом у роботі сучасних газоперекачувальних агрегатів (ГПА). Традиційні компресійні системи, які використовують виключно газові турбіни, часто працюють поза піковим діапазоном ефективності – особливо при змінних добових, сезонних або технологічних навантаженнях. Це призводить до неефективного витрачання ресурсу, збільшення експлуатаційних витрат (ОРЕХ) та зростання викидів CO₂ і NO_x.

Крім того, повна електрифікація втрачає економічну доцільність за нестабільних тарифів на електроенергію, тоді як виключно газотурбінний привід не дозволяє вчасно реагувати на ці зміни. У цих реаліях стає очевидною необхідність гнучких рішень, що дозволили б підтримувати газову турбіну в її зоні максимальної ефективності, водночас компенсуючи змінні навантаження за рахунок електроприводу. Це створює передумови для впровадження гібридних систем, котрі об'єднують обидва джерела потужності, а також потребу в надійних програмних методах, що дозволяють автоматично розподіляти навантаження з урахуванням технічних, економічних та екологічних обмежень.

Гібридна схема, яка поєднує газову турбіну та електродвигун на одному валу, забезпечує:

- стабільну роботу турбіни у високоефективному діапазоні;
- компенсацію пікових навантажень електродвигуном;
- можливість продажу надлишкової електроенергії в мережу або акумуляцію;
- економію палива та зниження викидів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Останні дослідження демонструють зростання інтересу до гібридних приводів, що поєднують газові турбіни з електроприводами, паливними елементами, або гідрдами.

Р. Курц, Містрі Дж., М. Вагані, Р. Аттікс описали типові схеми гібридних газотурбінноелектричних компресорів, акцентуючи увагу на перевагах систем, керованих синхронно, і викликах, таких як крутильні вібрації [1]. У. Сінгх та інші проаналізували продуктивність гібридних компресорів для водневих систем зберігання – електроспоживання знизилося на 75 %, підтверджуючи економію енергії [2].

Такі зарубіжні науковці як А. Траверсо, С. Барберіс, Д. Ліма досліджували рішення гібридної ранжії газової турбіни з інсоляційним підживленням, виявивши підвищення ефективності при змінних режимах експлуатації [3]. А. М. Дофф-Сотта, М. Кеннон та М. Бачич у свою чергу розробили моделі управління

енергією для гібридних літаків – економія палива досягає 70 %, завдяки застосуванню методів MPC та прогнозного управління [4] [5].

З. Цзі та ін. створили компактний гібридний реактивний двигун із SOFC – підтверджена підвищена ККД і екологічність [6]. Упорядкування гібридної системи зберігання енергії, виконане М. Раза разом з колегами націлено на інтеграцію в компресійні установки із запасом ефективності [7].

Індонезійсько-американський тандем дослідників, а саме Х. Сутойо, І. Анггаї, Г. Шуман, К. Берг переконливо продемонстрував зменшення витрат енергії в нафтових і газових установках після впровадження гібридних приводів [8]. Е. Коркмаз підтвердив потенціал енергозбереження для існуючих промислових компресорів, у тому числі з парою приводів [9].

В інших наукових працях представлено різні аспекти наукової проблематики, що досліджується, а саме: аналіз конструкції гібридної електростанції на газові турбіни та паливних елементах [10], аналіз частково електричної газової турбіни [11], тенденції драйверів компресорів та переваги гібридного компресійного приводу для виробництва ЗПГ [12; 13].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Враховуючи масштабність наукових досліджень, питання розробки ефективного методу зниження витрат газу в гібридному газотурбінно-електричному приводі газоперекачувального агрегату і досі залишається відкритим, та потребує детального опрацювання. Проте для реалізації цих переваг потрібна науково обґрунтована система розподілу навантаження. З огляду на можливість різкої зміни тарифів або споживання, модель повинна бути гнучкою та враховувати обмеження потужності електродвигуна, електроспоживання та турбінної ефективності. Це ставить перед нами завдання розробити математичну модель, яка за допомогою методу SLSQP забезпечить оптимальний добовий розподіл навантаження між приводами з урахуванням електричних обмежень та реальних режимів роботи компресора.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є розробка ефективного методу зниження витрат газу в гібридному газотурбінно-електричному приводі газоперекачувального агрегату.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Об'єкт дослідження – процес енергоспоживання та розподілу навантаження в газоперекачувальному агрегаті з гібридним газотурбінно-електричним приводом.

