

ВІДГУК

офіційного опонента 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

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю забезпечення надійної та ефективної роботи гідрогенераторів-двигунів, які є основними генеруючими потужностями гідроакумуючих електростанцій, що виконують важливу функцію балансування енергосистеми, покриття пікових навантажень і забезпечення стабільності режимів роботи електричних мереж. Доцільно зазначити, що в умовах активного впровадження відновлюваних джерел енергії роль гідроакумуючих електростанцій істотно зростає.

Підп'ятник гідрогенератора-двигуна є вузлом, що сприймає значні осьові навантаження від ротора, насос-турбіни та дії електромагнітних і гідродинамічних сил. У процесі експлуатації, особливо під час зміни режимів роботи агрегату, характер навантаження істотно змінюється, що супроводжується виникненням складного напружено-деформованого стану та підвищеними вимогами до вібростійкості й довговічності конструкції. Саме тому питання вдосконалення конструкції підп'ятника та підвищення точності його розрахунку є актуальними як з наукової, так і з практичної точки зору.

Існуючі інженерні методики проектування здебільшого базуються на спрощених розрахункових схемах, які не забезпечують повного врахування контактної взаємодії деталей, просторового характеру навантажень, впливу гідравлічної системи, температурних факторів та локальних концентрацій напружень. Використання сучасних засобів тривимірного чисельного моделювання із застосуванням методу скінченних елементів відкриває можливість комплексного аналізу роботи конструкції в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації, що є необхідною передумовою створення більш надійних конструктивних рішень.

У зв'язку з викладеним дисертаційна робота, присвячена створенню підп'ятника гідрогенератора-двигуна на гідравлічних опорах та розробленню методики визначення його напружено-деформованого стану у тривимірній постановці, є своєчасною та актуальною. Отримані результати мають практичне

значення для проєктування, модернізації та підвищення експлуатаційної надійності гідроагрегатів.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Зміст дисертаційної роботи свідчить про належний науково-методичний рівень проведених досліджень. Обґрунтованість отриманих результатів забезпечується використанням сучасних положень теорії пружності, теплопровідності, термопружності, механіки контактної взаємодії та чисельних методів, реалізованих на основі методу скінченних елементів. Це дозволило адекватно описати напружено-деформований стан і теплові процеси в елементах підп'ятника за умов експлуатації.

Автором розроблено методику тривимірного визначення напружено-деформованого стану підп'ятника на гідравлічних опорах, яка враховує реальну геометрію конструкції, контактну взаємодію її елементів, вплив тиску оливи, температурних факторів і просторового розподілу навантажень. Такий підхід забезпечує більш достовірне моделювання роботи конструкції порівняно з традиційними розрахунковими схемами.

Достовірність одержаних результатів підтверджується аналізом сіткової збіжності скінчено-елементних моделей, коректним вибором граничних умов, зіставленням результатів чисельного моделювання з інженерними розрахунками та даними інших досліджень, а також застосуванням адаптованого HSS-підходу для оцінювання розподілу напружень у локальних зонах концентрації.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у створенні нової конструкції підп'ятника гідрогенератора-двигуна на гідравлічних опорах із гідравлічною демпферною системою та розробленні методики комплексного тривимірного визначення його напружено-деформованого стану. До нових наукових результатів також належать уточнене моделювання контактної взаємодії елементів конструкції, врахування впливу робочої рідини на напружений стан пружної камери та застосування адаптованого HSS-підходу для підвищення достовірності оцінювання локальних концентрацій напружень.

Результати дисертації впроваджені у навчальний процес НАУ «ХАІ», що свідчить про їх прикладну цінність для електромашинобудівної та аерокосмічної галузей України. Отримані методики можуть бути використані для визначення оптимальних конструктивних параметрів електромашинного обладнання.

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 отриманих результатів:

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 аерогідродиніміки 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 виконано аналіз технічного стану підп'ятників гідрогенераторів-двигунів і досліджено причини виникнення підвищених вібрацій гідроагрегатів, які негативно впливають на їхню експлуатаційну надійність. На підставі аналізу конструктивних особливостей існуючих підп'ятників та оцінки їхніх переваг і недоліків обґрунтовано доцільність використання підп'ятника на гідравлічних опорах із гідравлічною демпферною системою, що забезпечує більш рівномірний розподіл навантажень між сегментами та покращення вібраційного стану агрегату. Для визначення основних конструктивних параметрів підп'ятника проведено гідродинамічний розрахунок, результати якого використано як вихідні дані для подальшого тривимірного моделювання та проектування конструкції.

У **другому розділі** автором сформовано математичну постановку задач теорії пружності, теплопровідності та термопружності, наведено математичний апарат тривимірного скінченно-елементного аналізу та обґрунтовано вибір розрахункових моделей. Запропоновано алгоритм визначення напружено-

деформованого стану елементів конструкції з урахуванням температурних впливів, фізико-механічних властивостей турбінної оливи та критеріїв втомної міцності.

