

## **ВІДГУК**

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора,

**Львова Геннадія Івановича**

професора кафедри динаміки та міцності машин

Національного технічного університету «Харківський політехнічний  
інститут»

на дисертаційну роботу

**Третяка Олексія Володимировича**

«Міцність вузлів турбогенераторів і гідрогенераторів

великої потужності»,

що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за  
спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Дисертаційна робота Третяка О.В. присвячена дослідженняю міцності вузлів турбогенераторів та гідрогенераторів великої потужності.

Метою дослідження є розробка комплексного підходу для аналізу напруженого-деформованого та теплового стану елементів конструкцій гідро- та турбогенераторів, генераторів-двигунів для гідроакумулюючих електростанцій на номінальних та аварійних режимах. Розроблені методики засновані на комп'ютерному тривимірному моделюванні елементів конструкцій. Структурний аналіз термопружності, тепlopровідності і газодинаміки систем охолодження виконано основі методу скінчених елементів.

В роботі, вперше у генераторобудуванні втілено ряд нових результатів з дослідження напруженого-деформованого стану конструкцій і вузлів діючих генераторів великої потужності на основі сформульованих підходів та методів.

### **I. Актуальність теми дисертаційної роботи**

Складність аналізу НДС елементів конструкцій та вузлів турбогенераторів та гідрогенераторів обумовлена необхідністю розв'язання комплексу задач – вентиляційної, тепlopровідності та термопружності – для аналізу їх міцності при впливі температурних та силових навантажень. Частини конструкцій генератора працюють в умовах складного навантаження, викликаного спільною дією інерційних сил від обертання ротора, сил тяжіння, складальних навантажень, що виникають, у першу чергу, внаслідок виділення тепла в активному контурі і визначаються параметрами роботи системи їх примусового вентилювання. Це призводить при комплексному проектуванні генератора до необхідності розгляду цілого комплексу задач, пов'язаного з визначенням термоапруженого стану конструкцій, ускладненого попередніми натягами, впливом температурних полів, що залежать від параметрів роботи систем вентилювання та багатьох інших факторів.

Сучасний стан генераторного обладнання в Україні характеризується тим, що більшість машин за нормативною документацією вже відпрацювали свій нормативний термін або він закінчиться у найближчі роки. Тому необхідне проведення невідкладних робіт з оновлення та модернізації машин, а також з розробки агрегатів нового покоління.

Таким чином, розробка ефективної методології, що дозволить виконувати весь цикл теплових, газодинамічних та механічних розрахунків для генераторів у тривимірній постановці для уточненої оцінки міцності елементів конструкцій гідро- та турбогенераторів великої потужності під впливом номінальних і аварійних навантажень, є актуальною проблемою, що і визначило тему даної дисертаційної роботи.

## **II. Коротка характеристика змісту роботи**

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою. Текст дисертації складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (346 найменувань на 37 сторінках) та двох додатків. Загальний обсяг дисертації – 396 сторінок, включаючи 41 таблицю та 204 рисунка (з них 40 сторінок – рисунки, що займають повну сторінку).

У **вступі** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі досліджень, викладені основні одержані результати, з'ясовані їх наукова новизна та практична цінність, наведені відомості про публікації та апробацію роботи.

У **першому розділі** наведено огляд літературних джерел, аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку у проектуванні, розрахунку та експлуатації електрогенераторів високої потужності. Особлива увага приділяється класичним та сучасним дослідженням із розрахунку міцності елементів конструкцій генераторів, а також аналізу аварійних ситуацій, що виникають під час експлуатації генераторів.

Класичні методи розрахунків електрогенераторів були створені на початку 20 століття і фактично дозволили сформувати сучасний вигляд електричних машин заклавши основи та підходи до їх проектування. Основною особливістю першого етапу стало те, що всі розрахунки – теплові, електричні, механічні та вентиляційні виконувалися спеціалістами з електричних машин. Основоположною метою було створення машини необхідної потужності і довгий час не було чітко визначених вимог, щодо маси і габаритів.

Бурхливе зростання можливостей обчислюальної техніки дозволило провести революцію у числових методах розрахунку і створити машини потужністю до 1000 МВт для турбогенераторів і 500 МВт для гідрогенераторів, які мають високі показники надійності та експлуатуються і понині.

У **другому розділі** представлено загальну методологію розрахунку НДС вузлів і деталей електрогенераторів великої потужності в тривимірній постановці.

