

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу
Васильєва Олександра Олександровича
на тему «Створення нових конструкцій підп'ятників гідрогенераторів
вертикального типу з гідравлічною демпферною системою»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 13 Механічна інженерія
за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

Актуальність теми дисертації

Гідроакумуючі електростанції відіграють важливу роль у забезпеченні стабільної роботи сучасних електроенергетичних систем, оскільки дозволяють оперативно покривати пікові навантаження, підтримувати частоту та напругу в мережі, а також компенсувати нерівномірність графіків електроспоживання. Особливої актуальності це набуває в умовах широкого впровадження відновлюваних джерел енергії, робота яких характеризується нестабільністю виробітку електроенергії. За таких умов підвищуються вимоги до надійності та експлуатаційної довговічності гідрогенераторів-двигунів, які є основним енергетичним обладнанням гідроакумуючих електростанцій.

Одним із найбільш навантажених вузлів гідрогенератора-двигуна є підп'ятник, який сприймає сумарні осьові навантаження від маси ротора, елементів насос-турбіни, гідравлічних та електромагнітних сил. Крім того, під час пусків, зупинок та переходу між режимами генератора і двигуна навантаження на підп'ятник істотно змінюються, що ускладнює оцінювання його міцності та довговічності. Саме тому визначення напружено-деформованого стану цього вузла є одним із найбільш складних і водночас важливих завдань сучасного електромашинобудування.

Необхідно зазначити, що традиційні інженерні методики розрахунку переважно ґрунтуються на використанні спрощених аналітичних моделей, які не дозволяють достатньо точно врахувати реальну геометрію конструкції, контактну взаємодію її елементів, складний просторовий розподіл навантажень та зміну жорсткосних характеристик гідравлічної системи. Це обмежує можливість отримання достовірної оцінки напружено-деформованого стану найбільш відповідальних деталей підп'ятника та ускладнює розроблення нових конструктивних рішень.

У зв'язку з цим використання сучасних методів тривимірного математичного моделювання на основі методу скінченних елементів є перспективним напрямом досліджень. Такі методи дозволяють моделювати роботу конструкції без геометричних спрощень, враховувати контактні граничні

умови між деталями, різноспрямований характер експлуатаційних навантажень, а також досліджувати напружено-деформований стан елементів конструкції у найбільш небезпечних зонах концентрації напружень. Це створює наукові передумови для вдосконалення конструкцій підп'ятників, підвищення їх вібростійкості та експлуатаційної надійності.

Враховуючи викладене, розроблення методики визначення напружено-деформованого стану підп'ятника гідрогенератора-двигуна на гідравлічних опорах у тривимірній постановці та створення нової конструкції підп'ятника з гідравлічною демпферною системою є актуальним науково-технічним завданням, результати якого мають важливе практичне значення для енергетичного машинобудування.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Матеріали дисертаційної роботи дозволяють зробити висновок про достатній рівень обґрунтованості та достовірності отриманих автором наукових результатів. Обґрунтованість висновків забезпечується використанням сучасного математичного апарату, положень механіки деформівного твердого тіла, класичної теорії міцності та сучасних чисельних методів аналізу, реалізованих на основі методу скінченних елементів.

При виконанні досліджень автором розроблено методику визначення напружено-деформованого стану підп'ятника гідрогенератора-двигуна у тривимірній постановці, яка враховує реальну геометрію конструкції без використання спрощень, контактну взаємодію між елементами вузла, особливості просторового розподілу навантажень, а також зміну жорсткосних характеристик гідравлічної опори. Такий підхід дозволив отримати більш повну інформацію про розподіл напружень та деформацій у характерних елементах конструкції порівняно з традиційними інженерними методиками.

Достовірність результатів підтверджується виконанням аналізу збіжності чисельних розрахунків, коректним формуванням граничних умов, використанням моделей без застосування умов симетрії, а також порівнянням результатів тривимірного моделювання з експериментальними та теоретичними дослідженнями інших авторів. Додаткову достовірність отриманих результатів забезпечує використання адаптованого підходу Hot Spot Stress при аналізі зон концентрації напружень.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розробленні нової методики визначення напружено-деформованого стану підп'ятника гідрогенератора-двигуна на гідравлічних опорах, удосконаленні алгоритмів задання граничних умов для тривимірних моделей конструктивних компонентів

та обґрунтуванні нової конструкції підп'ятника з гідравлічною демпферною системою, яка забезпечує покращення вібраційного стану гідроагрегату.

