

## **ВІДГУК**

офіційного опонента 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.**

При експлуатації турбоагрегатів в їх матеріалі поступово накопичується пошкодження. Суттєве накопичення пошкоджень зрештою призводить до руйнування агрегату.

Численні дослідження показують, що найчастішою причиною зародження та розвитку кільцевих тріщин роторів турбоагрегатів є динамічні крутні моменти з боку електрогенератора, які виникають внаслідок різкої зміни реактивного крутного моменту на його роторі. Серед найчастіших причин виділяють асинхронні підключення турбогенератора до енергосистеми та короткі замикання.

Потужні сплески реактивного крутного моменту на роторі електрогенератора при його нештатних режимах роботи спричиняють появу крутильних коливань по всій довжині валопроводу. Це призводить до зростання рівня дотичних напружень на найбільш небезпечних ділянках валопроводу. Багаторазове повторення циклів пошкодження стає причиною зародження та розвитку втомних тріщин.

Розрахунок пошкодження металу валопроводу внаслідок крутильних коливань пов'язаний із суттєвими математичними та технологічними складнощами. Тому розробка та вдосконалення розрахунково-експериментальних методів визначення втомного пошкодження металу енергетичного обладнання внаслідок дії змінних динамічних крутних моментів роторів є актуальною та становить значний практичний інтерес.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- вперше запропоновано замінювати робочі лопатки та бандажні кріплення на диски, що дозволяє раціоналізувати розрахункову модель в частині визначення критичного числа обертів;

- удосконалено розрахункову модель напружено-деформованого стану та оцінки залишкового ресурсу валопроводу турбоустановки К-200-130 для дослідження впливу крутильних коливань;

– удосконалено розрахункову модель напружено-деформованого стану та оцінки залишкового ресурсу валопроводу турбоустановки К-1000-60/3000 для дослідження впливу крутильних коливань;

– 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).

Достовірність отриманих наукових результатів дисертаційної роботи забезпечується коректним застосуванням засобів математичного моделювання при вирішенні поставлених наукових задач і підтверджена узгодженням отриманих результатів з положеннями відомих експериментальних та розрахункових досліджень. Додатковим підтвердженням достовірності результатів наукових досліджень є їх апробація на 6-ти міжнародних науково-практичних конференціях.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі теплової та альтернативної енергетики ННІ АТЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках науково-дослідних робіт № 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».

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання 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 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 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 співпадіння, 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.

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

Дисертація складається зі вступу, 5-ти розділів, висновків, списку літератури та 2-х додатків. Загальний обсяг дисертації 152 сторінки.

У вступі здобувач обґрунтував актуальність та значимість проведеної роботи, яка полягає в тому, що напрацьований ресурс більшості турбоагрегатів, які встановлені на українських енергоблоках ТЕС та АЕС перевищив паркове значення. Сформульовано мету та завдання наукового дослідження. Зазначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Надано відомості щодо публікацій та апробації результатів проведених досліджень.

У першому розділі дисертаційної роботи автор проаналізував літературні джерела, що стосуються теми дослідження та основні фактори, що впливають на втомну пошкоджуваність металу роторів турбоагрегатів при різних режимах роботи паротурбінної установки.

Впродовж експлуатації енергетичного обладнання, в його матеріалі виникають напруження, які постійно змінюються в часі. При багатократному повторенні змінних напружень в матеріалі обладнання може накопичуються пошкодження. Внаслідок цього відбувається зародження та розвиток тріщин втоми, які погіршують надійність обладнання та можуть призвести до руйнування об'єкту.

Автор зазначив необхідність розробки та впровадження засобів безперервного моніторингу за напружено-деформованим станом турбоагрегату з метою точної оцінки його пошкодження та залишкового ресурсу.

Другий розділ дисертації здобувач присвятив аналізу пошкоджуваності металу роторів парових турбін внаслідок дії крутильних коливань валопроводу при нештатному режимі роботи електрогенератора (короткі замикання, асинхронні підключення до мережі).

Автор описав методику визначення динамічних крутних моментів при нештатних режимах роботи електрогенератора та методику розрахунку пошкодження металу роторів. Сумарна пошкоджуваність валопроводу визначається як сума статичної, циклічної пошкоджуваності та пошкоджуваності внаслідок крутильних коливань.

Третій розділ дисертації автор присвятив дослідженню напружено-деформованого стану металу валопроводу турбоагрегату К-200-130 при короткому замиканні на електрогенераторі.

Здобувач запропонував замінювати робочі лопатки та бандажні кріплення при комп'ютерному моделюванні на диски еквівалентної довжини та маси. Це дозволяє раціоналізувати розрахункові ресурси при математичному

моделюванні та частково покращити динамічну поведінку валопроводу. Дана методика запропонована та описана вперше.

