

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Штогрін Олександр Валерійович

УДК 621.313.32.2-81

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАХОДИ ПО ЗМЕНШЕННЮ
ПОШКОДЖУВАНOSTІ СТАТОРІВ ПОТУЖНИХ
ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ, СПРИЧИНЕНИХ ВІБРАЦІЄЮ
В ТОРЦЕВИХ ЗОНАХ**

Спеціальність 05.09.01 «Електричні машини і апарати»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електромеханіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор,
Шумілов Юрій Андрійович,
радник голови правління Приватного
акціонерного товариства «Укратоенергобуд»,
м. Київ

Офіційні опоненти доктор технічних наук,
Кенцицький Олег Георгійович,
завідувач відділом «Надійності електротехнічного
обладнання енергоблоків АЕС» Інституту
проблем безпеки атомних електростанцій
НАН України, м. Київ

кандидат технічних наук, доцент,
Шевченко Валентина Володимирівна,
професор кафедри електричних машин
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків

Захист дисертації відбудеться 26 лютого 2016 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К41.052.05 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, адмін. корпус, ауд. 400-а.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Одеського національного політехнічного університету (м. Одеса, пр. Шевченка, 1).

Автореферат розіслано _____ січня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доцент



А. М. Якімець

Підписано до друку 25.01.2016.
Формат 42x30/4. Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 пр. Зам. № 1–16
Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура «TimesNewRoman»

Видавець СПД Свиначук Р. В.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
РВ № 27 від 29 липня 2004 року.
Тел. (+38067) 771 28 70, e-mail: 35800@ukr.net.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Характерною рисою сучасної електроенергетики є експлуатація на теплових (ТЕС) і атомних (АЕС) електростанціях значної кількості турбогенераторів (ТГ), що відпрацювали встановлений термін експлуатації. Однак вітчизняна й закордонна практика показує, що фактичний термін експлуатації ТГ зазвичай істотно перевищує термін, заявлений виробником. В Україні більше 60 % усього парку ТГ виробило свій ресурс. Як наслідок, в останні роки почастишала кількість аварій на енергоблоках, а проблема продовження ресурсу експлуатації ТГ є найбільш актуальною. Особливо важкими є наслідки аварій потужних енергоблоків АЕС. Аварійне відключення турбоагрегатів з ТГ потужністю 1000 МВт вкрай негативно впливає на роботу енергосистеми України.

На частку АЕС приходиться близько 50% щорічного виробітку електроенергії України, основна частина якої (94%) забезпечується ТГ потужністю 1000 МВт виробництва ВАТ «Електросила» (м. Санкт-Петербург, Росія). Серед цих генераторів найбільш проблемними є швидкохідні ТГ типу ТВВ-1000-2У3. Відповідно до висновку заводу-виготовлювача, основною причиною низької надійності роботи ТГ є те, що «ці генератори були спроектовані й виготовлені в габаритах генераторів потужністю 800 МВт і не пройшли у свій час обов'язкового для всіх ТГ нового типу циклу доведення конструкції на електростанціях, що практикується всіма світовими фірмами». У результаті зазначеної недоробки конструкції генератора ТВВ-1000-2У3 економіці України був нанесений значний економічний збиток.

Із наближенням строку виробітку робочого ресурсу ТГ виявилися складні вібромеханічні явища в їх кінцевих зонах, які стали причиною аварій з важкими наслідками.

З огляду на наведене вище, актуальною науково-технічною задачею є розробка та наукове обґрунтування технологічних заходів, спрямованих на підвищення вібраційної стійкості конструктивних вузлів торцевих зон статорів потужних турбогенераторів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана відповідно до планів наукових досліджень кафедри «Електричні машини» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», а також в межах господарчого договору «Науково-методичне забезпечення для створення системи моніторингу і вібродіагностики турбоагрегатів атомних електростанцій» (№ державної реєстрації 0107U005831, замовник – ЗАТ «Укратоменергобуд»).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка та наукове обґрунтування технологічних заходів, спрямованих на підвищення вібраційної стійкості конструктивних вузлів торцевих зон статорів потужних турбогенераторів. В роботі досліджуються найбільш вразливі елементи статора. А саме: стяжні призми осердя статора, зубці крайніх пакетів статора, вивідні і сполучні шини в лобових частинах обмотки статора. Дослідження проведені на прикладі турбогенератора типу ТВВ-1000-2У3. Для досягнення зазначеної мети необхідно було послідовно вирішити наступні задачі:

1. Провести системний аналіз відмов статорів турбогенераторів ТВВ-1000-2У3, визначити найбільш вірогідні причини виникнення дефектів.
2. Розробити математичні моделі вібраційних процесів в торцевих зонах статора турбогенератора. Дослідити виникнення і розвиток дефектів конструктивних вузлів

осердя, викликаних впливом осьових сил електромагнітного походження, визначити основні причини пошкодження стяжних призм і зубців крайніх пакетів.

3. Провести експериментальні дослідження вібрацій вивідних і з'єднувальних шин лобових частин обмотки статора ТГ ТВВ-1000-2У3 в різних режимах експлуатації.

4. Розробити та науково обґрунтувати технічні рішення щодо послаблення впливу осьової вібрації в торцевій зоні статора та подовження експлуатаційного ресурсу турбогенератора.

5. Розробити та науково обґрунтувати технологічні рішення та основні вимоги до комплексної системи моніторингу і вібродіагностики технічного стану статора турбогенератора.

Об'єкт дослідження – статор потужного турбогенератора.

Предмет дослідження – торцева зона статора потужного турбогенератора.

Методи дослідження – використовуються методи теорії електричних машин, теорії електромагнітного поля, опору матеріалів деформуванню й руйнуванню, експериментальних досліджень, а також теоретичної і прикладної вібродіагностики.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Розроблені нові дво- і трьохвимірні математичні моделі розподілу електромагнітного поля та віброзбуджувальних сил в торцевій зоні потужного турбогенератора, які на відміну від відомих враховують наявність вихрових струмів в конструктивних елементах.

2. Вперше доведено та науково обґрунтовано, що причиною ушкоджень стяжних призм осердя статора є їх утомне руйнування під впливом багаточислових навантажень аксіально спрямованими електромагнітними силами, які виникають у торцевих зонах ТГ і діють на крайній пакет осердя статора, натискну плиту, екран і натискний палець.

3. Розроблена нова математична модель руйнування зубців крайніх пакетів осердя статора внаслідок зменшення утомної міцності із виникненням розшарування шихтованих пакетів та резонансного коливання розшарованих листів заліза.

4. В результаті експериментальних досліджень визначено, що вивідні й сполучні шини обмотки статора турбогенератора ТВВ-1000-2У3 зазнають впливу складних вібрацій, спектр яких містить вищі часові гармоніки, кратні 100 Гц. Вперше доведено, що виникнення і зростання наскрізних тріщин у вивідних і сполучних шинах обмотки статора спричинено резонансом окремих шин на частотах, близьких до 200 Гц.

Практичне значення результатів роботи

1. З метою зменшення пошкоджуваності хвостовиків стяжних призм осердя статора розроблено спосіб контролю механічних напруг в стяжних призмах за допомогою чотирьох тензодатчиків – по двоє датчиків на призмах вздовж горизонталі і вертикалі, а також метод додаткового контролю вібрацій на натискному фланці і на натискному пальці з метою спостереження динаміки зміни рівня осьової вібрації на вищезазначених елементах осердя статора в часовій і частотній областях.

2. Розроблено спосіб визначення власних коливань вивідних і з'єднувальних шин обмотки статора без розбирання турбогенератора після зупинки турбоагрегату.

