

ШВИДКІСНЕ НАВАНТАЖЕННЯ РАДІАЛЬНОЇ ТУРБІНИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Проведено дослідження швидкісного навантаження радіальної турбіни, в якій як робоче тіло використано гідрофторолефін. Проаналізовано вплив зміни швидкісних режимів на основні експлуатаційні характеристики турбіни, зокрема потужність, крутний момент.

Ключові слова: органічний цикл Ренкіна, радіальна турбіна, швидкісне навантаження, статичний тиск.

Abstract

A study of the speed load of a radial turbine, in which hydrofluoroolefin was used as the working fluid, was conducted. The influence of changes in speed modes on the main operational characteristics of the turbine, in particular power and torque, was analyzed.

Keywords: organic Rankine cycle, radial turbine, speed load, static pressure

Вступ. Постановка задачі

В умовах нестабільності енергопостачання, спричиненої геополітичними викликами, військовими діями та пошкодженням енергетичної інфраструктури, особливої актуальності набувають технології, спрямовані на підвищення автономності та ефективності локальних джерел генерації. Дефіцит електричної енергії, зростання вартості енергоносіїв та необхідність раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів стимулюють розвиток децентралізованих систем, здатних забезпечувати об'єкти як тепловою, так і електричною енергією [1, 2].

Значні резерви підвищення ефективності теплогенеруючих установок пов'язані з утилізацією теплоти відхідних газів. У більшості водогрійних та парових котелень частина теплоти втрачається разом із димовими газами, що знижує загальний коефіцієнт корисної дії. Використання цієї низькопотенційної теплоти дозволяє підвищити паливну ефективність системи без додаткового спалювання палива.

Одним із перспективних напрямків утилізації низькотемпературної теплоти (70–300 °C) є органічний цикл Ренкіна (ORC), який забезпечує перетворення теплової енергії в електричну. Ключовим елементом ORC-установок малої та середньої потужності є радіальна турбіна. Завдяки компактності, високій швидкохідності та здатності ефективно працювати в широкому діапазоні навантажень, радіальні турбіни є оптимальним рішенням для децентралізованих енергетичних систем.

Особливу увагу при проектуванні та експлуатації радіальних турбін приділяють швидкісному режиму роботи. Саме швидкісне навантаження визначає рівень аеродинамічних втрат, ступінь реалізації теоретичного перепаду ентальпії та загальний ККД установки [3, 4].

Відношення колової швидкості робочого колеса до швидкості потоку є одним із ключових безрозмірних параметрів, що характеризує оптимальність режиму роботи турбіни. Відхилення від розрахункового швидкісного режиму призводить до зростання вторинних втрат, погіршення умов обтікання лопаток та зниження ефективності перетворення енергії.

Перспективність застосування радіальних турбін у складі ORC-систем обумовлена їх придатністю до роботи в діапазоні малих і середніх потужностей, можливістю модульного компонування та високою адаптивністю до змінних теплових потоків. Це робить їх ефективними для комунальних котелень, біомасових та біогазових установок, а також промислових підприємств із наявними тепловими викидами [5 - 7].

Метою роботи є дослідження впливу швидкісного навантаження на енергетичні та режимні характеристики радіальної турбіни в складі ORC-установки та визначення оптимальних умов її роботи для підвищення ефективності локальних систем генерації електроенергії.

Результат дослідження

Чисельне моделювання радіальної турбіни виконувалось у програмному середовищі Autodesk CFD [8]. Геометрія проточної частини була розроблена в Autodesk Inventor та імпортована до CFD-моделі у вигляді об'єму робочого середовища. Як робоче тіло використовувалась органічна пара, характерна для ORC-систем, при температурі близько 95°C для коректної роботи Solver створимо нерозривність потоку (адвекція).

Для дослідження навантаження задаємо швидкість потоку на вході в турбінне колесо 80 м/с, статичний тиск на виході 2,156 бар, швидкість обертання 3000 об/хв.

Для таких умов число Маха складає 0,42, що відповідає дозвуковому режиму, але для стисливої течії, що обґрунтовує використання стисливої CFD-моделі.

