

## ВІДГУК

офіційного опонента Панченка Анатолія Івановича,  
на дисертаційну роботу Рєзвої Ксенії Сергіївни  
на тему "**Удосконалення проточних частин високонапірних  
оборотних гідромашин на основі чисельного моделювання їх  
гідродинамічних характеристик**",  
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за  
спеціальністю 05.05.17 - гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

### **Актуальність теми досліджень.**

Гідроенергетика є одним із важливих джерел електроенергії та відноситься до відновлювальних систем енергозбереження. Вона забезпечує близько 20 % світового виробництва електроенергії. Але у балансі потужності енергосистеми України частка гідроелектростанцій не перевищує 9,1 %. Встановлено, що економічні та технічні можливості використання гідроенергоресурсів України дорівнюють близько 20 млрд кВтгод., а нині використовується лише 50 %. Для створення сприятливих умов для інтеграції об'єднаної енергетичної системи України з європейською енергосистемою та збільшення експорту електроенергії необхідно приділяти більшу увагу розвитку будівництва та реконструкції гідроелектростанцій (ГЕС) та гідроакumuлюючих електростанцій (ГАЕС,) бо це важлива задача сьогодення.

Тому актуальним є дослідження робочого процесу при проектуванні нових та модернізації існуючих оборотних гідромашин з високими енергетичними показниками.

В дисертаційній роботі розглядається актуальна задача чисельного дослідження просторової течії в елементах проточних частин оборотних гідромашин для подальшого удосконалення з урахуванням їх взаємодії. Вирішена одна з найважливіших задач при проектуванні оборотної гідромашини - узгодження елементів проточної частини при роботі в насосному та турбінному режимах.

Особлива важливість цієї роботи в тому, що вона пов'язана з виконанням держбюджетної теми МОН України «Розробка теоретичних основ синтезу гідравлічних машин, у тому числі гідротурбін та інших технологічних об'єктів автоматизації» (ДР № 0115U000513).

### **Достовірність та ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

Наукові положення, висновки та рекомендації, які викладені у роботі, є достовірними та науково обґрунтованими. Дані положення базуються на аналізі літературних джерел за даною проблематикою, поєднанні мети і задач, використанні сучасних методів дослідження, всебічному аналізі отриманих результатів і порівнянні їх з результатами інших теоретичних та експериментальних досліджень. Виконані теоретичні дослідження спираються на фундаментальні положення механіки рідини та газу, гідродинаміки, сучасної теорії подібності гідромашин та теорії лопатевих гідромашин, а також математичні методи, що дозволяють отримати науковий результат на

основі імітаційного моделювання. Отримані результати перевірені шляхом порівняння з результатами експериментальних досліджень фізичних моделей, що підтвердило адекватність і достовірність дослідження розглянутих гідромашин.

Достовірність результатів, викладених у дисертації забезпечується коректністю при формулюванні мети і задач дослідження, використанням найсучасніших представлень про характер руху рідини у проточній частині гідромашини і фізичних процесів, які відбуваються під час проходження рідини через елементи проточної частини та імітаційним моделюванням, в основі якого лежать не тільки необхідні математичні моделі, але і відповідні математичні методи їх дослідження.

Крім того, матеріали досліджень знайшли підтвердження під час апробацій на багатьох міжнародних наукових конференціях. Все це дозволяє зробити висновок, що сформульовані автором висновки та рекомендації ґрунтовані на науково обґрунтованих результатах досліджень та не викликають сумніву.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Вперше використаний метод дослідження робочого процесу високонапірної оборотної гідромашини, у якому використовуються осереднені безрозмірні параметри для визначення гідродинамічних характеристик окремих елементів проточної частини. Такий підхід моделювання дозволяє з достатньою точністю прогнозувати характеристики на перших етапах проектування без створення об'ємної моделі. Він ґрунтується на побудові графіків змін окремих видів відносних втрат  $h_i/H = f(Q_1)$  при  $n'_1 = \text{const}$  та  $h_i/H = f(n'_1)$  при  $Q_1 = \text{const}$ . Метод осереднених безрозмірних параметрів дозволяє побудувати математичну модель втрат в елементах проточної частини та визначити вплив геометричних параметрів на величину коефіцієнту теоретичного напору, коефіцієнту втрат, гідравлічного ККД та оцінити вид теоретичної характеристики.