Предмет дослідження – методи та алгоритми оптимізації енергетичних режимів роботи газотурбінного та електричного приводів у складі гібридного

газоперекачувального агрегату з метою мінімізації витрат природного газу без модернізації обладнання.

Методи дослідження. У роботі застосовано математичне моделювання, комп'ютерне програмування та методи нелінійної оптимізації з обмеженнями, що забезпечують формування ефективної стратегії розподілу потужності між газотурбінним і електричним приводами. Ключовим інструментом дослідження виступає метод послідовного квадратичного програмування з обмеженнями (SLSQP), який реалізує мінімізацію витрат природного газу шляхом знаходження оптимальної частки електроприводу α_i у загальному навантаженні протягом добового циклу.

Алгоритм SLSQP використовує ітераційну процедуру побудови квадратичної апроксимації функції Лагранжа з оновленням Гесініана за схемою BFGS, що забезпечує надлінійну збіжність та високу точність результатів при складних багатовимірних обмеженнях. Реалізація моделі здійснена в середовищі Python із застосуванням пакету `scipy.optimize`, що дозволяє автоматично генерувати таблицю оптимальних режимів роботи для 24-годинного циклу експлуатації.

Для підтвердження ефективності розробленого підходу побудовано економіко-енергетичну модель, яка враховує змінність навантаження, ліміти електроспоживання, граничну електричну потужність та коефіцієнт корисної дії газотурбінного агрегату. У результаті моделювання визначено, що оптимальний гібридний розподіл навантаження забезпечує зменшення витрат природного газу.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

У сучасному світі, в якому прагнення до стало-го розвитку стає стратегічним пріоритетом, питання оптимізації енергоспоживання у промислових компресійних системах набуває вирішального значення. Особливо це стосується газоперекачувальних агрегатів, де традиційно використовуються газові турбіни. Водночас використання електродвигунів у гібридній схемі приводу відкриває нові горизонти для економії та зниження екологічного впливу.

Гібридна система складається з газової турбіни та електродвигуна, з'єднаних через синхронні муфти на одному валу компресора. У період високого навантаження обидва джерела енергії працюють у комплексі, а при зниженні – турбіна підтримується в найбільш ефективному режимі, а електропривід компенсує пікову потужність. Такий підхід дозволяє мінімізувати час роботи турбіни в неробочих режимах, що суттєво підвищує загальну ефективність системи.

Мета гібридних приводів – оптимізувати роботу турбіни та електродвигуна, забезпечуючи мінімальне енергоспоживання і швидке реагування на зміну навантаження. Економічні переваги: суттєве зниження ОРЕХ за рахунок меншого використання палива, зменшення часу простою при обслуговуванні (електродвигуни працюють до 99 % часу без технічних зупинок).

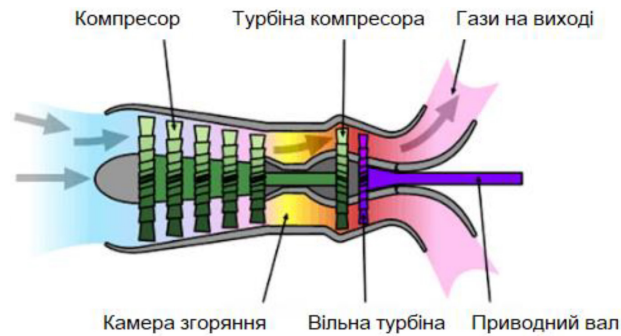


Рис. 1. Схема газової турбіни з розміщенням основних її компонентів, розподілених на холодний та гарячий відсіки

Зусилля зі скорочення споживання енергії та зменшення викидів CO_2 й NO_x вимагають модернізації традиційних компресійних систем. Компресорні агрегати, які базуються виключно на газових турбінах, часто працюють у неробочих режимах, що розбалансовує їх ефективність. Встановлення електродвигуна на вал компресора – класичне рішення у межах гібридного або двоприводного підходу – дозволяє досягнути значного покращення ефективності.

