

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента - кандидата техн. наук, доцента

Широкого Юрія Вячеславовича

на дисертаційну роботу

Жукова Антона Юрійовича

на тему «Оптимізація масогабаритних показників великих машин
постійного струму»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 13 Механічна інженерія

за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

Актуальність дослідження

Сучасна парадигма розвитку глобального енергетичного машинобудування диктує жорсткі вимоги до підвищення питомих показників потужності при радикальному зниженні матеріаломісткості великих електричних машин постійного струму (ЕМПС). Для індустріального сектору України, зокрема гірничо-металургійної галузі та аерокосмічного комплексу, створення високоефективного електротехнічного обладнання з мінімізованими масогабаритними параметрами є стратегічним завданням, що безпосередньо впливає на енергонезалежність та конкурентоспроможність економіки. Проблема полягає в тому, що класичні конструкторські рішення значною мірою вичерпали свій модернізаційний ресурс, а подальше вдосконалення машин стримується недосконалістю традиційних методів проектування, які базуються на усереднених аналітичних залежностях та спрощених розрахункових схемах.

Необхідність фундаментального перегляду існуючих підходів зумовлена тим, що класичні методики не здатні адекватно відобразити складну просторову структуру теплових, гідрогазодинамічних та механічних процесів, що протікають в активних частинах ЕМПС. Це призводить до виникнення значних похибок при прогнозуванні локальних зон термічної напруженості, через що розробники змушені закладати надлишкові, економічно необґрунтовані коефіцієнти запасу матеріалів для компенсації ризиків перегріву або механічної деструкції вузлів. Актуальність даної роботи полягає у розробці та впровадженні науково обґрунтованої методології тривимірного чисельного моделювання, що дозволяє інтегрувати розрахунки фізичних полів у єдиний обчислювальний цикл, виявляючи приховані конструктивні резерви, недоступні для традиційного аналізу.

Особливого значення набуває дослідження найбільш теплонавантажених вузлів — колекторно-щіткових апаратів, де інтенсивність тепловідведення безпосередньо визначає експлуатаційний ресурс усієї машини. Впровадження

інноваційних систем примусової вентиляції, обґрунтованих за допомогою методів обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD), дозволяє радикально інтенсифікувати процес охолодження. Це створює наукове підґрунтя для безпечного зменшення лінійних розмірів колекторів без загрози виходу температур за межі регламентованих класів ізоляції. Крім того, актуальність дослідження підсилюється гострою потребою у створенні методів прецизійної оцінки напружено-деформованого стану (НДС) вузлів після відновлювальних ремонтних робіт, що є критично важливим для продовження життєвого циклу дороговартісного промислового парку машин.

Наукова актуальність роботи підкріплена використанням передового математичного апарату — методу скінченних об'ємів та методу скінченних елементів (FEM), реалізованих у висотехнологічному програмному середовищі. Перехід від одновимірних моделей до повномасштабної тривимірної постановки задачі дозволяє не лише уточнити граничні умови теплообміну, а й створити фундамент для предиктивного аналізу стану обладнання. Практична спрямованість дослідження, підтверджена успішною апробацією на ТОВ «ХЕМЗ» та в Національному аерокосмічному університеті «ХАІ», демонструє своєчасність обраного напрямку для розв'язання пріоритетних завдань вітчизняного електромашинобудування та авіаційної промисловості. Отримані результати є вагомим внеском у розвиток теорії та практики проектування електричних машин нового покоління.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Високий ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та практичних рекомендацій, представлених у дисертаційній роботі, базується на комплексному поєднанні фундаментальних теоретичних засад класичної фізики та сучасних методів обчислювального аналізу. Теоретико-методологічною основою дослідження стали базові закони термодинаміки, гідрогазодинаміки та механіки деформівного твердого тіла. Обґрунтованість результатів забезпечена послідовним переходом від системного аналізу існуючих конструкцій великих електричних машин постійного струму (ЕМПС) до побудови прецизійних математичних моделей фізичних полів, що дозволило усунути суперечності між теоретичними розрахунками та практичними показниками експлуатації.

Ключовим фактором обґрунтованості є використання апарату усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (RANS), що дозволило з науковою точністю описати складні процеси тепломасообміну в зонах колекторно-щіткового апарату. Авторське обґрунтування вибору напівемпіричних моделей турбулентності ($k-\epsilon$ та її модифікацій) спирається на глибокий аналіз специфіки в'язких течій у обмеженому просторі вентиляційних каналів, що

мінімізує похибки, притаманні традиційним спрощеним аналітичним розрахункам. Застосування методу скінченних об'ємів (FVM) для розв'язання газодинамічних задач та методу скінченних елементів (FEM) для аналізу напружено-деформованого стану дозволило досягти високої деталізації фізичних процесів у тривимірній постановці.

