

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу
Носаля Олександра Юрійовича
на тему «Вібродіагностика пошкоджень конструктивних елементів
парової турбіни при її експлуатації і ремонті»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 14 Електрична інженерія
за спеціальністю 144 Теплоенергетика

Актуальність теми дисертації.

Паротурбінні установки складають основу світової генерації електричної енергії, тому забезпечення надійності та довговічності їх експлуатації є стратегічно-важливою задачею. Дане питання неможливо вирішити без ефективних та зручних методів діагностування. Представлена на рецензування дисертаційна робота присвячена розробці аналітичних підходів до вібраційної діагностики пошкоджень в лопатках та роторах парових турбін ТЕС і АЕС, що є актуальним напрямком дослідження як з наукової, так і з практичної точки зору.

Виявлення пошкоджень в конструктивних елементах парової турбіни є складним завданням. Використання локальних неруйнівних методів діагностики пошкоджень можливе лише під час проведення ремонтних робіт і потребує значних витрат часу. Вібраційна діагностика пошкодження, яка ґрунтується на тому, що динамічні характеристики непошкодженого тіла та тіла з порушеною суцільністю суттєво відрізняються, має перевагу над локальними методами діагностики, оскільки вона є інтегральною, тобто характеризує стан об'єкта в цілому і тому потребує значно менше часу для отримання результату діагностики. Різниця динамічних характеристик тіла, зумовлена зміною його жорсткості, може використовуватися як для діагностування самого пошкодження, так і для визначення його параметрів.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

У дисертаційній роботі вирішується важлива науково-технічна проблема, що полягає у розробці наукового підходу до вібраційного діагностування пошкоджень в лопатках та роторах парових турбін під час їх експлуатації та ремонту за допомогою аналітичних методів.

Вирішення поставлених у дисертаційній роботі задач здійснювалось з використанням низки методів дослідження. Зокрема, використано класичну теорію коливань, чисельноаналітичне моделювання поперечних коливань конструктивних елементів парової турбіни за наявності пошкодження типу

тріщини втоми з використанням сучасного програмного забезпечення, теорію лінійної механіки руйнування з використанням числових розрахункових методів інженерного аналізу.

Узгодження отриманих результатів підтверджує адекватність запропонованих методів та результатів досліджень, що були отримані аналітичним та експериментальним шляхом. Частина результатів дисертаційної роботи впроваджені на енергоблоці № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС, про що наявний відповідний акт-впровадження.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше обґрунтовано залежності між параметрами крайової поверхневої тріщини втоми (розмір і місцезположення), розмірами лопатки турбіни та початковою характеристикою демпфування (у непошкодженому стані), які отримано з використанням розробленої чисельно-аналітичної розрахункової моделі лопатки. Це дало змогу визначити вплив наявності тріщини на відносну зміну власних частот коливань, характеристику демпфування та спектр коливань.

2. Вперше обґрунтовано залежності між параметрами крайової поперечної тріщини втоми (розмір і місцезположення), розмірами ротора та кутом повороту тріщини відносно осі обертання ротора, які отримано з використанням розробленої чисельно-аналітичної розрахункової моделі ротора. Це дало змогу визначити вплив наявності тріщини на відносну зміну власних частот поперечних коливань.

3. Вперше обґрунтовано залежності між параметрами крайової поперечної тріщини втоми у валопроводі турбіни, які отримано з використанням розробленої чисельно-аналітичної розрахункової моделі валопроводу. Це дало змогу визначити вплив наявності тріщини на відносну зміну критичних швидкостей обертання.

4. Удосконалено методичний підхід до дослідження поперечних коливань лопатки турбіни за допомогою розроблення чисельно-аналітичної розрахункової моделі, яка, на відміну від існуючих, враховує наявність крайової поверхневої тріщини втоми.

5. Удосконалено методичний підхід до дослідження поперечних коливань роторів і валопроводу турбіни за допомогою розроблення чисельно-аналітичних розрахункових моделей, які, на відміну від існуючих, враховують наявність крайової поперечної тріщини втоми.

6. Набули подальшого розвитку методи вібраційної діагностики пошкодження за результатами проведення порівняльного аналізу ефективності

досліджених вібраційних характеристик пошкодження. Це дозволило визначити їхні особливості та межі застосування для надійного виявлення пошкодження типу тріщини докритичного розміру.

Практичне значення отриманих результатів полягає в такому:

1. Розроблено чисельно-аналітичні розрахункові моделі для дослідження поперечних коливань лопаток, роторів і валопроводу турбіни, які дають змогу розв'язати зворотну задачу вібраційної діагностики, тобто за відомими змінами вібраційних характеристик пошкодження оцінити його параметри.

2. Проаналізовано вплив параметрів тріщини і геометричних характеристик об'єктів діагностики на вібраційні характеристики пошкодження для правильної інтерпретації результатів практичного застосування запропонованих методик.

3. Розроблено методики оцінки ефективності вібраційної діагностики пошкодження, які враховують як основний параметр похибку експериментальної методики діагностики та дають змогу провести порівняльний аналіз ефективності того чи іншого методу для достатньо надійного, з практичної точки зору, й своєчасного виявлення пошкодження докритичного розміру.

Наукові дослідження були виконані здобувачем в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" під керівництвом професора кафедри теплової та альтернативної енергетики, доктора технічних наук, професора Бовсуновського Анатолія Петровича. Дисертація виконувалась в межах комплексної науково-дослідної роботи № 5162-ЗЕ-БуТЕС від 20.09.2024 р. «Розрахунок ресурсу ротора середнього тиску турбіни блоку №11 для ДТЕК БУРШТИНСЬКА ТЕС».