У гібридній схемі газова турбіна і електродвигун підключаються до компресора через вал. При пікових навантаженнях обидва приводи працюють синхронно, а у холодну пору, коли турбіна виробляє надлишок потужності, електродвигун може переходити в режим генератора і видавати електроенергію в мережу або акумулювати її.

Реальний приклад – компресорний потяг NEC з гібридною системою (газова турбіна SGT300 + 4 МВт електродвигун) [13]:

- Споживання палива знизилось на $\approx 16\%$,
- Викиди CO_2 – на $\approx 14\%$

У спекотні місяці електродвигун компенсує втрати потужності турбіни, а взимку ГТД виробляє електрику при надлишку потужності, що дає економічну вигоду.

Оптимізація режиму роботи газової турбіни (70–100 % навантаження) і перенесення частини функції на електро-привід призводять до зменшення викидів NO_x до однозначного ррмдіапазону і суттєвого падіння викидів CO .

Гібридна схема забезпечує:

- Гнучкість – можливість роботи в режимах турбіна, електродвигун, або їх комбінація;
- Сумісність із ВДЕ – у моменти надлишку електричної енергії, генератор може перерозподіляти її у вигляді зеленого струму;
- Скорочення ОРЕХ – зменшення простоїв турбіни та витрат на технічне обслуговування.

Дослідження багатьох гібридних систем (газ-газ, газ-фото, газ-ВЕД, газ-паливні елементи) демонструють збільшення комплексної ефективності на $\approx 16\text{--}30\%$, інколи до 70 %.

Метод послідовного квадратичного програмування з обмеженнями (SLSQP) часто використовується

для оптимізації режимів роботи гібридних енергосистем, включно з балансуванням теплової та електричної потужності, з урахуванням трафіку, обмежень по безпеці та потужності, забезпечуючи економічну оптимальність та надійність.

Це метод нелінійної оптимізації з обмеженнями, який поєднує мінімізацію квадратичної апроксимації цільової функції з обробкою рівностей та нерівностей. Внутрішні алгоритми SLSQP використовують оновлення квазі-Н'ютенової (BFGS) апроксимації гесініану та розв'язання малих підзадач через широко відомий solver.

Метод показує глобальну збіжність і надлінійну швидкість, що робить його придатним для задач із багатьма змінними і складними обмеженнями – такими як баланс потужності та обмеження по електроспоживанню.

У моделі гібридного газоперекачувального агрегату SLSQP мінімізує цільову функцію витрат газу:

- Змінні: α_i – частка приводів (бензоелектрична квота) в кожен момент часу t .
- Обмеження: сумарна потужність (L_t), ліміти електропроводу, інтеграли $\alpha_i \in [0, 1]$.
- Алгоритм ітеративно визначає оптимальні α_i , забезпечуючи найменші витрати газу при дотриманні всіх технічних обмежень.

SLSQP працює у Python (scipy.optimize.SLSQP) для побудови таблиці оптимальних режимів (наприклад, по годинах дня), що дозволяє досягти економії $\approx 16\text{--}18$ тис. грн на місяць без модернізації обладнання.

Ефективна реалізація SLSQP-методу в Python забезпечує адаптивну побудову розв'язань з гнучким урахуванням змінного навантаження протягом доби. Такі моделі забезпечують оптимальний розподіл α – частки електроприводу при заданій η_{ef} газотурбіни, що мінімізує сумарну витрату газу.

