

## РЕЦЕНЗІЯ

рецензента - кандидата техн. наук, доцента

Широкого Юрія Вячеславовича

на дисертаційну роботу

Арефьєвої Марії Олександрівни

на тему «Методи підвищення вібростійкості та надійності

гідрогенераторів через вдосконалення конструкції

елементів ротора та хрестовини за критерієм власних частот»,

яка представлена на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 13 Механічна інженерія

за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

### **Актуальність теми дисертації.**

Дисертаційна робота присвячена актуальній для енергетичного машинобудування проблемі підвищення вібростійкості та надійності гідрогенераторів шляхом удосконалення конструкції опорно-напрямних хрестовин. Авторка розробила методи аналітичного та тривимірного розрахунку жорсткості хрестовин і визначення критичних частот ротора з урахуванням податливості опор валопроводу. Подальше зниження вібраційного фону можливе лише через усунення фізичних чинників, що генерують додаткові механічні збудження та вібрації в опорах. У роботі обґрунтовано причинно-наслідковий зв'язок між конструкцією хрестовини, її різножорсткістю та виникненням резонансних явищ у валопроводі. Було виконано розрахунок власних частот і форм коливань валопроводу у тривимірній постановці з урахуванням податливості підшипників і розпірних домкратів. У частині вивчення та визначення механічних навантажень, що діють на ці вузли, було встановлено, що поєднання дії радіальних, осьових і тангенціальних складових на конструкцію мостової хрестовини за умов недостатньої жорсткості спричиняє збіг власної частоти з робочою частотою обертання та призводить до неприпустимих амплітуд коливань опорно-напрямого вузла. Вперше авторкою, на основі результатів вібраційних випробувань і тривимірного дослідження жорсткості конструкції мостової хрестовини, було запропоновано перехід до хрестовини променевого типу з підвищенням жорсткості опори та віддалення критичних частот, що знімає ризики виникнення резонансних явищ. Варто відзначити, що Арефьєва М.О. у ході досліджень провела повне тривимірне моделювання конструкції з фізичним аналізом по авторській методиці, що було створено на рівні найкращих інженерних шкіл європейської науки.

## **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Мету дослідження обґрунтовано в контексті розвитку наукових методів тривимірного фізичного моделювання напружено-деформованого стану хрестовини з урахуванням технологічної, геометричної та оливно-плівкової складових. Інтегровано аналітичну оцінку жорсткості основних елементів хрестовини з еквівалентною жорсткістю підшипників і упорних домкратів як параметрами граничних умов для визначення власних форм і критичних частот ротора, а також впроваджено конструктивні рішення для підвищення жорсткості хрестовини та зниження вібрацій валопроводу.

Результатом проведених досліджень Ареф'євої М.О. стали нові методи дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкцій хрестовин генераторів великої потужності при номінальному режимі роботи та в режимі короткого замикання.

Використання представлених у роботі результатів дозволить забезпечити надійну роботу таких електростанцій України, як Дністровська ГАЕС СВО2 - 1255/255-40 потужністю 324 МВт в генераторному режимі та 416 МВт у режимі двигуна, Київська ГАЕС СВО 733/130-36М потужністю 33,4 МВт у режимі генератора та 40 МВт у режимі двигуна, Середньодніпровська ГЕС ГСВ 1230/140 - 48 потужністю 117 МВт, Дніпро ГЕС-2 СВ1 1230/140-56М потужністю 119 МВт. Всі вищезазначені електростанції забезпечують Україну електричною енергією, завдяки яким забезпечується робота лікарень, виробництв та всіх інших галузей економіки.

Представлена дисертаційна робота надає науково обґрунтовані методи аналітичного та тривимірного визначення жорсткісних характеристик і напружено-деформованого стану опорних хрестовин гідрогенераторів. Отримані результати кількісно описують вплив основних конструктивних параметрів хрестовини на динаміку валопроводу та слугують підґрунтям для оцінки надійності діючих агрегатів, забезпечуючи нерезонансну роботу валопроводу й зниження вібрацій опорного вузла.

**Наукова новизна** результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше створено новий метод розрахунку напружено-деформованого стану хрестовини гідрогенератора, що, на відміну від існуючих, дає змогу врахувати сили від дії короткого замикання, нерівномірність масової складової гідрогенератора з покроковим уточненням силових факторів, що відповідають критичним режимам навантажень.

2. Удосконалено існуючі інженерні методи розрахунку власних частот роторів гідрогенераторів у частині точного задання геометрії елементів конструкції та врахування еквівалентної податливості опор і упорних домкратів в тривимірній постановці з заданням теплових граничних умов I роду; отримано просторові картини вигинів конструкції у трьох площинах.

3. Набув подальшого розвитку метод розрахунку податливості опорних та упорних вузлів гідрогенератора, що, на відміну від існуючих, дає змогу в тривимірній постановці оцінити внесок технологічної, геометричної та оливно-плівкової складових.

**Наукова та практична значущість** отриманих результатів полягає в тому, що полягає у розробці методів тривимірного розрахунку міцності при дослідженні напружено-деформованого стану елементів енергетичного обладнання для подальшого підвищення надійності, зокрема:

1. Запропоновано нову конструкцію модернізованої хрестовини, що відрізняється від існуючої додатковими силовими поясами, які забезпечують необхідну жорсткість конструкції для гідрогенераторів великої потужності, необхідний запас міцності та вібростійкості згідно існуючих нормативних документів.

