

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Назаренко Вячеслава Вікторовича

на тему «Дослідження напружено-деформованого стану елементів ротору турбогенераторів з метою обґрунтування підвищення міцності методами тривимірного моделювання», яка представлена на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

Актуальність теми дисертації.

Представлена робота присвячена дослідженню проблеми забезпечення надійності та довговічності потужних турбогенераторів, що функціонують у складі Об'єднаної енергосистеми України. Актуальність теми не викликає сумнівів, оскільки електроенергетика є базовою галуззю національної економіки, а турбогенератори великої потужності залишаються основним джерелом виробництва електричної енергії на теплових і атомних електростанціях.

У роботі ґрунтовно проаналізовано сучасний стан парку турбогенераторів, значна частина яких вичерпала або наближається до вичерпання нормативного ресурсу. Автор аргументовано показує, що експлуатація обладнання в надкритичних, нестаціонарних та асиметричних режимах істотно підвищує ризики аварійних пошкоджень, що може призвести до тривалих простоїв енергоблоків та значних економічних втрат. Особливу увагу приділено проблемі повторного використання валу ротора при модернізації агрегатів, що супроводжується деградацією фізико-механічних властивостей матеріалу та інтенсифікацією процесів розвитку втомних тріщин.

Важливим науковим аспектом є аналіз напружено-деформованого стану бандажного вузла ротора, який функціонує в умовах високих відцентрових сил та контактних напружень. Зазначено, що мінімально допустимі посадочні натяги бандажних кілець знижують запас міцності вузла, що може стати критичним фактором у забезпеченні надійності агрегатів.

В роботі автор обґрунтовує необхідність розвитку тривимірних чисельних моделей на основі методу скінченних елементів із врахуванням реальних граничних умов, нерівномірності контактних поверхонь та змінних характеристик матеріалів. Вказано на обмеженість традиційних аналітичних методик, які через спрощені припущення не забезпечують необхідної точності.

Загалом, робота вирізняється високим рівнем наукової цінності та практичної значущості. Розробка удосконалених методів розрахунку напружено-деформованого стану конструктивних елементів турбогенераторів у

тривимірній постановці є актуальним завданням сучасної енергетичної науки, вирішення якого сприятиме підвищенню надійності та безпеки генеруючого обладнання енергосистеми України.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Дисертаційна робота присвячена розробці методів оцінки напружено-деформованого та термонапруженого стану елементів ротора потужних турбогенераторів. Актуальність дослідження обґрунтована необхідністю підвищення міцності та надійності роторних конструкцій в умовах тривалої експлуатації та модернізації генеруючого обладнання, що має стратегічне значення для енергетичної безпеки України.

У роботі чітко сформульовано наукову проблему — складність оцінки запасів міцності елементів ротора, яка зумовлена потребою комплексного розв'язання взаємопов'язаних задач теплопровідності та термопружності. Особливу увагу приділено аналізу бандажного вузла, де на результати розрахунків істотно впливають посадочні натяги, температурні поля систем вентилування, відцентрові сили та нерівномірність контактних поверхонь. Автор переконливо доводить, що застосування високолегованих сталей із підвищеною твердістю та межею міцності потребує збільшення натягів, що водночас підвищує ризик утворення тріщин у зонах концентрації напружень. Обґрунтовано показано обмеженість класичних інженерних методик, які не забезпечують необхідної точності через неможливість врахування комплексної взаємодії численних факторів.

Наукова цінність роботи полягає у розробці та апробації удосконаленого методу розрахунку, що базується на послідовному розв'язанні задач термопружності та теплопровідності в тривимірній постановці з використанням методу скінченних елементів. Важливою особливістю є ефективна передача початкових і граничних умов між тепловими та механічними задачами.