Практична цінність роботи підтверджується можливістю використання розробленої методики під час проєктування гідрогенераторів-двигунів, а також інших відповідальних вузлів електромашинного обладнання. Результати дисертації впроваджені у навчальний процес Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», що свідчить про їх прикладну цінність для електромашинобудівної та аерокосмічної галузей України.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Розвинуті існуючі інженерні методи визначення напружено-деформованого стану на основі класичної теорії міцності в частині уточнення розподілу напружень на основі математичного моделювання конструкції з урахуванням тривимірного розподілу діючих навантажень.

2. Розроблено нову методику розрахунку напружено-деформованого стану гідравлічного підп'ятника гідрогенератора-двигуна у тривимірній постановці із використанням методу скінченних елементів, яка відрізняється від релевантних методик урахуванням просторової роботи гідравлічної опорної системи з пружними гофрованими камерами, заповненими оливою, реальної геометрії конструкції без спрощень, контактних граничних умов між елементами вузла, різнонаправлених та різнофакторних силових впливів у характерних елементах конструкції з урахуванням змінення жорсткосних характеристик оливи в процесі навантаження, що дозволило обґрунтувати створення нової конструкції підп'ятника гідрогенератора-двигуна на гідравлічних опорах з гідравлічною демпферною системою.

3. Вдосконалено алгоритм завдання граничних умов для тривимірних моделей конструктивних компонентів гідрогенератора-двигуна в частині детального опису навантажень, діючих при експлуатації.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Розроблена методика розрахунку напружено-деформованого стану підп'ятника гідрогенератора-двигуна з урахуванням впливу гідравлічної опори, що дозволяє підвищити точність розрахунків при проєктуванні.

2. На основі розробленої методики надане обґрунтування створення підп'ятника на гідравлічних опорах, що дозволяє покращити вібраційний стан гідроагрегату.

3. Виконано втомний розрахунок підп'ятника на гідравлічних опорах, що підтверджує його працездатність протягом нормативного терміну експлуатації гідрогенератора-двигуна.

Розроблену в роботі методику тривимірного розрахунку розподілу напружень може бути застосовано при дослідженні напружено-деформованого стану іншого електромашинного обладнання та енергетичного обладнання авіаційної техніки.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Васильєва Олександра Олександровича 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 Васильєва О. О., 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 оцінки вібраційної надійності та вдосконалення конструкцій опорних вузлів електричних машин.

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 та додатків. Список використаної літератури наводиться після вступу та кожного розділу. Загальний обсяг дисертації складає 185 сторінки, з них 156 сторінок основного тексту, 104 рисунка по тексту, 14 таблиць по тексту, списків використаних джерел до кожного розділу, сумарно викладених на 14 сторінках.

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми запропонованого дослідження, сформульовано мету та основні задачі, підкреслено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, вказано особистий внесок здобувача та наведено апробацію результатів.

У **першому розділі** автором проаналізовано причини виникнення підвищених вібрацій гідроагрегатів і визначено основні фактори, що впливають

на їхній вібраційний стан. На підставі аналізу існуючих конструкцій підп'ятників виконано обґрунтований висновок щодо актуальності розроблення однорядного підп'ятника на гідравлічних опорах із гідравлічною демпферною системою як найбільш перспективного рішення для підвищення експлуатаційної надійності обладнання. Значну увагу приділено визначенню основних геометричних та конструктивних параметрів вузла, які отримані за результатами гідродинамічних розрахунків і стали вихідною базою для подальших досліджень.

У **другому розділі** розроблено математичне забезпечення дослідження напружено-деформованого стану конструкції із застосуванням тривимірного методу скінченних елементів. Автором наведено постановку задач механіки деформівного твердого тіла, теплопровідності та термопружності, обґрунтовано вибір типів скінченних елементів і принципів побудови розрахункових моделей. Особливістю розділу є комплексний підхід до моделювання, який передбачає врахування контактної взаємодії деталей, температурних навантажень, дії інерційних сил, а також впливу оливи під тиском у гофрованих камерах гідравлічних опор. Окрему увагу приділено питанням оцінювання втомної міцності, що дозволяє прогнозувати ресурс роботи елементів підп'ятника.