3. Доведено, що налаштування та захист вивідних і сполучних шин обмотки статора від резонансів на частоті 100 Гц, регламентовані існуючими нормативними інструкціями, є недостатніми, оскільки в ТГ спостерігаються коливання на частотах, кратних 100 Гц, які здатні викликати резонанс окремих елементів конструкції.

количество шин, имеющих собственные частоты колебаний, близкие к частоте 200 Гц, весьма велико, т.е. эти шины находятся в состоянии, близком к резонансу, что обуславливает их высокую повреждаемость. Таким образом, выполняемая в настоящее время в соответствии с нормативной методикой ОБС 477.876 отстройка резонанса шин от частоты 100 Гц является недостаточной и требует срочного дополнения инструкцией, предусматривающей отстройку шин от частоты 200 Гц.

Обоснованы и сформулированы принципы построения и структурная схема автоматизированной системы диагностики, предназначенная для мониторинга и вибродиагностики турбогенератора как элемента турбоагрегата АЭС. Такая система позволяет не только обеспечить выявление повышенной виброактивности ТГ, но и на основе результатов анализа полученной виброинформации даёт возможность строго детерминировать причины возникновения такой виброактивности, а также сформулировать технические решения и рекомендации по ее устранению. Полученные результаты создают основу для дальнейшей конкретизации и разработки системы автоматизированного мониторинга и вибродиагностики нового типа. Внедрение автоматизированной системы вибродиагностики – важнейшее научно-техническое мероприятие по уменьшению повреждаемости и повышению надежности турбоблоков АЭС Украины, в том числе снижение повреждаемости исследованных в диссертации конструктивных узлов сердечника, а также выводных и соединительных шин обмотки статора турбогенератора.

Основные результаты диссертации внедрены в ЗАО «Укратомэнергострой», а также в учебном процессе кафедры электромеханики НТУУ «КПИ».

Ключевые слова: турбогенератор, магнитное поле, электромагнитные силы, разрушение материалов, вибромониторинг, вибродиагностика.

Shtogrin A. V. Scientific-Technical Measures Used to Reduce Damage in the Powerful Turbogenerator Stators Caused by Vibrations in the End Zones. – Manuscript

Dissertation Applied to Get the Scientific Degree of Candidate of Technical Sciences on the Speciality 05.09.01. – Electric Machines and Devices. Odessa National Polytechnical University, Odessa, 2016.

The Dissertation is devoted to scientific substantiation and development of scientific-technical measures, which can be used to reduce damage in construction elements of the turbogenerator (TG) stator caused by the vibrations in its end zones.

Destructive processes in the turbogenerator stator core – stator core coupling prisms, stator end packet teeth – using the techniques of strength of materials to deformation and destruction as well as field methods in the calculation of electromagnetic axial forces are studied. Vibroactivity of the stator coil coupling buses is experimentally investigated using the technique of vibrodiagnostics. A number of practical constructive recommendations concerning the reduction of consequences of damage in stator construction elements and enlargement of the TG stator working endurance are formulated. It is proposed to use the vibrodiagnostics as an effective technique for the detection of initial stages of defect formation in the TG construction elements.

Key words: turbogenerator, magnetic field, electromagnetic forces, destruction of materials, vibromonitoring, vibrodiagnostics.

Досліджено деструктивні процеси у вузлах осердя статора ТГ – стяжних призмах осердя статора, зубцях крайніх пакетів статора – завдяки застосуванню методів теорії спротиву матеріалів деформації і руйнуванню, а також польових методів розрахунку електромагнітних сил. Віброактивність сполучних шин обмотки статора досліджувалася експериментально із застосуванням техніки вібродіагностики. Сформульовано низку практичних конструктивних рекомендацій щодо зменшення наслідків пошкоджуваності елементів конструкції статора і подовження робочого ресурсу ТГ. Запропоновано впровадити вібродіагностику як ефективніший засіб виявлення початкової стадії розвитку дефектів елементів конструкції ТГ.

Ключові слова: турбогенератор, магнітне поле, електромагнітні сили, руйнування матеріалів, вібромоніторинг, вібродіагностика.

Штогрин А. В. Научно-технические мероприятия по снижению повреждаемости статоров мощных турбогенераторов, вызванных вибрацией в торцевых зонах. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электрические машины и аппараты. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2016.

Диссертация посвящена обоснованию и разработке научно-технических мероприятий по уменьшению повреждаемости конструктивных узлов статора мощных турбогенераторов, вызванных вибрацией в торцевых зонах. В работе исследовались узлы статора, частая повреждаемость которых подтверждается опытом длительной эксплуатации ТГ: тяжёлые призмы сердечника статора; зубцы крайних пакетов статора; соединительные шины в лобовых частях обмотки статора. Учитывая особую важность решения данной проблемы применительно к мощным ТГ АЭС, исследования проводились для турбогенератора ТВВ-1000-2У3 мощностью 1000 МВт.

Для решения поставленной задачи было разработано научно-методическое обеспечение в виде совокупности двух и трехмерных полевых математических моделей, позволивших рассчитывать осевые электромагнитные вибровозмущающие силы в виде тензора натяжения, приложенного к торцевой зоне сердечника статора.

Методами моделирования, используемыми в механике разрушения материалов, доказано, что повреждаемость тяжёлых призм сердечника статора происходит из-за процесса усталостного разрушения при многоцикловом нагружении призм аксиальными вибрационными электромагнитными силами, возникающими в торцевых зонах и воздействующими на крайние пакеты сердечника статора, нажимную плиту, медный экран и нажимные пальцы.

Предложена гипотеза, объясняющая механизм разрушения зубцов крайних пакетов сердечника статора вследствие явления расслоения шихтованной структуры зубцов на отдельные фрагменты и резонансом этих фрагментов под влиянием вибровозмущающих сил, генерируемых в работающем турбоагрегате в широком диапазоне частот. Расслоение зубцов сопровождается также появлением шумовой акустической составляющей в спектре вибраций сердечника.

Проведены экспериментальные исследования вибраций соединительных шин в лобовых частях обмотки статора турбогенератора ТВВ-1000-2У3. Экспериментально доказано, что частоты вынужденных колебаний соединительных шин образуют ряд, состоящий из следующих значений: 100, 200, 300, 400... Гц, причем наиболее интенсивные колебания происходят на частотах 100 и 200 Гц. Установлено, что

4. Доведено, що для підвищення надійності обмотки статора ТВВ-1000-2У3 необхідно перейти на обмотку статора, в якій застосовуються більш гнучкі зв'язки в аксіальному напрямку, що сприятимемо зменшенню механічних напруг вивідних і сполучних шин.

5. Для своєчасного виявлення дефектів, що виникають в елементах конструкції статора ТГ і запобігання аварій з тяжкими наслідками, розроблено структурну схему автоматизованої системи вібраційного моніторингу і діагностики технічного стану осердя статора, вивідних і сполучних шин обмотки статора.

Особистий внесок здобувача. В роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать наступні результати: в роботах [1,4,7] сформулював принципи побудови системи вібраційного моніторингу технічного стану та діагностики дефектів статора ТГ АЕС; в роботі [2] виконав обробку результатів експериментальних досліджень вібрацій турбогенератора ТВВ-1000-2У3 енергоблоку № 3 ЮУ АЕС; в роботах [3,6] розробив математичну модель для розрахунку вібробуджувальних сил та оцінки пошкоджуваності тяжких призм статора на основі положень теорії утомних напружень; в роботі [5] виконав розрахунок власних частот зубців крайніх пакетів осердя статора; в роботі [8] виконав аналіз електромагнітних сил, що діють на елементи конструкції в торцевій зоні, з використанням тривимірної польової моделі. В роботі [9] належить загальна постановка завдання.

