

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу

Третяка Олексія Володимировича

«Міцність вузлів турбогенераторів і гідрогенераторів великої потужності»,

що представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

1. Актуальність теми. Оцінювання міцності, довговічності, залишкового ресурсу елементів відповідальних конструкцій, зокрема, гідро- та турбогенераторів великої потужності є актуальною задачею сучасного машинобудування. Аналіз НДС (напружене-деформованого стану) деталей машин та елементів конструкцій є визначальною складовою цих розрахунків. Методи розрахунку вузлів гідро- та турбогенераторів, які склалися ще в середині минулого століття, з появою обчислювальної техніки та розвитком числових методів, потребують відповідного перегляду. Спільна дія сил інерції від обертання ротора, сил тяжіння, складальних навантажень, які виникають від посадок деталей з натягом, температурних навантажень, що виникають внаслідок виділення тепла в активному контурі, обумовлює широкий спектр навантажень, що діють на конструкційні елементи генератора. Складність аналізу НДС гідро- та турбогенераторів обумовлена ще необхідністю одночасного вирішення кількох задач, пов’язаних з умовами експлуатації, а саме – газодинаміки, тепlopровідності та термопружності.

У зв'язку з вищевикладеним, актуальність дисертаційної роботи Третяка Олексія Володимировича «Міцність вузлів турбогенераторів і гідрогенераторів великої потужності», спрямованої на вирішення важливої науково-практичної проблеми раціонального проектування електрогенераторів великої потужності через розробку ефективної методології розв’язання комплексу взаємопов’язаних тривимірних задач термопружності, тепlopровідності і газодинаміки, не викликає сумнівів.

Дисертаційну роботу виконано на Державному Підприємстві «Завод «Електроважмаш», м. Харків в рамках програми розвитку гідроенергетики на період до 2026 року та в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків відповідно до держбюджетної теми III-67-16, а її результати впроваджені в промислово-виробничу практику, що підтверджує актуальність роботи. Крім того, тема дисертації безпосередньо пов’язана з роботами, що виконувалися в рамках заводських замовлень ДП «Завод

«Електроважмаш». Розшифровка зазначених тем наводиться в дисертації та авторефераті.

2. Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в тому, що автором було розроблено методологію розрахунку конструктивних елементів електрогенераторів високої потужності на міцність через розв'язання сукупності взаємопов'язаних тривимірних задач термопружності, тепlopровідності і газодинаміки за методом скінченних елементів (МСЕ).

Окремо слід зазначити, що результатом наукових досліджень Третяка О.В. є:

- **нові результати** з тривимірного моделювання роботи теплообмінника турбогенератора з водневою системою охолодження, яке враховує можливе засмічення та закупорку газоохолоджувальних трубок у системі подачі води;

- **удосконалення** методів розрахунку напруженого-деформованого стану бандажного кільця ротора турбогенератора великої потужності під впливом відцентрових сил від обмоток ротору, масових сил самого бандажного вузла, натягу посадки бандажного кільця та температурних навантажень;

- **розробка**, у тривимірній постановці, уточненого методу розрахунку НДС пружної підвіски статора турбогенератора великої потужності під час понаднормових навантажень (аварія), які викликані коротким двофазним замиканням, де також враховується нерівномірність нагріву статора;

- **проведення** на основі запропонованої методології розрахунку міцності вузлів генератора числового дослідження напруженого-деформованого стану в коробі та хрестовині генераторів за експлуатаційних силових та температурних навантажень; **уверше** під час розрахунку коробів було враховано нерівномірність характеру тиску у зоні розміщення компресору; **уверше** враховано нагрів хрестовини під дією вихрових струмів, пляхом введення точкових джерел тепла, рівномірно розміщених у хрестовині, параметри яких було отримано під час експериментальних досліджень; **отримано уточнені дані**, щодо параметрів додаткового навантаження, що діє на розпорні домкрати під впливом нагріву хрестовини.

3. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі

Наукові положення дисертації базуються на класичних методах теорій термопружності, тепlopровідності та механіки суцільних середовищ, застосуванні сучасних числових методів та експериментальних випробувань і є достатньо обґрунтованими.

Достовірність наукових положень і висновків, сформульованих в дисертаційній роботі, підтверджується їхнім узгодженням із сучасними дослідженнями в сфері механіки деформівного твердого тіла. Окрім того, достовірність отриманих результатів обумовлена вживанням сучасної контрольно-вимірювальної і комп'ютерної техніки, низкою стандартних заходів, порівнянням розрахункових даних з експериментальними.

Позитивний ефект від використання результатів та рекомендацій, наведених в дисертаційній роботі, у виробничій діяльності ДП «Завод «Електроважмаш» також свідчить про їхню достовірність та застосовність до вирішення задач, які ставить перед інженерами та науковцями сучасна промисловість України.