Логічна обґрунтованість роботи підтверджується коректним завданням граничних умов, які відображають реальну експлуатаційну динаміку навантажень — від градієнтних тепловиділень в обмотках до механічних напружень у вузлах гарячої посадки. Використання адаптивних неструктурованих обчислювальних сіток із локальним згущенням у зонах концентрації напружень та градієнтів швидкостей забезпечило збіжність і стабільність ітераційних процесів, що є методологічним підтвердженням якості отриманих даних. Додатковим аргументом на користь обґрунтованості є інтеграція результатів аеродинамічних розрахунків у моделі механічної міцності, що дозволило сформувати цілісну картину стану машини як єдиної фізичної системи.

Обґрунтованість висновків щодо можливості оптимізації масогабаритних показників базується на виявленні реальних температурних та міцнісних запасів вузлів, які раніше не могли бути ідентифіковані через обмеження плоских розрахункових схем. Перехід до тривимірного аналізу дозволив науково довести безпечність зменшення геометричних параметрів колекторів при впровадженні систем примусової вентиляції. Кожне наукове положення дисертації проходить через етап верифікації — від перевірки математичної моделі на чутливість до зміни параметрів до прямого порівняння з результатами натурних випробувань на ТОВ «ХЕМЗ».

Статистична значущість та повторюваність отриманих результатів, а також їх відповідність вимогам нормативно-технічної документації за допустимими температурами та напруженнями, остаточно підтверджують обґрунтованість розробленої методики. Таким чином, дисертація являє собою теоретично вивірене та практично підтверджене дослідження, де кожен результат спирається на сувору математичну доказовість та фундаментальні принципи електромашинобудування.

Результати дисертації впроваджені на ТОВ «ХЕМЗ» та у навчальний процес НАУ «ХАІ», що свідчить про їх прикладну цінність для гірничої 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. Вперше створено новий метод аналізу теплового стану елементів конструкції великих машин постійного струму з вирішенням сукупності задач руху повітря та теплопровідності у тривимірній постановці із використанням методу скінченних об'ємів, що відрізняється більш точним заданням граничних умов в частині градієнтного завдання тепловиділень та коефіцієнтів тепловіддачі в тривимірній постановці.

2. Удосконалено алгоритм створення оптимізованої сітки скінченних об'ємів для вентиляційної моделі з використанням базових тетраедральних компонентів, що відрізняється згущенням компонентів в окремих зонах каналів, обумовлених детальними конструктивними чинниками.

3. Удосконалено алгоритм виконання оптимізації масогабаритних показників електромашинного обладнання з визначенням напружено-деформованого стану відновлюваних вузлів, що базується на параметрах електромагнітної ефективності та максимальної технологічності.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Надане обґрунтування оптимізації масогабаритних показників за рахунок впровадження системи примусової вентиляції для колектору та щіткового вузла машини постійного струму із забезпеченням їх теплового стану згідно заданим технічним вимогам.

2. На основі аналізу напружено-деформованого стану відновлених частин підтверджена можливість їх оптимізації масогабаритних показників електричної машини з забезпеченням її подальшої надійної експлуатації.

Розроблені в роботі методи тривимірного розрахунку руху газоподібного охолоджуючого середовища, теплового та напружено-деформованого стану вузлів можуть бути використані при дослідженні теплового стану електромашинного обладнання літаків та аеродромів.

Отримані наукові результати можуть бути використані науково-дослідними та проєктними організаціями, конструкторськими бюро, організаціями гірничої та електромашинобудівної галузей, аерокосмічними університетами та іншими організаціями, які спеціалізуються в області досліджень та експлуатації електромашинного обладнання.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Жукова Антона Юрійовича 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 Жукова А.Ю., 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 напружено-деформованого стану та аналізу теплового стану 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.

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 реалізовано всебічний ретроспективний та критично-аналітичний огляд конструктивних специфікацій великих електричних машин постійного струму (ЕМПС), у межах якого особливу увагу зацентовано на детермінації фундаментальних взаємозв'язків між топологією активних частин та механізмами функціонування гетерогенних систем охолодження. Шляхом компаративного аналізу автентичних конструктивних рішень із релевантними їм способами інтенсифікації тепловідведення було експліковано методологічну обмеженість класичних аналітичних апаратів. Попри формальну відповідність останніх чинній нормативно-технічній документації, вони не демонструють

спроможності до прецизійної верифікації ефектів локальної турбулізації та просторової анізотропії температурних полів. На підставі верифікованого огляду сучасних світових практик структурної оптимізації ідентифіковано стратегічні вектори демпфування матеріаломісткості виробництва, що полягають у безальтернативній необхідності імплементації вискоефективних чисельних методів детермінації теплового та напружено-деформованого стану (НДС) задля експлікації латентних конструктивних резервів.