Апробація результатів дисертації. Основні результати виконаних у дисертації досліджень доповідались: на щорічних Міжнародних симпозиумах «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика (SIEMA'2008), (SIEMA'2009), (SIEMA'2013) (м. Харків, 18 – 21 жовтня 2008 р., 20–23 жовтня 2009 р., 23–25 жовтня 2013 р.); на Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах», м. Севастополь, 21–25 вересня 2009 г., 12–16 вересня 2010 г.;

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 9 наукових статтях у спеціалізованих наукових виданнях, а саме: 7 статей – в фахових наукових журналах та збірниках наукових праць, а також 2 статті в збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків по роботі, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 161 сторінки і складає: 137 сторінок по тексту, 2 таблиці і 7 рисунків на окремих сторінках, список використаних літературних джерел із 129 найменувань на 12 сторінках, 4-х додатків на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. У вступній частині обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, викладається наукова новизна, зазначаються положення, які виносяться здобувачем на захист, теоретична та практична цінність отриманих результатів та їх зв'язок з науковими програмами, планами, подана інформація про апробацію роботи, наведено відомості про публікацію та впровадження.

У першому розділі виконано системний аналіз відмов і дефектів статорів потужних турбогенераторів на прикладі турбогенераторів ТВВ-1000-2У3, які

застосовуються на АЕС України, а також намічені заходи по підвищенню ефективності використання турбогенераторів.

При розробці ТГ типу ТВВ-1000-2У3 ВАТ «Електросила» взяла за основу серійний турбогенератор ТВВ-800-2 з підвищенням його потужності до 1000 МВт. Через те, що напруга обмотки статора залишилася незмінною (24 кВ), струм статора збільшився на 25%, а динамічні зусилля зросли відповідно в 1,56 рази. Згодом (протокол засідання НТС Мінпаливенерго України від 26.06.2006 р.) «Електросила» визнала, що ці генератори були спроектовані й виготовлені в габаритах генераторів потужністю 800 МВт і не пройшли обов'язкового для всіх генераторів нового типу циклу доведення конструкції на електростанціях, що практикується всіма фірмами світу. Це недостатньо обґрунтоване технічне рішення й послужило причиною ненадійної роботи турбогенераторів типу ТВВ-1000-2У3 на АЕС України.

Подальше доведення генераторів ТВВ-1000-2У3 велось заводом-виготовлювачем шляхом вирішення поточних завдань без поглибленого аналізу проблеми. В результаті сама процедура доведення не виправдало затяглася й донині не завершена, хоча з моменту пуску першої машини пройшло вже більше 30 років.

Наведений у розділі статистичний огляд відмов і дефектів турбогенераторів типу ТВВ-1000-2У3, що пройшли декілька етапів модернізації за пропозиціями «Електросили» і «Альстома», дозволяє зробити ряд попередніх висновків, а саме:

– дефекти й відмови мають систематичний характер;

– недостатня ефективність заходів, впроваджених при модернізації ТВВ-1000-2У3, свідчить про те, що при їх розробці не був зроблений системний аналіз причин виникнення дефектів, не виконана детальна діагностика технічного стану генераторів, внаслідок чого приймалися половинчасті, а не кардинальні рішення щодо доведення конструкції генераторів;

– хоча і був позитивний досвід експлуатації турбогенераторів ТВВ-1000-2У3 на Хмельницькій АЕС, де впроваджена обмотка статора фірми «Альстом», але ця модернізація не поширювалася на осердя статора, конструкція якого потребує також удосконалення.

В другому розділі розроблено науково-методичне забезпечення у вигляді сукупності польових математичних моделей і методів аналізу, необхідних для дослідження вібраційних процесів в статорі турбогенератора.

Сили електромагнітного походження вносять істотний внесок в загальний рівень вібрацій ТГ і потребують спеціального вивчення. Для формулювання рекомендацій і проведення відповідних заходів потрібен достовірний розрахунок і детальний аналіз прикладених електромагнітних сил.

Показано, що ефективним методом розрахунку електромагнітних сил в осерді статора ТГ є метод тензора магнітного натягу, використаний при формулюванні математичних моделей. Для дослідження радіальних і тангенціальних вібрацій статора розроблено модель, засновану на аналізі магнітного поля в поперечному перерізі турбогенератора – в його активній зоні.

Аналіз магнітного поля в поперечному перерізі ТГ, за відсутності індукованих вихрових струмів, виконується після розв'язання стаціонарного рівняння Пуассона відносно аксіальної складової векторного магнітного потенціалу A_z :

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_{z \text{ стор}} \quad (1)$$

ПУБЛІКАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шумилов Ю. А., Демидюк Б. М., Штогрин А. В. Вибродіагностика как составляющая часть мониторинга технического состояния силовых агрегатов электростанций // Праці ІЕД НАН України. – 2008. – № 1. – С. 76–80.

2. Шумилов Ю. А., Демидюк Б. М., Штогрин А. В. Результаты экспериментальных исследований вибраций турбогенератора ТВВ-1000-2У3У3 энергоблока № 3 ЮУ АЭС // Електротехніка і Електромеханіка. – 2008. – № 5. – С. 32–38.

3. Васьковский Ю. Н., Шумилов Ю. А., Штогрин А. В. Анализ вибровозмущающих осевых сил в сердечнике статора мощного турбогенератора // Електротехніка і Електромеханіка. – 2009. – № 1 – С. 21–26.

4. Шумилов Ю. А., Васьковский Ю. М., Чумак В. В., Штогрин О. В. Вибродіагностика та моніторинг турбогенераторів атомних електростанцій // Гідроенергетика України. – № 1. – 2009. – С. 28–31.

5. Васьковский Ю. Н., Шумилов Ю. А., Штогрин А. В. Моделирование процесса усталостного разрушения зубцов крайних пакетов сердечника статора мощных турбогенераторов // Праці НТУ «Харківський політехнічний інститут». – 2009. – № 4. – С. 22–28.

6. Васьковский Ю. Н., Шумилов Ю. А., Штогрин А. В. Вибровозмущающие осевые силы и механика разрушения элементов конструкции мощного турбогенератора // Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах», СевНТУ, г. Севастополь, 21-25 сентября 2009 г. – С. 77–78.

7. Васьковский Ю. Н., Шумилов Ю. А., Штогрин А. В. Системный мониторинг и диагностика турбоагрегатов АЭС // Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах», СевНТУ, г. Севастополь, 12-16 сентября 2010 г. – С. 5–7.

8. Гайденок Ю. А., Вишневский Т. С., Штогрин О. В. 3D-моделирование для определения осевых сил, действующих на элементы торцевой зоны мощного турбогенератора // Електротехніка і Електромеханіка. – 2013. – № 6. – С. 21–26.

9. Шумилов Ю. А., Штогрин А. В. Уменьшение повреждаемости статоров мощных турбогенераторов, вызванных вибрацией в торцевой зоне (анализ, гипотезы, эксперимент) // Електротехніка і Електромеханіка. – 2014. – № 1. – С. 37–39.

АНОТАЦІЇ

Штогрін О. В. Науково-технічні заходи щодо зменшення пошкоджуваності статорів потужних турбогенераторів, спричинених вібрацією в торцевих зонах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01. – Електричні машини і апарати. Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2016.