Дисертація містить комплексний аналіз конструктивних особливостей роторів турбогенераторів, характерних експлуатаційних пошкоджень та існуючих методів оцінки їхнього напружено-деформованого стану. Виконано тривимірне моделювання бандажного вузла, вала ротора та клинів кріплення струмопідводу, що дозволило отримати детальну картину розподілу напружень і деформацій та обґрунтувати безпечну роботу турбогенератора в номінальних та критичних режимах. Розроблені методи забезпечують більш точне визначення запасів міцності та обґрунтований вибір конструктивних параметрів на етапі проєктування.

Достовірність результатів дослідження підтверджено верифікацією з аналітичними розрахунками та реальними даними випробувань.

Практична значущість результатів підтверджується їхнім впровадженням на АТ «Українські енергетичні машини» (м. Харків) при проєктуванні та реконструкції турбогенераторів великої потужності, а також використанням у навчально-методичній діяльності Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

Таким чином, дисертаційна робота характеризується високим рівнем наукової обґрунтованості, достовірності та новизни. Отримані результати становлять вагомий внесок у розвиток методології розрахунку напружено-деформованого стану елементів потужних електричних машин і мають значний потенціал для практичного застосування в енергетичній галузі.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше створений новий метод розрахунку бандажного вузла ротора, що відрізняється від існуючих завданням фактичних натягів нерівномірних контактних поверхонь («носик» та «спинка»), теплових граничних умов I роду та фактичної геометрії пазів ротора при номінальній та критичній (угонній) частотах обертання.

2. Удосконалено метод розрахунку напружено-деформованого стану бочки вала з фрезерованими під обмотку пазами, що на відміну від існуючих містить уточнення сітки для концентраторів напружень, задані граничні умови I роду, отриманих з кореляції експериментальних та аналітичних даних та завдання реальних модулів пружності.

3. Розроблено метод розрахунку напружено-деформованого стану клиновидних елементів струмопідводу ротора, в якому на відміну від існуючих ураховуються відцентрові сили та контактні напруження, обумовлені технологією збирання.

4. Удосконалено метод обчислення критичних частот вала ротора в частині завдання еквівалентних перерізів в тривимірній постановці та завдання уточнених податливостей опор.

5. Набули подальшого розвитку існуючі інженерні методи розрахунку напружено-деформованого стану конструкції бандажного вузла ротора в частині уточнення сил, викликаних відцентровою складовою від дії лобової частини обмотки та врахування геометрії зубця для обчислення роз'єднувальної частоти.

Практичне значення отриманих результатів:

1. В роботі уточнено запаси міцності для найбільш навантажених елементів ротора турбогенератора та обґрунтовано можливість використання сучасних матеріалів для їх виготовлення.
2. Розроблено та впроваджено метод розрахунку бандажних вузлів роторів турбогенераторів великої та середньої потужностей. Показана можливість удосконалення конструкції зі збереженням посадкових поверхонь.
3. Представлений метод дозволив обґрунтувати безпечну роботу турбогенератора в номінальному режимі з достатнім інтервалом між першою та другою критичними частотами для податливих опор.
4. Вперше обґрунтовано застосування розбірної конструкції елементів кріплення струмопідводу ротора турбогенератора та прорахована їх деформація.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Назаренка Вячеслава Вікторовича 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, 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 авіаційна та ракетно-космічна техніка.

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 добре 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, 3 розділів, загальних висновків, додатків та списків використаної літератури до кожного розділу.

У вступі дисертаційної роботи ґрунтовно висвітлено актуальність дослідження напружено-деформованого та термонапруженого стану елементів ротора потужних турбогенераторів як ключового чинника підвищення їхньої міцності та експлуатаційного ресурсу. Автор чітко продемонстрував зв'язок дослідження з діючими науковими програмами, коректно сформулював мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, визначив методи, наукову новизну, практичну цінність, особистий внесок, апробацію та публікації, що свідчить про високий рівень наукової організації роботи.

