

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента – к.т.н, старшого дослідника

Мінко Олександра Миколайовича

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.

Електроенергетика є базовою галуззю національної економіки, що визначає рівень науково-технічного розвитку держави та забезпечує стабільне функціонування промисловості, транспорту, сільського господарства й комунально-побутового сектору. Турбогенератори великої потужності виробляють основну частку електричної енергії в об'єднаній енергосистемі України, становлячи фундаментальне обладнання теплових та атомних електростанцій.

Згідно з офіційними даними Міністерства енергетики України, станом на початок 2022 року теплові та атомні електростанції генерували близько 84,3 % загального обсягу електроенергії, переважно за допомогою синхронних турбогенераторів. На початок 2025 року в енергосистемі зберігається стійкий дефіцит потужності на рівні 20 %, що зумовлює роботу агрегатів у надкритичних, нестаціонарних та асиметричних режимах навантаження. Значна частина турбогенераторів вітчизняного парку вичерпала або наближається до вичерпання нормативного ресурсу експлуатації.

Аварійне руйнування елементів конструкції ротора (зокрема, бочки ротора, зубців або бандажних кілець) призводить до тривалого вимушеного простою енергоблока, що супроводжується значними техніко-економічними втратами (орієнтовно 1–2 млн грн на добу для одного блока). Взаємозалежність ремонтних кампаній на різних електростанціях суттєво підвищує вимоги до безвідмовності роботи кожного турбогенератора.

Особливо гостро проблема постає у контексті модернізації існуючого обладнання шляхом повторного використання роторів, що відпрацювали свій розрахунковий ресурс. Тривалий експлуатаційний вплив змінних механічних, електромагнітних і теплових навантажень призводить до деградації пружних характеристик матеріалу ротора, зниження межі витривалості та підвищення

ймовірності зародження й розвитку втомних тріщин. Крім того, вихрові струми в боці ротора, спричинені несиметрією фазних навантажень, короточасними короткими замиканнями та порушеннями систем охолодження, генерують нестационарні температурні поля, що викликають теплове викривлення осі ротора, виникнення додаткових сил небалансу та інтенсивне зростання вібрації.

Критичним елементом конструкції залишається бандажний вузол ротора, який працює в умовах високих відцентрових сил, попередніх натягів та термічних впливів. У багатьох турбогенераторах, що тривалий час експлуатуються, величина посадочного натягу бандажних кілець знаходиться на мінімально допустимому рівні або нижче нього, що суттєво знижує запас надійності вузла загалом.

Точна оцінка напружено-деформованого стану елементів турбогенератора в умовах комплексної дії електромагнітних, теплових, газодинамічних і механічних навантажень є необхідною передумовою забезпечення його надійності та визначення термінів продовження ресурсу. Сучасні чисельні методи дозволяють розв'язувати взаємопов'язані багатопараметричні задачі, проте для підвищення точності прогнозування міцності та технічного запасу потрібні удосконалені тривимірні моделі розрахунку НДС з урахуванням реальних експлуатаційних режимів.

Таким чином, розробка удосконаленого метода розрахунку напружено-деформованого стану конструктивних елементів потужних турбогенераторів у тривимірній постановці є актуальним науковим і практичним завданням, вирішення якого дозволить суттєво підвищити надійність, безпеку та ефективність роботи генеруючого обладнання об'єднаної енергосистеми України.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукові результати дисертації є обґрунтованими та достовірними. Автор застосував комплексний підхід, який поєднує аналітичні розрахунки з тривимірним чисельним моделюванням у програмному комплексі SolidWorks, включаючи взаємну передачу початкових і граничних умов між тепловими та механічними задачами. Достовірність отриманих даних підтверджується їхньою високою кореляцією з результатами класичних аналітичних методів, а також адекватним урахуванням реальних експлуатаційних факторів: відцентрових навантажень, попередніх натягів, температурних полів, геометричних концентраторів напружень та нерівномірності контактних поверхонь.

Результати роботи демонструють суттєву новизну. У дисертації вперше розроблено метод розрахунку бандажного вузла ротора, який враховує

фактичні натяги на нерівномірних контактних поверхнях («носик» та «спинка»), теплові граничні умови та реальну геометрію пазів при номінальній і угонній частотах обертання. Удосконалено метод розрахунку напружено-деформованого стану бочки вала з фрезерованими пазами за допомогою детального уточнення сітки скінченних елементів у зонах концентраторів напружень, застосування реальних модулів пружності матеріалів та граничних умов, верифікованих на основі кореляції аналітичних і експериментальних даних. Також розроблено метод оцінки НДС клиновидних елементів струмопідводу ротора з урахуванням відцентрових сил і контактних напружень, зумовлених технологією складання. Крім того, удосконалено методику визначення критичних частот вала ротора в тривимірній постановці через уточнення еквівалентних перерізів та податливостей опор, а також розвинуто класичні інженерні методи розрахунку бандажного вузла з детальним урахуванням геометрії зубця та відцентрової дії лобової частини обмотки.

