

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

В сучасних умовах розвитку електроенергетики, що характеризуються збільшенням частки відновлюваних джерел енергії та необхідністю забезпечення стійкої роботи об'єднаних енергосистем, особливого значення набуває підвищення ефективності та надійності гідроакумуючих електростанцій. Саме гідрогенератори-двигуни забезпечують швидке регулювання режимів роботи енергосистеми, тому до їх конструкції висуваються підвищені вимоги щодо довговічності, вібростійкості та безвідмовності експлуатації. Одним із найбільш відповідальних вузлів таких машин є підп'ятник, який працює в умовах значних статичних і динамічних осьових навантажень та визначає надійність роботи всього гідроагрегату.

Відомі конструкції підп'ятників мають певні недоліки щодо забезпечення необхідного рівню демпфування коливань і рівномірного розподілу навантажень. Крім того, використання традиційних інженерних методик розрахунку не дозволяє з достатньою точністю врахувати складну просторову геометрію вузла, контактну взаємодію деталей, вплив гідравлічної системи, температурних факторів і локальних концентрацій напружень. У зв'язку з цим актуальними є дослідження, спрямовані на створення нових конструктивних рішень підп'ятників та удосконалення методів їх розрахунку із застосуванням сучасного математичного моделювання.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню саме такого актуального науково-технічного завдання. Автором запропоновано нову конструкцію підп'ятника на гідравлічних опорах та розроблено методику визначення його напружено-деформованого стану у тривимірній зв'язаній постановці на основі методу скінченних елементів. Реалізація запропонованого підходу дозволяє враховувати комплекс експлуатаційних факторів, підвищити точність оцінювання напруженого стану конструкції та створює передумови для покращення вібраційних характеристик і надійності гідроагрегатів. Таким чином, тема дисертаційної роботи є актуальною, має вагоме наукове та практичне значення для сучасного енергетичного машинобудування.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Аналіз змісту дисертаційної роботи свідчить, що отримані автором наукові результати є достатньо обґрунтованими та достовірними. Під час виконання досліджень використано сучасні положення механіки деформівного твердого тіла, теорії пружності, теплопровідності та термопружності, а також чисельні методи, реалізовані засобами методу скінченних елементів. Запропонована методика враховує реальні умови роботи підп'ятника, включаючи контактну взаємодію деталей, вплив тиску оливи в гофрованих камерах, температурні ефекти, інерційні навантаження та особливості роботи гідравлічних опор.

Достовірність одержаних результатів забезпечується коректною математичною постановкою задач, використанням сучасних програмних засобів тривимірного моделювання, виконанням перевірки збіжності чисельних розрахунків та застосуванням адаптованого HSS-підходу для оцінювання локальних зон концентрації напружень. Важливою перевагою роботи є комплексний характер досліджень, що поєднує аналітичні розрахунки, чисельне моделювання та оцінювання довговічності конструкції за критеріями втомної міцності.

Наукова новизна дисертації полягає у розробленні нової методики дослідження напружено-деформованого стану підп'ятника гідрогенератора-двигуна на гідравлічних опорах у тривимірній постановці з урахуванням комплексу експлуатаційних навантажень, а також у створенні нової конструкції підп'ятника з гідравлічною демпферною системою, яка забезпечує покращення вібраційного стану гідроагрегату. До наукових результатів також слід віднести удосконалення підходів до моделювання контактної взаємодії конструктивних елементів та оцінювання напруженого стану в локальних зонах концентрації напружень.

Практична значущість дисертаційної роботи визначається можливістю використання запропонованих методичних підходів під час проєктування, модернізації та перевірочних розрахунків підп'ятників гідрогенераторів-двигунів і інших відповідальних вузлів електромеханічного обладнання. Отримані результати можуть бути використані як у проєктно-конструкторській практиці, так і в наукових дослідженнях та навчальному процесі закладів вищої освіти. Результати дисертації впроваджені у навчальний процес НАУ «ХАІ», 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 жорсткісних 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** виконано аналіз причин виникнення підвищених вібрацій гідроагрегатів та розглянуто можливі шляхи покращення їхнього вібраційного стану. На основі порівняльного аналізу існуючих конструкцій підп'ятників і оцінки їхніх експлуатаційних особливостей обґрунтовано доцільність використання підп'ятника на гідравлічних опорах. Проведено гідродинамічний розрахунок, за результатами якого визначено основні геометричні та конструктивні параметри сегментів підп'ятника, необхідні для подальшого проєктування.