Розроблено просторову модель високонапірної оборотної гідромашини на 200 та 500 м і виконано чисельне моделювання просторової течії з використанням CFD. Отримані результати дають змогу оцінити енергетичні характеристики високонапірних оборотних гідромашин, підвищити якість дослідження потоку рідини та скоротити терміни проектування.

В роботі були виділені та вирішені наступні задачі:

- визначено гідродинамічні характеристики елементів проточної частини та кінематичні характеристики лопатевої системи на основі методу осереднених безрозмірних параметрів;
- проведено чисельне дослідження просторової течії в елементах проточної частини для розрахунку енергетичних параметрів оборотних гідромашин;
- визначено оптимальний режим роботи гідромашини з метою зменшення втрат енергії шляхом зміни геометричних параметрів елементів проточної частини в турбінному режимі.

На основі методу осереднених безрозмірних параметрів визначено гідродинамічні та кінематичні характеристики, що дозволило побудувати прогнозні характеристики розглянутих оборотних гідромашин. Визначено кути потоку перед та за робочим колесом, які характеризують узгодження елементів проточної частини.

На основі отриманих результатів методу просторової течії надано рекомендації, щодо визначення параметрів розрахункової моделі: тип та розмір розрахункової сітки, модель турбулентності, граничні умови. Отримано дані розрахунку енергетичних втрат та рекомендації щодо їх зниження.

В ході роботи визначено параметри оптимального режиму тихохідної високонапірної оборотної гідромашини шляхом зміни геометричних параметрів елементів підводу, що призвело до покращення значення ККД.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Розроблені теоретичні основи проектування високонапірних оборотних гідромашин. Результати моделювання гідродинамічних характеристик із використанням методу осереднених безрозмірних параметрів дозволяють з достатньою точністю прогнозувати характеристики високонапірних оборотних гідромашин.

Практична важливість результатів наукової роботи полягає в удосконаленні математичних моделей дослідженні робочого процесу високонапірних оборотних гідромашин.

Результати досліджень показують доцільність використання методу осереднених безрозмірних параметрів на перших етапах проектування, що дозволяє за короткий термін обрати та узгодити між собою елементи проточної частини для отримання високих енергетичних показників гідромашини.

Результати дисертаційної роботи прийняті для використання в практиці в ОП Корпорації «Гідроелекс» (м. Харків) та ТОВ «Гідрогазмаш» (м. Харків), а також впровадженні у навчальний процес на кафедрі «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» в курси «Основи систем автоматичного проектування лопатевих гідромашин», «Системи автоматичного проектування гідротурбін, оборотних гідромашин, малих, міні- та мікрогідроелектростанцій», «Математичне моделювання робочого процесу гідромашин і гідроприводів».

### **Оцінка змісту роботи, її завершеність.**

Дисертаційна робота Резвої К.С. представляє собою закінчену наукову роботу і складається із анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 172 найменувань на 20 сторінках та 4 додатків на 20 сторінках. Основна частина викладена на 171 сторінках, містить 74 рисунки за текстом та 6 таблиць.

У **вступі**, згідно з вимогами, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі, обрано об'єкт і предмет, відображено основні методи досліджень, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено огляд та аналіз існуючих методів гідродинамічного розрахунку гідромашин та методів математичного моделювання їх робочих процесів.

За даними аналізу існуючі методи дослідження картини течії в проточних частинах гідравлічних машин, які застосовуються для прогнозування енергетичних характеристик, не дозволяють надійно визначати параметри для заданих вихідних умов в оборотних гідромашинах, які працюють у двох режимах роботи (насосному та турбінному).

