

## **ВІДГУК**

офіційного опонента 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.**

**Актуальність дослідження** зумовлена необхідністю підвищення техніко-економічної ефективності великих електричних машин постійного струму, які залишаються критично важливими для стратегічних галузей промисловості, шляхом радикальної оптимізації їхніх масогабаритних показників. Традиційні підходи до проектування, що базуються на спрощених аналітичних моделях, змушують розробників закладати надлишкові коефіцієнти запасу, що призводить до значної перевитрати дефіцитних матеріалів та збільшення габаритів обладнання. Перехід до комплексного тривимірного чисельного моделювання взаємопов'язаних теплового та напружено-деформованого станів дозволяє з високою точністю прогнозувати критичні режими роботи найбільш навантажених вузлів – колекторно-щіткового апарату та елементів якоря. Це створює необхідне наукове обґрунтування для впровадження високоефективних систем примусової вентиляції та інноваційних технологічних рішень щодо механічної обробки деталей, що дозволяє суттєво знизити матеріаломісткість машин при одночасному забезпеченні їх високої експлуатаційної надійності.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова обґрунтованість та достовірність результатів дисертаційної роботи забезпечена комплексним підходом, що базується на глибокому поєднанні фундаментальних положень класичної фізики з передовими методами тривимірного моделювання. Теоретичний фундамент дослідження ґрунтується на застосуванні системи рівнянь Нав'є-Стокса з осередненням за числом Рейнольдса (RANS) для аналізу складних турбулентних потоків охолоджуючого газу, а також на рівняннях теорії пружності та теплопровідності суцільних середовищ. Використання сучасних чисельних методів: методу скінченних об'ємів (FVM) та методу скінченних елементів (FEM), дозволило реалізувати високоточне тривимірне моделювання, яке, на

відміну від традиційних аналітичних методик, враховує складну геометричну конфігурацію колекторно-щіткового апарату та вузлів якоря. Достовірність отриманих розрахункових даних гарантується ретельною верифікацією математичних моделей. Вона включає перевірку сіткової незалежності (convergence study) для виключення впливу дискретизації на кінцеві результати, а також коректним формулюванням граничних умов, що повністю відповідають реальним фізичним процесам у великих машинах постійного струму.

Додатковим і вирішальним підтвердженням обґрунтованості винесених на захист положень є отримана висока збіжність між результатами моделювання у середовищі SolidWorks Flow Simulation з використанням цифрових двійників та даними натурних експериментів, проведених на промислових зразках електродвигунів великої потужності. Порівняльний аналіз температурних полів колектора при використанні базової та вдосконаленої примусової вентиляції продемонстрував мінімальні розбіжності між теоретичними розрахунками та показниками засобів теплового контролю в умовах експлуатації. Аналогічно, результати оцінки напружено-деформованого стану валів після механічної обробки та термічної посадки напівмуфт були підтверджені практикою успішного відновлення та подальшої безаварійної роботи агрегатів. Таке поєднання математичного апарату з практичною апробацією технічних рішень дозволило не лише обґрунтувати можливість суттєвої оптимізації масогабаритних показників машин, але й гарантувати їхню експлуатаційну надійність відповідно до вимог діючих галузевих стандартів та нормативно-технічної документації.

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. Запропонований метод відрізняється більш точним завданням 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 оптимізації масогабаритних показників електричної машини з забезпеченням її подальшої надійної експлуатації.

Створені в ході дослідження методи тривимірному розрахунку руху охолоджуючого газу (повітря), 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** здійснено всебічний ретроспективний та критичний аналіз конструктивних особливостей великих електричних машин постійного струму, в межах якого особливу увагу приділено дослідженню фундаментальних взаємозв'язків між архітектурою активних частин і специфікою функціонування систем охолодження різного типу. Шляхом зіставлення найбільш поширених конструктивних рішень із характерними для них способами тепловідведення було виявлено обмеження класичних аналітичних підходів до розрахунку вентиляційних вузлів, які, попри відповідність чинній нормативно-технічній документації, не дозволяють повною мірою врахувати локальну турбулізацію та нерівномірність температурних полів. На основі проведеного огляду сучасних світових практик оптимізації було ідентифіковано стратегічні напрямки зменшення матеріаломісткості виробництва, що полягають у необхідності впровадження високоточних чисельних методів аналізу теплового та напружено-деформованого стану для виявлення прихованих конструктивних резервів.

