

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.

Виявлення пошкоджень у конструктивних елементах парової турбіни є складною задачею, що супроводжується як теоретичними, так і практичними труднощами. Застосування локальних неруйнівних методів діагностики можливе переважно під час ремонтних робіт, але вимагає значних витрат часу.

У таких умовах вібраційна діагностика залишається майже єдиним практичним підходом для виявлення пошкоджень в обертових валах і лопатках парових турбін, здатним запобігти виникненню техногенних аварій.

Динамічні властивості цілісного об'єкта та об'єкта зі структурним порушенням, як правило, помітно різняться. Ці відмінності, пов'язані з локальним зменшенням жорсткості, можуть бути використані для виявлення пошкоджень (наприклад, втомних тріщин), а також для оцінки їх характеристик – розмірів і розташування.

З урахуванням вищезазначеного, розробка ефективних методів вібродіагностики пошкоджень елементів конструкції парових турбін у процесі їх експлуатації та під час ремонту з метою підвищення надійності й технічного ресурсу обладнання є важливою як у науковому, так і в прикладному контексті.

Під ефективністю вібродіагностичного методу розуміють його здатність з високою практичною достовірністю виявляти пошкодження (зокрема, тріщини) ще до досягнення ними критичних розмірів — тобто на стадії, коли ще не порушено цілісність об'єкта — при цьому забезпечуючи мінімальні витрати часу та простоту застосування.

Створення вібраційних методів, здатних виявляти тріщини докритичного розміру у різних типах конструкцій і машин, є особливо актуальним з огляду на можливість подовження їх експлуатаційного ресурсу шляхом моніторингу розвитку пошкоджень, а також запобігання раптовим та руйнівним аваріям.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Вирішення поставлених в дисертаційній роботі задач здійснювалось на основі класичної теорії коливань, чисельно-аналітичного моделювання поперечних коливань конструктивних елементів парової турбіни за наявності

пошкодження типу тріщини втоми з використанням сучасного програмного забезпечення, теорії лінійної механіки руйнування з використанням чисельних розрахункових методів інженерного аналізу.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі Теплової та альтернативної енергетики, КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках науково-дослідної роботи в межах договору № 5162-ЗЕ-БуТЕС, що є додатковим підтвердженням їх достовірності під керівництвом доктора технічних наук, професора Бовсуновського Анатолія Петровича.

Основний науковий результат дисертаційного дослідження полягає у розробленні здобувачем ефективних методів вібраційної діагностики втомних тріщин у лопатках і роторах турбін на етапі ремонту та валопроводу турбіни під час експлуатації.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в тому, що здобувачем:

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

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

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

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

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

– **Набули подальшого розвитку** методи вібраційної діагностики пошкодження за результатами проведення порівняльного аналізу ефективності досліджених вібраційних характеристик пошкодження. Це дозволило здобувачу визначити їхні особливості та межі застосування для надійного виявлення пошкодження типу тріщини докритичного розміру.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання, а саме розроблення й удосконалення методик вібраційної діагностики пошкоджень конструктивних елементів парової турбіни під час її експлуатації та ремонті 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 О.Ю. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 144 Теплоенергетика та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Теплоенергетика.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Управління залишковим ресурсом енергетичного обладнання теплової та альтернативної енергетики».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Носаля Олександра Юрійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Загальне враження по мові та стилю дисертаційної роботи є позитивним. В представлених матеріалах послідовно та доступно з використанням загальноприйнятої термінології викладено результати проведеної роботи.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, у яких викладено основні наукові результати роботи, загальних висновків, списку використаних джерел зі 331 найменування та чотирьох додатків. Повний обсяг дисертації становить 238 сторінок.

У **вступі** здобувачем обґрунтовано сучасний стан проблеми, що розглядається в дисертаційній роботі, її актуальність та значущість, сформульовано мету та завдання, об'єкт, предмет і методи наукового дослідження. Автором наведено наукову новизну та практичне значення

отриманих результатів. Надано відомості щодо публікацій та апробації результатів досліджень.

Перший розділ автор присвятив огляду стану проблеми та обґрунтуванню напрямку досліджень дисертаційної роботи. Здобувачем проведено аналіз літературних джерел і розкрито сучасний стан досліджень, що стосуються теми дисертаційної роботи. Зокрема, наведено сучасні та класичні підходи до вібраційних методів діагностики пошкодження конструктивних елементів різного призначення, представлено результати аналітичних та експериментальних досліджень чутливості вібраційних характеристик пошкодження.

За результатами проведеного літературного огляду здобувачем зроблено висновок, що запропоновані варіанти моделей локального пошкодження мають низку істотних недоліків, що перешкоджають створенню надійних та ефективних методів вібродіагностики пошкодження.

Автором обґрунтовано необхідність розроблення критеріїв оцінки ефективності практичного використання різних методів вібраційної діагностики пошкодження конструктивних елементів парових турбін при їх експлуатації та ремонті.