Другий розділ присвячено фундаментальному науковому обґрунтуванню та експліцитній розробці універсального алгоритму тривимірного чисельного моделювання, детермінованого для поглибленої ідентифікації параметрів складної газодинаміки охолоджуючих контурів та просторової дифузії температур у компонентах ЕМПС на основі інтегрування системи осереднених за числом Рейнольдса рівнянь Нав'є-Стокса (RANS). У межах зазначеного етапу аргументовано методологічну доцільність аплікації методу скінченних об'ємів (FVM), адаптованого у спеціалізованому програмному середовищі Flow Simulation, що дозволяє з високим ступенем достовірності апроксимувати поведінку в'язких течій шляхом релевантної селекції напівемпіричних моделей турбулентності. Особливу увагу зосереджено на процедурі дискретизації континууму розрахункової області за допомогою гібридних неструктурованих сіток, що поєднують тетраедральні та призматичні елементи, чим забезпечено максимальну геометричну толерантність моделі до специфічної архітектури вентиляційних каналів.

У третьому розділі репрезентовано результати комплексного компаративного дослідження термічного стану колекторно-щіткового вузла, реалізованого у тривимірній постановці для двох дивергентних сценаріїв: автентичної базової конфігурації та модернізованої системи з імplementованою примусовою інжекцією охолоджуючого повітря. Завдяки здійсненій візуалізації векторних полів та температурних градієнтів науково верифіковано, що інтенсифікація конвективного обміну гарантує гомеостаз теплового режиму вузла в усіх детермінованих експлуатаційних діапазонах із суворим дотриманням ізоляційних норм. Отримані дані слугували когнітивним фундаментом для стратегічної реконфігурації геометрії колекторного апарату, що уможливило радикальну редукцію його габаритних параметрів без ризику термічної деструкції діелектричних компонентів.

У четвертому розділі викладено результати чисельної детермінації напружено-деформованого стану ротаційних компонентів електродвигуна, здійсненої методом скінченних елементів (FEM) з метою верифікації механічної резистентності конструкції після реалізації реноваційних або оптимізаційних технологічних інновацій. Зокрема, представлено математичну

дедукцію безпечності функціонування валів із диференційованим діаметром шийок після прецизійного механічного проточування, а також результати симуляції контактних інтеракцій, детермінованих процесом гарячої посадки напівмуфт. Встановлено, що обчислені значення еквівалентних напружень за Мизесом не перевищують граничних значень пластичності матеріалу, а генерований натяг у спряженнях забезпечує трансляцію номінальних крутних моментів, що в сукупності підтверджує працездатність модернізованих елементів якоря за умов екстремальної механічної напруженості.

Практична значущість роботи підтверджена впровадженням на ТОВ «ХЕМЗ» та у навчальний процес НАУ «ХАІ», що демонструє ефективність запропонованих підходів для модернізації електромашинного 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, акт впровадження результатів на ТОВ «Харківський електромашинобудівний завод», а також 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 4 наукових публікаціях здобувача, що реферуються в базі даних Scopus, 4 тезах доповідей на міжнародних конференціях, 1 монографії та 2 патентах на корисну модель.

Публікації Жукова Антона Юрійовича 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 1 доцільно було б провести дослідження використання відцентрових та радіальних нагнітачів та розробити алгоритм вибору необхідних параметрів.

2. У Розділі необхідно було б звернути більш ретельну увагу на формування сітки скінчених об'ємів та визначення необхідної густини. Варто було б провести адаптацію сітки до розмірів вентиляційних каналів.

З В частині міцності правильно було б провести кореляцію результатів не тільки за Мізесом, а ще за нормальними та тангенціальними навантаженнями. Провести аналіз результатів з базовими стосовно напряму розтягування, що є визначальними при прийнятті матеріалів.

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 Жукова Антона Юрійовича на тему «Оптимізація масогабаритних показників великих машин постійного струму» 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 Жуков Антон Юрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Рецензент:

Декан факультету авіаційних двигунів,
Національний аерокосмічний університет
"Харківський авіаційний інститут"
кандидат техн. наук, доцент

Юрій ШИРОКИЙ