Дисертація присвячена науковому обґрунтуванню й розробці науково-технічних заходів щодо зменшення пошкоджуваності конструктивних вузлів статора турбогенератора, спричинених вібрацією в його торцевих зонах.

надійності таких ТГ необхідна розробка і впровадження відповідних науково-технічних заходів.

2. Розроблено науково-методичне забезпечення у вигляді двох і трьохвимірних математичних моделей торцевої зони ТГ для розрахунків змінних осьових електромагнітних сил, а також математичну модель для дослідження пошкоджуваності елементів конструкції статора ТГ, побудовану на основі апарату спротиву матеріалів деформації і руйнуванню, викликаних осьовою вібрацією в торцевих зонах ТГ.

3. Доведено, що пошкоджуваність стяжних призм статора ТГ відбувається через утомне руйнування при багаточикловому навантаженні аксіальними електромагнітними силами.

4. З'ясовано механізм руйнування зубців крайніх пакетів статора внаслідок розшарування шихтованих зубців на окремі фрагменти і резонансних коливань цих фрагментів під впливом сил різного походження.

5. Проведено експериментальні дослідження вібрацій з'єднувальних шин в лобових частинах обмотки статора ТВВ-1000–2У3. Експериментально доведено, що сполучні шини статора постійно вібрують на частоті 100 Гц, а також в умовах, близьких до резонансу на частоті 200 Гц.

6. Розроблено автоматизовану систему вібраційного моніторингу та діагностики турбогенератора.

7. Розроблено ряд заходів, спрямованих на зниження пошкоджуваності статора турбогенераторів:

7.1. Для контролю розподілу пресувальних зусиль між окремими стяжними призмами запропоновано розміщення на призмах чотирьох тензометричних датчиків з метою вирівнювання пресувальних зусиль між окремими призмами.

7.2. Показано, що розшарування зубців супроводжується появою шумової акустичної складової, що є додатковою діагностичною ознакою і може слугувати сигналом щодо необхідності підпресування осердя.

7.3. Розроблено спосіб визначення власних частот вивідних і сполучних шин обмотки статора без розбирання турбогенератора.

7.4. Запропоновано доповнити нормативну методику ОБС 477.876 інструкцією, яка передбачає відстроювання власних частот шин від частоти 200 Гц.

7.5. Запропоновано відмовитися від жорсткої конструкції обмотки статора ВАТ «Електросила» і перейти на конструкцію обмотки статора, в якій застосовуються гнучкі зв'язки, внаслідок чого має з'явитися незалежність віброзміщень окремих секцій в зоні лобових частин в аксіальному напрямку і зменшитися механічні напруження вивідних і сполучних шин.

7.6. Запропоновано конкретну модель вибродіагностики турбоагрегата АЕС.

8. Результати дисертаційної роботи використовуються в ПАТ «Укратоменергобуд», а також в навчальному процесі кафедри електромеханіки НТУУ «КПІ».

де $J_{стор}$ – густина сторонніх струмів, які задаються в перерізах обмоток статора і збудження. На границі G розрахункової області рівняння (1) доповнюється однорідною граничною умовою першого роду $A_z|_G = 0$, яка відображає загасання поля за межами області. Складові вектора магнітної індукції в декартових координатах визначаються за відомими значеннями векторного потенціалу:

$$B_x = \partial A_z / \partial y, B_y = -\partial A_z / \partial x. \quad (2)$$

В нормально-тангенціальних координатах складові магнітної індукції визначаються:

$$B_r = B_x \cos \alpha - B_y \sin \alpha = B_x \frac{y}{R_s} - B_y \frac{x}{R_s}, \quad B_n = B_x \sin \alpha + B_y \cos \alpha = B_x \frac{x}{R_s} + B_y \frac{y}{R_s} \quad (3)$$

де x, y – координати довільної точки, в якій розраховується індукція; R_s – радіус-вектор точки; α – кут між радіус-вектором і віссю Y в декартовій системі координат. Далі розраховуються складові тензора магнітного натягу:

$$T_n = \frac{1}{2\mu} \cdot (B_n^2 - B_r^2), \quad T_r = \frac{B_n \cdot B_r}{\mu} \quad (4)$$

Математична модель (1) – (4) реалізована чисельно за допомогою методу скінченних елементів. Розроблена модель дозволяє розрахувати електромагнітні сили, спрямовані вздовж радіусу і розточкі осердя статора, що дає можливість визначити радіальні і тангенціальні вібрації ТГ. Результати чисельної реалізації моделі використовуються також для завдання граничних умов в математичній моделі в торцевій зоні турбогенератора.

Розрахункова область, що відображає подовжній переріз генератора в його торцевій зоні в циліндричній системі координат RZ , зображена на рис.1. Для врахування впливу вихрових струмів в листах осердя від аксіальних магнітних потоків розсіювання використовується рівняння відносно комплексної амплітуди азимутної складової векторного магнітного потенціалу, що змінюється в часі з частотою живлення обмотки статора:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{A}_\varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \dot{A}_\varphi}{\partial z^2} - j\omega_1 \mu \gamma \dot{A}_\varphi = -\mu \dot{J}_{\varphi стор} \quad (5)$$

де γ – електропровідність сталі листів статора, ω_1 – кутова частота змінних.

Відмінна від нуля електропровідність задається в натискній плиті і пакетах осердя статора. Джерелами електромагнітного поля в різних розрахункових варіантах задачі можуть бути: а) тангенціальні (азимутальні) складові густини струмів в лобових частинах обмоток статора $J_{\varphi 1}$ і ротора $J_{\varphi 2}$, які заповнюють показані на рис.

1 еквівалентні перерізи лобових частин; б) значення векторного магнітного потенціалу на границі ABCD, яке враховує вплив основного (радіально спрямованого) магнітного потоку. При аналізі поля в режимі КЗ основний магнітний потік в осерді статора є дуже малий. Тому за граничні умови на всій зовнішній межі вибирається умова загасання поля

$$A_\varphi|_{ABCDEFGH} = 0 \quad (6)$$

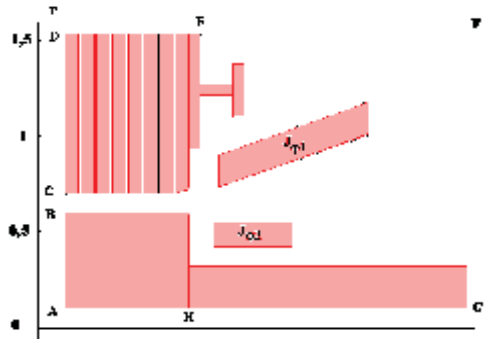


Рис. 1. Розрахункова область для аналізу поля в торцевій зоні ТГ

В режимі ХХ густина струму в обмотці статора дорівнює нулю, а еквівалентна густина струму в лобових частинах ротора дорівнює $J_{0\varphi 2} = I_{f0} W_2 / 2 / S_{Л2}$, де $S_{Л2}$ - еквівалентна площа перерізу лобових частин ротора. Магнітний стан осердя статора визначається основним магнітним потоком. Для урахування його стікання в тангенціальному напрямі (уздовж осі φ), на границях DE і AH задаються однорідні граничні умови другого роду

$$\left. \frac{\partial A_\varphi}{\partial n} \right|_{DE, AH} = 0. \quad (7)$$

На границі ABCD задана функція розподілу векторного магнітного потенціалу

$$A_\varphi|_{ABCD} = A_{\varphi 0}(r), \quad (8)$$

яка відповідає відомій функції розподілу потенціалу вздовж радіусу в поперечному перерізі. На решті границь задається умова $A_\varphi = 0$. В режимі навантаження густина струму обмотки статора $J_{\varphi 1}$ визначається з урахуванням просторового зсуву амплітуди НС витків обмотки статора по відношенню до амплітуди НС збудження.