Для зниження витрат газу виконано математичне моделювання оптимального розподілу навантаження між газотурбінним і електричним приводами в гібридному газоперекачувальному агрегаті. Розроблено програмну модель на Python, яка реалізує оптимізацію методом SLSQP з урахуванням добового

навантаження та обмежень на електроспоживання. Основна модель підрахунку витрат газу має вигляд:

$$Q_{\{gas\}}(\alpha_t) = \left(\frac{(1 - \alpha_t) \cdot L_t}{\eta_{\text{еф}}} \right) (1 + 0.1 \cdot \alpha_t), \quad (1)$$

де L_t – навантаження в момент часу t , α – частка електроприводу, $\eta_{\text{еф}}$ – ефективний коефіцієнт корисної дії газотурбінного агрегату, прийнято як 0,35.

Цільова функція:

$$\min_{\alpha} F(\alpha) = \sum_{t=1}^{24} \frac{L_t (1 - \alpha_t)}{\eta_{\text{еф}}} \quad (2)$$

це загальні витрати за добу

Обмеження:

Електропотужність: $\alpha_t L_t \leq P_{\text{max}}^{\text{ел}}$.

Ліміт електроспоживання: $\alpha_t L_t \leq E_t$.

Граничні умови: $0 \leq \alpha_t \leq 1$.

Метод SLSQP дозволяє мінімізувати нелінійну функцію з обмеженнями (як рівності, так і нерівності), забезпечуючи надлінійну збіжність завдяки оновленню Гесініана за BFGS й ураховуючи змінні рамки й обмеження.

Алгоритм:

1. Початкове припущення $\alpha^{(0)}$.

2. Обчислення градієнту і перевірка обмежень.

3. Складання квадратичної апроксимації функції Лагранжа.

4. Розв'язання QP-підзадачі з обмеженнями.

5. Оновлення $\alpha^{(k)}$ та перевірка збіжності.

Виконаний алгоритм передбачає автоматичну побудову таблиці, у якій вказано оптимальний розподіл навантаження на кожну годину доби (рис. 2).

Програмна модель на Python, яка реалізує оптимізацію методом SLSQP з урахуванням добового навантаження та обмежень на електроспоживання має вигляд:

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize
```

Вхідні дані

$L = \text{np. array}([...])$ # 24-годинне навантаження

$P_e_max = ...$ # максимальна електропотужність

$E = \text{np. array}([...])$ # ліміти електроспоживання

Цільова функція

def cost (alpha):

return np. sum (L · (1 - alpha) / eta_eff)

Обмеження

cons = []

for t in range (24):

cons. append({'type': 'ineq',
'fun': lambda a, t=t: P_e_max - a [t]*L
[t]})

cons. append({'type': 'ineq',
'fun': lambda a, t=t: E [t] - a [t]*L
[t]})

Межі [0,1]

bounds = [(0,1)] * 24

Початковий вектор

alpha0 = np. zeros (24)

