

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.049

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБТІКАННЯ РОТОРІВ ДАР'Є ТА САВОНІУСА

Редчиць Д.О.¹, Тарасов С.В.¹, Польовий О.Б.¹, Моїсеєнко С.В.²,
Тучина У.М.¹, Акіменко О.В.¹, Заїка В.О.¹

¹*Інститут транспортних систем і технологій НАН України (Україна)*

²*Херсонський національний технічний університет (Україна)*

Залежно від орієнтації осі обертання стосовно напрямку потоку вітру вітроенергетичні установки (ВЕУ) можна розділити на два основних класи: горизонтально-осьові (ГО) і вертикально-осьові (ВО). Горизонтально-осьовою називається установка, вісь обертання якої збігається з напрямком потоку вітру. У вертикально-осьових ВЕУ вісь перпендикулярна потоку. Найбільш широко розповсюдженими представниками даного класу є ротори Дар'є та Савоніуса.

Ефективність роботи будь-якої ВЕУ визначається коефіцієнтом використання енергії вітру (коефіцієнтом потужності). Результати експериментальних досліджень свідчать, що високими значеннями коефіцієнта потужності володіють швидкохідні ГО ВЕУ пропелерного типу, а також ротори Дар'є з фіксованим і змінюваним кутом установки лопаті. І при належному аеродинамічному проектуванні вертикально-осьові ВЕУ фактично не уступають широко розповсюдженим ГО ВЕУ пропелерного типу.

Підвищення потужності вітроенергетичних установок (ВЕУ) та збільшення коефіцієнта використання енергії вітру робить задачу вибору раціональної аеродинамічної форми ротора дуже актуальною. Провідну роль роботі ВЕУ грають нестационарні аеродинамічні процеси, тому основним напрямом досліджень має бути розробка нових універсальних методів розрахунку нестационарних процесів при обтіканні потоком роторів вітроагрегатів.

Відомі методи визначення аеродинамічних та енергетичних характеристик ротора ВЕУ засновані на експериментальних даних, імпульсній та вихровій теоріях, чисельному вирішенні рівняння потенціалу. Вони використовують певні припущення при постановці завдання (квазістационарність потоку, відсутність обліку в'язко-нев'язкої взаємодії тощо). Головними труднощами розрахунку нестационарних процесів при обтіканні роторів ВО ВЕУ є ефекти динамічного зриву потоку. Досі жодна з відомих спрощених моделей не давала можливості адекватно розрахувати аеродинамічні характеристики роторів у разі динамічного зриву потоку.

Рівняння Нав'є-Стокса є найбільш повною математичною моделлю

механіки рідини та газу. Тому їх застосування спільно з моделлю турбулентності, рівнянням динаміки ротора дозволяє досліджувати особливості нестационарного обтікання, структуру поля швидкостей, динамічний зрив потоку, процеси формування та розпаду вихорів навколо самого ротора та слідом за вітроагрегатом.

У роботі розглянуто методику розрахунку чисельного моделювання нестационарного обтікання роторів вертикально-осьових вітроенергетичних установок, що базується на спільному рішенні рівняння обертання ротора та динаміки рідини, що не стискається.

Для розрахунку аеродинамічних характеристик використано алгоритм на базі осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (RANS) нестисливої рідини, записаних відносно довільної криволінійної системи координат на рухомих сітках. Узгодження полів тиску і швидкості здійснюється за допомогою методу штучної стисливості, модифікованого для розрахунку нестационарних задач. Для замикання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса використовуються однопараметрична модель турбулентності Спаларта-Алмараса, а також її модифікації: з урахуванням обертання твердої поверхні та кривизни ліній струму (SARC); лінійна модель, адаптована до тензора швидкостей деформацій (SALSA). Розв'язання системи вихідних рівнянь отримано за допомогою неявного скінчено-об'ємного чисельного алгоритму, що базується на методі штучної стисливості та багатоблочних різномасштабних структурованих сітках.

Наведено результати чисельного моделювання нестационарного обтікання ротора Дар'є. Проаналізовано контури завихреності, розподіл коефіцієнта тиску по поверхні лопаті, значення коефіцієнтів лобового опору, підйомної сили, моменту обертання, нормальної та тангенційної сил. Отримані результати задовільно узгоджуються з експериментальними даними. В'язкі та динамічні ефекти відіграють істотну роль у роботі ротора Дар'є. Встановлено, що збільшення коефіцієнта швидкохідності призводить до придушення процесу формування динамічного зриву потоку з лопатей ротора Дар'є. Показано, що основний момент, що крутить, створюється на навітряній ділянці траєкторії лопаті. Виконано аналіз поля течії навколо дво- та трилопатевого ротора Дар'є. Виділено основні стадії формування вихрової структури. Проаналізовано особливості аеродинаміки обтікання (відрив примежового шару, взаємодія лопатей, перебіг у сліді та поблизу гондоли вітроагрегату) при обертанні ротору. Розглянуто вплив чисел Рейнольдса, коефіцієнтів швидкохідності та заповнення на енергетичні характеристики ротора Дар'є. Зростання числа Рейнольдса призводить до збільшення значень коефіцієнта

потужності. При зменшенні коефіцієнта заповнення ротора Дар'є значення коефіцієнта потужності стають менш чутливими до зміни коефіцієнта швидкохідності.

Проведено три типи обчислювальних експериментів з вивчення аеродинамічних та енергетичних характеристик дво- та трилопатевого ротора Савоніуса. Для більшості кутових положень нерухомого дволопатевого ротора Савоніуса середній за часом коефіцієнт статичного моменту, що крутить, позитивний. У разі трилопатевого ротора Савоніуса коефіцієнт крутного моменту завжди позитивний при будь-якому кутовому положенні ротора. Збільшення числа Рейнольдса призводить до невеликого поліпшення аеродинамічних властивостей ротора. Виділено основні стадії формування вихрової структури при обертанні ротора Савоніуса. У дослідженому діапазоні визначальних параметрів у дволопатевого ротора Савоніуса значення енергетичних характеристик вище, ніж у трилопатевого. Отримані результати задовільно узгоджуються із відомими експериментальними даними. Вирішено зв'язану задачу динаміки та аеродинаміки трилопатевого ротора Савоніуса. Проаналізовано картину течії навколо ротора, наведено залежності коефіцієнтів лобового опору, підйомної сили та моменту обертання, а також кутову швидкість обертання від часу.

NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT FLOW AROUND DARRIEUS AND SAVONIUS ROTORS

Redchyts Dmytro, Tarasov Serhii, Polevoy Oleg,

Moiseienko Svitlana, Tuchyna Ulyana, Akimenko Oksana, Zaika Volodymyr

Abstract. The study of unsteady processes during the flow around the rotors of vertical-axis wind turbines was carried out based on the Navier-Stokes equations. General definition of the coupled problem on vertical-axis wind turbines rotors aerodynamics and dynamics is formulated. The solution to the system of initial equations is obtained using an implicit finite-volume numerical algorithm based on the method of artificial compressibility and multi-block structured grids. A code for the calculation of vertical-axis wind turbines rotors aerodynamic and power characteristics is developed on the base of Reynolds averaged Navier-Stokes equations for incompressible fluids. Two types of Darrieus and Savonius rotors with different geometric parameters and number of blades were calculated. The influence of Reynolds numbers, tip-speed-ratios and solidity on the power characteristics of the rotors has been established.

Keywords: numerical methods, wind turbines, Darrieus rotor, Savonius rotor, Navier-Stokes equation, turbulence model.