У **третьому розділі** наведено результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану відповідальних елементів запропонованої конструкції. Виконано дослідження контактних напружень у з'єднанні «тарілка – болт», здійснено перевірку стійкості опорного болта, а також визначено напруження і деформації пружної камери за різних схем навантаження, у тому числі з урахуванням дії олиї під тиском. Проведений аналіз втомної міцності підтвердив відповідність конструкції вимогам щодо довговічності та надійності експлуатації. Також виконано оцінювання достовірності отриманих результатів шляхом порівняння інженерних розрахунків із результатами тривимірного моделювання.

У **четвертому розділі** виконано інтерпретацію напружень у локальних зонах концентрації із використанням адаптованого підходу Hot Spot Stress із застосуванням лінійної поверхневої екстраполяції, що дозволило мінімізувати вплив чисельних особливостей скінченно-елементної моделі. Проведені дослідження збіжності підтвердили правильність обраних підходів до моделювання, а одержані значення напружень і переміщень знаходяться в межах допустимих величин для прийнятих конструкційних матеріалів.

У цілому результати дисертаційної роботи свідчать про успішне вирішення поставленого науково-технічного завдання. Розроблена методика моделювання напружено-деформованого стану підп'ятника гідрогенератора-двигуна на гідравлічних опорах може бути використана під час проектування нових та модернізації існуючих гідроагрегатів. Запропоновані конструктивні рішення та

методичні підходи спрямовані на підвищення вібростійкості, надійності та довговічності енергетичного обладнання, що визначає їх практичну цінність.

Практична значущість роботи підтверджена впровадженням у навчальний процес Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

Загальні висновки висвітлюють основні отримані наукові результати, а також містять рекомендації щодо їх практичного застосування.

У додатках наведено перелік наукових публікацій здобувача за темою дисертації та акт впровадження результатів роботи в науково-методичний процес кафедри аерогідродинаміки Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

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 5 наукових публікаціях здобувача, з яких 3 – у фахових видання України, 2 – у журналі, що індексується у базі даних Scopus, та 1 тезах доповідей на міжнародній конференції.

Публікації Васильєва Олександра Олександровича мають високий науковий рівень, проходили рецензування та перевірку на унікальність згідно з умовами видавництва. Особистий внесок здобувача 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. У першому розділі дисертації достатньо детально проаналізовано конструкції існуючих підп'ятників, однак доцільно було б більш ґрунтовно висвітлити результати використання підп'ятників на гідравлічних опорах у світовій практиці та навести порівняльний аналіз їх експлуатаційної ефективності відносно традиційних конструкцій.

2. У другому розділі основну увагу приділено математичному апарату методу скінченних елементів та постановці задач термопружності й теплопровідності. Разом із тим, методика визначення граничних умов, вибору параметрів навантаження та їх відповідність реальним режимам роботи гідрогенератора-двигуна могла б бути викладена більш детально.

3. У третьому розділі наведено результати дослідження напружено-деформованого стану окремих елементів підп'ятника, однак доцільно було б доповнити роботу аналізом чутливості отриманих результатів до зміни основних

конструктивних параметрів або експлуатаційних навантажень, що дозволило б більш повно оцінити запас працездатності запропонованої конструкції.

4. У четвертому розділі виконано верифікацію результатів чисельного моделювання із застосуванням адаптованого HSS-підходу, проте більш переконливими були б результати експериментальної перевірки або порівняння із даними натурних випробувань інших науковців, що додатково підтвердило б достовірність запропонованої методики.

Вважаю, що наведені зауваження не мають принципового характеру, не знижують наукової новизни та практичної цінності виконаної дисертаційної роботи, а також не впливають на її загальну позитивну оцінку.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Васильєва Олександра Олександровича на тему «Створення нових конструкцій підп'ятників гідрогенераторів вертикального типу з гідравлічною демпферною системою» 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.

Здобувач Васильєв Олександр Олександрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Рецензент:

професор кафедри технології виробництва
літальних апаратів
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»,
доктор технічних наук, професор,
Заслужений працівник освіти України

Юрій ВОРОБІЙОВ