

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Третяк Ірини Ігорівни

на тему «Підвищення потужності та надійності генераторів за рахунок

вдосконалення теплових процесів»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 14 Електрична інженерія

за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування

Актуальність дослідження

Дисертаційну роботу присвячено актуальній для енергетичної галузі України науково-технічній проблемі підвищення надійності, енергоефективності та потужності гідрогенераторів, зокрема гідрогенераторів-двигунів гідроакumuлюючих електростанцій. В умовах необхідності модернізації енергетичного обладнання, підвищення маневровості об'єднаної енергосистеми України та забезпечення стабільної роботи енергетичної інфраструктури особливого значення набуває впровадження сучасних методів проектування й дослідження електричних машин великої потужності. Одним із перспективних напрямів в цьому сенсі є удосконалення систем охолодження гідрогенераторів.

Дослідження та оптимізація теплових та механічних процесів в таких складних технічних об'єктах, як електричні машини, на сучасному рівні неможливо без застосування новітніх методів моделювання та оптимізації із використанням тривимірних моделей з розподіленими параметрами. Тому робота, в якій основну увагу приділено розробленню та використанню тривимірних математичних моделей, побудованих на основі методів скінченно-елементного аналізу, обчислювальної гідрогазодинаміки та теплообміну для визначення теплового стану вузлів і деталей гідрогенератора-двигуна, є безумовно актуальною.

У роботі виконано комплексний тривимірний тепловий та аеродинамічний розрахунок гідрогенератора-двигуна з реконструйованою системою охолодження. На основі чисельного моделювання визначено розподіли температур, швидкостей і тисків охолоджувального середовища у внутрішніх вентиляційних трактах машини, що дозволило оцінити ефективність модернізованої системи охолодження та встановити потенційну можливість підвищення потужності агрегату.

Запропоновано реконструкцію системи охолодження гідрогенератора-двигуна, яка полягає у заміні окремо встановлених нагнітачів на відцентрові нагнітачі, інтегровані безпосередньо в конструкцію ротора. Таке технічне рішення забезпечує підвищення експлуатаційної надійності обладнання, зменшення кількості допоміжних елементів та покращення аеродинамічних характеристик системи вентиляції. У процесі проєктування нового нагнітача визначено його раціональні геометричні параметри з урахуванням конструктивних особливостей та режимів роботи гідрогенератора-двигуна.

Для підтвердження працездатності та надійності запропонованої конструкції виконано розрахунок напірної характеристики нагнітача із застосуванням методів обчислювальної гідрогазодинаміки, а також проведено аналіз напружено-деформованого стану робочого колеса вентилятора на основі методу скінченних елементів з урахуванням дії відцентрових навантажень у всіх експлуатаційних режимах.

За результатами проведених теплових та аеродинамічних досліджень встановлено, що температурні запаси основних вузлів гідрогенератора-двигуна дозволяють розглядати можливість підвищення потужності реконструйованого агрегату на 5–7 % за умови забезпечення відповідних параметрів насос-турбіни, з якою він працює в єдиному гідроагрегаті. Остаточне підтвердження можливості збільшення потужності потребує виконання повного комплексу взаємопов'язаних електромагнітних, теплових, механічних та гідродинамічних розрахунків гідрогенератора-двигуна і насос-турбіни.

Метою дисертаційної роботи є підвищення потужності та надійності гідрогенератора-двигуна шляхом удосконалення системи охолодження та застосування сучасних методів скінченно-елементного аналізу, обчислювальної гідрогазодинаміки і теплообміну.

Результати роботи можуть бути використані під час створення нових і модернізації існуючих гідрогенераторів, здатних відповідати сучасним вимогам щодо надійності, енергоефективності та експлуатаційної безпеки, встановленим міжнародними стандартами та нормативними документами Європейського Союзу і США.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Високий ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і достовірності результатів дисертаційної роботи Третьак Ірини Ігорівни забезпечується комплексним застосуванням сучасного математичного апарату, методів чисельного моделювання та багаторівневого аналізу фізичних процесів, що протікають у гідрогенераторі-двигуні реальної конструкції. У процесі виконання досліджень використано методологію мультифізичного

моделювання із поєднанням методів обчислювальної гідрогазодинаміки (Computational Fluid Dynamics, CFD), скінченно-елементного аналізу (Finite Element Method, FEM), а також чисельного дослідження спряжених теплогідродинамічних і термомеханічних процесів у вузлах електричної машини великої потужності.

Достовірність отриманих результатів забезпечується проведенням багатоетапної верифікації та валідації розроблених математичних моделей. Аналітичні розрахунки напірних характеристик інтегрованого відцентрового нагнітача, які були виконані на основі фундаментальних законів газової динаміки, теорії турбомашин, були зіставлені з результатами тривимірного CFD-моделювання в'язкої турбулентної течії у проточній частині вентиляційної системи. Високий рівень збіжності чисельних і аналітичних результатів свідчить про адекватність побудованих фізико-математичних моделей, коректність прийнятих допущень, а також правильність формування початкових та граничних умов із урахуванням реальної геометрії конструкції, теплофізичних параметрів матеріалів і експлуатаційних режимів роботи гідроагрегату.

