

## **ВІДГУК**

офіційного опонента 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 провідною базовою галуззю національної економіки, яка визначає науково-технічний потенціал держави та забезпечує функціонування всіх секторів господарства. Турбогенератори великої потужності виробляють основну частку електричної енергії в Об'єднаній енергосистемі України та залишаються ключовим генеруючим обладнанням теплових і атомних електростанцій.

Значна частина турбогенераторів вітчизняного парку вичерпала або наближається до вичерпання нормативного ресурсу. Експлуатація обладнання в надкритичних, нестаціонарних та асиметричних режимах суттєво підвищує ризики аварійних пошкоджень. Аварійне руйнування елементів ротора призводить до тривалих простоїв енергоблоків і значних техніко-економічних втрат.

Особливої гостроти проблема набуває при модернізації обладнання шляхом повторного використання бочок ротора, що відпрацювали ресурс. Тривалий вплив змінних механічних, електромагнітних і термодинамічних навантажень викликає деградацію фізико-механічних властивостей матеріалу, зниження межі витривалості та інтенсифікацію розвитку втомних тріщин. Вихрові струми, несиметрія навантажень і порушення систем охолодження генерують нестаціонарні температурні поля, що призводять до теплового викривлення осі ротора, виникнення додаткових сил небалансу та зростання вібрації.

Критичним елементом конструкції залишається бандажний вузол, який працює в умовах високих відцентрових сил і контактних напружень. У багатьох агрегатах посадочні натяги бандажних кілець знаходяться на мінімально допустимому рівні, що знижує запас міцності вузла.

Точне прогнозування напружено-деформованого та термонапруженого стану елементів ротора під комплексною дією навантажень вимагає розвитку тривимірних чисельних моделей на основі методу скінченних елементів з

урахуванням реальних граничних умов, нерівномірності контактних поверхонь і змінних характеристик матеріалів. Традиційні аналітичні методики не завжди забезпечують необхідну точність через спрощені припущення.

Таким чином, розробка удосконалених методів розрахунку напружено-деформованого стану конструктивних елементів потужних турбогенераторів у тривимірній постановці є актуальним науковим і прикладним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню надійності та безпеки генеруючого обладнання енергосистеми України.

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

Дисертаційна робота присвячена розробці методів оцінки напружено-деформованого та термонапруженого стану елементів ротора потужних турбогенераторів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення міцності та надійності роторних конструкцій в умовах тривалої експлуатації й модернізації генеруючого обладнання.

Складність оцінки запасів міцності елементів ротора обґрунтовано пояснено потребою комплексного розв'язання взаємопов'язаних задач теплопровідності та термопружності. Особливо це стосується аналізу бандажного вузла, де на результати суттєво впливають попередні посадочні натяги, температурні поля систем вентилявання, відцентрові сили та нерівномірність контактних поверхонь. Автор достатньо чітко показав, що застосування високолегованих сталей із підвищеною твердістю та межею міцності вимагає збільшення натягів, що підвищує ризик виникнення тріщин у зонах концентрації напружень. Обґрунтовано доведено, що класичні інженерні методики не забезпечують необхідної точності через неможливість повного врахування сукупної взаємодії численних факторів.

У дисертації розроблено та апробовано удосконалений метод розрахунку, який базується на послідовному розв'язанні задач термопружності та теплопровідності в тривимірній постановці з використанням методу скінченних елементів. Характерною особливістю методу є ефективна передача початкових і граничних умов між тепловими та механічними задачами. Розрахунки виконані в програмному комплексі SolidWorks. Достовірність отриманих результатів достатньо обґрунтовано верифікацією з аналітичними рішеннями та врахуванням реальних експлуатаційних умов.

Метою дисертаційної роботи є обґрунтування підвищення міцності елементів ротора турбогенераторів на основі тривимірного комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану.

