

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Дубініна Оксана Миколаївна

УДК 621.314.21

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
МАГНІТНОГО ПОЛЯ І ВИХРОВИХ СТРУМІВ
У КІНЦЕВИХ ЧАСТИНАХ ТУРБОГЕНЕРАТОРА З МЕТОЮ
ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО НАДІЙНОСТІ**

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків–2007

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електричних машин Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Міліх Володимир Іванович,
НТУ "ХПІ", завідувач кафедри електричних машин.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Шумілов Юрій Андрійович,
Національний технічний університет України
„Київський політехнічний інститут”, кафедра
електромеханіки, м. Київ

доктор технічних наук
Зозулін Юрій Васильович, головний
спеціаліст АТ МЕА „Елта”, м. Харків

Захист відбудеться " 11 " жовтня 2007 р. о 12 год. 35 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий " 8 " вересня 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Марков В.С

Актуальність теми. Стратегія розвитку турбогенераторобудування в Україні, згідно зі світовими тенденціями в цьому напрямку, характеризується переходом до виробництва турбогенераторів середньої потужності з повітряною системою охолодження.

Основною проблемою при експлуатації таких турбогенераторів є підвищений нагрів їх торцевих частин. Для подолання цього негативного явища потрібне глибоке вивчення та розкриття якісного характеру процесів торцевої зони, щоб визначити орієнтири для прийняття конструктивних рішень, що забезпечують надійну роботу турбогенераторів. Через дуже велику складність турбогенератора як об'єкту проектування, ефективним підходом є декомпозиція задачі проектування на ряд окремих підзадач, які вирішуються послідовно або паралельно. Фундаментом для наукового обґрунтування заходів по подоланню нагріву торцевих частин турбогенераторів є розрахунок магнітних полів та вихрових струмів у цій зоні, тому що саме через магнітні поля здійснюються головні процеси в турбогенераторі. Одними із найбільш навантажених в електромагнітному та тепловому відношеннях є кінцеві пакети осердя статора. Найнебезпечнішими з точки зору надійної роботи турбогенераторів є режими недозбудження та асинхронного ходу.

Таким чином, актуальність розглянутих у дисертації питань підтверджується необхідністю мати ефективний апарат розрахунку магнітних полів, який сукупно з аналізом експериментів надає змогу інтенсифікації охолодження, вибору найбільш ефективних засобів захисту деталей та вузлів кінцевої зони турбогенератора, встановленню раціональної геометрії, вибору матеріалів, що в свою чергу зменшує місцеві нагриви та сумарні втрати. Всі ці заходи підвищують надійність експлуатації турбогенератора, поліпшують його енергетичні характеристики та дозволяють спростити систему охолодження агрегату.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі електричних машин НТУ „ХПІ” у рамках координаційного плану НДР МОН України: держбюджетної теми „Розробка та удосконалення електричних та електродинамічних перетворювачів енергії з високими електромагнітними навантаженнями та криогенним охолодженням” (2002 р., ДР № 0100U001696); держбюджетної теми „Створення науково–технічного та учбово–методичного забезпечення для розвитку системи проектування електричних машин на основі чисельно–польових методів” (2006 р., ДР № 0106U001484); госпдоговірної теми з ДП завод „Електроважмаш” (м. Харків)”, (перспективний план НДВКР на 2006–2010 рр.), в яких здобувач була виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в створенні методики розрахунку магнітних полів та вихрових струмів в кінцевій частині турбогенераторів, яка дозволяє у найбільш повному обсязі враховувати конструкційні та експлуатаційні особливості цих турбогенераторів, тим самим даючи посыл до підвищення надійності їх роботи.

Реалізація поставленої мети містить в собі рішення наступних задач:

- аналіз методів розрахунку магнітних полів і вихрових струмів у кінцевій зоні турбогенератора та дослідження особливостей моделювання магнітного поля наприкінці осердя статора турбогенератора;
- створення розрахункової математичної моделі магнітного поля в торцевій зоні турбогенератора, яка дозволяє розраховувати магнітне поле не тільки в зоні лобових частин обмоток та на поверхні кінцевого пакету осердя статора, але й безпосередньо в середині цього пакету;
- розробка методики розрахунку магнітного поля в режимі навантаження в області кінцевих частин турбогенератора на базі методу плоско-ортогональних розрахункових моделей;
- вирішити задачу розрахунку вихрових струмів у кінцевих пакетах осердя статора турбогенератора та визначити напрямки можливостей їх зниження;
- дослідження можливостей зниження додаткових магнітних втрат потужності в кінцевих частинах турбогенератора на ґрунті розрахунку вихрових струмів;
- порівняння експериментальних даних з вимірювання параметрів магнітних полів в елементах конструкції торцевої зони турбогенератора з результатами чисельного моделювання.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в кінцевій зоні турбогенератора та їх чисельне моделювання.

