

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ РОТОРІВ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ

Йож В.В., магістрант, Гайденко Ю.А., к.т.н., доц.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

Вступ. Як відомо, ротор турбогенератора є одним з найбільш навантажених вузлів. Найбільш відповідальним елементом ротора є обмотка збудження [1]. Вона виконує струмопровідну функцію, перебуваючи при цьому під дією відцентрових сил. Тепловий стан провідників обмотки, виготовлених з міді, ретельно контролюється в процесі експлуатації з метою запобігання перегріву ізоляції [2]. Перегрів може спричинити пошкодження обмотки (замикання витків, тріщини, блокування охолоджуючих каналів) і передчасний вихід з ладу всього ротора. Робота в маневрених режимах і при багаторазових пусках-зупинках призводить до частих змін циклів нагрівання та охолодження. Ці термічні цикли також можуть стати причиною деформації обмотки. У зв'язку з цим на етапі проектування проводиться попередній тепловий розрахунок ротора, основне завдання якого полягає у визначенні температури обмотки і теплових потоків [3]. Результати теплового розрахунку дають можливість оцінити тепловий стан обмотки в різних режимах роботи турбогенератора. За результатами аналізу теплового стану визначається ресурс обмотки.

Тепловий стан обмотки ротора залежить від величини тепловиділень в ній і інтенсивності та ефективності системи охолодження [4]. В турбогенераторах, що на даний час експлуатуються в якості охолоджуючого агента найчастіше використовується водень, який забезпечує в порівнянні з повітрям більш ефективне охолодження.

Серед основних методів розрахунку усталених та перехідних теплових процесів в електричних машинах є наступні: метод еквівалентних гріючих втрат, аналітичний метод (метод температурного поля), метод еквівалентних теплових схем заміщення.

Необхідність визначення еквівалентних параметрів теплових схем заміщення передбачає їх усереднення, що призводить до неможливості визначення локальних перегрівів в елементах конструкції. Це є основним з недоліків зазначених методів, оскільки від локальних перегрівів багато в чому залежить термін служби ізоляції та інших елементів конструкції.

Враховуючи вище сказане, створення ефективної уточненої методики для визначення температурного поля машини загалом та окремих її елементів зокрема, в різних режимах роботи є актуальною проблемою.

Метою роботи є огляд існуючих підходів до аналізу теплового стану турбогенераторів та вибір найоптимальнішого підходу, який дозволить не тільки достовірно оцінити тепловий стан об'єкту дослідження, а і виявити локальні зони перегріву ротору турбогенераторів, що працює в різних режимах.

Основна частина. Для досягнення більшої точності та деталізації картини теплового поля в турбогенераторі методика теплового розрахунку повинна враховувати всю складність геометрії конструкції, реальні фізичні

властивості матеріалів, джерела генерування тепла та циркуляцію охолоджуючих агентів всередині машини. Цим вимогам може задовільнити лише методика, яка заснована на використанні тривимірної (3D) математичної моделі, яка дозволяє сумісно розв'язувати задачі електромагнітного поля, розрахунку електричних кіл та теплового розрахунку. На даний час створення таких моделей можливе при використанні сучасних потужних програмно-обчислювальних комплексів, таких як SolidWorks та Comsol Multiphysics. Ці програмні пакети використовують метод скінчених елементів (МСЕ) та методи чисельного розв'язання диференціальних рівнянь. Складна геометрія машини вимагає значної геометризації різних вузлів при високих навантаженнях.

МСЕ характеризується значною гнучкістю в побудові дискретної моделі, що дає можливість зменшити загальну кількість вузлів сітки скінчених елементів та зекономити обчислювальні ресурси. Перевагою методу скінчених елементів також є простота задання граничних умов.

В роботі [5], автори застосували методику визначення теплового стану ротора з урахуванням місцевого тепловиділення і різних умов тепловідведення на окремих ділянках обмотки. Дана методика базувалася на використанні 3D-моделі, яка включала в себе секцію активної зони турбогенератора (без врахування лобових частин) з провідниками обмотки ротора. Результати дослідження продемонстрували значно кращі співпадіння даних розрахунку з експериментальними даними на відміну від результатів одержаних при використанні класичних методів теплового розрахунку. Це свідчить про доцільність застосування тривимірних моделей для аналізу теплового стану турбогенераторів.

Аналіз теплового стану на основі 3D-моделей проводиться в такій послідовності. На першому етапі створюється геометрія об'єкту дослідження. На другому етапі задаються властивості матеріалів, джерела генерування тепла та граничні умови. На третьому етапі відбувається триангуляція області розрахунку на скінченні елементи у вигляді тетраедрів. На четвертому етапі задаються умови руху охолоджуючого агента в середині об'єкту дослідження. Рух і теплообмін текучого середовища моделюються за допомогою рівнянь Нав'є-Стокса [6], що описують закони збереження маси, імпульсу і енергії цього середовища.

