

## ВІДГУК

офіційного опонента – кандидата технічних наук, доцента

Єгорова Андрія Володимировича

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»,

представлену 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 підвищенню вібростійкості та надійності гідрогенераторів великої потужності – одного з найважливіших завдань сучасної електроенергетики, адже саме від стабільної роботи гідроагрегатів залежить ефективність і безперервність енергопостачання країни. У процесі тривалої експлуатації генераторів спостерігається зростання рівня вібрацій, викликаних складними динамічними процесами у валопроводі, нерівномірністю жорсткості опор, появою додаткових моментів від коротких замикань, а також старінням металоконструкцій опорно-напрямних вузлів. Ці фактори зумовлюють появу резонансних явищ, зниження ресурсу підшипників, розбалансування ротора та, як наслідок, аварійні зупинки агрегатів.

У зв'язку з цим надзвичайно актуальним є наукове завдання вдосконалення конструкції хрестовини, що забезпечує геометричну співвісність та впливає на динамічну стійкість системи. Авторкою вперше виконано тривимірне моделювання жорсткісних характеристик хрестовини гідрогенератора з урахуванням податливості підшипників та домкратів, визначено причинно-наслідковий зв'язок між конструкцією опорно-напрямого вузла, нерівномірністю його жорсткості та виникненням резонансних коливань у валопроводі. Запропонований перехід від мостової до променевої конструкції дозволяє істотно знизити амплітуду вібрацій, віддалити критичні частоти від робочих режимів і тим самим підвищити надійність та довговічність гідрогенераторів.

Таким чином, дисертація вирішує актуальне науково-технічне завдання підвищення ефективності та безпеки роботи електричних машин великої потужності шляхом удосконалення їхніх механічних елементів, що має вагоме значення для розвитку енергетики України.

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

Мета дослідження, сформульована Ареф'євою М.О., є обґрунтованою та спрямованою на розвиток сучасних наукових підходів до тривимірного фізичного моделювання напружено-деформованого стану опорно-напрямної хрестовини гідрогенератора з урахуванням технологічних, геометричних та оливно-плівкових чинників, що визначають її просторову жорсткість. У роботі інтегровано аналітичну оцінку жорсткості основних елементів хрестовини з еквівалентною жорсткістю підшипників і упорних домкратів, які використано як граничні умови для визначення власних форм і критичних частот ротора.

Авторка запропонувала низку конструктивних рішень, спрямованих на підвищення жорсткості хрестовини та зниження рівня вібрацій у валопроводі, що безпосередньо впливає на надійність і довговічність гідрогенератора.

Проведені дослідження свідчать про створення нових методів аналізу напружено-деформованого стану елементів хрестовин генераторів великої потужності як у номінальному режимі роботи, так і за умов короткого замикання, що підтверджує наукову новизну та практичну цінність виконаної роботи.

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 машин 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* обґрунтовано актуальність теми, наведено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, визначено методи, наукову новизну, практичне значення, апробацію та публікації. Визначено основну мету – підвищення вібростійкості гідрогенераторів шляхом розробки методів аналізу жорсткості й напружено-деформованого стану опорно-напрямних хрестовин.

*Перший розділ* містить огляд літератури, сучасних досліджень і технічних рішень у галузі динаміки гідрогенераторів. Проаналізовано різні конструкції хрестовин, класифікацію типів опор, особливості сприйняття радіальних, осьових і тангенціальних навантажень. Наведено аналіз вібраційних характеристик валопроводів і методів визначення критичних частот.

*Другий розділ* присвячено аналітичному та чисельному визначенню жорсткісних параметрів елементів хрестовини. Розроблено методику розрахунку вертикальної та радіальної жорсткості з урахуванням податливості підшипників, лап і домкратів. Визначено еквівалентну жорсткість вузлів і виконано аналітичну оцінку прогинів для різних конструкцій.

*Третій розділ* подає тривимірне чисельне моделювання динамічної системи «ротор-опори-хрестовина». Використано метод скінченних елементів (FEM) для визначення власних частот, форм коливань і критичних швидкостей. Порівняно результати для мостової та модернізованої променевої хрестовини: встановлено, що модернізована конструкція збільшує першу критичну частоту з 9 Гц до 26 Гц, що забезпечує нерезонансну роботу.

*Четвертий розділ* присвячено верифікації чисельних результатів і перевірці збіжності розрахункових моделей. Виконано оцінку напружено-

деформованого стану методом Hot Spot Stress, підтверджено достовірність результатів та обґрунтовано запас міцності елементів.

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 Арефьєвої 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 та другому розділах не зрозуміло, яким чином для діючого агрегату ГАЕС Porąbka-Żag враховувався нерівномірність повітряного проміжку, що впливає на електромагнітні та теплові чинники, і в подальшому вносять зміни у величину власних частот і вібрацій.

2. В третьому розділі досить детально представлені тривимірні розрахунки власних частот ротору гідроагрегату, але не зрозуміло яким чином був заданий модуль пружності для ободу ротора, що є складальною одиницею і складається з запресованих пластин, а його величина залежить від моменту затяжки болтових з'єднань, що зменшуються з часом.

3. В четвертому розділі при аналізі збіжності сітки було б доцільним провести дослідження, не тільки для тетраєдральної сітки, а й для сітки у вигляді паралелепіпедів, та можливої комбінації сіток для деталей з правильною геометричною формою, що дало б змогу акцентувати увагу на критичні деталі конструкції.

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 техніка».

### **Офіційний опонент:**

Кандидат технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри «Електричні машини»,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
03 листопада 2025 р.

Андрій ЄГОРОВ