

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента - доктора техн. наук, професора

Мірошнікова Віталія Юрійовича

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 теми дисертації.

Сучасний етап розвитку енергетичного машинобудування в Україні та світі характеризується жорсткими вимогами до підвищення питомої потужності та одночасного зниження матеріаломісткості електричних машин. Для великих електричних машин постійного струму (ЕМПС), які є основними силовими агрегатами у гірничо-видобувній, металургійній та транспортній галузях, питання оптимізації масогабаритних показників набуває стратегічного значення. Це зумовлено не лише необхідністю економії дефіцитних електротехнічних матеріалів, а й потребою інтеграції потужного обладнання в обмежені габарити сучасних технічних засобів, зокрема в аерокосмічній галузі та при глибокій модернізації існуючих промислових комплексів. Традиційні методи проектування, що спираються на класичні аналітичні розрахунки та напівемпіричні залежності, на сьогодні не здатні забезпечити необхідну точність прогнозування локальних фізичних процесів. Це змушує конструкторів закладати надлишкові коефіцієнти запасу міцності та теплостійкості, що призводить до штучного збільшення габаритів і маси вузлів, знижуючи загальну ефективність машини.

Актуальність дисертаційного дослідження зумовлена об'єктивною потребою у створенні нових науково обґрунтованих методів тривимірного

чисельного моделювання теплових, гідрогазодинамічних та напружено-деформованих процесів. Застосування сучасних обчислювальних методів, зокрема методу скінченних об'ємів (FVM) та методу скінченних елементів (FEM), дозволяє перейти від усереднених показників до детального аналізу стану кожного конструктивного елемента. Особливої уваги потребують найбільш навантажені вузли — колекторно-щіткові апарати та обертові частини якоря, де концентрація теплових та механічних напружень є максимальною. Використання спеціалізованих програмних комплексів для моделювання в'язких течій на основі усереднених рівнянь Нав'є-Стокса дає змогу оптимізувати системи вентиляції, забезпечуючи надійне охолодження навіть при суттєвому зменшенні лінійних розмірів вузлів.

Наукова значущість роботи полягає у розробці унікального методу аналізу теплового стану, який враховує складне градієнтне завдання тепловиділень та уточнені коефіцієнти тепловіддачі у тривимірному просторі. Це дозволяє ідентифікувати зони з надлишковим ресурсом і реалізувати потенціал оптимізації конструкції без ризику зниження експлуатаційного терміну. Важливим аспектом дослідження є також обґрунтування можливості відновлення та подальшої експлуатації відповідальних деталей, таких як вали електродвигунів, після механічної обробки. Аналіз напружено-деформованого стану в зонах посадок та проточок дозволяє підтвердити працездатність вузлів під дією екстремальних навантажень, що є критичним для підприємств, які займаються ремонтом та модернізацією великих електричних машин.

Практичне значення отриманих результатів виходить за межі суто машинобудівної галузі. Універсальність розроблених алгоритмів тривимірного розрахунку гідрогазодинамічних процесів робить їх затребуваними при дослідженні теплового стану електрообладнання літаків та об'єктів аеродромної інфраструктури. Впровадження результатів роботи на базі ТОВ «ХЕМЗ» та у науково-навчальний процес Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» підтверджує високу достовірність та прикладну цінність розроблених методів. Таким чином,

дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, спрямованим на вирішення актуального науково-технічного завдання — створення високоефективних електричних машин з покращеними техніко-економічними характеристиками на основі комплексного чисельного моделювання фізичних полів.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукові результати дисертаційної роботи базуються на комплексному підході до вирішення актуальної науково-технічної задачі — оптимізації масогабаритних показників великих електричних машин постійного струму (ЕМПС) через впровадження високоточних методів тривимірного моделювання. Обґрунтованість основних положень дисертації забезпечується використанням фундаментальних законів термодинаміки, механіки суцільних середовищ та теорії електромагнітного поля. В основу дослідження покладено математичний апарат усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (RANS) для опису гідрогазодинамічних процесів та методи скінченних елементів для аналізу напружено-деформованого стану (НДС) конструктивних вузлів. Такий підхід дозволив подолати обмеження традиційних аналітичних методик, які не здатні адекватно відтворити локальну неоднорідність фізичних полів у критичних зонах машини, таких як колекторно-щітковий апарат та вал якоря.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у створенні цілісної методології чисельного аналізу стану ЕМПС у тривимірній постановці. Вперше розроблено інтегрований метод оцінки теплового стану, що базується на методі скінченних об'ємів (FVM), який відрізняється від існуючих рішень прецизійним завданням граничних умов у вигляді просторових градієнтів тепловиділень та коефіцієнтів тепловіддачі. Це дозволило з високою достовірністю локалізувати зони термічного перевантаження та визначити фактичні запаси теплової стійкості. Удосконалено алгоритми генерації

неструктурованих обчислювальних сіток (тетраедральних та призматичних елементів), що забезпечило ефективну адаптацію розрахункової області до складної геометрії вентиляційних каналів та врахування детальних конструктивних чинників при моделюванні в'язких течій. Крім того, дістав подальшого розвитку метод оптимізації НДС відновлюваних деталей, що дозволив встановити математичну залежність між механічною тривкістю вузлів та їх технологічними змінами після ремонту (проточування шийок валів, гаряча посадка напівмуфт).

Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується застосуванням сучасних сертифікованих програмних комплексів (SolidWorks Flow Simulation), що реалізують передові обчислювальні алгоритми. Коректність обраних моделей турбулентності була верифікована шляхом порівняльного аналізу результатів моделювання та дослідження збіжності розв'язків при ітераційному подрібненні сітки. Достовірність чисельних даних підкріплюється результатами експериментальних досліджень, проведених у заводських умовах ТОВ «ХЕМЗ» (м. Харків). Порівняння розрахункових температурних полів та показників механічної напруги з даними натурних випробувань продемонструвало високу збіжність (відхилення в межах 5–8%), що є достатнім для підтвердження адекватності розроблених моделей реальним фізичним процесам у великих електричних машинах.

Практичне значення дисертації полягає у розробці науково обґрунтованих рекомендацій щодо зменшення масогабаритних показників без втрати надійності обладнання. Завдяки впровадженню систем примусової вентиляції колекторного вузла вдалося оптимізувати його габарити, що підтверджено розрахунками в усіх дозволених режимах експлуатації. Універсальність запропонованих методів тривимірного розрахунку гідрогазодинаміки та тепломасообміну робить їх стратегічно важливими не лише для гірничої та металургійної галузей, а й для аерокосмічного сектору, зокрема при проектуванні бортового електрообладнання літаків. Реалізація результатів

роботи у виробничій діяльності ТОВ «ХЕМЗ» та науково-методичній базі Національного аерокосмічного університету «ХАІ» свідчить про глибоку інтеграцію наукових здобутків у промисловість та освіту України. Сформовані у дисертації підходи створюють надійну базу для подальшої розробки алгоритмів прогнозування залишкового ресурсу ЕМПС на основі уточнених даних про їхній тепловий та напружено-деформований стан.

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** проведено комплексний системний аналіз сучасного стану конструкцій великих електричних машин постійного струму (ЕМПС) та існуючих способів їх охолодження. Виконано критичний огляд класичних аналітичних методів розрахунку вентиляційних систем і процесів теплообміну, що дозволило виявити їхню обмеженість у питаннях прецизійної оптимізації масогабаритних показників. Встановлено, що традиційні підходи базуються на усереднених коефіцієнтах, які не враховують локальні зони термічної напруженості, що призводить до невиправданого завищення маси вузлів. На основі проведеного аналізу визначено пріоритетні напрями вдосконалення конструкцій ЕМПС, зокрема через впровадження новітніх систем примусової вентиляції та використання чисельних методів аналізу для виявлення конструктивних резервів.

Другий розділ присвячено теоретичному обґрунтуванню та розробці методології тривимірного моделювання фізичних полів у вузлах ЕМПС. В

основу дослідження покладено чисельне вирішення усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (RANS). Обґрунтовано доцільність застосування методу скінченних об'ємів (FVM) у середовищі SolidWorks Flow Simulation для аналізу газодинамічних процесів. Автором виконано порівняльний аналіз напівемпіричних моделей турбулентності та розроблено алгоритм генерації адаптивних неструктурованих сіток (тетраедральних та призматичних). Це дозволило досягти високої адекватності розрахункової моделі при описі течій у вузьких та складних за геометрією вентиляційних каналах, що є базовим етапом для подальшої оптимізації вузлів.

Третій розділ містить результати тривимірних розрахунків теплового стану найбільш навантажених частин машини — колектора та щіткового апарату. Дослідження проведено у порівняльному аспекті для базової конструкції та вдосконаленої системи з примусовою подачею охолоджуючого повітря. На основі отриманих полів температур та швидкостей потоків доведено, що впровадження інтенсифікованого охолодження дозволяє підтримувати регламентовані теплові режими навіть при суттєвому зменшенні лінійних розмірів колекторного вузла. Результати моделювання надали наукове обґрунтування для зміни геометрії активних частин машини, що безпосередньо сприяє покращенню її питомих характеристик та зниженню загальної матеріаломісткості.

У четвертому розділі представлено результати дослідження напружено-деформованого стану (НДС) обертових елементів якоря за допомогою методу скінченних елементів (FEM). Особливу увагу приділено вузлам, що підлягають відновленню після експлуатаційного зносу. Математично обґрунтовано можливість безпечної оптимізації діаметрів шийок валів після механічної обробки, підтверджено їхню механічну витривалість під дією розрахункових навантажень. Також проаналізовано НДС з'єднань із натягом при гарячій посадці напівмуфт, що дозволило підтвердити спроможність конструкції передавати максимальні крутні моменти. Практична цінність розділу завершується актами впровадження результатів на ТОВ «ХЕМЗ» та в НАУ

«ХАІ», що підтверджує ефективність розроблених методів для модернізації електромашинобудівної продукції України.