Автор моделював появу крутильних коливань валопроводу турбоагрегату шляхом прикладання додаткового реактивного крутного моменту бігармонійної форми на бочці ротора електрогенератора, тривалістю дії 0,02 с. Внаслідок цього виникли крутильні коливання по всій довжині валопроводу.

Четвертий розділ дисертаційної роботи автор присвятив дослідженню напружено-деформованого стану валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000 при короткому замиканні та асинхронному підключенні турбогенератора до енергосистеми.

За результатами моделювання автор показав, що будь яка різка зміна крутного моменту на роторі електрогенератора викликає появу крутильних коливань всього валопроводу.

Здобувач провів порівняння пошкодження металу валопроводу внаслідок крутильних коливань, що виникають при асинхронному підключенні турбогенератора до енергосистеми, для проєктного валопроводу та валопроводу після відновлення.

В п'ятому розділі дисертації здобувач навів результати розрахунку теплового та напружено-деформованого стану ротора ЦВТ турбоагрегату К-1000-60/3000 ЛМЗ після пошкодження, для номінального та пускових режимів роботи енергоблоку, які були виконані на кафедрі теплової та альтернативної енергетики за участі здобувача.

Автор навів розподіли температур та графіки зміни градієнтів температур по об'єму ротора на номінальному та пускових режимах роботи турбоагрегату.

При номінальному режимі роботи турбоагрегату найбільша температура металу спостерігається на диску першого ступеня та становить 264 °С. В той же час температура металу на ділянках кінцевих ущільнень становить від 151 до 115 °С.

Найбільший градієнт температур при пуску паротурбінної установки з холодного стану становить 952 К/м та спостерігається в області діафрагмового ущільнення 4-го ступеня в момент синхронізації турбогенератора з енергосистемою (4400 с).

Найбільший градієнт температур при пуску паротурбінної установки з гарячого стану металу становить 958 К/м, спостерігається також в області діафрагмового ущільнення 4-го ступеня, проте вже при роботі на електричній потужності 400 МВт (3300 с).

Таким чином за допомогою сучасних методів математичного моделювання було розраховано тепловий стану валопроводу турбоагрегату та визначено найбільш напружені ділянки ротора при пусках з різних теплових станів металу. При пуску з холодного стану металу найбільша інтенсивність

напруження в роторі ЦВТ становить 296,4 МПа, а найменша інтенсивність напруження дорівнює -190,2 МПа. При пуску з гарячого стану металу найбільша інтенсивність напруження складає 298,9 МПа, а найменша інтенсивність напруження дорівнює -205,9 МПа.

Для досліджуваного турбоагрегату статична пошкоджуваність ротора становить 51,66 %, а циклічна пошкоджуваність 5,38 %.

Автором було розраховано сумарне пошкодження металу валопроводу внаслідок 156-ти асинхронних підключень турбогенератора до мережі, яке становить 10,06 %, що є співставною величиною з циклічними пошкодженнями металу ротора ЦВТ за весь час експлуатації енергоблоку.

У загальних висновках здобувач зазначив основні отримані наукові результати дослідження та рекомендації.

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.

Результати дисертаційного дослідження були апробовані на 6 міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях.

Опубліковані праці дисертанта виконані на високому науковому рівні, відображають проведені дослідження та відповідають напрямку теплоенергетики.

В наукових публікаціях здобувача відсутні ознаки плагіату та дотримані принципи академічної доброчесності. В списку публікацій, виконаних у співавторстві, зазначено особистий внесок здобувача.

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

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. В даній роботі не достатньо детально описана математична модель, що лежить в основі розрахунку значень реактивних крутних моментів на роторі електрогенератора та напружено-деформованого стану валопроводу при крутильних коливаннях.

2. З яких міркувань обирався рівень демпфування металу для даних валопроводів та як він впливає на циклічне пошкодження металу?

3. З тексту дисертації не достатньо зрозуміло, які саме граничні умови задавалися для розрахунку напружено-деформованого стану валопроводу при короткому замиканні та асинхронному підключенні.

4. Де саме відбувалося коротке замикання, крутильні коливання при якому досліджувалися в розділах 3.4 та 4.4?

5. З метою більшої наочності, на графіках, що демонструють зміну максимальних дотичних напружень варто було зобразити межу витривалості роторної сталі при кручення.

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 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.

Здобувач Марисюк Богдан Олександрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 144 Теплоенергетика.

### **Офіційний опонент:**

Професор кафедри теоретичної,  
загальної та нетрадиційної енергетики,  
Національного університету «Одеська  
політехніка», д.т.н., проф.

Алла ДЕНИСОВА

Підпис д.т.н., проф. Денисової А.Є. засвідчую.

Вчений секретар Вченої ради

Національного університету  
«Одеська політехніка»

Лада ПРОКОПОВИЧ



« 08 » 05 20 24 року