2. Розроблені методи дозволяють проєктувати хрестовини з оптимальними масо-габаритними показниками, з необхідною жорсткістю конструкції, що включають в конструкцію розпірні елементи – домкрати, для демпфування дії від моменту короткого замикання полюсів.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувачки Арефьєвої Марії Олександрівни відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка та напрямкам досліджень відповідно до освітньо- наукової програми «Авіаційна та ракетно-космічна техніка», про що свідчить висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Арефьєвої Марії Олександрівни, наданий кафедрою аерогідродинаміки Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено. Використання в тексті результатів інших вчених супроводжується відповідними посиланнями, посилання на літературні джерела коректні. Усі

результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, що опубліковані у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

### **Мова та стиль викладення результатів.**

Дисертаційна робота написана українською мовою, логічно структурована та доступно викладена. Основний текст підготовлено якісною технічною мовою, з використанням професійної термінології. Наукова робота достатньо забезпечена рисунками та таблицями.

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, додатків та списків використаної літератури до кожного розділу.

У *вступі* висвітлено актуальність теми підвищення вібростійкості та надійності гідрогенераторів шляхом удосконалення конструкції опорно-напрямних хрестовин. Наведено зв'язок роботи з науковими програмами, визначено мету – розробити методи аналізу напружено-деформованого стану й підвищення жорсткості хрестовин, сформульовано завдання, об'єкт і предмет дослідження, методи, наукову новизну, практичну цінність, особистий внесок автора, апробацію та основні публікації.

*Перший розділ* містить аналітичний огляд конструкцій хрестовин гідрогенераторів і їх впливу на вібростійкість і надійність агрегатів. Розглянуто класифікацію існуючих типів, основні навантаження, які вони сприймають, а також сучасні методи оцінки вібрацій і напрями підвищення жорсткості конструкцій.

*Другий розділ* присвячено методиці оцінки жорсткості та міцності елементів хрестовини. Виконано аналітичні розрахунки для центральної частини, лап, опорних і напрямних підшипників та упорних домкратів із урахуванням їхньої податливості. Розроблено методику визначення прогинів і вертикальної жорсткості, що забезпечує динамічну віддаленість власних частот від робочої швидкості обертання.

*Третій розділ* охоплює чисельний аналіз вібраційних характеристик хрестовин. Проведено тривимірне моделювання критичних частот обертання для гідрогенератора з існуючою мостовою та модернізованою променевою конструкцією. Показано, що модернізація призводить до підвищення першої критичної частоти з 9 Гц до 26 Гц, забезпечуючи необхідний динамічний запас і зменшення резонансних коливань.

*Четвертий розділ* присвячено верифікації результатів дослідження. Проведено порівняння напружено-деформованого стану елементів конструкції методом Hot Spot Stress і перевірку збіжності результатів у послідовності

розрахункових сіток. Отримано підтвердження достовірності чисельного моделювання та уточнено запаси міцності основних елементів хрестовини.

На підставі теоретичних і експериментальних даних сформульовано наукові положення, що розв'язують актуальну задачу підвищення вібростійкості та надійності гідрогенераторів шляхом удосконалення конструкції опорно-напрямної хрестовини за критерієм власних частот. Підтверджено взаємозв'язок між жорсткістю елементів хрестовини, розподілом напружень у роторній системі та виникненням резонансних коливань.

У додатках наведено перелік наукових публікацій здобувачки за темою дисертації та акти впровадження результатів на ТОВ "ХЕМЗ", НАУ «ХАІ».

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.**

Наукові результати дисертації висвітлені у 10 наукових працях, зокрема, 7 статей, що реферуються в базі даних Scopus, 1 теза науково-технічної конференції, в 1 колективній монографії та в 1 патенті.

Публікації Ареф'євої Марії Олександрівни мають високий науковий рівень, проходили рецензування та перевірку на унікальність згідно з умовами видавництва. Особистий внесок здобувачки до поданих наукових публікацій є вагомим. Публікації охоплюють усі основні результати дисертаційного дослідження.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. В першому розділі представлені в роботі різні конструкції хрестовин гідрогенераторів, при чому обчислення силових факторів не проводилось з врахуванням нормативних документів фундаментних споруд в яких вони розміщені та не оцінювався вплив податливості закладних сталевих компонентів і методів їх кріплення.

2. Другий розділ присвячений аналітичному розрахунку хрестовин, однак у розрахунковому алгоритмі не враховано зміни наступних величин від температури: межа плинності та модуль пружності.

3. В третьому розділі дуже детально представлена тривимірна розрахункова модель валопроводу та модель хрестовини. Необхідно звернути увагу, що модернізована хрестовина складається з металопрокату різної товщини та суцільності. При чому межа плинності змінюється в діапазоні 10-15% в залежності від типу використаної сталі в межах однієї групи, що не було враховано при дослідженні.

4. Розділ чотири необхідно було б доповнити інформацією про реальні деформації хрестовини та більш детальною експериментальною частиною.

Важливо відмітити, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

#### **Висновок про дисертаційну роботу.**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувачки ступеня доктора філософії Арефьєвої Марії Олександрівни на тему «Методи підвищення вібростійкості та надійності гідрогенераторів через вдосконалення конструкції елементів ротора та хрестовини за критерієм власних частот» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 13 Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувачка Арефьєва Марія Олександрівна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна технік.

#### **Рецензент:**

Декан факультету авіаційних двигунів,  
Національний аерокосмічний університет  
"Харківський авіаційний інститут"

кандидат техн. наук, доцент

Юрій ШИРОКИЙ