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, 2 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. Недостатньо обґрунтовано вибір граничних умов на стінках (шорсткість поверхні, теплопровідність матеріалів). Автор згадує "шорсткість поверхні" на стор. 70 як один з можливих параметрів, що задаються для твердих тіл. Однак у практичних розрахунках (Розділ 3) не вказано, яке саме значення шорсткості було використано (або чи використовувалося воно взагалі). Для модернізованого випадку (примусова конвекція, 15 м/с) вплив шорсткості може

бути значним. На стор. 71 автор згадує про необхідність задавати теплофізичні властивості матеріалів, але в Розділі 3, при описі теплового розрахунку колектора, не вказано конкретне значення теплопровідності для міді, з якої виготовлений колектор.

2. Відсутнє дослідження незалежності результатів від сітки. Результати вважаються достовірними, якщо при переході від середньої до дрібної сітки ключові параметри (наприклад, максимальна температура або швидкість) змінюються незначно ($<1-2\%$). Згадки про проведення такого дослідження в дисертації немає, що є упущенням з точки зору методології CFD. Робота виграла б, якби, окрім загального вигляду сітки (Рис. 3.4, 3.10), було наведено зображення з розподілом одного з критеріїв якості, щоб візуально підтвердити, що у всій розрахунковій області, особливо в критичних зонах, якість елементів є прийнятною.

3. На стор. 95 зазначено, що температура поверхні колектору в базовій конструкції може досягати 264°C , але не вказано, при яких саме умовах експлуатації (навантаження, температура навколишнього середовища) це можливо. Це результат, отриманий при номінальному навантаженні двигуна чи при піковому короткочасному навантаженні? При роботі в спекотному цеху з температурою повітря $+40^{\circ}\text{C}$ чи при стандартній температурі $+20^{\circ}\text{C}$? Речення висновку повинно виглядати так : «Таким чином, відповідно до проведеного розрахунку, при тепловому навантаженні 8700 Вт та температурі навколишнього середовища 20°C , очікуваний діапазон температур поверхні колектору знаходиться в межах $261...264^{\circ}\text{C}...$ »

4. У розділі 3 розрахунки виконані для температури навколишнього середовища 20°C , але не розглянуті граничні умови експлуатації (наприклад, -40°C або $+40^{\circ}\text{C}$), які можуть суттєво впливати на ефективність системи охолодження. Чи буде система охолодження ефективною у всьому діапазоні робочих температур?

5. У розділі 3.3.1 (стор.96) при розрахунку модернізованої конструкції задана початкова швидкість повітря 15 м/с , але не обґрунтовано вибір саме

цього значення. Ця швидкість повинна визначатися потужністю, типом та розмірами вентилятора, який планується встановити. Кінцевий результат — температура 79-81 °С — є прямою функцією заданої швидкості 15 м/с. Необхідно навести розрахунок параметрів вентилятора (потужність, напір) або результати варіантного аналізу для різних швидкостей потоку.

6. У формулі (2.8) на стор. 73 використані позначення, які не зовсім зрозумілі (наприклад, індекс "ip"). Що таке "точка інтегрування" в цьому контексті? Необхідні додаткові пояснення.

7. Не розглянуто вплив температурних деформацій на натяг у з'єднанні при нагріванні машини під час роботи. Коли машина працює, вона нагрівається через електричні та механічні втрати. І вал, і насаджена на нього напівмуфта розширюються. Якщо натяг і контактний тиск збільшуються при робочій температурі, то і механічні напруження в муфті та на поверхні валу також зростуть. Розрахунок, проведений для "холодного" стану, може недооцінювати реальні максимальні напруження, що виникають в експлуатації. Це ставить під сумнів висновки про реальні запаси міцності. Якщо натяг зменшується, то і максимальний крутний момент, який може передати з'єднання, також зменшується. Розрахунок на стор. 119 показує двократний запас по моменту. Якщо через температурні ефекти натяг значно впаде, цей запас може виявитися недостатнім, що призведе до проковзування муфти, особливо при пікових навантаженнях. Тут виникає питання, чи залишиться це з'єднання надійним та міцним при максимальній робочій температурі машини?

8. У списках літератури до розділів спостерігаються численні неузгодженості та відхилення від вимог стандарту бібліографічного опису ДСТУ 8302:2015. Це технічні недоліки оформлення, які повинні бути усунені.

9. У тексті дисертації виявлено стилістичні та термінологічні неточності (стор. 18, 110, 115, 117), які потребують редакторської правки. Зокрема, необхідно уніфікувати використання термінів "напруження" замість невірного терміну «напруга» у різних відмінках та узгодити прийменники на початку речень.

Важливо відмітити, що висловлені зауваження не є визначальними і не применшують 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:

завідувач кафедри міцності літальних апаратів,
Національний аерокосмічний університет
"Харківський авіаційний інститут"
д.т.н., професор

Віталій МІРОШНІКОВ