Вона базується на розв'язанні МСЕ у рамках єдиного підходу задач термопружності, тепlopровідності і вентиляції. Припускається, що задачі є незв'язаними. Розв'язання задач проводиться послідовно з ітераційним уточненням результатів шляхом обчислення попередніх задач.

В основу запропонованої тривимірного підходу до аналізу НДС генераторів великої потужності покладено поетапний розгляд з ітераційним уточненням:

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

У розділі наведено постановку цих задач у рамках тривимірного підходу 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 наведено інформацію про моделювання та чисельне дослідження роботи системи охолодження генератора, визначення граничних умов для задач тепlopровідності в елементах конструкцій генератора.

Розроблено метод для аналізу роботи системи охолодження генератора, що базується на тривимірному моделюванні всієї охолоджувальної системи в цілому, з урахуванням засмічень каналів, які виникають під час експлуатації, що дало можливість більш точно описати поле швидкостей і тисків, а також уточнити характер розподілу температур в газі та вузлах генератора. Це дозволило отримати локальні характеристики тепловіддачі на елементах конструкції генератора, необхідні для оцінки термоапруженого стану вузлів.

Проведено розрахунок і аналіз роботи системи охолодження гідрогенератора Канівської ГЕС. Примусовою аксіальною системою вентилювання є повітряний контур закритого типу. Весь генератор розташований в герметичному корпусі капсули.

Для забезпечення роботи системи вентиляції на ободі ротора спроектовані направляючі канали, що дозволяють оптимізувати систему вентиляції та забезпечити необхідну витрату за номінальної потужності гідрогенератора і не допустити перегрівання ротора та статора.

Для просторового моделювання течії охолоджуючого повітря в гідрогенераторі СВКр 1347/150-96 в програмному комплексі SolidWorks була побудована його тривимірна модель з урахуванням геометричних особливостей стрижнів обмотки статора і конструкції вентиляційних каналів статора та ротора.

Верифікація загальної моделі вентиляції проводилася шляхом порівняння потужностей, споживаних напірними елементами на валу гідрогенератора, отриманих методом скінченних об'ємів з аналітичними методами. Розрахункова похибка склала 2,67% відносно споживаної потужності на вентиляцію гідрогенератора зонтичного типу на роторі гідроагрегату.

В тривимірній постановці виконаний тепловий та вентиляційний розрахунок гідрогенератора потужністю 60 МВт зонтичного типу. Система вентиляції забезпечує нормальну роботу електричної машини для тривалого режиму роботи.

**Четвертий** розділ присвячено дослідженню 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.

У запропонованому підході на першому етапі дослідження міцності короба проводиться 3D аналіз роботи системи вентиляції генератора з водневим охолодженням і визначаються надлишковий тиск та температури коробу. На наступному етапі, використовуючи ці значення, проводиться розрахунок НДС короба.

В якості критеріїв збіжності рішення вентиляційної задачі було обрано такі значення: мінімальний, середній і максимальний статичний тиск, середня масова витрата; на поверхнях твердих тіл – усереднений тепловий потік. Розрахунок виконувався ітераційне до досягнення збіжності рішення.

Підхід, що було запропоновано, дає змогу виконувати розрахунки з високим ступенем точності, що є неможливим, використовуючи тільки аналітичний підхід. Встановлено, що використання в якості початкових умов даних про тиск, отриманих шляхом поєднання аналітичного та чисельного методів, дозволяє виконувати розрахунки з високою точністю.

При виготовленні діючих гідроагрегатів використовується металопрокат сталей марки 3, відповідних ГОСТ 380-2005 або його найближчих замінників S235 DIN EN 10025-2. У структурі металу можуть бути присутні явні і приховані дефекти, які виявляються під час вхідного контролю за допомогою візуального огляду і рентгенографії. При цьому розмір допустимих дефектів металу повинен бути підтверджений відповідними розрахунками міцності.

У зв'язку з цим проведено дослідження втомної міцності хрестовини, виготовленої з товстолистового прокату 2 класу суцільності. Для цього в найбільш навантажену зону, що має найменший запас міцності, вводиться "елементарний окремий дефект" у вигляді кулі, радіус якої відповідає другому класу суцільності (еквівалентна площа дефекту  $20 \text{ см}^2$  на  $1 \text{ м}^2$ ). Дефект на хрестовині розташовується позацентрове на стійкі двотаврової балки. При цьому кількість циклів навантаження визначається з допустимою кількістю пусків-зупинок генератора протягом доби з урахуванням необхідного терміну експлуатації.