Сумарна величина осьових електромагнітних сил, прикладених до торцевої зони осердя статора, знаходиться як сума двох складових: $F_z = F_{z\sigma} + F_{zm}$, де складова $F_{z\sigma}$ обумовлена магнітними потоками розсіювання лобових частин обмоток статора і ротора, що індукують вихрові струми в крайніх пакетах і натискних фланцях осердя статора, а складова F_{zm} обумовлена неоднорідністю структури магнітопроводу. Методика розрахунку сил на основі моделі (1) – (8) складається з наступних етапів.

1. Розв'язується задача (1) – (4) розрахунку електромагнітного поля в поперечному перерізі ТГ і знаходяться функції розподілу векторного магнітного потенціалу $A_{\varphi 0}(r)$ та магнітної проникності $\mu(r)|_{OO}$ уздовж радіусу ТГ.

2. Для визначення складової сили $F_{z\sigma}$ розв'язується задача (5), (6) при однорідних граничних умовах першого роду на зовнішніх границях розрахункової області. При цьому розподіл магнітної проникності вздовж радіусу є заданий і відповідає знайдений в п.1 функції $\mu(r)|_{OO}$ для поперечного перерізу ТГ.

вала), щоб за допомогою сигналу, що надходить від тригера (перекидаючого кута), виділити із сумарного сигналу комплексні амплітуди (величину й фазу) $1n, 2n, 3n, \dots$ гармонійних складових. Побудований на швидкому перетворенні Фур'є аналіз у частотній області дозволяє зіставити поточний спектр із «зразковим» спектром, причому для кожного пікового значення визначають тенденцію розвитку дефекту. Ця тенденція зміни конкретної характеристики є чутливим інструментарієм для раннього розпізнавання систематичних змін.

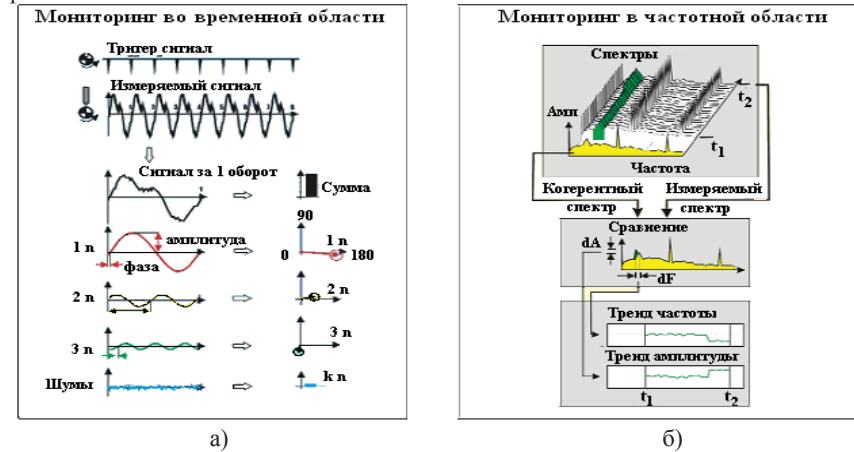


Рис. 7. Моніторинг сигналів у часовій (а) і частотній (б) областях

Обґрунтовано й сформульовано принципи побудови й структурна схема автоматизованої системи моніторингу і вібродіагностики (АСМВ), призначеної для моніторингу й вібродіагностики турбогенератора як елемента турбоагрегату атомних електростанцій. Така система дозволяє не тільки забезпечити виявлення підвищеної віброактивності ТГ, але й на основі результатів аналізу отриманої віброінформації дає можливість строго визначити причини виникнення такої віброактивності, а також сформулювати технічні рішення й рекомендації з її усунення. Ефективне функціонування АСМВ – важливий науково-технічний захід для зменшення пошкоджуваності й підвищення надійності турбоблоків АЕС.

У додатках наводяться документи, що підтверджують актуальність і впровадження результатів дисертаційної роботи, деякі експериментальні результати, а також пропозиції щодо практичної побудови системи вібраційної діагностики турбоагрегата.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна наукова задача по обґрунтуванню й розробці науково-технічних заходів щодо зменшення пошкоджуваності конструктивних вузлів статора турбогенераторів, викликаних вібрацією в його торцевих зонах. За результатами досліджень зроблені наступні основні висновки:

1. Системний аналіз відмов і дефектів статорів потужних турбогенераторів ТВВ-1000-2У3, які експлуатуються на АЕС України, засвідчив, що підвищена пошкоджуваність ТГ даного типу в значній мірі обумовлена вібраційними явищами в торцевих зонах статорів. Для забезпечення необхідного рівня експлуатаційній

7. Істотним резервом зниження рівнів вібрації шин є додаткове підпресування осердя статора, а також радикальна зміна конструкції й способу кріплення лобових частин і сполучних шин обмотки статора.

8. Необхідно передбачити розміщення вібродатчиків на опорних колонах, а також на натискних фланцях і натискних пальцях осердя статора.

9. Існуючі технічні умови для відстроювання від резонансів лише для 100 Гц не є достатніми. Необхідно зважати на наявність істотних вібрацій як на вищих гармоніках, так і субгармоніках.

10. Досліджений ТГ у вихідному конструктивному виконанні можна залишити в експлуатації за умови неповного навантаження, рівень якого слід установити експериментально.

11. Запропоновано відмовитися від жорсткої конструкції обмотки статора ВАТ «Електросила» і перейти на конструкцію обмотки статора, в якій застосовуються гнучкі зв'язки, внаслідок чого має з'явитися незалежність віброзміщень окремих секцій в зоні лобових частин в аксіальному напрямку і зменшитися механічні напруження вивідних і сполучних шин.

В п'ятому розділі розглянуто питання вібромоніторингу і вібродіагностики технічного стану турбоагрегатів АЕС.

Для моніторингу технічного стану ТГ спостереження за рівнем вібрації в широкій смузі частот є малоєфективним, тому що забезпечує лише попередження ескалації ушкоджень, здатних викликати аварію. Так, моніторинг технічного стану вивідних і сполучних шин обмотки статора турбогенератора ТВВ-1000-2У3, виконаний фірмою VibroSyst M з використанням вібродатчика FOA-100 із частотною смугою пропускання 50 – 350 Гц (Розділ 4), не зміг виявити тріщин, що зароджувалися у сполучних шинах, які резонували біля частоти 200 Гц. Більш ефективним є селективний метод, здатний вибірково обробляти інформацію, що міститься у вимірвальних сигналах, і аналізувати її з метою раннього виявлення ушкоджень. При цьому можна виділити три основних аспекти:

1. Для роторів вимірюються віброзміщення, віброшвидкості й віброприскорення на частоті обертання, а також вищих гармоніках. Кожний складовий ставлять у відповідність певний вид джерела віброзміщення (термічний дисбаланс, помилка балансування, контактні процеси й т. д.). Методика може уточнюватися за допомогою використання виміру фазових кутів (відносно нанесеного на вал маркування) як показник спостереження.

2. Розширення діагностики досягається за рахунок введення діагностичних ознак по окремих видах дефектів (характерних для різних видів нерегулярності) на частотах, відмінних від частоти обертання й відповідно вищих складових, кратних частоті обертання. Джерелами таких вібрацій можуть бути магнітне поле, підшипники ковзання тощо.