За допомогою оператора «Wall» проведено розрахунок потоку, а саме крутного моменту та центру сил. Результати, показані на рис.1, свідчать про правильну побудову гідродинамічної моделі, наявність додатного за модулем моменту, що відповідає роботі ротора в турбінному режимі.

На рисунку 2 представлено поля швидкості та статичного тиску в проточній частині радіальної турбіни ORC-установки.

Візуалізація виконана у вигляді ліній струму з накладенням кольорових шкал:

- Velocity Magnitude (см/с) — поле швидкостей;
- Static Pressure (dyn/cm²) — поле статичного тиску.

Summary

Total area, 102.593, cm²
TOTAL FX, 172.584, Newton
TOTAL FY, 4985.92, Newton
TOTAL FZ, -4053.46, Newton
Center of Force about X-Axis (Y-Z), 5.97829, -70.133, cm
Center of Force about Y-Axis (X-Z), -0.000142073, 5.50848e-05, cm
Center of Force about Z-Axis (X-Y), 17.4923, 5.98101, cm
TOTAL MX, -242.44, N-m
TOTAL MY, 588.004, N-m
TOTAL MZ, -10.3247, N-m
Torque, 10.3247, N-m

Рисунок 1 – Проміжні результати

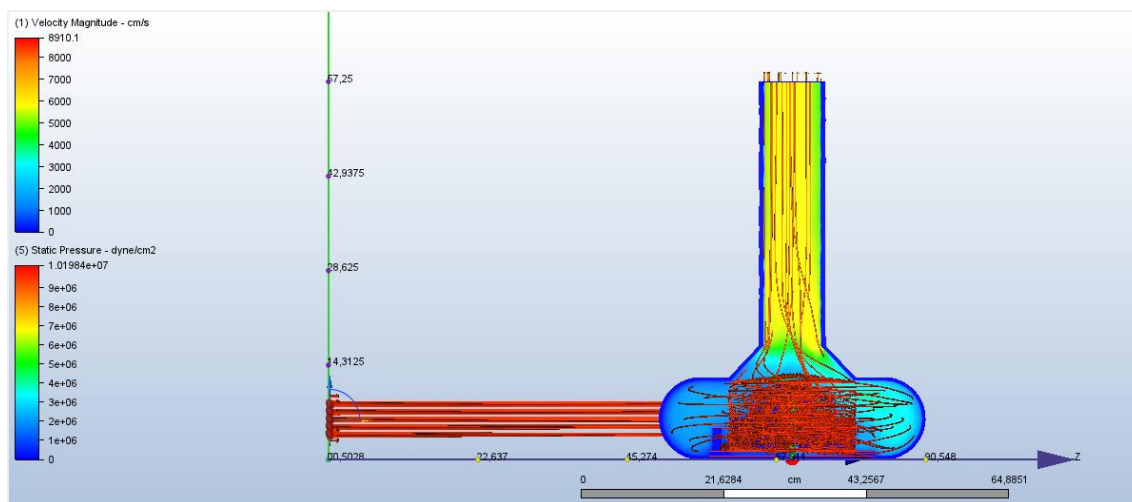


Рисунок 2 – Побудова основи ротора. Поля швидкості та статичного тиску

Потік рухається зліва направо з горизонтального підвідного каналу, далі через вертикальний сопловий апарат у зону робочого колеса. У підвідному горизонтальному каналі спостерігається: рівномірний розподіл швидкості; переважно червоний колір, що відповідає підвищеним, але стабільним швидкостям; відсутність значних зон рециркуляції. Це свідчить про коректно задані вхідні граничні умови та відсутність паразитних втрат на вході.

У вертикальному каналі (сопловий апарат) чітко видно: різке прискорення потоку; витягнуті лінії струму з високою щільністю; переважання жовто-червоних кольорів, що відповідає максимальним швидкостям (порядку 70–90 м/с). Це підтверджує, що сопловий апарат ефективно перетворює перепад тиску в кінетичну енергію потоку, формуючи швидкісний струмінь перед входом у робоче колесо.

У корпусі турбіни (спіральна зона): потік закручується і набуває складної тривимірної структури; видно взаємодію струменів з лопатками; швидкість поступово зменшується, що відповідає відбору енергії ротором.