У роботі детально проаналізовано конструктивні особливості роторів турбогенераторів, характерні експлуатаційні пошкодження та існуючі методи

оцінки їх напружено-деформованого стану. Виконано комплексне дослідження термонапруженого стану бандажного вузла, включаючи аналітичні розрахунки зусиль, переміщень, роз'єднувальних швидкостей та тривимірне моделювання методом скінченних елементів при різних частотах обертання.

Виконано розрахунок напружено-деформованого стану вала ротора методом скінченних елементів, включаючи статичний розрахунок та визначення критичних частот обертання. Отримані результати дозволяють обґрунтувати безпечну роботу турбогенератора в номінальному режимі з достатньою відстанню між першою та другою критичними частотами для податливих опор. Проведений статичний розрахунок достатньо чітко визначив детальну картину розподілу напружень і деформацій по всьому об'єму вала з урахуванням усіх діючих сил і підтвердив значні запаси міцності. Крім того, здійснено тривимірний розрахунок напружено-деформованого стану бочки ротора, який дозволив визначити розподіл внутрішніх напружень, а також проведено тривимірне моделювання напружено-деформованого стану клинів кріплення струмопідводу ротора.

Розроблені методи дозволяють визначати рівні напружень у конструктивних елементах, які раніше було складно оцінити традиційними спрощеними підходами. Це забезпечує більш точне визначення запасів міцності та обґрунтований вибір конструктивних параметрів на етапі проєктування.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на АТ «Українські енергетичні машини» (м. Харків) при проєктуванні та реконструкції турбогенераторів великої потужності, а також використовуються в навчально-методичній діяльності Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

Таким чином, наукові результати дисертації є обґрунтованими, достовірними та характеризуються суттєвою новизною. Вони становлять вагомий внесок у розвиток методології розрахунку термонапруженого стану елементів потужних електричних машин.

**Наукова новизна** результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше створений новий метод розрахунку бандажного вузла ротора, що відрізняється від існуючих завданням фактичних натягів нерівномірних контактних поверхонь («носок» та «спинка»), теплових граничних умов I роду та фактичної геометрії пазів ротора при номінальній та критичній (угонній) частотах обертання.

2. Удосконалено метод розрахунку напружено-деформованого стану бочки вала з фрезерованими під обмотку пазами, що на відміну від існуючих містить уточнення сітки для концентраторів напружень, задані граничні умови I роду,

отриманих з кореляції експериментальних та аналітичних даних та завдання реальних модулів пружності.

3. Розроблено метод розрахунку напружено-деформованого стану клиновидних елементів струмопідводу ротора, в якому на відміну від існуючих ураховуються відцентрові сили та контактні напруження, обумовлені технологією збирання.

4. Удосконалено метод обчислення критичних частот вала ротора в частині завдання еквівалентних перерізів в тривимірній постановці та завдання уточнених податливостей опор.

5. Набули подальшого розвитку існуючі інженерні методи розрахунку напружено-деформованого стану конструкції бандажного вузла ротора в частині уточнення сил, викликаних відцентровою складовою від дії лобової частини обмотки та врахування геометрії зубця для обчислення роз'єднувальної частоти.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

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 податливих опор.

4. Вперше обґрунтовано застосування розбірної конструкції елементів кріплення струмопідводу 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 дисертаційної роботи ґрунтовно висвітлено актуальність дослідження напружено-деформованого та термонапруженого стану елементів ротора потужних турбогенераторів як основи підвищення їхньої міцності та експлуатаційного ресурсу. Автор чітко продемонстрував зв'язок роботи з діючими науковими програмами, сформулював мету — обґрунтування підвищення міцності елементів ротора на основі розроблених методів тривимірного комп'ютерного моделювання, а також коректно визначив завдання, об'єкт і предмет дослідження, методи, наукову новизну, практичну цінність, особистий внесок автора, апробацію та публікації.