```
res = minimize (cost, alpha0,  
method='SLSQP',  
bounds=bounds, constraints=cons,  
options={'ftol':1e - 6,'disp':True})
```

Програмно спрогнозована модель дозволила виявити, що при переході до гібридного режиму експлуатації витрати на енергоресурси щомісяця зменшуються на 16400–18200 грн, залежно від тривалості місяця, що еквівалентно понад 1,5 млн грн за рік на один агрегат (рис. 3).

Запропоноване рішення не потребує модернізації обладнання й має високий економічний потенціал.

Інтеграція методів гібридного розподілу навантаження схожа за концепцією до інженерних рішень

Година, год	Навантаження, відн. од.	Частка електроприводу, част.	Витрата газу, м³	Електроенергія, кВт·год	Вартість газу, грн	Вартість ел. енергії, грн	Вартість (тільки газ), грн	Оптимізована вартість, грн	Економія, грн
1	0.5	0.33	0.991	0.148	20.81	1.01	30	21.82	8.18
2	0.52	0.35	0.998	0.166	20.96	1.14	31.3	22.1	9.21
3	0.54	0.53	0.763	0.261	16.02	1.79	32.61	17.81	14.8
4	0.57	0.84	0.272	0.43	5.72	2.95	33.91	8.67	25.25
5	0.59	0.66	0.599	0.351	12.58	2.41	35.22	14.99	20.22
6	0.61	0.84	0.294	0.462	6.18	3.17	36.52	9.35	27.17
7	0.63	0.62	0.723	0.353	15.17	2.42	37.83	17.6	20.23
8	0.65	0.82	0.364	0.481	7.65	3.3	39.13	10.95	28.18
9	0.67	0.35	1.298	0.211	27.26	1.45	40.43	28.71	11.72
10	0.7	0.47	1.094	0.297	22.97	2.04	41.74	25.01	16.73
11	0.72	0.57	0.925	0.37	19.42	2.54	43.04	21.96	21.09
12	0.74	0.79	0.47	0.528	9.86	3.62	44.35	13.48	30.86
13	0.76	0.76	0.557	0.522	11.69	3.58	45.65	15.27	30.38
14	0.78	0.37	1.455	0.262	30.56	1.8	46.96	32.36	14.6
15	0.8	0.8	0.498	0.579	10.46	3.97	48.26	14.43	33.83
16	0.83	0.39	1.488	0.293	31.25	2.01	49.57	33.25	16.31
17	0.85	0.7	0.788	0.531	16.55	3.64	50.87	20.19	30.68
18	0.87	0.77	0.624	0.6	13.11	4.12	52.17	17.23	34.95
19	0.89	0.59	1.107	0.473	23.25	3.24	53.48	26.5	26.98
20	0.91	0.72	0.795	0.588	16.7	4.03	54.78	20.73	34.05
21	0.93	0.56	1.248	0.469	26.21	3.22	56.09	29.42	26.66
22	0.96	0.34	1.875	0.289	39.37	1.99	57.39	41.36	16.03
23	0.98	0.88	0.356	0.778	7.47	5.33	58.7	12.8	45.89
24	1	0.62	1.152	0.558	24.18	3.83	60	28.02	31.98

Рис. 2. Таблиця розподілу навантаження між газотурбінним і електричним приводами

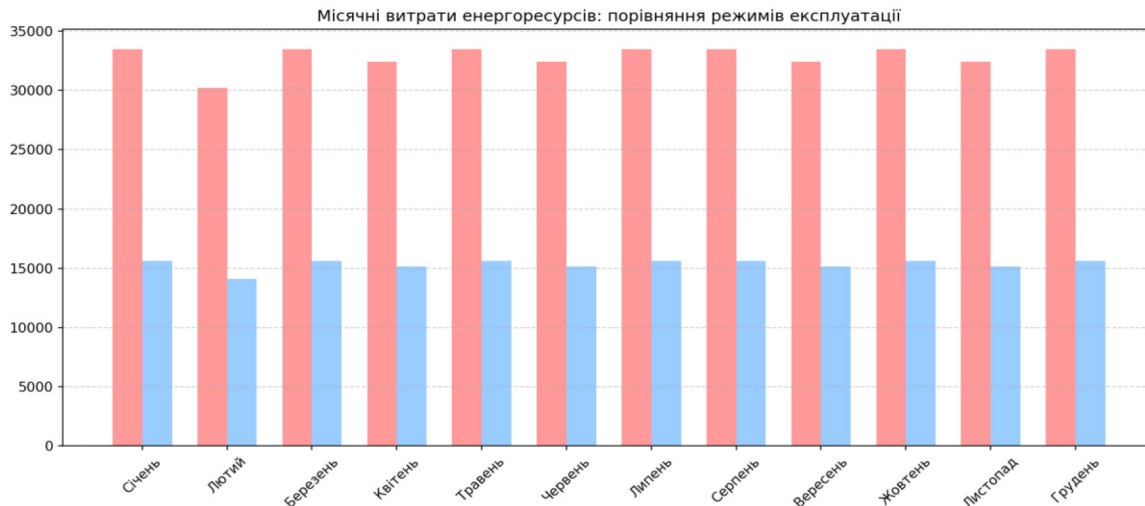


Рис. 3. Згенерований прогноз економії витрат при гібридному режимі експлуатації

у промислових агрегатах, де застосовують енергетично-гібридні драйви (двохприводні компресори), що дозволяє оптимізувати енергоспоживання залежно від умов роботи та вартості електроенергії. У таких системах використання SLSQP-оптимізації доволі ефективне для подібних задач розподілу потужності між приводами.

Таким чином, запропонований підхід демонструє значну економічну ефективність та практичну здійснюваність, що відкриває перспективу масштабування технології на інші об'єкти енергетичної інфраструктури.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати підтверджують доцільність використання гібридного газотурбінно-електричного приводу для зниження витрат природного газу в газоперекачувальних агрегатах та загалом узгоджуються з тенденціями, відображеними в сучасних дослідженнях світових наукових і промислових центрів.

Проведене моделювання оптимального розподілу навантаження методом нелінійної оптимізації SLSQP дозволило досягнути економії енергоресурсів на рівні 16–18 тис. грн на місяць, що еквівалентно понад 1,5 млн грн на рік для одного агрегату без модернізації обладнання. Подібні показники ефективності узгоджуються з результатами Р. Курц та співавторів [1; 11], які довели, що інтеграція електроприводу в газотурбінну систему забезпечує зниження питомої витрати палива на 12–18 % та скорочення експлуатаційних витрат (OPEX) завдяки можливості підтримання турбіни в оптимальному тепловому режимі.