3. Подальше підвищення ефективності діагностики турбоагрегату може бути досягнуто, якщо в процесі роботи ТГ і всього турбоагрегату брати до уваги селекційно встановлені власні частоти елементів конструкції усього комплексу, що впливають на роботу ТГ. Така інформація характеризує стан машини в деталях і вказує на появу дефектів на ранній стадії (нашарування складових, що змінюються, зсув резонансів і т.д.). Селективні методи можна спрощено підрозділити на методи контролю в часовій і частотній областях. Такий розподіл пояснюється на Рис.7. У часовій області вимірвальний сигнал визначається багатьма періодами (обертанням

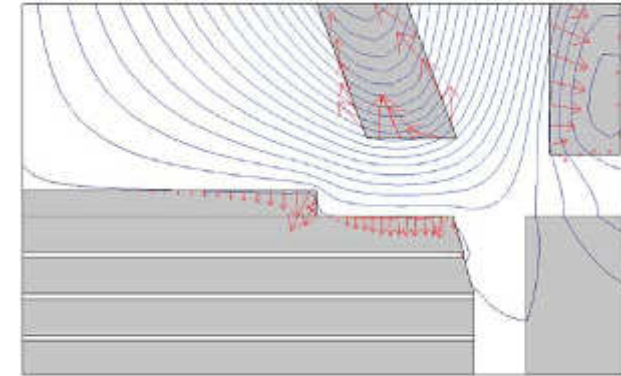


Рис. 2 Розподіл тензора магнітного натягу в зоні крайнього пакету в номінальному режимі

3. Для визначення складової сили F_{zm} розв'язується рівняння (5) при електропровідності $\gamma=0$, оскільки вважається, що радіальний магнітний потік в шихтованих пакетах статора вихрових струмів не індукує (якщо нехтувати незначними по величині струмами, вплив яких враховується при розрахунку втрат в сталі). При цьому приймається $J_{\phi 1} = J_{\phi 2} = 0$. Джерелом поля в цій задачі є значення потенціалу на границі ABCD $A_{\phi} = A_{\phi 0}(r)$, знайдене з рішення задачі по п.1 в поперечному перерізі. Для моделювання замикання основного магнітного потоку в тангенціальному напрямі на границях DE і АН задаються однорідні граничні умови другого роду (7). На решті границь задається умова (6).

4. Визначається сумарна осьова сила $F_z = F_{z\sigma} + F_{zm}$.

На рис.2 представлена картина розподілу електромагнітного поля та тензора магнітного натягнення в торцевій зоні турбогенератора ТВВ-1000-2У3 в номінальному режимі (при струмі збудження 6980 А і $\cos\varphi=0,9$).

Розроблені двовимірні польові моделі в поперечному і поздовжньому перерізах в цілому формують квазітривимірну математичну модель, що дозволяє розрахувати осьові віброзбуджувальні сили в торцевій зоні ТГ. Однак такий підхід не дозволяє достовірно врахувати всі складові осьових сил, оскільки характер поля в торцевих зонах є істотно тривимірним, а в двовимірній розрахунковій області в поздовжньому перерізі неможливо строго врахувати сили, які прикладені до інших конструктивних елементів – натискній плиті, екрану, натискним пальцях. Тому в дисертації була розроблена тривимірна польова модель.

Розрахунковою областю є просторова конструкція торцевої зони ТВВ-1000-2, зображена на рис. 3а. Побудова області виконано за допомогою пакета автоматизованого проектування SolidWorks. Для правильного завдання граничних умов модель торцевої зони ТГ була поміщена всередину циліндра, який обмежував розрахункову область по трьох координатах і імітував нескінченний повітряний простір навколо розрахункової моделі. На зовнішній поверхні циліндра задані однорідні граничні умови першого роду.

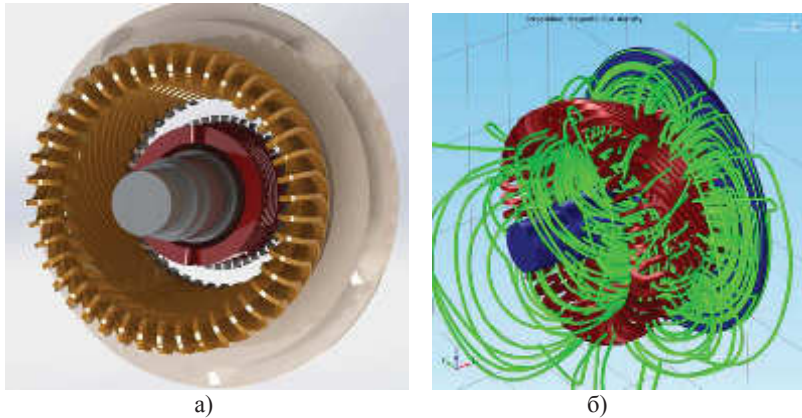


Рис. 3. Тривимірне моделювання поля і сил в торцевій зоні ТВВ-1000-2

Для розрахунку електромагнітного поля використовувалося загальне рівняння поля відносно векторного магнітного потенціалу, яке має наступний вигляд:

$$j\omega_1 \gamma \cdot \vec{A} + \nabla \times \frac{\nabla \times \vec{A}}{\mu_0 \mu_r} = \vec{J}_{\text{стор.}} \quad (9)$$

Джерелами поля є щільності струмів в лобових частинах фаз обмотки статора і обмотки ротора. Вирази для фазних значень щільності струму статора задавалися згідно такими виразами:

$$J_A = J_m \cdot e^{j(\omega_1 t)}, \quad J_B = J_m \cdot e^{j(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3})}, \quad J_C = J_m \cdot e^{j(\omega_1 t + \frac{4\pi}{3})}, \quad (10)$$

де J_m – амплітуда густини струму фази обмотки статора. Електромагнітні сили на елементи конструкції визначалися за методом тензора магнітного натягу.

Модель містить близько 210^6 тетрадральних скінченних елементів. Чисельне рішення моделі з такою кількістю елементів являє високі вимоги до ресурсів комп'ютера. Час вирішення однієї задачі на 8-ядерному сервері склав близько 5 діб, що знижує можливості значних розрахункових варіацій в моделі. На рис. 3б за допомогою ізоліній представлено розподіл магнітної індукції в торцевій зоні ТГ.

В таблиці 1 наведені розраховані значення осьової складової сили, прикладеної до досліджуваних елементів торцевої зони.

Елемент торцевої зони	Сила F_x , Н	Сила F_x , тонн
Осердя статора	213850	21,799
Натискна плита	38514	3,926
Екран	16193	1,651
Натискні пальці	2225	0,227
СУМА (на одну сторону)	270782	27,602
СУМА (на дві сторони)	541564	55,205

Таблиця 1

Метою дослідження був пошук джерел підвищеної вібрації тих шин, на яких рівні вібрації помітно перевищили рівні вібрації інших шин. Для цього був використаний режим запуску турбоблоку після ремонту турбогенератора. Для вивчення особливостей сигналів від вібродатчиків були обчислені спектри вібропотужностей в діапазоні до 400 Гц. Частотний діапазон був обмежений, щоб не заходити в зону резонансу датчиків.

Аналіз експериментальних даних дозволив зробити наступні висновки:

1. Основний вплив на вібрацію сполучних шин ТГ робить гармоніка сили магнітного походження на частоті 100 Гц.