Перший розділ присвячено глибокому аналізу конструктивних особливостей роторів потужних синхронних турбогенераторів та сучасних підходів до оцінки їх напружено-деформованого стану (НДС). У розділі розглянуто загальну конструкцію турбогенератора потужністю 200 МВт з детальним описом бочки ротора, бандажних кілець, centruючих елементів, систем кріплення обмотки та лобових частин. Виконано детальний аналіз типових експлуатаційних пошкоджень (втомні тріщини, фретінг-корозія, пластичні деформації зубців) та факторів, що їх спричиняють (відцентрові сили, термічні градієнти, вихрові струми, циклічні навантаження). Проведено критичний огляд аналітичних і чисельних методів, а також проаналізовано результати розрахунків запасів міцності за класичними інженерними методиками.

**У другому розділі** представлено результати комплексного термомеханічного дослідження бандажного вузла ротора. Виконано аналітичні розрахунки зусиль, еквівалентних напружень за критерієм Мізеса та переміщень під дією відцентрових навантажень і контактних тисків. Визначено роз'єднувальні швидкості компонентів. Запропоновано вдосконалену методологію вибору оптимальних посадкових натягів. Вперше проведено високоточні 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»), нелінійності контактної взаємодії та реальної геометрії.

**У третьому розділі** здійснено детальне тривимірне моделювання напружено-деформованого стану вала ротора. Виконано повний аналіз методом скінченних елементів, включаючи статичний розрахунок, модальний аналіз з визначенням критичних частот обертання та вивченням власних форм коливань. Проведено високоточне моделювання бочки ротора з фрезерованими пазами та клинів кріплення струмопідводу з урахуванням контактних взаємодій, відцентрових сил і нелінійної поведінки матеріалів.

Науково-дослідна частина роботи завершується створенням ефективних методів оцінки напружено-деформованого та термонапруженого стану вузлів турбогенераторів на базі високоточних тривимірних моделей. Застосування сучасних підходів методу скінченних елементів дозволило отримати детальний розподіл полів напружень у складних зонах концентраторів (зубці, пази, отвори, контактні поверхні), що практично неможливо достовірно оцінити за допомогою традиційних спрощених аналітичних моделей. Отримані результати забезпечують суттєве підвищення точності розрахунку коефіцієнтів запасу міцності та дають надійну основу для оптимізації конструктивних і технологічних параметрів на етапі проєктування.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на АТ «Українські енергетичні машини» (м. Харків) при проєктуванні та реконструкції турбогенераторів великої потужності, а також використано в навчально-методичному процесі 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. Автор використовує граничні умови I роду (завдання температури поверхонь). У реальних умовах експлуатації турбогенератора теплообмін визначається конвекцією у водневому середовищі під тиском, що відповідає ГУ III роду. Ігнорування коефіцієнтів тепловіддачі та градієнтів температури в товщі масивних деталей не дозволяє адекватно оцінити термічні напруження, які можуть бути співмірними з механічними.

2. Розрахунки проводяться у пружній постановці. Однак при напруженнях 685 МПа, які виникають згідно розрахунків здобувача, матеріал фактично переходить у стадію текучості. Автор не враховує пружно-пластичні деформації, що призводить до неточної оцінки залишкових натягів після першого ж пуску-зупинки машини, коли в зонах концентраторів можуть виникнути незворотні зміни.

3. По тексті дисертації зустрічається неузгодженість одиниць вимірювання. Використовуються застарілі "кгс/см<sup>2</sup>" поруч із системними SI "МПа".

4. Низька читабельність міток на епюрах, наприклад, на рисунку 2.15 номери вузлів та значення напружень накладаються один на одного.

5. Дослідження зосереджено на стаціонарних станах. Проте найбільше пошкодження виникає під час пусків та зупинок, коли нерівномірне нагрівання обмотки та метала створює температурні перепади. Розрахунок напружень без урахування часової динаміки температурних полів не дає повної картини втомної міцності.

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 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.

**Офіційний опонент:**

Доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики  
Національного технічного університету України  
"Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського",  
к.т.н, доцент

Дмитро РИНДЮК