**Другий розділ** присвячено науковому обґрунтуванню та детальній розробці універсального алгоритму тривимірного чисельного моделювання, призначеного для глибокого вивчення складної газодинаміки охолоджуючих середовищ та температурного розподілу в деталях електричних машин на основі розв'язання системи осереднених за числом Рейнольдса рівнянь Нав'є-Стокса. У межах даного етапу було аргументовано доцільність застосування

методу скінченних об'ємів, інтегрованого у спеціалізований програмний модуль Flow Simulation, що дозволяє з високою достовірністю описувати поведінку в'язких течій через адекватний вибір напівемпіричних моделей турбулентності. Особливу увагу в розділі приділено процедурі дискретизації розрахункового простору за допомогою гібридних неструктурованих сіток, які поєднують тетраедральні та призматичні елементи, що забезпечило максимальну геометричну адаптивність моделі до специфічної конфігурації вентиляційних каналів великої електричної машини.

У **третьому розділі** наведено результати комплексного порівняльного дослідження теплового стану щітково-колекторного вузла, виконаного у тривимірній постановці для двох альтернативних сценаріїв: традиційної базової конструкції та модернізованої системи з впровадженою примусовою подачею охолоджуючого повітря. Завдяки проведеній візуалізації потоків та температурних градієнтів було науково підтверджено, що інтенсифікація обміну повітря гарантує надійне функціонування вузла в усіх регламентованих режимах експлуатації з повним дотриманням граничних температурних норм, передбачених галузевими стандартами. Отримані дані стали фундаментом для прийняття рішень щодо радикальної оптимізації геометрії щітково-колекторного апарату, що відкрило можливість суттєвого зменшення його габаритів без ризику термічної деградації ізоляції або погіршення умов комутації.

У **четвертому розділі** викладено результати чисельного аналізу напружено-деформованого стану обертових вузлів електродвигуна, проведеного методом скінченних елементів з метою підтвердження механічної міцності конструкції після виконання відновлювальних або оптимізаційних технологічних операцій. Зокрема, у розділі представлено математичне обґрунтування безпечності експлуатації валів зі зменшеним діаметром шийок після механічного проточування, а також результати моделювання контактних взаємодій, що виникають у процесі гарячої посадки напівмуфт. Встановлено, що розраховані значення еквівалентних напружень не перевищують критичних меж плинності матеріалу, а створений натяг у з'єднаннях гарантує надійну передачу пікових крутних моментів, що в сукупності підтверджує працездатність та експлуатаційну придатність модернізованих елементів якоря за умов екстремальних механічних навантажень.

Результатом проведених досліджень стало формування цілісної наукової концепції оптимізації масогабаритних показників електричних машин, яка, спираючись на точність сучасного чисельного моделювання, дозволяє цілеспрямовано усувати надлишкову матеріаломісткість вузлів шляхом точного визначення локальних запасів міцності та термічної стійкості конструкції.

Практична значущість роботи підтверджена впровадженням на ТОВ «ХЕМЗ» та у навчальний процес НАУ «ХАІ», що демонструє ефективність запропонованих підходів для модернізації електромашиного 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. В Розділі 1 доцільно було б провести більш широке дослідження про створення зв'язаних задач електромеханічні – вентиляційні – теплові розрахунки та описати можливість передачі сітки та граничних умов.

2. В роботі не висвітлено вплив зміни густини повітря в залежності від стану засмітнення щіток та впливу зміни газодинамічних параметрів за умови зміни кліматичних параметрів.

3. В розділі 3 для рисунків 3.1 – 3.6 необхідно було б більш ретельно відобразити кінцеві частини обмоток та обчислити розподіл тепловиділень по ним.

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.

### **Офіційний опонент:**

завідувач кафедри електричних машин  
Національного технічного університету  
«ХПІ», канд. техн. наук доцент

Андрій ЄГОРОВ