

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

Енергетична галузь належить до найбільш наукоємних секторів промисловості, розвиток яких визначається рівнем впровадження сучасних методів математичного моделювання, цифрового проєктування та високоточного аналізу фізичних процесів у електротехнічному обладнанні. Значна частина потужних турбогенераторів, гідрогенераторів та гідрогенераторів-двигунів, що експлуатуються на електростанціях, була спроектована у 60–80-х роках ХХ століття із застосуванням аналітичних методів розрахунку, розроблених в умовах обмежених можливостей обчислювальної техніки. Зазначені підходи передбачали використання суттєвих спрощень при визначенні електромагнітних, теплових, аеродинамічних та механічних параметрів електричних машин.

Використання спрощених аналітичних моделей не забезпечувало можливості детального дослідження просторового розподілу електромагнітного поля, густини струму, локальних теплових втрат, швидкісних характеристик охолоджувального середовища та напружено-деформованого стану конструктивних елементів машини. У зв'язку з цим при проєктуванні генераторного обладнання застосовувалися значні коефіцієнти запасу за тепловими, механічними та електродинамічними навантаженнями, що призводило до збільшення масогабаритних показників активної сталі, обмоток, корпусних елементів та опорних конструкцій. Наслідком цього стало зростання матеріалоємності електричних машин і зниження ефективності використання активного об'єму генератора.

Сучасні тенденції розвитку електротехнічного машинобудування орієнтовані на підвищення питомої потужності, енергоефективності та експлуатаційної надійності гідрогенераторів і гідрогенераторів-двигунів при одночасному зниженні їх масогабаритних характеристик. Реалізація зазначених вимог потребує застосування сучасних методів тривимірного чисельного

моделювання, зокрема методу скінченних елементів та методів обчислювальної гідродинаміки, які забезпечують високоточний аналіз електромагнітних, теплових і аеродинамічних процесів у складних системах.

Особливого значення набуває тривимірне моделювання систем вентиляції та охолодження гідрогенераторів, яке дозволяє визначати локальні температурні поля в осерді статора, лобових частинах обмоток, полюсах ротора та вентиляційних каналах, а також досліджувати вплив нерівномірного розподілу швидкостей охолоджувального повітря на тепловий стан активних елементів машини. Застосування тривимірних аеродинамічних і теплових моделей забезпечує можливість зменшення локальних перегрівів, підвищення допустимих електромагнітних навантажень та збільшення одиничної потужності генератора без перевищення гранично допустимих температурних обмежень.

Водночас використання тривимірних моделей напружено-деформованого стану дозволяє здійснювати детальний аналіз механічних напружень і деформацій у відповідальних конструктивних елементах гідрогенератора, зокрема в ободі ротора, спицях, полюсних кріпленнях, корпусних та опорних вузлах. Це створює передумови для оптимізації конструкції, зниження матеріалоємності та підвищення механічної надійності обладнання за умов тривалої експлуатації.

Таким чином, розробка та вдосконалення тривимірних моделей електромагнітних, теплових, аеродинамічних і механічних процесів у гідрогенераторах та гідрогенераторах-двигунах є актуальним науково-технічним завданням. Використання сучасних методів чисельного аналізу дозволить підвищити потужність, енергоефективність та експлуатаційну надійність електричних машин, забезпечити оптимізацію їх конструктивних параметрів і сприятиме розвитку та модернізації енергетичного комплексу України

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукові результати дисертаційної роботи характеризуються високим рівнем теоретичної та методологічної обґрунтованості, внутрішньою логічною послідовністю, належним ступенем достовірності та відповідністю сучасним тенденціям розвитку електротехнічної науки, енергетичного машинобудування й систем комп'ютерного моделювання складних фізичних процесів. Обґрунтованість сформульованих у роботі наукових положень, висновків і практичних рекомендацій базується на комплексному використанні фундаментальних положень теорії електричних машин, механіки суцільного середовища, теплопередачі, обчислювальної гідрогазодинаміки та чисельних методів. Такий комплексний підхід дозволив автору всебічно охопити

досліджувану проблему та забезпечити системний характер виконаних досліджень.