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання щодо розробки нових та вдосконалення наявних методів вібраційної діагностики роторів та лопаток парових турбін виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Носаля Олександра Юрійовича відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 144 Теплоенергетика та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Теплоенергетика», про що свідчить висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Носаля О.Ю., наданий кафедрою теплової та альтернативної енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям діагностування елементів теплоенергетичного устаткування.

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.

Окремого схвалення заслуговує пояснення специфічних термінів на початку кожного розділу, та подальше виділення термінології за допомогою курсиву. Також слід позитивно відзначити наявність лістингу програмного коду розроблених аналітичних моделей в середовищі IntelliJ IDEA в додатках дисертації.

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* автором оглянуто сучасні та класичні підходи до вібраційних методів діагностики пошкоджень конструктивних елементів різного призначення, представлено результати аналітичних та експериментальних досліджень чутливості вібраційних характеристик пошкодження. Обґрунтовано необхідність розроблення критеріїв оцінки ефективності практичного використання різних методів вібраційної діагностики пошкодження конструктивних елементів парових турбін, яка ґрунтується на порівняльному аналізі чутливості методів вібродіагностики та оцінці впливу умов експлуатації обладнання на вибрані вібраційні характеристики.

У другому розділі запропоновано аналітичну розрахункову модель лопатки турбіни з тріщиною, яка дає змогу прогнозувати вплив параметрів крайової поверхневої тріщини та геометричних параметрів лопатки на її власні частоти коливань, характеристику демпфування і спектр коливань. Адекватність моделі підтверджено порівнянням з результатами експериментів. На основі аналітичних досліджень, виконаних із використанням запропонованої моделі, продемонстровано достатньо високий рівень чутливості розглянутих методів вібродіагностики для виявлення тріщин.

У третьому розділі запропоновано аналітичну розрахункову модель для визначення зміни власних частот поперечних коливань роторів парової турбіни. На основі аналітичних досліджень, виконаних із використанням запропонованої моделі представлено результати моделювання поперечних коливань роторів і валопроводу турбіни з крайовою поперечною тріщиною. Досліджено вплив параметрів тріщини (розмірів і місцеположення) на власні частоти коливань окремих роторів та всього валопроводу турбіни. Визначено власні форми коливань, які виникають при проходженні валопроводу турбіни через критичні швидкості обертання, а також встановлено ті власні форми коливань, що є найбільш доцільними для проведення надійної та ефективної вібродіагностики.

У четвертому розділі дисертації представлено методику оцінки ефективності запропонованих методів вібродіагностики пошкодження лопаток і роторів турбін, що ґрунтується на попередньо заданій величині зміни інформаційної характеристики пошкодження. Виконано порівняльний аналіз чутливості досліджених методів вібродіагностики пошкоджень лопаток парової турбіни та визначено особливості й межі застосування зміни власних частот коливань, характеристики демпфування і спектрального аналізу резонансних коливань лопаток. Показано залежність ефективності вібродіагностики крайової тріщини у роторах турбіни від відносного місцеположення тріщини вздовж довжини ротора, жорсткості ротора, а також від загальної похибки методики випробувань.

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 роботи на АТ «ДТЕК Західенерго», економічні обґрунтування доцільності впровадження вібраційної діагностики, а також візуалізація результатів та лістинг програмного коду в середовищі розробки IntelliJ IDEA.

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 11 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 5 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття за матеріалами доповіді на міжнародній конференції Scopus та 5 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях.

Публікації Носаля Олександра 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. Огляд літератури досить переобтяжений (52 с). При цьому розділ 1 доцільно доповнити публікаціями щодо впливу термічної втоми, повзучості, коагуляції карбідів, ерозійно-корозійного впливу на накопичення пошкоджень в елементах турбін, що є характерними явищами при їх експлуатації.

2. Представлені в розділі 2 підходи до вібраційної діагностики лопаток представляють значний інтерес. Однак, доцільно доповнити запропоновані методи для випадку об'єднання лопаток у пакети, що часто використовуються на електростанціях (зокрема робоча решітка 1 ступеня турбіни К-1000-60/3000 сформована 16 пакетами по 4-5 лопаток).

3. На с. 99, 113, 122 зазначається що запропоновані методи вібродіагностики будуть достатньо ефективними і для більш довгих лопаток що мають меншу жорсткість. Дане питання доцільно дослідити детальніше з врахуванням того, що довгі лопатки турбін мають змінний поперечний переріз по довжині (віяловість) та стають легшими від кореня до периферії, тобто матимуть ще меншу жорсткість ніж очікується в дисертації.

4. В розділі 2.2.2, 2.3.2, 2.4.2 представлена верифікація запропонованої аналітичної моделі за допомогою експериментальних досліджень, які виконані автором дисертації або науковим керівником. Доцільно доповнити верифікацію порівняннями з роботами інших вчених.

5. Вібраційна діагностика роторів високого, середнього і низького тиску виконана для постійного модуля пружності 200 ГПа. При цьому температура металу роторів в окремих областях змінюється від 540 до 35 °С, що призводить до відповідної зміни модуля пружності сталі Р2МА від 181 до 216 ГПа.

6. Вибір осереднених діаметрів PBT, PCT і PHT на с. 136 потребує обґрунтування. Також спрощення кількості опор валопровода турбіни К-200-130 з 7 до 5 без врахування упору між PBT і PCT (рис. 3.9) потребує додаткових коментарів щодо впливу на точність оцінки власних частот коливання.

Важливо відмітити, що 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.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Носалю Олександра Юрійовича на тему «Вібродіагностика пошкоджень конструктивних елементів парової турбіни при її експлуатації і ремонті» 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. 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 Носаль Олександр Юрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 144 Теплоенергетика.

Рецензент:

в.о. завідувача кафедри теплової та альтернативної енергетики
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
кандидат техн. наук, доцент

«04» липня 2025 року