Суттєвим підтвердженням достовірності результатів є виконаний аналіз напружено-деформованого стану робочого колеса інтегрованого нагнітача із застосуванням просторового скінченно-елементного моделювання. Під час розрахунків враховувалися складні відцентрові та інерційні навантаження, що виникають у номінальних, перехідних та аварійних режимах експлуатації. Отримані результати свідчать про наявність достатніх запасів статичної та циклічної міцності конструкції, що підтверджує її механічну надійність, технологічну реалізованість і довговічність в умовах тривалої експлуатації.

Виконані спряжені теплові та гідродинамічні розрахунки дозволили визначити просторові температурні поля конструктивних елементів гідрогенератора-двигуна після реконструкції системи охолодження. Результати досліджень підтвердили наявність достатнього теплового резерву, що створює передумови для підвищення потужності гідрогенератора-двигуна на 5–7 % без перевищення допустимих температур та гранично допустимих термомеханічних навантажень. Висновки дисертаційної роботи мають високий ступінь наукової аргументованості, оскільки базуються на комплексному аналізі взаємопов'язаних гідродинамічних, теплових і механічних процесів у реальній конструкції електромеханічного обладнання.

Практична апробація отриманих результатів на ТОВ «ХЕМЗ» (м. Харків) у процесі проектування, модернізації та реконструкції гідрогенераторів великої потужності є вагомим підтвердженням достовірності та прикладної цінності виконаних досліджень. Впровадження розроблених методик чисельного аналізу та інженерних рекомендацій у виробничий процес свідчить про їхню технічну ефективність, практичну придатність і відповідність сучасним міжнародним вимогам до високонадійного енергетичного обладнання. Отримані результати створюють науково-технічне підґрунтя для розроблення нових та модернізації існуючих гідрогенераторів, орієнтованих на відповідність сучасним нормативним вимогам Європейського Союзу та США у сфері енергоефективності, ресурсощадності, експлуатаційної надійності та безпеки.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на ТОВ «ХЕМЗ» та у навчальний процес Національного аерокосмічного університету «ХАІ», що підтверджує їхню наукову значущість, практичну цінність і перспективність використання для розвитку енергетичного машинобудування України.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше створений новий метод розрахунку системи охолодження гідрогенераторів у тривимірній постановці для симетричної задачі, що враховує всі конструктивні особливості конструкції, розподіл аеродинамічних параметрів повітря та характеристики нагнітача.

2. Удосконалено алгоритм формування граничних умов для тривимірних моделей конструктивних компонентів гідрогенераторів в частині визначення аеродинамічних параметрів повітря, конструктивних властивостей вузлів та елементів гідрогенераторів, теплофізичних властивостей повітря.

3. Вперше обґрунтовано підвищення надійності та потужності гідрогенератора-двигуна за рахунок відмови від окремо встановлених нагнітачів в системі охолодження та введення в якості нагнітача спеціальних лопатей, розташованих на роторі, які можуть створювати необхідний напір при напрямку обертання ротора як за годинниковою стрілкою, так і проти неї.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблений метод розрахунку теплового та аеродинамічного стану гідрогенератора-двигуна з використанням відцентрового нагнітача, встановленого безпосередньо на ободі ротора гідрогенератора-двигуна, може бути використано для створення більш потужних та надійних гідрогенераторів.

2. Розроблена конструкція відцентрового нагнітача може бути використана для підвищення ефективності систем охолодження, що в свою чергу дасть змогу збільшити потужність та надійність гідрогенераторів.

3. Запропонований метод може бути використаний при проектуванні та розрахунку багатокомпонентних високоефективних систем охолодження авіаційної та аерокосмічної техніки.

Отримані наукові результати можуть бути використані науково-дослідними та проектними організаціями, конструкторськими бюро енергетичної галузі, навчальними закладами та іншими організаціями, які спеціалізуються в області досліджень та експлуатації енергетичного електромашинного обладнання.

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

За своїм змістом дисертаційна робота Третьак Ірини Ігорівни відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 142 Енергетичне машинобудування та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Енергетичне машинобудування», про що свідчить висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Третьак І. І., наданий кафедрою аерокосмічної теплотехніки Національного аерокосмічного університету "Харківський авіаційний інститут".

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувачки у науковий напрямоцінки 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 з вступу, чотирьох розділів, висновків та списків використаних джерел до кожного розділу і загальних висновків.

