

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПЕРЕПАДУ ТИСКУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ РАДІАЛЬНОЇ ТУРБІНИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено вплив тискового навантаження на роботу радіальної турбіни в складі установки органічного циклу Ренкіна (ORC) із використанням методів CFD-моделювання. Проведено аналіз розподілу тиску, швидкості та турбулентної кінетичної енергії в проточній частині турбіни, а також масову витрату та крутний момент на валу.

Ключові слова: радіальна турбіна; органічний цикл Ренкіна (ORC); перепад тиску; CFD-моделювання.

Abstract

The study investigates the effect of pressure load on the operation of a radial turbine as part of an Organic Rankine Cycle (ORC) system using CFD modeling methods. An analysis of the pressure, velocity, and turbulent kinetic energy distribution in the turbine flow path, as well as the mass flow rate and torque on the shaft, was carried out.

Keywords: radial turbine; organic Rankine cycle (ORC); pressure drop; CFD modeling.

Вступ. Постановка задачі

В умовах нестабільності енергопостачання, зумовленої геополітичними ризиками, військовими діями та пошкодженням об'єктів енергетичної інфраструктури, підвищення ефективності локальних джерел генерації набуває стратегічного значення. Зростання вартості енергоносіїв і необхідність зменшення залежності від централізованих мереж стимулюють впровадження технологій децентралізованої когенерації. Особливий інтерес становлять системи, здатні забезпечувати одночасне виробництво теплової та електричної енергії з максимальним використанням наявних теплових ресурсів.

Одним із напрямків підвищення ефективності теплогенеруючих установок є утилізація теплоти відхідних газів із подальшим перетворенням її в електричну енергію за допомогою органічного циклу Ренкіна (ORC). Ефективність роботи ORC-установки значною мірою визначається режимами роботи турбінного агрегату, зокрема параметрами тиску робочого тіла на вході та виході з турбіни. Саме перепад тиску формує рушійну силу процесу розширення та безпосередньо впливає на величину реалізованого ентальпійного перепаду.

Тискове навантаження є одним із ключових факторів, що визначають аеродинамічні умови протікання робочого процесу в радіальній турбіні. Зміна вхідного тиску або ступеня розширення призводить до зміни густини, швидкості та характеру обтікання лопаток, що, у свою чергу, впливає на величину втрат енергії. Надмірне підвищення тиску може спричинити зростання механічних і термічних навантажень на елементи проточної частини, тоді як недостатній перепад тиску зменшує корисну потужність турбіни.

Перспективність застосування радіальних турбін у складі ORC-систем обумовлена їх здатністю ефективно працювати в широкому діапазоні тисків і ступенів розширення, що особливо важливо для установок з нестабільними джерелами тепла. Це робить такі системи придатними для комунальних котелень, біоенергетичних комплексів та промислових підприємств із змінними режимами тепловиділення.

Метою роботи є дослідження впливу тискового навантаження на енергетичні та експлуатаційні характеристики радіальної турбіни в складі ORC-установки та визначення оптимальних параметрів перепаду тиску для підвищення ефективності децентралізованих систем виробництва електричної енергії.

Результат дослідження

В ході навантаження виконується визначення розподілу статичного тиску та коефіцієнта тиску в проточній частині турбіни.

- Повний тиск на вході в турбіни $P_T = 9,335$ бар
- Статичний тиск на виході з турбіни $P_c = 2,156$ бар
- Швидкість обертання ротора $n = 3000$ об/хв

Таким чином, загальний перепад повного тиску, доступний для перетворення в механічну роботу, становить близько 7,18 бар, що є характерним для низькотемпературних ORC-турбін.

Коефіцієнт тиску використовується для безрозмірної оцінки локального стану потоку та визначається як:

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{ref}^2}, \quad (1)$$

Отриманий розподіл коефіцієнта тиску свідчить про: ефективне перетворення потенційної енергії тиску в кінетичну енергію в сопловому апараті, а наявність зон підвищених градієнтів тиску, які відповідають основним втратам у проточній частині.