2. Поряд з основною гармонікою віброзбуджувальної сили на вібрацію сполучних шин обмотки статора впливають вищі гармоніки сил на частотах, кратних 100 Гц, тобто 200, 300, 400, 500 і т.д. Гц (рис. 6а)

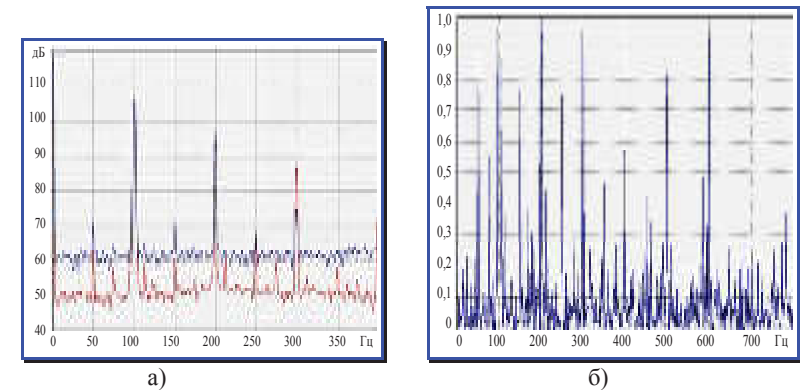


Рис. 6. Спектри вібрації шин на 16-й хвилині з початку набору потужності ТГ: а – спектри віброактивних шин (для віброактивної шини 2С1 – тангенціальна вібрація; для менш віброактивної шини К3А – аксіальна вібрація); б – функція когерентності

3. Крім того, існують субгармоніки, частоти яких є дробовими стосовно оборотної частоти (1/2, 1/3, 1/4 від 50 Гц.), що спричинено складними процесами, які відбуваються в підшипниках ковзання. Дробові гармоніки породжують власний ряд вищих гармонік, які можуть викликати резонансні явища на шинах, зубцях і інших елементах конструкції генератора.

4. По досягненні навантаження ТГ 500 МВт і вище спостерігався істотне зростання шумової складової вібрації на шинах, на яких відзначена найбільша віброактивність. Зона існування шумової складової не є стабільною. Виникнення помітного шуму пов'язане з недостатнім пресуванням осердя статора генератора.

5. Аналіз когерентності гармонійних складової вібрації (рис. 6б) наочно показує належність гармонік до загального джерела 100 Гц. Поява субгармонік може бути викликана нелінійними явищами взаємодії турбогенератора з фундаментом і в ослаблених стиках елементів конструкції ТГ.

6. На рівень вібрації шин істотно впливає навантаження ТГ, що спостерігалось при поступовому навантаженні генератора активною потужністю. При рівні навантаження ТГ до 750 МВт вібрація шин знаходилася в допустимих межах.

Розрахунки показали, що із зменшенням товщини відшарованої частини зубця відбувається зниження власних частот його поперечних коливань. Можливе повне руйнування всіх клейових шарів зубця, внаслідок чого окремі сталеві листи резонують самостійно. Причому форма коливань листа може бути різною. Результати розрахунків представлені в таблиці 3, в якій показані різні форми коливань і можливий розмір частини зубця, що відкололися. З таблиці 3 видно, що залежно від форми коливань і довжини зубця власні частоти коливань окремих груп листів стали лежать в широкому спектрі: від 8 до 9169 Гц. В цьому спектрі є і частоти, близькі до частоти електромагнітних сил 100 Гц, що обумовлює резонансні коливання листів і їх руйнування. В спектрі власних частот є також низькі частоти, близькі до 50 Гц, які можуть співпадати з частотою сил механічного походження.

Таблиця 3

L, мм	222	150	100	50	Довжина шматочків листів, що відламалися, мм			
ВФ	ВЧ							
1	8	17,96	40,41	161,3	222	150	100	50
2	51,39	112,56	253,26	1013,0	111	75	50	25
3	143,9	315,203	709,2	2836,7	74	50	33,3	16,6
4	282,10	617,68	1386,8	5558,9	55,5	37,5	25	12,5
5	454,78	1020,99	2297,2	9169,5	44,4	30	20	10

де ВФ – власна форма (порядковий номер) коливань; ВЧ – власна частота коливань.

Таким чином, розрахунковим шляхом показано механізм руйнування зубців крайніх пакетів осердя статора ТГ. Основними причинами, що приводять до руйнування, є розшарування склеєних пакетів осердя внаслідок втрати властивостей клею і підвищена вібрація окремих листів або груп листів електротехнічної сталі під впливом вібробуджувальних сил, в основному, на частотах 100 і 50 Гц, а також субгармоніках і вищих часових гармоніках.

В **четвертому розділі** виконано експериментальні дослідження причин пошкодженості вивідних і сполучних шин обмотки статора ТГ ТВВ-1000-2У3. Через складність конструкції вивідних і міжфазних сполучних шин обмотки статора, які вирізняються розмірами, способами кріплення й масово-пружними характеристиками, достовірна кількісна оцінка рівня їхньої вібрації розрахунковими методами практично неможлива. Тому були проведені експериментальні дослідження причин підвищеної вібрації окремих шин в умовах енергоблоку №3 Південноукраїнської АЕС

Для контролю віброзміщень на сполучних шинах обмотки статора було встановлено 16 вібродатчиків типу FOA-100 (Fiber-Optic Accelerometer) зі смугою пропускання частот 50 – 350 Гц і виміром віброзміщень у режимі « пік-пік» (top-top). До роз'ємів, на які надходили сигнали від датчиків через оптоволоконні канали зв'язку, був підключений штатний реєструвальний пристрій фірми VibroSyst M. До цих же роз'ємів було підключено 16-канальний реєструвальний пристрій, на який надходили сигнали від вібродатчиків. Пристрій складався з попередніх підсилювачів, схеми синхронізації, аналого-цифрових перетворювачів, вбудованого ПК, програм оперативного відображення вихідних даних, а також підпрограм попередньої обробки даних у реальному часі «DeepSea». Система первинної обробки даних забезпечувала виконання статистичної обробки для широкого набору стандартних і нестандартних функцій.

Сумарна розрахункова осьова електромагнітна сила, що діє на всі елементи торцевих частин ТГ по обидві сторони осердя статора, становить 55,2 тонни.

Третій розділ присвячено дослідженню методами теорії руйнування матеріалів причин і механізму пошкодженості важливих конструктивних елементів осердя статора – стяжних призм і зубців крайніх пакетів осердя статора. Відомо, що руйнування матеріалів під впливом змінних навантажень відбувається внаслідок утоми – процесу повільного накопичення ушкоджень. Різні періоди втомного процесу можна представити узагальненою діаграмою втомного руйнування (Рис.4). По осі абсцис в логарифмічному масштабі відкладено число циклів силової дії на матеріал, а по осі ординат – механічні напруження. Позначено: σ_a – амплітуда прикладених до зразка циклічних напружень; σ_R – межа витривалості – максимальне напруження, при якому матеріал здатний чинити опір, не руйнуючись при достатньо великому числі циклів навантаження. Лінія АС відповідає руйнуванню (лінія Веллера), лінія А₁С відображає процес утворення мікротріщин (лінія Френча), лінія А₁С₁D₁ відповідає утворенню субмікротріщин.