У. Сінгх та його колеги [2] також підтверджують ефективність гібридних компресорів при зберіганні й транспортуванні водню, де досягнуто підвищення ККД системи до 15 % порівняно з традиційними газотурбінними приводами. Подібно до наведеного

дослідження, у моделі цієї статті враховано змінність навантаження протягом доби та обмеження електроспоживання, що забезпечило гнучкість системи і стабільність у динамічних режимах. Умовно подібний підхід застосовувався М. Дофф-Соттою та ін. [4; 5] у сфері авіаційних гібридних енергосистем, де методи послідовного квадратичного програмування забезпечували адаптивний розподіл потужності між двигунами залежно від режиму польоту.

Підтвердження ефективності принципу «розумного балансування» енергоресурсів між газотурбінним і електричним приводами можна також знайти у дослідженнях З. Цзі та співавторів [6], які продемонстрували, що гібридні двигуни з твердокисними паливними елементами (SOFC) забезпечують до 30 % підвищення енергоефективності. Крім цього у дослідженні Т. Квасневського та М. Півоварські [10] доведено, що комбіновані газотурбінно-паливно-елементні установки характеризуються підвищеною стійкістю та економічністю завдяки можливості перерозподілу навантаження.

Результати цієї роботи узгоджуються і з висновками Дж. Герреро, А. Райт та Н. Бхатті [12], які зазначали, що сучасна тенденція розвитку компресорних станцій полягає у переході від виключно турбінного приводу до гібридних систем, що забезпечують зменшення викидів CO₂ на 10–15 % і покращення надійності роботи агрегатів. Б. Бревнов та Дж. Шубрат [13] також підтверджують, що впровадження гібридного компресійного приводу для виробництва СПГ (LNG) дає економію палива до 20 %, що співмірно з результатами моделювання, наведеними у цій статті.

Додаткову підтримку висновкам надають дослідження М. Раза з колегами [7], які вказують, що гібридизація енергосистем із залученням акумулюючих елементів забезпечує зниження коливань енергоспоживання та збільшення загальної ефективності на 16–30 %. Аналогічну ідею енергетичної гнучкості

та стійкості розвитку промислових об'єктів розвивають Г. Сутойо та співавтори [8], які наголошують, що впровадження адаптивних систем управління в нафтогазових виробничих установках дозволяє істотно зменшити енергетичні втрати.

Таким чином, отримані результати узгоджуються з висновками провідних дослідників і практиків у галузі гібридних енергосистем. Запропонована в статті модель оптимізації на основі методу SLSQP підтверджує загальні тенденції до енергоощадності та конкретизує шляхи їх реалізації в умовах промислової компресорної станції без потреби у модернізації обладнання. Це свідчить про високий рівень практичної реалізованості, економічної ефективності та перспективності подальшого розвитку напрямку гібридних приводів у газотранспортній інфраструктурі.

ВИСНОВКИ

Застосування методу нелінійної оптимізації SLSQP із підтримкою нерівностей дозволило добитися надлінійної збіжності та надійного числа ітерацій для модельованої задачі розподілу навантаження в гібридній системі. Впровадження оптимізованої стратегії управління навантаженням між

газотурбінним і електричним приводами забезпечило щомісячну економію 16 400–18 200 грн, що еквівалентно понад 1,5 млн грн на рік на один агрегат. Успішна реалізація моделі без необхідності фізичної реконструкції обладнання демонструє високу практичну значимість і низькі інвестиційні ризики.

Перспективи подальших досліджень ґрунтуються на розширенні на багатоагрегатні комплекси та мережі, урахуванні стохастичності навантажень. Актуальним напрямком є впровадження прогнозування змін навантаження (тимчасові серії, зимово-літні скачки) у модель, що дозволить переходити від детермінованої до стохастичної оптимізації (наприклад, SLSQP + багатошарова імітація).