Це підтверджує коректність формування енергетичного напору перед робочим колесом.

На рисунку 1 візуалізовано потік за допомогою оператора «Tracer», із рисунку ми бачимо, що вектор напрямку потоку в правильному напрямку, тобто з вхідного патрубку на вихідний.

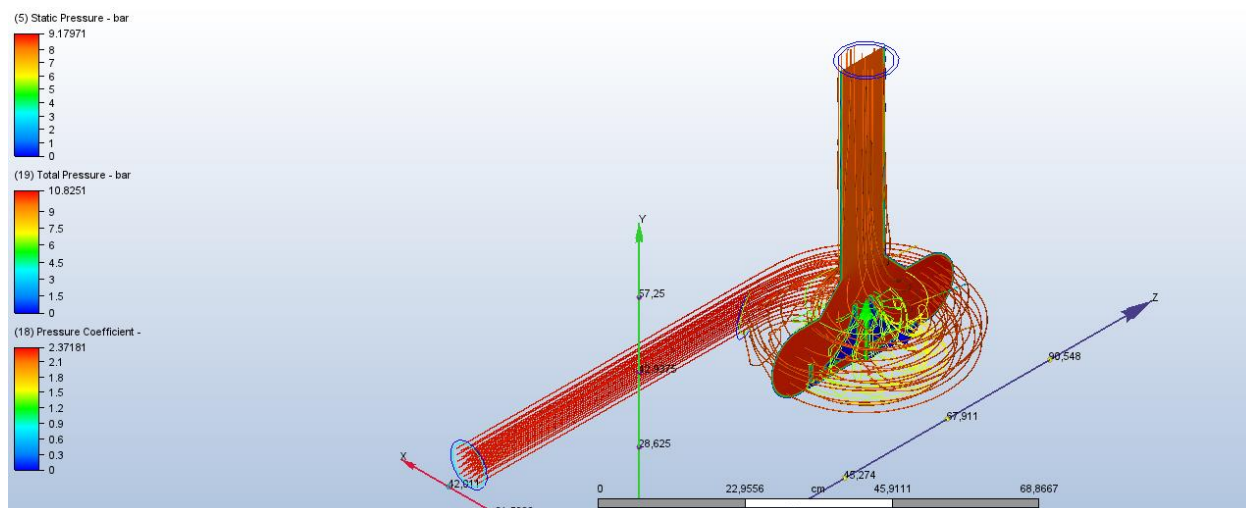


Рисунок 1 – Візуалізація потоку НРТ.

Скориставшись оператором «Wall» визначаємо вектори та момент сил.

Зі зведених результатів на рисунку отримано інтегральні значення моментів сил, що діють на ротор (див. рис.2).

Корисним крутним моментом є складова M_Z , оскільки вона діє вздовж осі обертання ротора.

Наявність додатного за модулем моменту підтверджує, що ротор працює саме в турбінному режимі, а не в режимі гальмування $M = 8,74$ (Н/м).

Summary

Total area, 102.593, cm²
TOTAL MX, -221.191, N-m
TOTAL MY, 537.635, N-m
TOTAL MZ, -9.42218, N-m
Torque, 8.74294, N-m

Рисунок 2 – Результати моменту сил на валу.

Значні значення моментів M_X та M_Y свідчать про асиметрію потоку та створюють додаткові навантаження на опори ротора

Сопловий апарат виконує свою функцію ефективного перетворення перепаду повного тиску у кінетичну енергію потоку. Це підтверджується різким зростанням швидкості до значень близько 80 м/с та відповідним спадом статичного тиску в цій зоні.

Характерні особливості на вході, швидкість зростає різко, що відповідає роботі соплового апарата; максимальні значення швидкості досягають ≈ 80 м/с; далі швидкість стабілізується, що відповідає зоні роботи робочого колеса (див. рис. 3).