У **п'ятому** розділі наведена постановка задачі про визначення НДС бандажного вузла та натискного фланця ротора турбогенератора під впливом силових і температурних навантажень.

Для забезпечення надійної працездатності бандажного вузла на всіх експлуатаційних режимах при проектуванні проведено аналіз НДС в конструкціях та оцінена їх міцність на номінальних та критичних режимах роботи машини. Враховано частоти обертання, при яких відбувається роз'єднання бандажного кільця з опорами.

Проведено числове дослідження напруженого стану бандажного вузла турбогенератора ТГВ-550-2МУ3 потужністю 560 МВт під впливом силових і температурних навантажень. Виконано дослідження міцності деталей бандажного кільця, посадженого з натягом на бочку ротора і центрувальне кільце, а також дослідження податливості деталей бандажного вузла.

У шостому розділі представлени результати дослідження опорних вузлів генератора.

Розглянуто особливості експлуатації, проектування і виготовлення конструкції опорних елементів електричних машин великої потужності.

Збільшення потужності генераторів, а отже і осьових навантажень на підп'ятник, вимагає збільшення геометричних розмірів сегментів і міцності їх конструкцій, що в деяких випадках досить складно здійснити. Створення підп'ятників з дворядним розташуванням сегментів, дозволило зберегти необхідний рівень питомого навантаження без збільшення розміру сегментів.

Для врахування особливостей геометрії зони стикання тарілки з болтом выбрано нерівномірну сітку скінченних елементів зі згущенням в області контакту.

Розглянуто дворядний підп'ятник на гіdraulічній опорі генератора Дністровської ГЕС.

Проведено аналіз роботи вузла на втому з урахуванням технологічного, геометричного факторів, факторів шорсткості поверхні та впливу поверхневого зміцнення стану поверхні на міцність від утоми відповідної технологічної процедури. Для гіdraulічного 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 кріплення статора генератора і напруженого стану між полюсних з'єднань ротора для генераторів великої потужності.

Виконано аналіз міцності системи кріплення статора до корпусу машини. На систему кріплення діють силові навантаження як від ваги самого статора, так і від експлуатаційних вібраційних навантажень. Крім того, при короткому замиканні на неї діють аварійні навантаження, величини яких значно вище номінальних експлуатаційних навантажень. При цьому статор відчуває нерівномірне нагрівання. Ці вузли працюють в умовах напруженого стану, що вимагає урахування контактної взаємодії елементів вузлів.

Проведено аналіз напружено-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.

Розглянуто питання про заміну вітчизняних марок сталей, що застосовуються під час виготовлення статора генератора, на сталі, відповідні нормам EN.

Особливістю конструкції гідрогенератора-двигуна є наявність високо напруженого вузла, який виконує функцію з'єднання електричного ланцюга полюсів між собою – «між полюсна перемичка». Експлуатаційні навантаження, що сприймаються вузлом, викликані тепловим нагріванням та дією відцентрової сили. Крім того, у момент угону гідроагрегату з суттєвим підвищеннем частоти обертання на вузол діють значні навантаження, які можуть спричинити його руйнування. Таким чином, НДС в перемичці має складний характер, обумовлений одночасним впливом температурних і силових навантажень. Між полюсна перемичка виготовляється з міді, а її механічні характеристики істотно залежать від температури, що також ускладнює механічний аналіз.

Проведено аналіз збіжності результатів для камер підп'ятника і короба турбогенератора.

У **висновках** надано загальний огляд на поєднання тривимірних та аналітичних методів розрахунків НДС. Проаналізовано вирішення важливої науково-технічної проблеми, що полягає в розробці ефективних методів дослідження НДС елементів конструкцій та вузлів гідрогенераторів, генераторів-двигунів, турбогенераторів великої потужності під впливом силових та температурних навантажень. Отримані результати є теоретичною і практичною основою для інженерних розрахунків міцності елементів конструкцій гідрогенераторів та турбогенераторів великої потужності.

### **III. Наукова новизна роботи**

Розроблено тривимірний підхід до моделювання та проведено дослідження роботи всієї системи охолодження гідрогенератора в цілому, що дозволило більше точно описати поля швидкостей та температур у потоці і визначити локальні характеристики тепловіддачі на поверхні конструкцій та додаткові силові навантаження на них, які необхідні для уточненої оцінки напруженого стану елементів вузлів генераторів великої потужності.