Можна адаптувати модель для режимної вартості електрики (пік / ніч), що дозволить отримати ще більшу економію шляхом створення стратегії заряджання з максимальною вигодою від зміни тарифів (peak shaving, arbitrage).

Розширення моделі за рахунок інтеграції акумуляторів або сонячної генерації, як це успішно зроблено в гармонійних задачах мікромереж і когенерацій, може забезпечити ще вищу стійкість і незалежність системи.

REFERENCES

- [1] Kurz, R., Mistry, J., Vagani, M., & Attix, R. (2024). Concepts for hybrid electric motor gas turbine driven compressors. *Turbomachinery Laboratory, Texas A&M*. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2022-2182>
- [2] Singh, U. R., Bhogilla, S. S., Hosokai, S., Saita, I., & Tolj, I. (2025). Performance evaluation of hybrid compressors for hydrogen storage and refuelling stations. *Journal of Energy Storage*, No. 114, 115778.
- [3] Traverso, A., Barberis, S. & Lima, D. (2014). Dynamic Analysis of Concentrated Solar Hybridised Gas Turbine. *ResearchGate*. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2014-25225>
- [4] Doff-Sotta, M., Cannon, M., & Bacic, M. (2020). Optimal energy management for hybrid electric aircraft. *IFAC-PapersOnLine*, No. 53(2), P. 6043–6049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1672>
- [5] Doff-Sotta, M., Cannon, M., & Bacic, M. (2023). Predictive energy management for hybrid electric aircraft propulsion systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, No. 31(2), P. 602–614. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2022.3193295>
- [6] Ji, Z., Qin, J., Cheng, K., Liu, H., Zhang, S., & Dong, P. (2021). Design and performance of a compact air-breathing jet hybrid-electric engine coupled with solid oxide fuel cells. *Frontiers in Energy Research*, No. 8. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.613205>
- [7] Raza, M. S., Abid, M. I., Akmal, M., Munir, H. M., Haider, Z. M., Khan, M. O., Alamri, B., & Alkarni, M. (2024). Comprehensive assessment of energy storage elements in hybrid power systems for energy reserve optimization. *Sustainable Development*, No. 16(20), 8730. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16208730>
- [8] Sutoyo, H. R. D., Angga, I. G., Schumann, G., & Berg, K. F. (2023). Energy efficiency of oil and gas production plant operations. *Geoenergy Science and Engineering*, Vol. 226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211759>
- [9] Korkmaz, E. (2024). Energy saving potentials in compressed air systems. In M. S. Cengiz (Ed.), *Advanced and contemporary studies in engineering* (pp. 459–490). İzmir: Duvar Yayınları.
- [10] Kwaśniewski, T., & Piwowarski, M. (2020). Design analysis of hybrid gas turbine–fuel cell power plant in stationary and marine applications. *Polish Maritime Research*, No. 27, P. 107–119. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0032>
- [11] Murthy, M. S. N., Kumar, S., & Sreedhara, S. (2019). Analysis of part electric gas turbine: A novel hybrid propulsion concept. In *Proceedings of the ASME 2019 Gas Turbine India Conference* (Vol. 2). Chennai, Tamil Nadu, India: ASME. DOI: <https://doi.org/10.1115/GTINDIA2019-2498>
- [12] Guerrero, J. J., Wright, A., & Bhatia, N. (2021). LNG compressor driver trends: Gas turbines vs. electric motors. In *Proceedings of the 2021 IEEE LAS Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)* (pp. 263–272). San Antonio, TX, USA: IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/PCIC42579.2021.9729009>
