

Роговий А.С., д-р техн. наук, професор

ORCID 0000-0002-6057-4845

Савенков Д.А.,

ORCID 0009-0008-8654-627X

Азаров А.С.

ORCID 0000-0002-7119-715X

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

КОМПЛЕКСНА ЧИСЕЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОЧОГО КОЛЕСА І СПІРАЛЬНОГО ВІДВОДУ ВИСОКОНАПІРНОГО ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА

Гідроакумлюючі електростанції (ГАЕС) відіграють ключову роль у балансуванні енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії, забезпечуючи накопичення надлишкової електроенергії та її повернення у години пікового навантаження. Основними агрегатами таких станцій є оборотні гідромашини, що працюють у двох режимах: турбіни та насоса. Ефективність насосного режиму безпосередньо визначає енергетичні та економічні показники акумулюючої станції, а тому підвищення коефіцієнта корисної дії відцентрових насосів із високими напорами є актуальним науково-технічним завданням [1].

Одними з основних елементів, що формують гідравлічні втрати у проточній частині насоса, виступають робоче колесо та спіральний відвід [2]. Нерівномірність розподілу швидкості в міжлопатевому просторі, локальні прискорення до 30 м/с, різкі перепади тиску на задній кромці лопаті, а також відриви потоку в зоні язика спіралі призводять до підвищення втрат і зниження ККД [3]. Традиційні методи проектування базуються на спрощених аналітичних залежностях і не забезпечують урахування складної тривимірної структури течії у високонапірних агрегатах.

Сучасні інженерні підходи передбачають використання засобів комп'ютерної гідродинаміки (CFD), що дають можливість досліджувати просторові турбулентні структури та оптимізувати геометрію з високою точністю [4]. Поєднання Vista CPD для попереднього проектування з тривимірним моделюванням у ANSYS CFX дозволяє виконувати

параметричну оптимізацію проточної частини та оцінювати вплив конструктивних змін на робочі характеристики [5]. У цьому контексті комплексна оптимізація робочого колеса та спірального відводу є перспективним напрямом підвищення ефективності насосних агрегатів ГАЕС.

Методика дослідження базувалася на інтегрованому застосуванні програмного комплексу ANSYS. На першому етапі виконано попереднє проектування проточної частини у Vista CPD та генерацію лопатей у BladeGen. Далі побудовано гексагональні та тетрагональні сітки у TurboGrid і ANSYS Mesh з перевіркою сіткової незалежності. Тривимірне моделювання течії проведено в ANSYS CFX із використанням RANS-рівнянь та SST-моделі турбулентності. Для аналізу взаємодії між колесом і спіраллю застосовано підходи Frozen Rotor та Stage.

Оптимізація робочого колеса була спрямована на зменшення гідравлічних втрат у міжлопатевому просторі та покращення умов течії на виході у спіральний відвід. CFD-аналіз базової геометрії, спроектованої у Vista CPD, показав суттєву нерівномірність розподілу швидкості: у звуженій зоні каналу меридіональна швидкість зростала до 30 м/с, формуючи локальні прискорення та інтенсивні зсувні шари. Крім того, на задній кромці лопаті спостерігався різкий перепад тиску, що сприяв вихороутворенню та підвищував ризик кавітації.

На першому етапі оптимізації виконано локальне розширення каналу в меридіональній площині, що зменшило пікові швидкості та вирівняло потік. На другому етапі скориговано профіль лопаті шляхом зменшення її товщини біля задньої кромки та уточнення кута входу потоку, що забезпечило плавніше з'єднання потоків і зниження втрат. Порівняння модифікацій показало, що оптимізований варіант забезпечив підвищення напору з 588 до 621 м та зростання ККД з 0,927 до 0,952, що підтверджує ефективність внесених змін. Розподіл статичного тиску на лопаті представлено на рисунку 1.

Оптимізація спірального відводу була спрямована на усунення локальних втрат, що формувалися у зоні язика та верхній частині спіралі. Аналіз базової геометрії показав наявність відривних течій і різких градієнтів швидкості, що призводило до нерівномірного навантаження на робоче колесо та зниження ефективності. Для детального виявлення проблемних областей застосовано підхід

Frozen Rotor, який зберігає кутову нерівномірність потоку та дозволяє ідентифікувати локальні зони прискорення й рециркуляції.

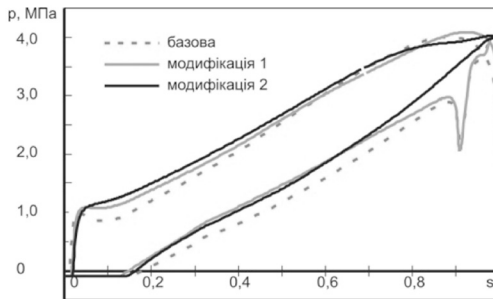


Рисунок 1 – Розподіл статичного тиску вздовж лопаті на 50 % висоті для трьох конструкцій робочого колеса

На основі отриманих результатів розроблено дві модифікації спірального відводу шляхом зміни радіусів поперечних перерізів. Перша модифікація сприяла частковому вирівнюванню поля швидкостей, проте зберігала локальні відриви біля язика. Друга забезпечила плавніше розширення каналу та зменшення пікових швидкостей, що призвело до суттєвого зменшення втрат. Розрахунки показали зростання напору з 549 до 592,5 м та підвищення ККД з 0,865 до 0,893.

Сумарний ефект комплексної оптимізації виявив взаємний вплив удосконалених елементів: покращений вихід із робочого колеса забезпечив рівномірніший ввід потоку у спіраль, а оптимізований відвід ефективніше перетворював енергію, що зменшувало гідравлічні втрати.

Висновки. Розроблено комплексну методику CFD–оптимізації проточної частини відцентрового насоса із використанням Vista CPD, BladeGen, TurboGrid/Mesh та ANSYS CFX, що дозволило врахувати тривимірну структуру течії та взаємодію між елементами.

Оптимізація робочого колеса та спірального відводу забезпечила усунення локальних прискорень і зон відриву, вирівняла розподіл швидкостей і тиску, що зменшило гідравлічні втрати.

Комплексні зміни привели до зростання напору та підвищення ККД до 0,893, що підтверджує ефективність інтегрованого підходу.

Список використаних джерел

1. Резва К.С., Дранковський В.Е., Шевцов В.М. та Оспіщева Л.О. Застосування методів математичного моделювання при чисельному дослідженні гідродинамічних характеристик високонапірної оборотної гідромашини», Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Гідравлічні машини та гідроагрегати, №1, С. 46–52, 2020.

2. Роговий А.С., Дранковський В.Е., Тиньянов О.Д. та Азаров А.С. Проектування оборотної гідромашини засобами Ansys та дослідження течії у насосному режимі. Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Гідравлічні машини та гідроагрегати, №2, – С. 73–81, 2024.

3. T. Nigussie and E. Dribssa, Design and CFD analysis of centrifugal pump, Int. J. Eng. Res. Gen. Sci., vol. 3, no. 3, pp. 668–677, 2015.

4. Роговий А.С., Азаров А.С., та Демчук Р.М. Удосконалення характеристик робочого колеса високонапірного відцентрового компресора проектуванням за допомогою САПР, Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Гідравлічні машини та гідроагрегати, №1, С. 25–30, 2023.

5. A. Rogovy et al., Improving the Performance of a Centrifugal Compressor Through Computer–Aided Design and Optimization of Blade Thickness, in Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, 2024, pp. 324–333.