Отримані результати впроваджено на АТ «Українські енергетичні машини» (м. Харків) при проєктуванні та модернізації турбогенераторів великої потужності. Вони дозволили уточнити запаси міцності ключових елементів ротора (зокрема, мінімальний коефіцієнт запаса 1,3 при угонній частоті для турбогенератора 200 МВт), обґрунтувати оптимальні величини натягів, оцінити можливість застосування сучасних матеріалів та забезпечити безпечну експлуатацію агрегатів у номінальних і критичних режимах.

Таким чином, наукові результати дисертації є обґрунтованими, достовірними та становлять суттєвий внесок у розвиток методів розрахунку напружено-деформованого стану потужних електричних машин.

Наукова та практична значущість отриманих результатів полягає в наступному:

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 еластичних опор.

4. Вперше обґрунтовано застосування розбірної конструкції елементів кріплення струмопідводів ротора турбогенератора та прорахована їх деформація.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Назаренко 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 Назаренко Вячеслава Вікторовича, 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 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, 3 розділів, загальних висновків, додатків та списків використаної літератури до кожного розділу.

У вступі висвітлено актуальність теми дослідження напружено-деформованого стану елементів ротору турбогенераторів з метою обґрунтування підвищення міцності. Наведено зв'язок роботи з науковими програмами, визначено мету – обґрунтування підвищення міцності елементів ротора турбогенераторів на основі розроблених методів дослідження напружено-деформованого стану його елементів з використанням тривимірного комп'ютерного моделювання, сформульовано завдання, визначено об'єкт і предмет дослідження, методи, наукову новизну, практичну цінність, особистий внесок автора, апробацію та основні публікації.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячено аналізу конструктивних особливостей роторів потужних синхронних турбогенераторів та сучасних

методів дослідження їх напружено-деформованого стану. У розділі розглянуто загальну конструкцію турбогенератора потужністю 200 МВт, який влючає вал ротора, бандажні кільця, центруючі кільця, клинні системи кріплення обмотки збудження та лобові частини обмотки. Виконано детальний аналіз конструкції ротора, характерних пошкоджень (втомні тріщини, фретінг-корозія, пластичні деформації зубців) та факторів, що їх викликають (відцентрові сили, теплові градієнти, вихрові струми, циклічні навантаження). Проведено критичний огляд аналітичних і чисельних методів визначення НДС. Розглянуто результати розрахунків запасів міцності основних конструктивних елементів ротора за класичними інженерними методиками.

У другому розділі представлено результати комплексного дослідження термонапруженого стану бандажного вузла ротора. Виконано аналітичні розрахунки зусиль, еквівалентних напружень за Мізесом та переміщень під дією відцентрових навантажень і контактних тисків від посадки бандажного кільця на бочку ротора та центруюче кільце. Визначено роз'єднувальні швидкості компонентів вузла. Запропоновано вдосконалену методологію добора оптимальних посадкових натягів. Вперше проведено тривимірні розрахунки напружено-деформованого стану деталей бандажного вузла методом скінченних елементів при номінальній та угонній частотах обертання з урахуванням нерівномірності контактних поверхонь («носик» і «спинка»).

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено дослідженню напружено-деформованого стану вала ротора. У розділі наведено результати тривимірного розрахунку НДС вала методом скінченних елементів, включаючи статичний розрахунок, визначення критичних частот обертання та аналіз власних форм коливань. Здійснено моделювання напруженого стану бочки ротора з фрезерованими пазами, а також клинів кріплення струмопідводу з урахуванням контактних напружень і відцентрових сил.

Науково-дослідна робота завершується розробкою методів оцінки напружено-деформованого та термонапруженого стану вузлів і елементів конструкцій турбогенераторів. Застосування метода скінченних елементів у тривимірній постановці дозволяє визначати рівні напружень у концентраторах (зубці, пази, отвори), які неможливо достовірно оцінити традиційними спрощеними аналітичними методами. Отримані результати забезпечують суттєве підвищення точності розрахунку коефіцієнтів запасу міцності та обґрунтований вибір конструктивних і технологічних параметрів на етапі проектування.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на АТ «Українські енергетичні машини» (м. Харків) при проектуванні нових та реконструкції існуючих турбогенераторів великої потужності. Крім того, розроблені методи

використано в навчально-методичному процесі кафедри Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 10 наукових працях: 3 статті у наукових фахових виданнях затверджених МОН України, 3 статті, що реферуються 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.

1. В першому розділі необхідно було б провести аналіз існуючих технологічних операцій посадки бандажного кільця на ротор, та провести дослідження, чи мають реальні натяги симетричні посадки і як це вплине на режим роботи ротора

2. В другому розділі не достатньо мірою розглянуто механічні властивості матеріалів, з боку врахування модулі пружності. Було б доцільно відобразити модулі пружності, тимчасовий опір та зміну властивостей матеріалів під впливом діючих температур.

3. В третьому розділі рисунок 3.17 вимагає додаткового пояснення високих значень механічних напружень в торцевій поверхні паза для установки клина.

4. На рисунках 3.14 – 3.18 не достатньо чітко зображено значення графіків.

Важливо відмітити, що зазначені 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.

Вважаю, що 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.

Здобувач Назаренко Вячеслав Вікторович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна технік.

Рецензент:

Начальник НДЧ

Національного аерокосмічного університету

«Харківський авіаційний інститут»,

канд. техн. наук, старший дослідник

Олександр МІНКО