4. Практична цінність роботи полягає в тому, що була розроблена нова методологія розрахунку напружене-деформованого стану в елементах конструкцій гідрогенераторів, генераторів-двигунів, турбогенераторів великої потужності під дією розрахункових та надрозрахункових (аварійних) навантажень. За основу прийняті тривимірні моделі, що дає суттєве підвищення точності оцінки та прогнозування міцності конструкцій. Окремо треба зазначити, що усе вище викладене зорієнтовано на розв'язання реальних, актуальних задач енергетичного машинобудування.

Методологія, методи та результати досліджень напружене-деформованого стану генераторів впроваджено на ДП «Завод «Електроважмаш» (м. Харків) і використовувалися під час проектування, виробництва та складання гідрогенераторів Дністровської ГАЕС СВО-1255/255-40 потужністю 324 МВт в генераторному режимі та 416 МВт у режимі двигуна; під час реконструкції двох гідрогенераторів Середньодніпровської ГЕС СВ 1500/100-112 потужністю 50 МВт, трьох агрегатів Київської ГАЕС СВО 733/130-36М потужністю 33,4 МВт у режимі генератора та 40 МВт у режимі двигуна, двох гідрогенераторів Канівської ГЕС СГКЗ-538/160-70 потужністю 22 МВт, двох гідрогенераторів Дніпро ГЕС-2 СВ1 1230/140-56М потужністю 119 МВт, а також турбогенератора ТГВ-550-2МУ3 Екібастузької ГРЕС потужністю 560 МВт з водневим охолодженням та турбогенератора ТГВ-220-2МТ3 потужністю 220 МВт з воднево-водяним охолодженням для ТЕС Сіддірганч.

Про практичне значення роботи свідчать також отримані дисертантом патенти та акти впровадження ДП «Завод «Електроважмаш» та НАУ «ХАІ».

5. Загальна характеристика роботи. Текст дисертації містить вступ, сім розділів, загальні висновки, список використаних джерел (346 найменувань на 37 сторінках) та двох додатків.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет досліджень, основні наукові результати, їх наукова новизна та практична цінність, зазначено особистий внесок здобувача у роботи, що виконані у співавторстві, наведено відомості про публікації та інформацію про апробацію результатів досліджень.

У *першому розділі* розміщено огляд літературних джерел, здійснено аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку у проектуванні, розрахунку та експлуатації електрогенераторів високої потужності. Розглянуто типові дефекти та несправності генераторів, класичні та сучасні дослідження із розрахунку міцності елементів конструкцій генераторів, а також аналіз аварійних ситуацій, що виникають під час експлуатації генераторів.

Зроблено висновок про відсутність загальної методології розрахунку НДС елементів конструкцій генератора, яка б об'єднувала в єдиний комплекс методи тривимірного моделювання задач газодинаміки, тепlopровідності та пружної поведінки конструкцій; обґрунтовано основні напрями досліджень дисертаційної роботи.

У *другому розділі* сформульовано загальну методологію розрахунку на міцність вузлів і деталей електрогенераторів великої потужності, яка ґрунтуються на послідовному розв'язанні задач газодинаміки, тепlopровідності і термопружності у тривимірній постановці з ітераційним їх уточненням.

Запропонований підхід до аналізу НДС ґрунтуються на розв'язані наступних задач:

- визначення параметрів теплообміну вузлів генератора за допомогою розв'язання 3D задачі вентилювання генератора в цілому;
- визначення температурних полів у вузлах генератора;
- визначення НДС вузлів генератора за відомих силових і температурних навантажень.

Тривимірна задача вентилювання для генератора розглядається в цілому із врахуванням турбулентності течії, що дозволяє отримати уточнені локальні, а не осереднені характеристики тепловіддачі по характерним поверхням. Також розроблено спрощений підхід, заснований на поєднанні аналітичних інженерних методів із тривимірним моделюванням.

Наведено постановку цих задач у тривимірній постановці та запропоновано методологію їх розв'язання. Усі задачі було реалізовано у прикладному пакеті SolidWorks, що дозволило передавати результати розрахунку однієї задачі до іншої без втрати точності.

У третьому розділі приведено інформацію про моделювання та чисельне дослідження роботи системи охолодження генератора, визначення граничних умов для задач тепlopровідності в конструктивних елементах генератора.

Запропоновано підхід до аналізу роботи системи охолодження генератора, який ґрунтуються на тривимірному моделюванні всієї охолоджувальної системи в цілому, з урахуванням засмічення каналів, яке має місце під час експлуатації. Розроблена методика була апробована у розрахунках конструктивних елементів гідрогенераторів різних типів.

