

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Марисюка Богдана Олександровича

на тему «Ресурсні характеристики парових турбін від дії крутильних коливань»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань

14 Електрична інженерія за спеціальністю 144 Теплоенергетика

Актуальність теми дисертації.

Беззаперечним є твердження про те, що енергетична галузь є стратегічно важливим сектором господарства будь якої країни. Надійний та безперебійний виробіток енергії напряду залежить від технічного стану об'єктів генерації, в першу чергу таких, як парові турбіни. Високотемпературні масивні елементи парових турбін (ротори, клапани, корпуси) є одними з найкоштовніших і, одночасно, най навантажених частин турбіни. Впродовж експлуатації в металі цих об'єктів накопичується пошкодження від втоми. Довготривале накопичення пошкодження призводить до руйнування металу, що найбільш небезпечно саме для валопроводів турбоагрегатів. Багаторічний досвід експлуатації парових турбоустановок вказує, що серед причин, які спричиняють зародження та розвиток тріщин, можуть бути динамічні крутні моменти з боку електрогенератора, які призводять до появи крутильних коливань.

Дослідження пошкодження металу парових турбін, що відбувається внаслідок крутильних коливань валопроводу є досить складними як з технологічної так і з математичної точки зору. Дана задача становить значний практичний та науковий інтерес. Тому робота спрямована на розробку та вдосконалення розрахунково-експериментальних методів визначення втомного пошкодження металу енергетичного обладнання, що відбувається при дії змінних динамічних крутних моментів роторів є актуальною.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Вирішення поставлених у дисертаційній роботі задач здійснювалось на основі чисельного дослідження теплового та напружено-деформованого стану валопроводу турбоагрегату з використанням сучасних методів математичного моделювання, які, в свою чергу, ґрунтуються на класичних положеннях механіки твердих тіл та нестационарної теплопровідності, з використанням загальноприйнятих чисельних розрахункових методів інженерного аналізу (МКЕ) та методів вирішення задач математичної фізики.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі теплової та альтернативної енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках НДР № 4629-ВЭ-ЛуТЭС «Розрахунок ресурсу роторів та корпусних деталей ЦВТ і ЦСТ блоку ст. №15 для ДТЕК Луганська ТЕС» та № 37-124-08-22-17927 «Оцінка можливості подовження безпечної експлуатації турбоустановки К-1000-60/3000 енергоблоку №2 ХАЕС після пошкодження ротора ЦВТ», що є додатковим підтвердженням їх достовірності.

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

1. вперше запропоновано замінювати робочі лопатки та бандажні кріплення на диски, що дозволяє раціоналізувати розрахункову модель в частині визначення критичного числа обертів;
2. удосконалено розрахункову модель напружено-деформованого стану та оцінки залишкового ресурсу валопроводу турбоустановки К-200-130 для дослідження впливу крутильних коливань;
3. удосконалено розрахункову модель напружено-деформованого стану та оцінки залишкового ресурсу валопроводу турбоустановки К-1000-60/3000 для дослідження впливу крутильних коливань;
4. вперше проведено порівняльну оцінку пошкодження металу валопроводу турбоустановки К-1000-60/3000 внаслідок крутильних коливань, що виникають при підключенні турбогенератора до енергосистеми з грубою синхронізацією, для проєктного валопроводу та валопроводу після відновлення (без одного робочого ступеня).

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Марисюка Б.О. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 144 Теплоенергетика та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Теплоенергетика.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею результати якої мають практичну цінність і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Ресурс енергетичного обладнання та розробка засобів подовження терміну експлуатації».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Марисюка Богдана Олександровича 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.

Іноколи в роботі зустрічаються граматичні, пунктуаційні (значна кількість) та семантичні неточності. Також зустрічаються русизми. Іноді застосовуються невірні відмінки слів. Типи та розміри шрифтів на деяких рисунках (наприклад 2.2 та 2.7) відрізняються від основного шрифту (Times New Roman, 14 пт.). Іноді зустрічається шрифт Arial замість Times New Roman (наприклад стр. 77). Нарисункові підписи рис. 3.14-3.16 та 4.11-4.15 не відповідають вимогам ДСТУ 3008:2015.

В цілому ж загальне враження по мові та стилу дисертаційної роботи є позитивним.

В представлених матеріалах послідовно і доступно з використанням загальноприйнятої термінології викладено результати проведеної роботи.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 152 сторінки.

У вступі здобувачем обґрунтовано стан задачі дослідження, що розглядається в роботі, її актуальність та доцільність. Автором сформульовано мету та завдання наукового дослідження. Наведено наукову новизну, а також зазначено практичну цінність отриманих результатів. Надано відомості щодо публікацій та апробації результатів досліджень.