- [13] Brevnov, B., & Shubrt, J. (2023). Benefits of hybrid compression drive for LNG production. *Gas Turbine World*. Retrieved from: <https://gasturbineworld.com/hybrid-compression-drive/>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kurz, R., Mistry, J., Vagani, M., & Attix, R. (2024). Concepts for hybrid electric motor gas turbine driven compressors. *Turbomachinery Laboratory, Texas A&M*. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2022-2182>
- [2] Singh, U. R., Bhogilla, S. S., Hosokai, S., Saita, I., & Tolj, I. (2025). Performance evaluation of hybrid compressors for hydrogen storage and refuelling stations. *Journal of Energy Storage*, No. 114, 115778.
- [3] Traverso, A., Barberis, S. & Lima, D. (2014). Dynamic Analysis of Concentrated Solar Hybridised Gas Turbine. *ResearchGate*. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2014-25225>
- [4] Doff-Sotta, M., Cannon, M., & Bacic, M. (2020). Optimal energy management for hybrid electric aircraft. *IFAC-PapersOnLine*, No. 53(2), P. 6043–6049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1672>
- [5] Doff-Sotta, M., Cannon, M., & Bacic, M. (2023). Predictive energy management for hybrid electric aircraft propulsion systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, No. 31(2), P. 602–614. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2022.3193295>
- [6] Ji, Z., Qin, J., Cheng, K., Liu, H., Zhang, S., & Dong, P. (2021). Design and performance of a compact air-breathing jet hybrid-electric engine coupled with solid oxide fuel cells. *Frontiers in Energy Research*, No. 8. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.613205>
- [7] Raza, M. S., Abid, M. I., Akmal, M., Munir, H. M., Haider, Z. M., Khan, M. O., Alamri, B., & Alkarni, M. (2024). Comprehensive assessment of energy storage elements in hybrid power systems for energy reserve optimization. *Sustainable Development*, No. 16(20), 8730. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16208730>
- [8] Sutoyo, H. R. D., Angga, I. G., Schumann, G., & Berg, K. F. (2023). Energy efficiency of oil and gas production plant operations. *Geoenergy Science and Engineering*, Vol. 226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211759>
- [9] Korkmaz, E. (2024). Energy saving potentials in compressed air systems. In M. S. Cengiz (Ed.), *Advanced and contemporary studies in engineering* (pp. 459–490). İzmir: Duvar Yayınları.
- [10] Kwaśniewski, T., & Piwowarski, M. (2020). Design analysis of hybrid gas turbine–fuel cell power plant in stationary and marine applications. *Polish Maritime Research*, No. 27, P. 107–119. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0032>
- [11] Murthy, M. S. N., Kumar, S., & Sreedhara, S. (2019). Analysis of part electric gas turbine: A novel hybrid propulsion concept. In *Proceedings of the ASME 2019 Gas Turbine India Conference* (Vol. 2). Chennai, Tamil Nadu, India: ASME. DOI: <https://doi.org/10.1115/GTINDIA2019-2498>
- [12] Guerrero, J. J., Wright, A., & Bhatia, N. (2021). LNG compressor driver trends: Gas turbines vs. electric motors. In *Proceedings of the 2021 IEEE IAS Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)* (pp. 263–272). San Antonio, TX, USA: IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/PCIC42579.2021.9729009>
- [13] Brevnov, B., & Shubrt, J. (2023). Benefits of hybrid compression drive for LNG production. *Gas Turbine World*. URL: <https://gasturbineworld.com/hybrid-compression-drive/>

© Резніков О. І.

Дата надходження статті до редакції: 11.11.2025

Дата затвердження статті до друку: 27.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0