Другий розділ присвячено розробці удосконаленої методики визначення напружено-деформованого стану елементів підп'ятника гідрогенератора-двигуна у тривимірній постановці із застосуванням методу скінченних елементів. Автором виконано узагальнення математичного апарату для

розв'язання задач термопружності та теплопровідності, обґрунтовано вибір розрахункових моделей і типів скінченних елементів, а також наведено алгоритм формування системи рівнянь МСЕ. Важливою особливістю запропонованої методики є комплексне врахування механічних, температурних та інерційних навантажень, що забезпечує більш повне відтворення реальних умов роботи конструкції. Позитивною рисою другого розділу є також врахування специфічних особливостей конструкції підп'ятника на гідравлічних опорах, зокрема впливу оливи під тиском у гофрованих камерах, взаємозв'язку задач теплопровідності та термопружності, а також використання методів оцінювання втомної міцності для прогнозування довговічності елементів конструкції. Запропонований підхід створює теоретичну основу для подальших чисельних досліджень, результати яких наведені у наступних розділах дисертації, та забезпечує достатній рівень обґрунтованості виконаних розрахунків.

У **третьому розділі** наведено результати чисельного дослідження напружено-деформованого стану основних вузлів нового підп'ятника. Виконано аналіз контактної взаємодії в з'єднанні «тарілка – болт», досліджено стійкість вертикального опорного болта, а також визначено напруження і деформації пружної камери за різних умов роботи, зокрема з урахуванням дії оливи під тиском. Додатково проведено розрахунок втомної міцності матеріалу камери, який підтверджує працездатність конструкції протягом нормативного строку експлуатації. У розділі здійснено перевірку достовірності отриманих результатів шляхом зіставлення інженерних розрахунків із результатами тривимірного моделювання методом скінченних елементів.

У **четвертому розділі** для коректної оцінки локальних максимумів напружень у зонах їх концентрації застосовано адаптований HSS-підхід із використанням лінійної поверхневої екстраполяції. Проведені дослідження збіжності підтвердили достатню точність запропонованої методики, а отримані значення напружень і переміщень не перевищують допустимих величин для прийнятого конструкційного матеріалу. Використаний підхід дозволяє мінімізувати вплив локальних чисельних особливостей моделі та підвищує достовірність оцінювання напружено-деформованого стану конструкції.

За результатами виконаних досліджень автором розроблено методику моделювання напружено-деформованого стану вузлів і елементів підп'ятника гідрогенератора-двигуна на гідравлічних опорах. Практичне застосування запропонованої методики на етапах проєктування та модернізації гідроагрегатів сприятиме підвищенню їхньої надійності, покращенню вібраційних характеристик і забезпеченню більш ефективної експлуатації обладнання.

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 обґрунтовано необхідність заміни існуючого підп'ятника на конструкцію з гідравлічними опорами, однак доцільно було б доповнити аналіз кількісним порівнянням експлуатаційних показників існуючої та запропонованої конструкцій, зокрема щодо рівня вібрації, рівномірності розподілу навантаження між сегментами та очікуваного ресурсу роботи.

2. У другому розділі достатньо повно викладено методику тривимірного моделювання та особливості постановки задачі. Разом із тим доцільно було б ширше висвітлити питання вибору вихідних параметрів моделі та оцінки їх впливу на результати чисельних розрахунків.

3. У третьому розділі запропоновано поетапний алгоритм визначення напружено-деформованого стану підп'ятника, який включає аналітичні розрахунки, МСЕ-моделювання та CFD-аналіз течії оливи. Водночас доцільно було б детальніше висвітлити результати аналізу чутливості моделі до зміни тиску оливи, жорсткості пружної камери та інших визначальних параметрів, що дозволило б більш повно оцінити стійкість запропонованих конструктивних рішень.

4. У четвертому розділі достовірність результатів підтверджено дослідженням збіжності та застосуванням адаптованого HSS-підходу. Проте робота виграла б від доповнення результатами експериментальної верифікації

або порівнянням із даними натурної експлуатації чи стендових випробувань, що стало б додатковим підтвердженням практичної достовірності 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:

начальник науково-дослідної частини
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»,
канд. техн. наук, старший дослідник

Олександр МІНКО