Достовірність отриманих у дисертаційній роботі результатів забезпечується коректністю постановки задач дослідження, використанням апробованих математичних моделей та сучасного програмного забезпечення для виконання чисельних розрахунків. Автором застосовано фундаментальні рівняння руху суцільного середовища, теплообміну та механіки деформівного твердого тіла, а також сучасні моделі турбулентності, засновані на декомпозиції Рейнольдса з використанням $k-\epsilon$ моделі. Виконання досліджень у тривимірній постановці дозволило врахувати реальні геометричні особливості системи охолодження гідрогенератора-двигуна, конфігурацію вентиляційних каналів, характеристики повітряних потоків та особливості розподілу теплових втрат у конструктивних елементах машини.

Важливим аспектом роботи є те, що отримані результати не мають ознак формального або суто теоретичного характеру, а ґрунтуються на фізично обґрунтованих моделях та реальних конструктивних параметрах гідрогенератора-двигуна. Отримані чисельні результати узгоджуються з відомими теоретичними положеннями, результатами експериментальних досліджень та науковими працями інших авторів у галузі проектування та дослідження систем охолодження потужних електричних машин. Це свідчить про адекватність використаних моделей та підтверджує достовірність сформульованих у дисертації висновків.

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 проєктними 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 здобувачки 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 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 досліджень.

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 ґрунтовно розглянуто особливості функціонування системи охолодження гідрогенератора-двигуна з використанням окремо встановлених нагнітачів, а також детально проаналізовано характерні проблеми, що виникають у процесі їх експлуатації. Автором переконливо показано, що існуючі конструктивні рішення, які тривалий час залишалися наріжним каменем проектування систем вентиляції потужних електричних машин, у сучасних умовах уже не повною мірою відповідають вимогам щодо підвищення питомої потужності, енергоефективності та експлуатаційної надійності гідрогенераторів-двигунів. У роботі всебічно розглянуто особливості побудови систем охолодження гідрогенераторів, виконано порівняльний аналіз конструкцій напірних елементів та визначено основні фактори, що впливають на аеродинамічні характеристики системи вентиляції. На основі проведених досліджень та аналізу напірних характеристик нагнітачів різних типів автором обґрунтовано доцільність застосування відцентрових нагнітачів, встановлених безпосередньо на роторі гідрогенератора-двигуна. Такий підхід дозволив не лише по-новому поглянути на проблему організації охолодження потужних електричних машин, але й закласти підґрунтя для подальшого підвищення ефективності використання активного об'єму гідрогенератора. Окрему увагу приділено аналізу сучасних тенденцій розвитку систем охолодження електричних машин та критичному узагальненню існуючих наукових підходів у цій галузі, що свідчить про глибоке опрацювання автором сучасного стану проблеми.

У другому розділі дисертаційної роботи викладено теоретичні засади аеродинамічних та теплових розрахунків систем охолодження гідрогенераторів-двигунів. Автором розроблено удосконалений метод визначення теплового стану конструктивних елементів гідрогенератора-двигуна у тривимірній постановці з уточненим завданням початкових та граничних умов. Метод базується на чисельному розв'язанні системи рівнянь Нав'є–Стокса, усереднених за Рейнольдсом, із застосуванням сучасних моделей турбулентності та спеціалізованих засобів обчислювальної гідрогазодинаміки. Для моделювання течії охолоджувального повітря використано програмний комплекс SolidWorks Flow Simulation, що дозволило врахувати складну геометрію вентиляційних

каналів, локальні аеродинамічні опори, нерівномірність розподілу швидкостей повітряних потоків та особливості теплообміну в активних елементах машини. Без перебільшення можна стверджувати, що розроблений автором підхід відкриває нові горизонти у сфері високоточного тривимірного моделювання теплових і аеродинамічних процесів у потужних електричних машинах.