Проведено аналіз існуючих досліджень в галузі теоретичних основ розрахунку та проектування оборотних гідромашин, визначені особливості розподілу гідравлічних втрат енергії в елементах проточної частини.

У **другому розділі** описано використання блочно-ієрархічного методу для математичного опису робочого процесу оборотної гідромашини. Визначено, що при використанні функціональної моделі робочого процесу оборотної гідромашини в насосному режимі для чисельного дослідження гідродинамічних характеристик необхідним є визначення коефіцієнтів теоретичного напору, коефіцієнтів окремих категорій втрат в елементах проточної частини, об'ємного та дискового ККД. В турбінному режимі - приведеної витрати, витрати через робоче колесо, об'ємного та дискового ККД.

При проектуванні оборотних гідромашин вибір основних параметрів відбувається по насосному режиму, тому розрахунок гідродинамічних характеристик для даного режиму виконується за допомогою чисельного моделювання впливу геометричних та режимних параметрів з використанням математичної моделі робочого процесу. Загальна структура математичного опису робочого процесу базується на рівнянні балансу енергії та основному рівнянні гідромашин.

Також в розділі наведено розрахунок втрат за допомогою методу осереднених безрозмірних параметрів. Завдяки цьому методу визначаються коефіцієнти втрат для кожного елемента проточної частини оборотної гідромашини.

Приведена у розділі методика розрахунку дозволяє більш обґрунтовано підійти до вибору основних геометричних параметрів проточної частини та дозволяє побудувати математичну модель втрат у підводі, робочому колесі, відсмоктуючій трубі.

У **третьому розділі** представлена методика проведення чисельного дослідження просторової течії в проточних частинах гідромашин з використанням пакету програм CFD.

Для проведення чисельного дослідження було створено геометричну модель потоку в проточній частині оборотної гідромашини та обрано математичну модель руху рідини ( $k-\varepsilon$  модель турбулентності), ця модель менш вимоглива до обчислюваних ресурсів, що грає велику роль при проведенні великої кількості розрахункових досліджень. Відзначено, що результати розрахунку з використанням даної моделі турбулентності дуже близькі до експериментальних даних.

За результатами розрахунку було визначено:

- втрати в елементах проточної частини, які використовувались для складання балансу енергії;
- розподіл абсолютної швидкості в спіральній камері зі статором в оптимальному режимі роботи насос-турбіни, а також по висоті каналу після решітки статору;
- залежності втрат в елементах проточної частини від приведених витрат при постійному значенні відкриття лопаток направляючого апарату;
- розподіл компонентів швидкості в направляючому апараті та робочому колесі на оптимальному режимі роботи насос-турбіни;
- характер течії в основних елементах проточної частини оборотної гідромашини;

Результат аналізу енергетичних характеристик оборотної гідромашини дозволив виявити в яких елементах проточної частини втрати енергії мають найбільші значення та визначити способи їх зменшення.

**У четвертому розділі** представлено порівняльний аналіз результатів моделювання гідродинамічних параметрів в елементах проточної частини на основі різних математичних моделей.

Встановлено, що для підвищення гідравлічного ККД високонапірної оборотної гідромашини в турбінному режимі при незмінному значенні частоти обертів та оптимальної витрати необхідним є модернізація елементів підводу проточної частини: спіральної камери, колон статору та лопаток направляючого апарату. Результати досліджень адекватно описують характер потоку та дають кількісну і якісну оцінку гідродинамічних характеристик оборотної гідромашини.

Завдяки виконаному аналізу було розроблено та запропоновано нову геометрію підводу проточної частини високонапірної оборотної гідромашини в турбінному режимі, у якій було розширено спіральну камеру, зменшено число колон статору та лопаток направляючого апарату до 16, що дозволило краще узгодити елементи проточної частини між собою, і в результаті гідравлічний ККД збільшився на 2 %.