Перший розділ характеризується глибоким аналізом конструктивних особливостей роторів потужних синхронних турбогенераторів та сучасних підходів до оцінки їхнього напружено-деформованого стану. Автор детально розглянув конструкцію турбогенератора потужністю 200 МВт, зокрема, конструкцію ротора та його конструктивних елементів. Важливим є систематизований аналіз типових експлуатаційних пошкоджень (втомні тріщини, фретинг-корозія, пластичні деформації зубців) та факторів, що їх спричиняють. Проведено критичний огляд аналітичних і чисельних методів, що дозволяє оцінити обмеженість класичних інженерних підходів.

Другий розділ містить результати комплексного дослідження напружено-деформованого стану бандажного вузла ротора. Автор виконав аналітичні розрахунки зусиль, еквівалентних напружень за критерієм Мізеса, переміщень під дією відцентрових навантажень і контактних тисків, визначив роз'єднувальні швидкості компонентів. Запропоновано вдосконалену методологію вибору оптимальних посадкових натягів. Вперше проведено високоточні тривимірні розрахунки методом скінченних елементів з урахуванням нерівномірності контактних поверхонь, нелінійності взаємодії та реальної геометрії, що свідчить про наукову новизну роботи.

У третьому розділі здійснено детальне тривимірне моделювання напружено-деформованого стану вала ротора, включаючи статичний розрахунок, модальний аналіз критичних частот обертання та власних форм коливаль. Високоточне моделювання бочки ротора з фрезерованими пазами та клинів кріплення струмопідводу з урахуванням контактних взаємодій і нелінійної поведінки матеріалів забезпечило отримання достовірних результатів, що мають значну практичну цінність.

Науково-дослідна частина роботи завершується створенням ефективних методів оцінки напружено-деформованого та термонапруженого стану вузлів

турбогенераторів на базі високоточних тривимірних моделей. Використання сучасних підходів методу скінченних елементів дозволило отримати детальний розподіл полів напружень у складних зонах концентраторів, що практично неможливо оцінити традиційними аналітичними моделями. Це забезпечує суттєве підвищення точності визначення коефіцієнтів запасу міцності та створює надійну основу для оптимізації конструктивних і технологічних параметрів на етапі проєктування.

У додатках наведено перелік наукових публікацій здобувача за темою дисертації та акти впровадження результатів.

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.

Результати дисертації висвітлені у 10 наукових працях: 3 статті у фахових виданнях затверджених МОН України, 3 статті, що індексуються в базі даних Scopus, 3 тези науково-технічної конференції та 1 колективна монографія.

Публікації Назаренко Вячеслава Вікторовича 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.

Викладене вище свідчить про високий науковий рівень роботи та її відповідність вимогам, що пред'являються до докторських дисертацій. Проте, слід зазначити і ряд таких недоліків.

1. Перший розділ необхідно було б доповнити оглядом існуючих методів з розрахунку напруженого-деформованого стану ротора у тривимірній постановці, що дозволило б вказати на їх сильні сторони та недоліки. Також потрібно було б показати, як враховується сумарний модуль пружності для багатокомпонентних конструкцій.

2. У роботі у другому та третьому розділах доцільно було б розглянути вплив жорсткості опор в на напружено- деформований стан ротора та навести методологію розрахунку жорсткості опор в залежності від вибору типу оливи та геометрії бабітових вкладишів.

3. Третій розділ слід доповнити тепловим розрахунком струмопровідних компонентів струмовідводу (мідний стрижень), результати якого застосувати

для подальшого аналізу міцності ротора. Також необхідно було б показати, які технологічні рішення використовують для компенсації теплових переміщень.

Але висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Таким чином, дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Назаренко Вячеслава Вікторовича на тему «Дослідження напружено-деформованого стану елементів ротору турбогенераторів з метою обґрунтування підвищення міцності методами тривимірного моделювання» 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.

Вважаю, що здобувач, Назаренко Вячеслав Вікторович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Офіційний опонент:

Завідувачка відділу вібраційних і
термоміцнісних досліджень
Інституту енергетичних машин і систем
ім. А.М. Підгорного НАН України,
докторка технічних наук, професорка



Наталя СМЕТАНКІНА