У першому розділі дисертаційної роботи розглянуто конструкцію та принципи функціонування системи охолодження гідрогенератора-двигуна з окремо встановленими нагнітачами. Проаналізовано основні експлуатаційні недоліки існуючої системи вентиляції. Визначено фактори, що негативно впливають на надійність та ефективність охолодження гідроагрегату. Виконано аналіз сучасних систем охолодження гідрогенераторів великої потужності. Досліджено конструктивні особливості їхніх напірних елементів. Проведено порівняльний аналіз аеродинамічних характеристик нагнітачів різних типів. На основі отриманих результатів обґрунтовано вибір інтегрованого відцентрового нагнітача, встановленого безпосередньо на роторі гідрогенератора-двигуна. Розглянуто сучасні тенденції розвитку систем охолодження електричних машин великої потужності. Виконано критичний аналіз результатів сучасних наукових досліджень у галузі аеродинаміки, теплообміну та напруженого стану гідрогенераторів.

У другому розділі викладено теоретичні засади аеродинамічних і теплових розрахунків гідрогенератора-двигуна. Розроблено удосконалений метод визначення теплового стану елементів конструкції у тривимірній постановці. Метод базується на чисельному розв'язанні системи рівнянь Нав'є–Стокса, осереднених за Рейнольдсом. Для моделювання турбулентної течії охолоджувального повітря застосовано підхід обчислювальної гідрогазодинаміки. Процеси теплопереносу досліджено із використанням спряженого теплогідродинамічного аналізу. У математичних моделях враховано реальну геометрію конструкції, теплофізичні властивості матеріалів та режими експлуатації гідроагрегату. Уточнено початкові та граничні умови задачі. Чисельне моделювання виконано із застосуванням програмного комплексу FlowSimulation у складі пакета SolidWorks.

У третьому розділі наведено результати проєктування інтегрованого нагнітача системи охолодження гідрогенератора-двигуна. Виконано параметричний аналіз декількох конфігурацій робочого колеса та допоміжних конструктивних елементів. Метою аналізу була оптимізація аеродинамічних характеристик нагнітача. Обґрунтовано вибір раціональної конструктивної схеми. Напірну характеристику нагнітача визначено на основі класичних

рівнянь газової механіки та теорії турбомашин. Отримані результати верифіковано шляхом тривимірного CFD-моделювання просторової турбулентної течії. Проведено аналіз напружено-деформованого стану робочого колеса нагнітача із застосуванням методу скінченних елементів. Ураховано вплив відцентрових та інерційних навантажень у різних режимах експлуатації. Результати розрахунків підтвердили механічну міцність, конструктивну надійність та працездатність запропонованої конструкції.

Четвертий розділ присвячено дослідженню аеродинамічних процесів в реконструйованій системі охолодження гідрогенератора-двигуна. Виконано аналітичне визначення розподілу потоків охолоджувального повітря у вентиляційних трактах машини. Проведено тривимірний аеродинамічний розрахунок на основі просторової цифрової моделі гідрогенератора-двигуна. У розрахунках використано уточнені початкові та граничні умови. За результатами CFD-моделювання визначено поля швидкостей, тисків та інших параметрів потоку повітря у характерних зонах системи вентиляції. Додатково визначено локальні коефіцієнти тепловіддачі на поверхнях основних вузлів та конструктивних елементів. Отримані значення використано для подальшого аналізу теплового стану гідрогенератора-двигуна. Результати досліджень підтвердили ефективність модернізованої системи охолодження.

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 аерокосмічної теплотехніки 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, що реферуються в базі даних Scopus, 2 тезах доповідей на міжнародних конференціях, 1 патент на корисну модель.

Публікації Третьяк Ірини Ігорівни 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, є підстави вважати, що наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У Розділі 1 та Розділі 2 доцільно було б представити тривимірні моделі теплообмінних процесів в системі вентиляції та описати відповідні методи розрахунків, а також провести порівняльний аналіз результатів тривимірного моделювання та загальноприйнятих одновимірних розрахунків.

2. У Розділі 2 доцільно було б більш детально навести газодинамічні параметри охолоджуючого середовища (повітря) та врахувати залежності цих параметрів від температури та тиску.

3. У Розділі 4 необхідно було надати пояснення щодо отриманих у SolidWorks FlowSimulation характеристик потоку повітря. Зокрема, чому вибрана лише 1/4 частина конструкції і які граничні обмеження задавались по симетричним площинам.

4. На Рисунку 4.3 не можливо ідентифікувати частину активних компонентів гідрогенератора. Рисунок 4.6 не дає однозначну відповідь яким чином виконувалорся зменшення сітки скінчених об'ємів для «вузьких» каналів та каналів з різкими переходами.

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 здобувачки ступеня доктора філософії Третьак Ірини Ігорівни на тему «Підвищення потужності та надійності генераторів за рахунок вдосконалення теплових процесів» 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 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування. 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.

Виходячи з вищенаведеного, можна зробити висновок, що здобувачка Третяк Ірина Ігорівна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

Офіційний опонент:

заступник директора з наукової роботи
Інституту енергетичних машин і систем
ім. А.М. Підгорного НАН України,
лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки,
член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор

Андрій КОСТИКОВ