Оцінюючи дисертаційну роботу, слід зазначити, що вона є закінченою і вирішує поставлені задачі. Зміст, форма подачі матеріалу та стиль викладення відповідають вимогам до кандидатських дисертацій.

#### **Повнота опублікованих основних результатів дослідження.**

Основні положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно викладені в 20 наукових працях. Серед них 8 статей у фахових виданнях України, 12 - у матеріалах міжнародних конференцій.

Рівень і кількість публікацій, а також апробація матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам, що висуваються до кандидатських дисертацій МОН України.

#### **Відповідність автореферату основним положенням дисертації.**

Зміст автореферату у достатній мірі відображає основні положення та результати дисертаційної роботи, висновки в дисертації та в авторефераті повністю співпадають.

### **Загальні зауваження до дисертаційної роботи.**

1. При розгляді основного кінематичного рівняння для лопатевої системи робочого колеса, де встановлюється зв'язок його безрозмірних кінематичних комплексів у характерних перетинах при обертанні з постійною частотою, недостатньо повно наведено межі його застосування. Здобувач у своїй роботі застосовує безрозмірний комплекс, але не визначає граничного рівня і напрямку зміни досягнутих параметрів.

2. При дослідженні впливу геометричних параметрів елементів проточної частини модифікованого підводу на енергетичні показники відсутня оцінка кавітаційних показників.

3. При побудові математичної моделі робочого процесу оборотної гідромашини не враховуються об'ємні втрати та втрати на дискове тертя, які впливають на загальний ККД гідромашини.

4. В роботі не вказано для якого режиму та які граничні умови на вході в робоче колесо задавались під час проектування лопатевої системи.

5. При порівняльному аналізі результатів розрахунку енергетичних характеристик проточної частини високонапірної оборотної гідромашини не приведено даних, які отримуються за стандартною методикою (методика ЦКТИ).

6. В роботі бажано б було привести опис експериментального стенду, на якому проводилися випробування проточної частини оборотної гідромашини, та вказати тип спіральної камери, колон статору, лопаток направляючого апарату і відсмоктуючої труби, який був прийнятий при випробуваннях моделі оборотної гідромашини на гідравлічному стенді.

7. Хотілося б побачити в роботі аналіз можливостей використання застосованих здобувачем методів проектування і програм та вказати діапазон їх використання в оборотних гідромашинах. Бажано було б провести багатокритеріальну оптимізацію отриманих геометричних параметрів проточної частини спроектованої гідромашини не тільки з точки зору отримання максимального значення ККД.

Вказані зауваження стосуються окремих деталей дослідження і не знижують наукового та практичного рівня дисертаційної роботи в цілому та не впливають на позитивну оцінку роботи.

### **Висновок.**

Дисертаційна робота Резвої Ксенії Сергіївни "Удосконалення проточних частин високонапірних оборотних гідромашин на основі чисельного моделювання їх гідродинамічних характеристик" є завершеною науково-дослідною роботою, що має теоретичне та практичне значення, містить нові рішення актуальної науково-практичної задачі, суть якої полягає у розробці та модернізації проточних частин оборотних гідромашин з високими енергетичними показниками.

Актуальність, практичне значення, новизна і завершеність досліджень, обґрунтування та достовірність висновків заслуговує позитивної оцінки.

Зміст і структура дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.05.17 - Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати.

В цілому дисертаційна робота відповідає вимогам п. п. 9, 11, 12 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, а її автор - Резва Ксенія Сергіївна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 - Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати.

Офіційний опонент:  
 доктор технічних наук, професор,  
 завідувач кафедри «Мехатронних  
 систем та транспортних технологій»  
 Таврійського державного  
 агротехнологічного університету

А.І. Панченко

Підпис Панченка А.І. засвідчую  
 Начальник відділу кадрів

Г.В. Терещенко