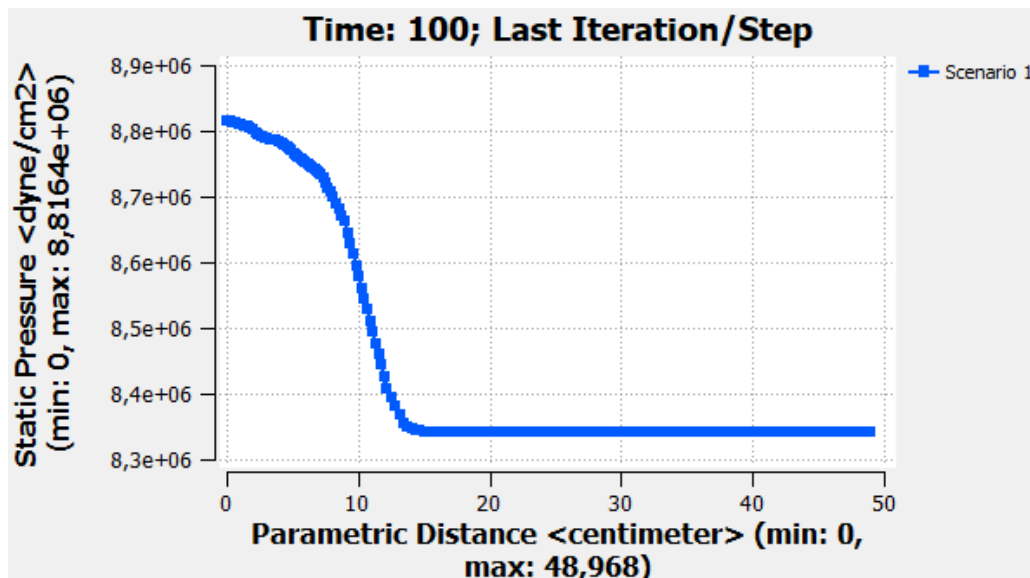


Рисунок 3 – Розподіл тиску на виході з соплового апарату.

Це узгоджується із заданою граничною умовою на виході та підтверджує, що основний енергетичний перепад реалізується до та всередині робочого колеса.

Зростання рівня турбулентності в зоні соплового апарату; пікові значення на вході в колесо; подальше зменшення турбулентності на виході.

Це свідчить про те, що основні втрати зосереджені в зоні формування струменя та на вході в ротор, що є типовим для радіальних турбін.

Основні втрати енергії пов'язані з підвищеним рівнем турбулентної кінетичної енергії в зоні входу в робоче колесо. Пікові значення турбулентності в цій області вказують на наявність інтенсивних градієнтів швидкості, можливих локальних відривів потоку та вторинних течій.

Подальше зниження рівня турбулентності вздовж проточної частини свідчить про часткову стабілізацію потоку, однак початкові втрати в сопловому апараті та на вході в ротор залишаються визначальними для загального ККД турбіни.

Результат оператора демонструє масову витрату 11,49 кг/с, тиск який проходить крізь об'єм 8,34 бар.

Висновки

В даній роботі проаналізовано навантаження радіальної турбіни тиском використовуючи інструменти та оператори CFD моделювання, визначено масу витрату, вона становить 11,49 кг/с, також побудовано графік розподілу тиску в сопловому апараті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Ксендзук В. В. Енергетична безпека України та світу: оцінка наслідків російсько-української війни // Економіка, менеджмент та адміністрування. – 2025. – Режим доступу: <https://ema.ztu.edu.ua/article/view/335558>
- 2 Dixon S. L., Hall C. A. Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery. – 7th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. – 526 p. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780124159549/fluid-mechanics-and-thermodynamics-of-turbomachinery>
- 3 Au 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>
- 4 ngier R. H. Turbine aerodynamics: axial-flow and radial-inflow turbine design and analysis. – New York: ASME Press, 2005. – 404 p.
- 5 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, доцент 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