У **третьому розділі** наведено результати чисельного дослідження напружено-деформованого стану найбільш відповідальних елементів запропонованого підп'ятника. Окрему увагу приділено побудові алгоритму виконання розрахунків, який передбачає проведення аналітичних розрахунків, скінченно-елементного моделювання, CFD-аналізу розподілу тиску робочої рідини та оцінювання довговічності конструкції за критеріями втомної міцності. Досліджено контактну взаємодію в системі «тарілка – опорний болт», виконано перевірку стійкості вертикального опорного болта, а також визначено параметри напружено-деформованого стану пружної камери спочатку без урахування робочої рідини, а потім із врахуванням розподілу тиску оливи, отриманого за результатами гідродинамічного моделювання. Крім того, виконано розрахунок втомної міцності конструкції, який підтвердив її працездатність протягом нормативного строку експлуатації. Для перевірки правильності отриманих результатів здійснено їх порівняння з інженерними розрахунками, що дозволило оцінити коректність запропонованої методики тривимірного моделювання.

У **четвертому розділі** виконано верифікацію запропонованої методики шляхом аналізу сіткової збіжності тривимірних моделей та оцінювання достовірності визначення локальних максимумів напружень у зонах їх концентрації. Для цього застосовано адаптований HotSpotStress-підхід у постановці лінійної поверхневої екстраполяції, який дозволяє суттєво знизити вплив локальних чисельних особливостей скінченно-елементної моделі на результати аналізу. Отримані результати підтвердили достатню точність запропонованої методики, а значення еквівалентних напружень і переміщень у найбільш навантажених зонах конструкції не перевищують допустимих величин для використаних конструкційних матеріалів. Виконана верифікація підтвердила можливість практичного застосування розробленої методики під час проєктування та модернізації підп'ятників гідрогенераторів-двигунів.

Загалом результати дисертаційної роботи свідчать про успішне вирішення поставленого науково-технічного завдання. Запропонована методика комплексного моделювання напружено-деформованого стану підп'ятника на гідравлічних опорах може бути використана при створенні нових і модернізації існуючих гідроагрегатів, забезпечуючи підвищення їхньої вібростійкості, надійності та довговічності. Отримані результати мають практичну цінність не лише для гідроенергетичного машинобудування, а й можуть бути використані під час проєктування інших відповідальних конструкцій, що працюють в умовах складного просторового навантаження.

Практична значущість роботи підтверджена впровадженням у навчальний процес НАУ «ХАІ».

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 розділі 3 (с. 134) зазначено, що тиск оливи всередині пружної камери приймається постійним ($P = 8,1$ МПа) на основі статичних розрахунків. Проте під час інтенсивних перехідних режимів пусків та зупинок виникає потужний динамічний ефект стиснення масляної плівки, що неодмінно вимагає нестационарного розв'язання задачі гідропружності в часі.
2. Під час детального аналізу критичних частот обертання та загального вібраційного стану гідроагрегату (с. 36) не досліджується вплив гіроскопічних моментів масивного обертового ротора. Ці некомпенсовані моменти в динаміці можуть створювати значні додаткові та асиметричні навантаження на окремі сегменти підп'ятника.
3. Оцінка міцності масивного вертикального опорного болта (с. 121, 126) демонструє великий розрахунковий запас міцності (понад 9,5). Однак розрахунок виконано без урахування початкових геометричних і монтажних недосконалостей осі болта та нелінійних ефектів великих просторових переміщень, що є важливим для стиснутих елементів.
4. Оцінка втомної довговічності пружної сталеві камери (с. 142) базується на класичній кривій Велера для сталої амплітуди навантаження. На

практиці реверсивна машина зазнає дії широкосмугового стохастичного спектра пульсацій від гідротурбіни, що об'єктивно вимагає застосування методу виділення циклів (наприклад Rainflow counting) та правила лінійного підсумовування пошкоджень.

5. Під час МСЕ-моделювання складної контактної взаємодії "тарілка-болт" (с. 107) тіло опорного болта прийнято як жорстко закріплене. У реальній конструкції різьбове з'єднання має власну механічну податливість, ігнорування якої призводить до штучного завищення загальної розрахункової жорсткості вузла.
6. У формулі 1.24 (с. 60) для визначення втрат на в'язке тертя обертового диска використано емпіричні коефіцієнти тертя k_1 та k_2 . У тексті відсутнє обґрунтування їхньої достовірності для сучасних PTFE-матеріалів або бабітів за умов розвиненого турбулентного режиму течії з числами Рейнольдса понад $5 \cdot 10^5$ (с. 61).
7. Робота глибоко досліджує мікродеформації сегментів підп'ятника, але ігнорує макроскопічні термічні деформації масивної верхньої мостової хрестовини (с. 27). Під час виходу агрегату на робочі температури це може викликати міліметровий перекис площини підп'ятника та нерівномірне навантаження камер.
8. На сторінці 17 у відповідному вступному переліку наведені не всі змінні, які активно використовуються у тексті роботи. Зокрема, відсутні розшифровки таких параметрів, як E_V^* (модуль пружності вакуумованої рідини), $\bar{\omega}_T$ (безрозмірний тангенціальний ексцентриситет) та інших.

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

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

Офіційний опонент:

доцент кафедри «Теплової та
альтернативної енергетики»
Національного технічного університету
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
кандидат технічних наук, доцент

Дмитро РИНДЮК