Приведено розрахунок і аналіз роботи системи вентилівовання гідрогенератора Канівської ГЕС капсульного типу. Досліджено роботу системи охолодження гідрогенератора за трьох режимів: номінальному та двох аварійних. Показано, що на номінальному режимі температура активних вузлів генератора не перевищує допустимих значень, тоді як за аварійних режимів ця умова не виконується. З урахуванням цього систему охолодження генератора було модифіковано шляхом включення до неї додаткового відцентрового нагнітача, який забезпечив досягнення необхідних параметрів для безпечної роботи генератора.

Аналогічне дослідження теплового стану було виконано для гідрогенератора Кременчуцької ГЕС потужністю 60 МВт зонтичного типу. Результати розрахунків засвідчили, що система вентиляції забезпечує нормальну роботу електричної машини для тривалого режиму роботи.

Виконано розрахунок теплообмінника турбогенератора потужністю 220 Вт. Результати розрахунку порівнювалися з експериментальними даними, показано, що похибка запропонованого методу знаходиться на рівні похибок вимірювальних приладів, не більше 1%.

Крім того, виконано розрахунок теплового стану апарату щіткотримача у тривимірній постановці з урахуванням тепловиділень, викликаних електричними і механічними діями.

Розглянуті приклади засвідчили, що запропонована методика підвищує точність описання полів швидкостей і тисків, а також дозволяє уточнити характер розподілу температур в газі та вузлах генератора.

Четвертий розділ присвячено дослідженю НДС основних корпусних елементів (короба і хрестовини) генераторів середньої і великої потужності під дією експлуатаційних силових і температурних навантажень. Проблема вирішувалась в тривимірній постановці МСЕ на основі раніше викладеного підходу, заснованого на послідовному розгляді задач вентиляції та аналізу НДС конструкції. Наведено постановку та проведено дослідження НДС коробів генераторів різної потужності. Здійснено дослідження впливу класу суцільності

металу на НДС хрестовини. Проведено розрахунки на втомну міцність хрестовини з дефектом у вигляді кулі, радіус якої відповідає другому класу суцільності. Зроблено висновок про недопустимість застосування товстолистового прокату Ст.3 з класом нижче 2-го.

У п'ятому розділі розглянуто задачу визначення НДС бандажного вузла та натискного фланця ротора турбогенератора під впливом силових і температурних навантажень. Проведено числове дослідження напруженого стану бандажного вузла турбогенератора ТГВ-550-2МУЗ потужністю 560 МВт. Досліджено міцність деталей бандажного вузла ротора в стані спокою і під час експлуатації. Проведено дослідження роз'єднувальних частот обертання для холодних і нагрітих деталей бандажного вузла. Показано, що величини роз'єднувальної частоти обертання бандажного кільця і бочки ротора, а також бандажного кільця і центруючого кільця значно відрізняються у холодному і нагрітому стані.

У шостому розділі представлені результати дослідження міцності опорних вузлів генератора. Розглянуто особливості експлуатації, проектування і виконання конструкції опорних елементів електричних машин великої потужності. Показано, що найбільш навантаженими елементами, що сприймають контактні навантаження, є жорсткі підп'ятники. Реалізовано метод математичного моделювання напруженого стану в тривимірній постановці. Для жорсткого підп'ятника встановлено, що максимальні значення напружень посередині зони контакту болта і тарілки істотно відрізняються від даних аналітичного розрахунку. Середні ж напруження в області контакту узгоджуються з напруженнями, які отримані за аналітичного розрахунку, і не перевищують допустимих значень. Для гідравлічного підп'ятника проведено втомний розрахунок і показано, що термін експлуатації підп'ятника даного типу значно перевищує необхідний термін експлуатації генератора.

У сьомому розділі представлено дослідження НДС системи кріplення статора генератора і термоапруженого стану міжполюсних з'єднань ротора для генераторів великої потужності. Проведено аналіз напружене-деформованого стану вузла підвіски, що включає в себе пружину, опорну плиту, накладку, систему штифтів і болтових з'єднань. Досліджена міцність вузла підвіски в момент двофазного короткого замикання, яке відповідає максимальним навантаженням на систему підвіски.

Використання методів тривимірного моделювання дозволило отримати більш точне описання НДС у вузлі підвіски. Результати розрахунку за запропонованою методикою зіставлялися з даними розрахунку, отриманими за класичною інженерною методикою. Показано, що максимальна розбіжність між

результатами розрахунку за запропонованим методом та результатами, отриманими за інженерною методикою, не перевищує 15%.

Крім цього, розглянуто питання про заміну вітчизняних марок сталей, що застосовуються у виготовлені статора генератора, на сталі, що відповідають європейському стандарту EN 10025.

У *висновках* коротко представлені основні наукові і практичні результати, отримані автором дисертації.

6. Оцінка змісту дисертації і її завершеність в цілому. Дисертація є закінченою науковою працею, що виконана у вигляді підготовленого рукопису. Дисертація оформлена згідно вимог до оформлення. Стиль викладання наукового матеріалу забезпечує його чітке та однозначне розуміння.