Створено нову методику розрахунку НДС опорних елементів, підп'ятників, електричних машин великої потужності та проведено дослідження міцності дворядних підп'ятників жорсткого і гіdraulічного типу при експлуатаційних навантаженнях.

Розроблено уточнений метод в тривимірній постановці для розрахунку НДС пружної підвіски статора турбогенератора великої потужності під час аварійних навантажень, викликаних коротким замиканням, який враховує нерівномірність нагріву статора.

Створено уточнену методику розрахунку та проведено чисельне дослідження напружень між полюсної перемички ротора при угоні гідроагрегату, яке супроводжується різким зростанням частоти обертання ротора під дією відцентрових сил та температурних навантажень, що викликані нагрівом вузла при проходженні струму.

Запропоновано нову методологію для виконання великого числа проектних циклів, завдяки якій з'явилася можливість провести уточнений аналіз НДС конструкцій під час експлуатаційних та аварійних навантажень, а також удосконалити існуючі конструкції для підвищення надійності роботи великих електричних машин.

#### **IV. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що**

Розроблено та практично застосовано методологію розрахунку НДС в елементах конструкцій гідрогенераторів, генераторів-двигунів, турбогенераторів великої потужності при впливі номінальних та аварійних навантажень, в основі якої лежать тривимірні моделі, що суттєво підвищують точність оцінки міцності конструкцій, і яка орієнтована на розв'язання реальних практично важливих задач.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на ДП «Завод «Електроважмаш» (м. Харків) і використовувалися при проектуванні, виробництві та складанні гідрогенераторів Дністровської ГАЕС СВО-1255/255-40 потужністю 324 МВт в генераторному режимі та 416 МВт у режимі двигуна; а також під час реконструкції трьох агрегатів Київської ГАЕС СВО 733/130-36М потужністю 33,4 МВт у режимі генератора та 40 МВт у режимі двигуна, двох гідрогенераторів Середньодніпровської ГЕС СВ 1500/100-112 потужністю 50 МВт, двох гідрогенераторів Дніпро ГЕС-2 СВ1 1230/140-56М потужністю 119 МВт, двох гідрогенераторів Канівської ГЕС СГКЗ-538/160-70 потужністю 22 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».

#### **V. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів**

Обґрунтованість результатів дисертаційної роботи обумовлена тим, що вони засновані на фундаментальних рівняннях теорії пружності, тепlopровідності та механіки рідини та газу, а чисельні данні отримані за допомогою сучасного програмного забезпечення на основі методу скінчених елементів, за допомогою сертифікованого програмного комплексу «SolidWorks».

Достовірність отриманих результатів забезпечена використанням

aprobowanych metodów rozwiązywania krajowych задач, fizycznie obgrontowanych modelach konstrukcji i materiałach, dobrą korelacją teoretycznych rezultatów z eksperymentalnymi i teoretycznymi danymi.

Analiz zbieżnosti zostało prowadzone dla komórek podciśnienia i korobki turbogeneratora. Zbieżność potwierdzona na poziomie 2%. Spowodowane jest to dość stały rezultat dla wykorzystanych wartości siatki skończeniowych elementów.

Dla sprawdzenia dokładności rezultatów, otrzymanych drogą modelowania przepływu w trzech wymiarowej postawce, prowadzono porównanie z rezultatami obliczenia metodą rozłożonych siatków temperaturowych, a także danymi eksperymentalnymi doświadczeń.

Z porównaniem rezultatów wentylacyjnych obliczeń (rozdzielenie ciśnień i prędkości chłodzącego powietrza w kanałach rotora i statora), wykonanych analitycznym drogą SolidWorks Flow Simulation, pokazano dobry zgodność.

Analiz zbieżności rezultatów skończonego elementowego analizy zostało prowadzone dla komórek podciśnienia i korobki turbogeneratora. Zbieżność potwierdzona na poziomie 2%. Spowodowane jest to dość stały rezultat dla wykorzystanych wartości siatki skończeniowych elementów.

Pozitívny efekt od wykorzystania rezultatów i zaleceń, podanych w doktorandów pracy, na DPH «Zawod «Elektroważmash» (m. Charków) przy projektowaniu nowych i rekonstrukcji istniejących elementów konstrukcji generatorów średnich i dużych mocowości również potwierdza, że oznacza dość dokładność i zastosowanie do rozwiązania zadań, które stawia przed inżynierami i naukowcami współczesna przemysłowość Ukrainy.

Wszystko powyżej pozwala na uważanie wszystkich podstawowych wniosków doktorandów za obgrontowane, a otrzymane rezultaty za dokładne.