Так, в роботі [5] був знайдений уточнений розподіл коефіцієнта тепловіддачі по довжині витка, отриманий при моделюванні потоку повітря (рис. 1).

Проте, в моделі, представленій в роботі [5], істотним недоліком було те, що розглядалася лише окрема ділянка активної зони (секція активної зони на половину довжини ротора) без врахування взаємного впливу інших елементів конструкції на цю ділянку, а також без врахування всієї складності руху охолоджуючого агента, зокрема в лобових частинах.

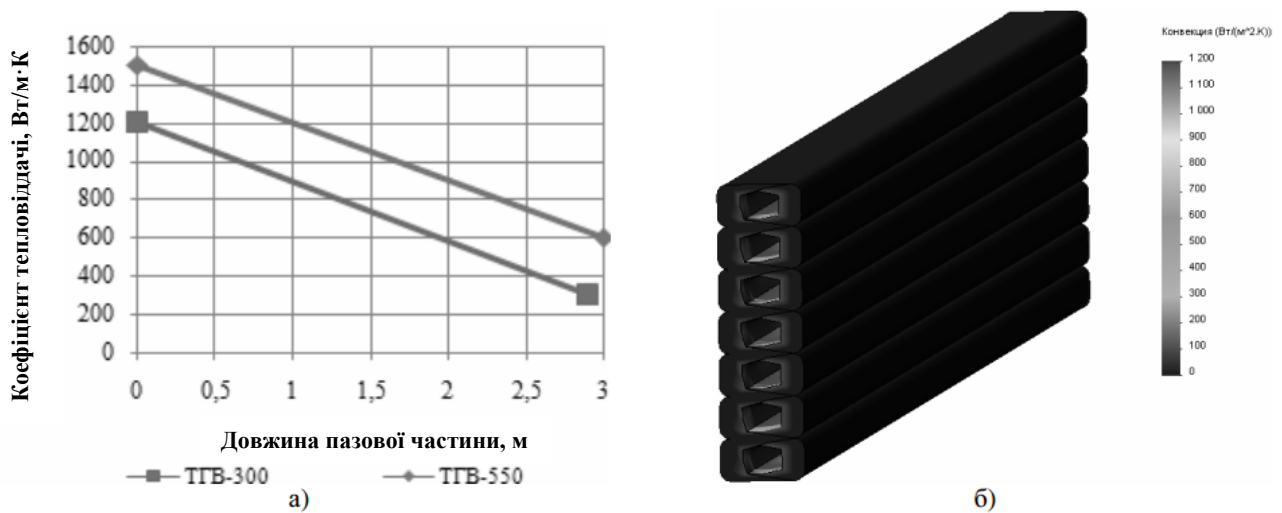


Рисунок 1 – Розподіл коефіцієнту тепловіддачі по довжині витка
 а) – для двох машин, що порівнюються; б) – на перерізі обмотки (1000мм)
 ротора генератора потужністю 550 МВт

Згаданий недолік може призвести до значного викривлення результатів, особливо при роботі турбогенератора в аномальних режимах роботи, таких як несиметрія струмів в обмотці статора, качання ротора, тощо. Тому для більш точного моделювання теплового стану потужних турбогенераторів в різноманітних режимах роботи доцільно використовувати тривимірну модель цілої конструкції турбогенератора враховуючи допоміжні елементи, такі як кріплення, стяжні призми, нажимні плити, тощо.

Висновок. Сучасний рівень розвитку комп'ютерних технологій та програмного забезпечення вже дозволяє відмовитися від застарілих наближених методів розрахунку теплового стану електричних машин та перейти до більш точних 3D-моделей, які забезпечують високу достовірність одержаних результатів та дозволяють виявити локальні зони перегріву ще на етапі розробки та проектування нових зразків електричних машин. Ця обставина є особливо важливою для таких коштовних об'єктів, як турбогенераторів електричних станцій.

Перелік посилань

1. Извехов В.И., Серихин Н.А., Абрамов А.И. Проектирование турбогенераторов – М.: Моск. энерг. ин-т, 2005. – 440 с.
2. Boldea, I. Synchronous generators / I. Boldea. – Boca Raton – 2006. – 441 p.
3. Филлипов, И. Ф. Теплообмен в электрических машинах : Учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
4. Вэйли Л. Температурное поле ротора турбогенератора с непосредственным охлаждением с подпазовыми и радиальными каналами: Дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 1997. – 15 с.
5. Кобзарь К.А., Гакал П.Г., Овсянникова Е.А., Третьяк А.В. Тепловое состояние обмотки ротора турбогенератора с непосредственным охлаждением водородом // Проблемы машиностроения. – 2015. – Т.18, № 4/1. – С. 30-35.