У третьому розділі наведено результати проектування відцентрового нагнітача системи охолодження гідрогенератора-двигуна. Автором виконано комплексний аналіз декількох конфігурацій робочого колеса нагнітача та допоміжних конструктивних елементів з метою оптимізації його аеродинамічних характеристик. На основі проведених досліджень обґрунтовано вибір остаточної конструкції нагнітача, яка забезпечує необхідний рівень напору та ефективності при роботі гідрогенератора-двигуна в різних режимах експлуатації. Визначення напірної характеристики нагнітача здійснювалося із застосуванням класичних співвідношень газової механіки з подальшою перевіркою результатів шляхом тривимірного чисельного моделювання. Окрім цього, у роботі проведено аналіз напружено-деформованого стану робочого колеса нагнітача, що дозволило оцінити рівень механічних напружень, деформацій та запасів міцності при номінальних і максимальних частотах обертання ротора. Такий підхід свідчить про те, що автор не залишив поза увагою жодної суттєвої деталі, а дослідження виконано з урахуванням усіх ключових аспектів забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності конструкції.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено аналізу аеродинамічних параметрів системи охолодження гідрогенератора-двигуна з новими нагнітачами. У роботі наведено результати визначення розподілу потоків охолоджувального повітря на окремих ділянках вентиляційної системи, отримані як аналітичними методами, так і за допомогою тривимірного чисельного моделювання. Автором побудовано просторову модель гідрогенератора-двигуна із врахуванням реальних конструктивних особливостей та заданих граничних умов, що дозволило отримати детальний розподіл швидкостей повітряних потоків, температурних полів та коефіцієнтів тепловіддачі у характерних точках системи охолодження. Отримані результати переконливо свідчать про ефективність запропонованих технічних рішень та дозволяють зробити висновок щодо наявності додаткових температурних запасів у вузлах гідрогенератора-двигуна. Саме це, у свою чергу, відкриває можливість підвищення потужності машини на 5–7 % без порушення допустимих теплових режимів та вимог щодо експлуатаційної надійності.

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 електро-машинобудівний завод», а також акт впровадження результатів роботи в науково-методичний процес кафедри аерокосмічної теплотехніки Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

У цілому результати виконаних досліджень мають вагомим наукове та практичне значення. Автором розроблено ефективні методи тривимірного моделювання аеродинамічних процесів, теплового стану та напружено-деформованого стану вузлів гідрогенераторів і гідрогенераторів-двигунів. Запропоновані підходи можуть бути використані під час проєктування нових та модернізації існуючих систем охолодження потужних електричних машин. Без сумніву, отримані результати є суттєвим внеском у розвиток сучасного енергетичного машинобудування та створюють передумови для подальшого підвищення потужності, енергоефективності й експлуатаційної надійності

Практична значущість роботи підтверджена впровадженням на ТОВ «ХЕМЗ» та у навчальний процес НАУ «ХАІ», що демонструє ефективність запропонованих підходів для модернізації електромашинного обладнання.

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 Третяк 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, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У Розділі 1 необхідно було б звернути більшу увагу на існуючу нормативну документацію для гідрогенераторів-двигунів, та показати які режими можуть бути дозволені при довгостроковому використанні системи вентиляції, а які обмежені за часом. Також обґрунтувати необхідність проведення змінних за часом зв'язаних теплових розрахунків.

2. У Розділі 2 доцільно було б додатково провести моделювання електромагнітних полів в Ansys Maxwell (або схожому програмному продукті) для визначення тривимірного розподілу тепловиділень вздовж «спинки» активної сталі статору та визначити нелінійні циркуляційні струми у мідних стрижнях статору. Провести дослідження розподілу теплових втрат для мідної обмотки полюсу ротору.

3. У Розділі 4 для Рисунка 4.19 та Таблиці 4.5 бажано було б представити допустимі класи ізоляції обмотки та допустимі температури.

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.

Здобувачка Третьак Ірини Ігорівни заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри електричних машин
Національного технічного університету
«ХПІ», к.т.н. доцент

Андрій ЄГОРОВ