Podstawowe wnioski doktorandów pochodzące z analizy wykonanych doświadczeń i dostatecznie obgrontowanych ich rezultatów.

## **VI. Повнота викладених наукових положень та висновків**

Materiały doktorandów opublikowane w 30 naukowych pracach (z których 13 artykułów w naukowych czasopismach i zbiorcach naukowych prac Ukrainy, 8 artykułów w zagranicznych wydawnictwach, 2 patenty Ukrainy na korzystną model, 1 świadectwo o rejestracji prawa autorskiego na dzieło, 6 rozpraw i 6 rozpraw dodatkowych na międzynarodowych konferencjach).

Analiz publikacji pozwala na stwierdzenie, że podstawowe rezultaty doktorandów znalezły pełne odzwierciedlenie w naukowych wydawnictwach.

Autorreferat w pełni reprezentuje podstawowe wnioski doktorandów autorom rezultatów doświadczeń.

## **VII. Оформлення дисертації**

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.

## **VIII. Зауваження до дисертації**

1. В огляді літературних джерел, де розглянуто аналіз сучасного стану у проектування та розрахунків електрогенераторів високої потужності, зустрічаються загально відомі співвідношення. Наприклад, критерії міцності, їх геометрична ілюстрація та формули контактного тиску в коаксіальних циліндрах. Поряд з тим наводяться досить громіздкі математичні моделі, без детальних пояснень означень та розрахункових схем (сторінка 51 та 53).

2. У другому розділі наведені основні співвідношення класичної теорії пружності, тепlopровідності та відомості метода скінченних елементів. Частина, присвячена МСЕ перевантажена деталями, аж до формул методу Крамера для розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Це виглядає недоречним тому, що розрахунки виконувались за допомогою комерційного програмного комплексу SolidWorks.

Не досить вдало викладено теоретичні основи механіки рідини та газу. Автор представив варіаційне рівняння, наведеного в документації SolidWorks Flow Simulation, де застосована лаконічна тензорна форма запису всіх рівнянь. Це приводить до того, що деякі характеристики позначаються неоднаковими символами в різних частинах роботи.

3. Результати чисельного аналізу систем вентиляції гідрогенераторів та турбогенераторів за допомогою програмного комплексу SolidWorks Flow Simulation наведені в третьому розділі, але відсутня інформація щодо якості скінчено елементної сітці, кількості елементів та збіжності результатів на різних сітках.

4. При аналізі системи охолодження корпусу статора вертикального гідрогенератора не врахований вплив охолоджуючого масла всередині опорних та упорних підшипників, а також не вказаний його вплив на загальний тепловий баланс.

5. Розподіл напружень в коробах турбогенераторів, що наведено в розділі 4, отримано на рівномірних сітках скінченних елементів. Аналіз розподілу еквівалентних напружень свідчить про значну концентрацію напружень в локальних зонах конструкції. В таких випадках доцільно застосовувати згущення сітці скінченних елементів в зонах концентрації.

6. При аналізі втомної міцності хрестовини розрахункові дефекти були розглянуті тільки як сферичні порожнини. Доцільно було б використати механіку руйнування тіл з тріщинами.

## ВИСНОВОК

На підставі вищевикладеного, вважаю, що дисертаційна робота Третяка Олексія Володимировича «Міцність вузлів турбогенераторів і гідрогенераторів великої потужності» є завершеною науковою працею, в якій містяться нові наукові результати, спрямовані на вирішення важливої науково-прикладної проблеми, що полягає в дослідженні міцності вузлів турбогенераторів та гідрогенераторів великої потужності та підвищенні їх експлуатаційного ресурсу на розрахункових та над розрахункових навантаженнях, побудуванні нової методології, що дозволить значно підвищити точність аналізів міцності елементів конструкцій, а також впровадити застосування сучасного тривимірного моделювання.

Зазначені зауваження суттєво не вплинули на якість дисертаційної роботи, не зменшили її наукового та практичного значення.

На основі розглянутих матеріалів вважаю, що за актуальністю, науковим рівнем, практичною цінністю, наявністю необхідної кількості публікацій та їх обсягом дисертаційна робота Третяка Олексія Володимировича відповідає вимогам спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Робота містить науково обґрунтовані результати, що розв'язують важливу науково-прикладну проблему забезпечення міцності електрогенераторів великої потужності. Дисертація відповідає вимогам «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,  
доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри динаміки та міцності машин  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»**

**Г.І. Львов**