Наявність локальних вихорів у цій зоні є типовою для радіальних турбін і свідчить про реальні втрати, пов'язані з: турбулентністю; нерівномірністю підводу; вторинними течіями.

У зоні підводу і перед сопловим апаратом: статичний тиск максимальний (червоні та жовті кольори); після входу в сопло спостерігається різке падіння тиску. Це відповідає класичній фізиці соплового процесу: зростання швидкості → зниження статичного тиску.

У зоні робочого колеса: тиск стає значно нижчим; розподіл тиску є нерівномірним, що зумовлює виникнення сил і моменту на лопатках.

На виході з турбіни: тиск стабілізується на рівні, близькому до заданого граничного значення; відсутні різкі градієнти, що вказує на стійкий режим роботи.

Отримані поля швидкості та тиску узгоджуються з раніше визначеним крутним моментом $\sim 9 \dots 10 \text{ Н}\cdot\text{м}$: прискорення потоку в соплі → формування кінетичної енергії; взаємодія струменя з лопатками → передача імпульсу; зменшення швидкості та тиску → відбір механічної роботи.

Це підтверджує, що турбіна працює в турбінному режимі, а не як гідравлічний опір.

Висновки

В даній роботі наведена актуальність впровадження когенераційних установок для локальних джерел теплопостачання. Вказано, що утилізація теплоти відхідних газів паливоспалюючих установок є значним резервом підвищення енергоефективності локальних джерел. Крім того, завдяки використанню цієї теплоти та застосуванню ORC-систем є можливість розподіленого виробництва електроенергії для джерел локального теплопостачання.

Основним елементом ORC-системи є радіальна турбіна. Проведено CFD-моделювання швидкісного навантаження та розподілу статичного тиску в такій турбіні. Швидкість потоку в споловому апараті досягає $70 \dots 90 \text{ м/с}$, отримані поля швидкостей та тисків на виході з турбіни забезпечують заданий крутний момент $9 \dots 10 \text{ Н}\cdot\text{м}$, що підтверджує роботу системи в турбінному режимі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Лісовий А. В. Енергетична безпека України: виклики війни та перспективи відновлення / А. В. Лісовий // Економіка та суспільство. – 2025. – № 48. – URL: <https://journals.dpu.kyiv.ua/index.php/economy/article/view/541>
- 2 Сіренко Ю. В. Аналіз стану енергетичної системи України та виклики в умовах війни / Ю. В. Сіренко // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2025. – № 2. – URL: https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/article/view/995
- 3 Symes R. Design and optimization of a radial inflow turbine for use with a low temperature organic Rankine cycle / R. Symes, E. Sauret // Applied Thermal Engineering. – 2021. – URL: <https://discovery.researcher.life/download/article/89c65fb81e0833ad802b7d092d5be85c/full-text>
- 4 Alshammari F. Advanced energy conversion strategies using multistage radial inflow turbine in organic Rankine cycle / F. Alshammari // Energy Conversion and Management. – 2025. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X25002941>
- 5 Paseka A. D., Prasetyo P., Bonar A., Arifin M. A Geometric Design Method of Radial Inflow Turbine from 0D to 3D for Organic Rankine Cycle Micro Power Generation // ASEAN Engineering Journal. – 2022. – Vol. 12, No. 1. – P. 131–139. – URL: <https://doi.org/10.11113/aej.v12.17244>
- 6 Aungier R. H. Turbine aerodynamics: axial-flow and radial-inflow turbine design and analysis. – New York: ASME Press, 2005. – 404 p.
- 7 Khader M. Optimised radial turbine design D1.8. – London: City University London, 2014. – 28 p. – URL:
- 8 Autodesk. Simulation CFD User's Guide [Електронний ресурс]. – Autodesk, 2014. – URL: <https://help.autodesk.com/view/SCDSE/2014/ENU/?guid=GUID-B3B67A19-0CF3-424B-9C77-F474453C7C1B>

Мартиненко Віталій Вікторович, студент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет

Степанов Дмитро Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Stepanovdv@ukr.net

Martynenko Vitalii, student on Department of heat power engineering, Vinnytsia National Technical University
Stepanov Dmitry, candidate of technical Sciences, associate Professor, Department of heat power engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Stepanovdv@ukr.net