У **другому розділі** дисертаційної роботи здобувачем запропоновано чисельно-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 результатів аналітичних досліджень, виконаних із використанням моделі, яку запропоновано та розроблено здобувачем із застосуванням мови програмування *Java* в інтегрованому середовищі розробки *IntelliJ IDEA* автором виконано порівняльний аналіз чутливості вібраційних характеристик пошкодження лопаток турбін. Продемонстровано методику вібраційної діагностики лопаток і перспективність досліджених вібраційних характеристик для проведення надійної та ефективної діагностики пошкоджень у лопатках турбін під час ремонтного періоду.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи здобувачем запропоновано чисельно-аналітичну розрахункову модель для визначення зміни власних частот поперечних коливань роторів парової турбіни. На основі результатів аналітичних досліджень, виконаних із використанням моделі, яку запропоновано та розроблено здобувачем із застосуванням мови програмування *Java* в інтегрованому середовищі розробки *IntelliJ IDEA* автором представлено результати моделювання поперечних коливань роторів і валопроводу турбіни з крайовою поперечною тріщиною. На основі цих досліджень здобувачем

розроблено методики вібраційної діагностики пошкоджень роторів турбіни на етапі їхнього ремонту та валопроводу турбіни під час експлуатації.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи здобувачем представлено методику оцінки ефективності запропонованих методів вібродіагностики пошкодження лопаток і роторів турбін, що ґрунтується на попередньо заданій величині зміни інформаційної характеристики пошкодження, яка повинна перевищувати похибку тесту та випадкові чинники методики експерименту. 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. Автором 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. Продемонстровано ступінь впливу похибки на ефективність вібродіагностики пошкодження у роторах і валопроводі турбіни.

Загальні висновки висвітлюють основні отримані наукові результати, а також містять рекомендації щодо їх практичного застосування.

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 виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 6 публікацій – тези доповідей в збірниках праць міжнародних науково-практичних конференцій (1 - проіндексована в базах даних *Scopus*).

Також результати дисертації були апробовані на 6 наукових фахових конференціях.

Публікації Носаля Олександра Юрійовича мають досить високий науковий рівень. Вони проходили рецензування та перевірку на унікальність відповідно до вимог видавництва, у яких були опубліковані. Особистий внесок здобувача до поданих наукових публікацій є достатньо вагомим, варто відмітити, що в одній з праць розкрито розроблений здобувачем аналітичний підхід, що дав змогу моделювати коливання лопатки турбіни *K-1000-60/3000* з тріщиною втоми, а також досліджувати вплив параметрів тріщини та геометричних характеристик лопатки на власні частоти коливань та оцінювати ефективність вібраційної діагностики пошкоджень. Також в одній з праць здобувача розкрито розрахункову модель для визначення зміни власної частоти коливань ротора турбіни *K-200-130* у разі виникнення в ньому крайової

поперечної тріщини в томи за різної її орієнтації відносно осі обертання, а також розкрито методику діагностування тріщини в роторі турбіни на основі вібраційних досліджень ротора на стадії ремонту турбіни.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Повторюваність формулювань – так, наприклад, ідея про похибку тесту і «випадкові чинники» методики експерименту повторюється майже дослівно в багатьох частинах роботи (напр. с. 154, 170, 174).
2. Недостатня критичність літературного огляду: розділ 1 зводиться до компіляції джерел, без належної аналітики або порівняння ефективності підходів.
3. Недостатньо обґрунтований вибір порогу чутливості 5% у методиках діагностики – чому саме це значення вважається достатнім або оптимальним, не пояснено (с. 158, 170).
4. Обмежена валідація розрахункової моделі – хоча модель заявлена як чисельно-аналітична, відсутні порівняння з реальними промисловими даними або сторонніми результатами.
5. Імітація тріщин шляхом прорізів має методичні обмеження, але це не обговорено належним чином: наприклад, за Гудмунсоном (с. 59), проріз моделює тріщину неадекватно.
6. Використані методи слабо пристосовані до шуму/реальної експлуатації на енергооб'єктах – це лише побіжно згадується, без аналізу робастності або нечутливості до експлуатаційних збурень (с. 49).
7. Аналіз чутливості вібраційних характеристик пошкодження лопаток турбін обмежується лише трьома параметрами (відносній зміні її власних частот коливань, характеристики демпфування та спектра коливань при основному резонансі), але в практиці їх значно більше (температура, вологість, фіксація тощо).
8. Відсутнє незалежне підтвердження експериментальних результатів – автор сам провів усі дослідження, немає згадок про незалежне відтворення.
9. Умови проведення експериментів не узагальнені – не вказано діапазони температур, навантажень, та інші умови, що впливають на точність результатів (с. 117, 158).
10. Жодної згадки про кількість повторів чи статистичну обробку даних, хоча використано експериментальні методи і точність отриманих

результатів явно залежать від повторюваності експериментів, дисперсії тощо (с. 154–158).

11. Відсутній розділ з аналізом економічної ефективності впровадження, хоча такий додаток (В) згадується – не зрозуміло, на чому базується його зміст і як зроблено оцінки.

Вважаю, 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 Носаля 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.

На мою думку, здобувач Носаль Олександр Юрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 144 Теплоенергетика.

Рецензент:

Доцент кафедри теплової
та альтернативної енергетики
ННІ АТЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського,
к.т.н., доц.

М.П.

« 04 » липня

20 23

року