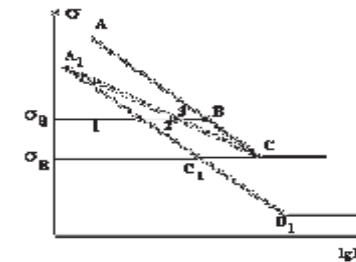


Рис. 4. Узагальнена діаграма втомного руйнування

За результатами статистичної обробки експериментальних даних Вейбуллом було отримано наступне рівняння, яке використано в даній роботі:

$$(\sigma_a - \sigma_R)^m N = c, \quad (11)$$

де m і c – коефіцієнти, що характеризують властивості матеріалу; $N = N_{3T} + N_{PT}$ – число циклів навантаження матеріалу до його руйнування; N_{3T} – число циклів до зародження тріщини, N_{PT} – число циклів, при якому відбувається подальше зростання тріщини і руйнування. Для аналітичного опису лінії Френча використано рівняння, що виражає кількість циклів до зародження тріщини N_{3T} :

$$N_{3T} = N_{PT} \left(\frac{\sigma_R - \sigma_n}{\sigma_a - \sigma_n} \right)^{2/m} / \left(1 - \left(\frac{\sigma_R - \sigma_n}{\sigma_a - \sigma_n} \right)^{2/m} \right) \quad (12)$$

де σ_n – рівень напруг, при перевищенні якого в матеріалі з'являються пошкодження.

При складанні статора в стяжних призмах створюється попереднє пресувальне зусилля. Це статичне напруження має значну величину і внаслідок ряду технологічних причин розподілена по всіх призмах дуже нерівномірно. В результаті накладення статичних і циклічних механічних напружень формується асиметрія циклу навантаження, що впливає на втомні характеристики призми. Асиметрія циклу

навантаження характеризується коефіцієнтом асиметрії циклу: $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}$,

де σ_m і σ_a – статичні і циклічні складові напружень. Для урахування впливу статичної складової напруження при циклічному навантаженні використана діаграма граничних амплітуд напружень – діаграма Гудмана (Рис. 5).

З діаграми Гудмана витікає, що при $\sigma_m > 0$ величина σ_a зменшується (т. В), тобто втомне руйнування починається при менших циклічних напруженнях. Наприклад, при початковому статичному напруженні $\sigma_m = 100$ МПа гранично допустима циклічна складова зменшується з 31 МПа до 25 МПа. Знайдене значення використовується при визначенні тривалості періоду зародження тріщини. В загальній кількості циклів навантаження матеріалу до його руйнування величина N_{3T} складає ~ 90 %.

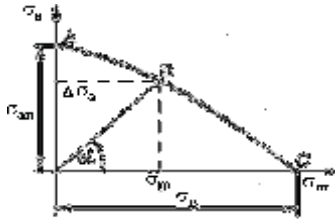


Рис 5. Діаграма граничних амплітуд напруг (діаграма Гудмана)

Для розрахунку кількості циклів навантаження N_{PT} , використовувався наступний інтегральний вираз:

$$N_{PT} = \int_0^{l_k} \frac{dl}{C(\Delta K)^n} \quad (13)$$

В Таблиці 2 приведені результати розрахунків загальної кількості циклів навантаження матеріалу до його руйнування при різних статичних і циклічних складових напружень. Для кожного заданого σ_m величина σ_a повинна перевищувати граничне напруження, при якому починається втомне руйнування.

Отримані розрахункові результати дозволяють визначити час експлуатації ТГ до руйнування призми. Наприклад, якщо прийняти $\sigma_m = 200$ МПа і $\sigma_a = 20$ МПа, то руйнування призми відбудеться через $3,95 \cdot 10^{10}$ циклів або 12,5 років безперервної роботи. При цьому амплітуда сумарних осьових сил оцінюється величиною 51,4 т, що добре узгоджується з величиною осьової вібробуджувальної сили 54,4 т, яка була отримана за результатами польових розрахунків сил в попередньому розділі

Таким чином, в результаті проведеного аналізу доведена гіпотеза, що пошкодженість стяжних призм осердя статора ТГ відбувається через процес утомного руйнування при багатоциклового навантаженні аксіальними вібраційними силами. Взнявши за основу експериментально встановлені факти руйнування призми після 10 ... 20 років експлуатації ТГ, отримано хороший збіг результатів розрахунків вібробуджувальних електромагнітних сил і сил, здатних викликати втомне руйнування призми за вказаний період експлуатації ТГ згідно з теорією руйнування матеріалів.

Таблиця 2

σ_m , МПа	$\sigma_{\text{дт}}$, МПа	$\Delta\sigma_a$, МПа	ΔK_{th}	l_0 , м	σ_a , МПа	N_{PT} , цикл	N_{3T} , цикл	Сумарна довговічність N , цикл
50	31	28	5,83	0,0138	35	$3,23 \cdot 10^7$	$3,82 \cdot 10^8$	$4,14 \cdot 10^8$
					32	$4,97 \cdot 10^7$	$9,6 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^9$
					30	$6,77 \cdot 10^7$	$2,53 \cdot 10^9$	$2,6 \cdot 10^9$
					29	$7,96 \cdot 10^7$	$4,9 \cdot 10^9$	$4,97 \cdot 10^9$
100	31	25	3,2	0,0052	30	$2,56 \cdot 10^8$	$3,67 \cdot 10^9$	$3,93 \cdot 10^9$
					28	$3,57 \cdot 10^8$	$8,14 \cdot 10^9$	$8,5 \cdot 10^9$
					26	$5,1 \cdot 10^8$	$3,27 \cdot 10^{10}$	$3,32 \cdot 10^{10}$
200	31	19	3,2	0,0090	35	$5,38 \cdot 10^7$	$2,46 \cdot 10^8$	$3,0 \cdot 10^8$
					30	$1,37 \cdot 10^8$	$8,23 \cdot 10^8$	$9,6 \cdot 10^8$
					28	$1,57 \cdot 10^8$	$1,09 \cdot 10^9$	$1,25 \cdot 10^9$
					26	$2,24 \cdot 10^8$	$1,9 \cdot 10^9$	$2,13 \cdot 10^9$
					24	$3,29 \cdot 10^8$	$3,73 \cdot 10^9$	$4,06 \cdot 10^9$
					22	$5,0 \cdot 10^8$	$8,95 \cdot 10^9$	$9,45 \cdot 10^9$
20	$7,9 \cdot 10^8$	$3,87 \cdot 10^{10}$	$3,95 \cdot 10^{10}$					

Іншим проблемним вузлом торцевих зон ТГ є зубці крайніх пакетів осердя статора. При експлуатації ТГ встановлені випадки розшарування шихтованих пакетів і облом коронок зубців, що приводило до пошкодження ізоляції обмотки статора.

Розроблено модель зубця у вигляді призматичного стрижня, один з кінців якого жорстко прикріплений до ярма, а другий може вільно переміщатися. Під дією осьових вібрацій закріплений кінець вібує разом з ярмом, внаслідок чого зубець здійснює поперечні пружні коливання. Рівняння, що описує поперечні коливання призматичного стрижня з одним жорстко закріпленим кінцем має наступний вигляд:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \cdot dx = -\rho F \cdot dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad (14)$$

де EI – жорсткість при згинанні; ρ – густина матеріалу; F – площа поперечного перерізу стрижня. Отримано вираз для власної частоти коливань стрижня:

$$f_1 = \frac{3,515 \cdot r_n}{2\pi \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot E}{\rho}}, \quad (15)$$

де L – довжина; E – модуль пружності; I – момент інерції поперечного перерізу стрижня.

Після підстановки чисельних значень початкових даних у вираз (15), отримуємо залежність частоти власних коливань для першої її форми як функцію тільки довжини стрижня:

$$f_1 = 22,59 \cdot 10^6 / L^2 \quad (16)$$

При оцінці міцності зубця слід враховувати зміну характеристик шихтованої (клеювої) структури при тривалому циклічному навантаженні. Клеюві з'єднання внаслідок утомних явищ істотно знижують свою міцність. Розшарування зубця на частини має випадковий (стохастичний) характер і може досягнути такого стану, при якому зубець буде розшарований на окремі листи сталі.