Перший розділ дисертаційної роботи автор присвятив аналізу літературних джерел які стосуються теми дисертаційної роботи. В розділі автор проаналізував основні фактори, що впливають на втомну пошкоджуваність металу валопроводів турбоагрегатів при їх різних режимах роботи.

Здобувач висвітлив основні причини появи крутильних коливань валопроводів турбоагрегатів.

Також автор обґрунтував доцільність розробки та впровадження засобів безперервного моніторингу пошкоджуваності металу роторів парових турбоагрегатів та наголосив на недостатність наукових робіт спрямованих на визначення ресурсних характеристик й втомної пошкоджуваності парових турбін внаслідок крутильних коливань

Другий розділ дисертації автор присвятив аналізу пошкоджуваності металу роторів турбоагрегату внаслідок дії крутильних коливань валопроводу, що виникають при нештатному режимі роботи електрогенератора.

Здобувач довів, що статичний крутний момент спричиняє максимальні значення дотичних напружень в області з'єднувальної муфти між паровою турбіною та турбогенератором. Також в розділі автором описано умови, які призводять до виникнення крутильних коливань валопроводу турбіни, що за певних умов можуть спричинити його втомну пошкоджуваність.

Та запропонував методику розрахунку сумарної пошкоджуваності накопиченої в основному металі валопроводу турбоустановки, що визначається як сума статичної, циклічної пошкоджуваності та пошкоджуваності внаслідок крутильних коливань.

У третьому розділі дисертаційної роботи автор наводить результати власних досліджень напружено-деформованого стану валопроводу парової турбіни К-200-130 при короткому замиканні на турбогенераторі.

Тут здобувач пропонує для раціоналізації розрахункових ресурсів при комп'ютерному моделюванні вперше застосувати варіант заміни робочих лопаток та бандажних кріплень на диски еквівалентної довжини та маси.

Також автор моделює крутильні коливання валопроводу турбіни, що виникають внаслідок трьохфазного короткого замикання при тривалості сплеску 0,02 с., шляхом прикладання додаткового реактивного крутного моменту бігармонійної форми на бочку ротора електрогенератора. Результатом моделювання є розподіл дотичних напружень по об'єму ротора турбіни К-200-130. В розділі наголошується, що реактивний сплеск на роторі турбогенератора спричинив появу крутильних коливань по всій довжині валопроводу. Проте пошкодження металу ротора не відбулося, оскільки інтенсивність максимальних дотичних напружень не перевищила границю втоми роторної сталі 25Х1М1ФА.

Четвертий розділ автор присвятив досліджено напружено-деформований стан валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000 при нештатних режимах роботи електрогенератора. Основуючись на результатах розрахунку напружено-деформованого стану валопроводу, здобувачем оцінено вплив крутильних коливань валопроводу турбоагрегату на його ресурсні характеристики. Основуючись на методі кінцево-елементного аналізу, автор показав, що при нештатних режимах роботи турбогенератора на його роторі виникають реактивні крутні моменти та довів, що внаслідок даних сплесків, по всій довжині валопроводу виникають крутильні коливання. Таким чином здобувачем було удосконалено розрахункову модель напружено-деформованого стану та оцінки залишкового ресурсу валопроводу турбоустановки К-1000-60/3000 для дослідження впливу крутильних коливань.

Основуючись на удосконаленій моделі, автор показав, що будь яка зміна крутного моменту між турбогенератором та паровою турбіною викликає появу крутильних коливань всього валопроводу. Й хоча інтенсивність крутильних коливань була не достатньою для миттєвого крихкого руйнування валопроводу, але багатократне повторення нештатних режимів роботи турбогенератора призводить до суттєвого рівня пошкодження металу.

Також в даному розділі здобувач провів порівняння пошкодження металу валопроводу внаслідок крутильних коливань, що виникають при підключенні

турбогенератора до енергосистеми з грубою синхронізацією, для проєктного валопроводу та валопроводу після відновлення.

П'ятий розділ дисертаційної роботи автор присвятив дослідженню теплового та напружено-деформованого стану ротора циліндру високого тиску при його номінальному та пускових режимах роботи.

Автором в даному розділі за допомогою комплексу числових експериментів вдалося визначити розподіли температур та їх градієнтів по об'єму ротора як на номінальному так і на пускових режимах роботи турбоагрегату.

Основою на отриманих даних, здобувач визначив найбільш напружені ділянки ротора. Ними виявилися області розвантажувальних отворів 3-го та 4-го робочого ступеня, а також осьовий канал під цими ступенями.