Теоретичні положення та експериментальні результати є оригінальними та обґрунтованими – вони отримані шляхом зіставлення даних отриманих на основі проведення наукових досліджень та експериментальних досліджень на стендах. Поставлені автором задачі були вирішенні, а мета дослідження – розробка ефективних методів для оцінки НДС елементів конструкцій турбо- та гідрогенераторів високої потужності на основі метода скінчених елементів у тривимірній постановці – досягнута.

Зміст автoreферату ідентичний основним положенням дисертації та повністю висвітлює отримані автором результати досліджень і висновки роботи.

7. Апробація та повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні наукові положення і результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковані в 30 наукових працях, зокрема 12 статей у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, 9 статей у закордонних періодичних виданнях, 2 патенти України на корисну модель, 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, 6 доповідей і тез доповідей на всеукраїнських та міжнародних конференціях.

Основні положення дисертації доповідалися й обговорювалися на 6 всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях. Робота в повному обсязі розглядалась і обговорювалась на семінарі науково-технічної проблемної ради Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України та на семінарі в Інституті електродинаміки НАН України.

Основні результати дисертації знайшли повне відображення в наукових виданнях.

8. Зауваження до дисертації і автореферату.

8.1 До розділу 1, який присвячено огляду сучасного стану досліджень за темою дисертації, включено ряд фрагментів, які мають або історичне, або достатньо віддалене відношення до теми дисертації, наприклад, «1.3 Генератори великої потужності виробництва ДП «Завод «Електроважмаш» та «1.5 Проблеми створення експертної системи». Авторові слід було б більше сконцентруватися на аналізі робіт, які стосуються стратегічних цілей дослідження, а саме – методах розв'язання взаємопов'язаних тривимірних задач термопружності, тепlopровідності і газодинаміки конструкційних елементів генераторів.

8.2 У розділі 4 описано розрахунок на втомну міцність хрестовини з дефектом у вигляді кулі, де автор робить посилання на те, що розрахунки виконувалися згідно з ГОСТом 25.504-82. При цьому, згаданий стандарт використовується тільки з метою визначення коефіцієнту концентрації в околі дефекту. На жаль деталі розрахунку на втому в роботі на наведені, тому не зрозуміло як враховувалися, наприклад, такі фактори, як нерегулярність навантажування та складний напружений стан.

8.3 Еквівалентна площа дефекту у вигляді кулі згідно даної роботи становить до 20 см². Але з тексту дисертації не зрозуміло відносно якої поверхні цей розмір задавався і який дійсний розмір дефекту.

8.4 У роботі, розрахунки напруженого-деформованого стану конструкцій виконуються, як правило, для сталіх режимів навантажування. З роботи не зрозуміло, як враховуються перехідні процеси, наприклад, форсування та проходження крізь резонансні частоти, за яких зусилля збільшуються у кілька разів.

8.5 У розділі 6 результати розрахунку на втому камери підп'ятника представлені у вигляді відсотку пошкодження (рис. 6.20). При цьому відсутні будь-які пояснення, яким чином цей розрахунок було виконано.

9. Висновок.

На основі вивчення змісту дисертаційної роботи, автореферату і публікацій вважаю, що дисертація робота Третяка Олексія Володимировича «Міцність вузлів турбогенераторів і гідрогенераторів великої потужності» відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Дисертація є завершеною науковою працею, в якій містяться нові наукові результати, спрямовані на вирішення важливої науково-прикладної проблеми, яка полягає у розробці методів розрахунків міцності вузлів турбогенераторів і гідрогенераторів великої потужності та підвищенні їх експлуатаційного ресурсу. Запропонована

методологія числового моделювання у тривимірній постановці дозволила значно підвищити точність оцінювання міцності елементів конструкцій.

Результати дисертаційної роботи є оригінальними, обґрунтованими і викладені в публікаціях автора як у міжнародних, так і фахових виданнях України. Експериментальні результати можна застосовувати для вирішення практичних задач на усіх стадіях виробництва електричних машин. Автореферат у повному обсязі відображає зміст дисертації.

Тому є всі підстави вважати, що дисертаційна робота «Міцність вузлів турбогенераторів і гідрогенераторів великої потужності» повністю відповідає вимогам пунктів 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567, а її автор, Третяк Олексій Володимирович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 «Динаміка та міцність машин».

Офіційний опонент,
професор кафедри динаміки і міцності
машин та опору матеріалів
Національного технічного
університету України «Київський
політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
доктор технічних наук, професор

C. M.

Шукаєв С.М.

«30» вересня 2020 р.

Підпис д.т.н., проф. Шукаєва С.М. засвітчую
Учений секретар КПІ ім. Ігоря Сікорського

B. Holayko Холявко В.В.