Базуючись на результатах розрахунку напружено-деформованого стану при номінальному та пускових режимах експлуатації, автор визначив статичну та циклічну пошкоджувальність ротора, які відповідно становили 51,66 % та 5,38 %. Також було розраховано сумарне пошкодження металу валопроводу внаслідок 156-ти асинхронних підключень турбогенератора до мережі (10,06 %). Відмічено, що його величина є співставною з величиною циклічного пошкодження металу ротора циліндру високого тиску, які мали місце за весь час експлуатації енергоблоку.

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 10 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 6 публікацій тез доповідей в збірниках праць міжнародних науково-практичних конференцій.

Також результати дисертації були апробовані на 6 наукових фахових конференціях.

Публікації Марисюка Богдана Олександровича мають досить високий науковий рівень, вони проходили рецензування та перевірку на унікальність згідно з умовами видавництва. Особистий внесок здобувача до поданих наукових публікацій є достатньо вагомим, варто відмітити, що здобувач особисто розробляв геометричні моделі роторів циліндра середнього тиску турбоагрегату К-200-130 та К-1000-60/3000 і розраховував власні та критичні частоти обертання розроблених моделей, а також розраховував значення крутних моментів при короткому замиканні, проводив моделювання

крутильних коливань та досліджував напружено-деформований стан валопроводу.

На погляд рецензента, публікації в достатній мірі охоплюють усі основні результати дисертаційного дослідження.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Вважаю, що перший пункт наукової новизни, а саме *«вперше запропоновано замінювати робочі лопатки та бандажні кріплення на диски, що дозволяє раціоналізувати розрахункову модель в частині визначення критичного числа обертів»* є не зовсім коректним. При сучасному розвитку розрахункових можливостей ЕОМ, спрощення геометричних моделей досліджуваних об'єктів, а отже й неминуче зменшення точності розрахунків, не може бути науковою новизною.

2. Не зовсім зрозуміло, що автор мав на увазі при формулюванні другого та третього пунктів наукової новизни. З розділів 3 та 4 дисертаційної роботи чітко не ясно в чому суть *«удосконалення розрахункових моделей»*. Якщо автором малась на увазі заміна робочих лопаток та бандажних кріплень ротора на диски, то це не є удосконаленням – це є спрощенням розрахункових моделей.

3. В роботі не представлено математичну модель, що лежить в основі проведених автором числових експериментів. Дана робота є суто розрахунковою, тому, на думку рецензента, опису математичної моделі має бути приділена особлива докладна увага. Наприклад, присвячено окремий розділ роботи.

4. В роботі автором наведено значну кількість діаграм та графіків залежностей величин отриманих на основі числових експериментів, проте з тексту дисертації складно зрозуміти методику проведення цих експериментів.

5. На с. 97 автор пише: *«У зв'язку з відсутністю значень реактивних моментів, що виникають при асинхронному включенні електрогенератора ТВВ-1000-2УЗ ВЕО «Електросила» в мережу, було використано залежності отримані для електрогенератора ТГВ-200»*. На погляд рецензента, таке припущення є досить сумнівним, оскільки вказані електрогенератори мають абсолютно різні масо-габаритні показники. За умови відсутності експериментальних або розрахункових даних, автору більш доцільно було б розглянути діапазон реактивних моментів.

6. В розділі 4.3 автором наведено геометричну модель турбоагрегату К-1000-60 (рис. 4.5) без збуджувача електрогенератора. Збуджувач електрогенератора має досить значні масо-габаритні показники (довжину – більше 5 м і масу – 10 т) чи допустиме таке спрощення, особливо з точки

зору того, що автор в цьому ж розділі окремо розглядає валопроводи з та без робочих лопаток 5-го ступеня ротора ЦВТ (а вони мають набагато менші масо-габаритні показники).

7. В розділі 2.2 за допомогою залежності (2.10), автор розраховує реактивний крутний момент на роторі генератора при трьохфазному короткому замиканні, проте не зрозуміло яким чином було визначено/обрано безрозмірні коефіцієнти a_0 та a_1 , які залежать від типу короткого замикання та типу генератора.

8. В роботі відсутній розрахунок похибки результатів числових експериментів. Це було б особливо актуальним, зважаючи на суттєві припущення здійсненні автором щодо заміни робочих лопаток та бандажних кріплень роторів турбоагрегатів на диски.

Проте, не зважаючи на висловленні зауваження, дисертаційна робота справляє дуже позитивне враження.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Марисюка Богдана Олександровича на тему «Ресурсні характеристики парових турбін від дії крутильних коливань» 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 Марисюк Богдан Олександрович 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.

«21» травня 2024 року