Предмет дослідження – торцева зона потужного турбогенератора з повітряним охолодженням, як джерело додаткових магнітних втрат потужності та тепловиділення.

Методи дослідження – для опису векторного магнітного та векторного електричного потенціалів застосовувались методи теорії диференціальних рівнянь та елементів теорії електромагнітного поля; розв'язання основних рівнянь по розрахунку поля в торцевій зоні турбогенератора виконувались за допомогою чисельних методів скінченних різниць та скінченних елементів, а також теорії електричних машин; метод скінченних елементів реалізований за допомогою програми FEMM; методом дослідження математичних моделей є чисельний експеримент. Вірогідність досліджень підтверджена практикою та статистичною оцінкою результатів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- одержали подальший розвиток методи розрахунку магнітних полів, вихрових струмів та магнітних втрат потужності в кінцевій зоні турбогенератора за рахунок високої точності урахування геометрії торцевої зони;
- запропоновано математичну модель магнітного поля в торцевій зоні турбогенератора, яка враховує тривимірність поля за допомогою квазітривимірної моделі, а також різноманітні конструктивні фактори, що дозволяє удосконалити аналіз складових магнітної індукції, в тому числі аксіальної складової магнітної індукції в кінцевих пакетах, яка є причиною

виникнення вихрових струмів в листах осердя статора і, внаслідок цього, можливого їх перегріву;

- вперше проведено порівняльний аналіз граничних умов супутніх рішенням задачі розрахунку магнітного поля в торцевій зоні турбогенератора методом плоско–ортогональних розрахункових моделей;

- встановлено кількісний вплив на додаткові магнітні втрати потужності принципів конструкційних рішень в зубцевій зоні кінцевих пакетів осердя статора за допомогою порівняльного аналізу; при цьому розрахунковий аналіз дозволив цілеспрямовано обирати параметри елементів кінцевої зони та мінімізувати, таким чином, додаткові теплові виділення та нагрів цих елементів.

- удосконалено проведення безпосереднього розрахунку поля в режимі навантаження при сукупній дії обмоток статора та ротора, одночасно в комбінації з різноманітними варіантами урахування насичення магнітопроводу турбогенератора;

- розв'язано задачу про розрахунок магнітного поля в середині кінцевого пакету осердя статора.

Практичне значення одержаних результатів: викладені в дисертації результати роботи дозволили урахувати найважливіші фактори, які впливають на електромагнітні процеси в торцевій зоні турбогенератора. Розроблено методику порівняльного аналізу різноманітних структур скорочених зубців та кінцевих пакетів осердя статора на основі кількісних оцінок аксіальної складової магнітної індукції в цих пакетах та впливу активної довжини статора. Весь комплекс досліджень і розрахунків, виконаних дисертантом, розширює методичну основу вирішення проблеми підвищення рівню надійності та безпеки функціонування турбогенераторів, які проектує та випускає ДП Завод „Електроважмаш” (м. Харків).

Використання результатів досліджень при розрахунках дизель–генераторів типу Д80 дозволило знизити трудомісткість розрахунків шляхом мінімізації області розрахунку та рівня сіткової дискретизації, а також за рахунок нехтування мало впливовими факторами; виробити практичні рекомендації по зниженню додаткових магнітних втрат потужності в кінцевій зоні дизель–генераторів на ДП „Завод ім. Малишева” (м. Харків).

У дисертації представлені відповідні акти впровадження отриманих результатів.

Особистий внесок здобувача. Результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані особисто здобувачем. Серед них: формулювання задач дослідження магнітних полів та вихрових струмів в кінцевій зоні турбогенератора; розробка методів розв'язання задачі по розрахунку магнітного поля у вище названій зоні; обробка одержаних результатів; а також формування висновків за розділами і загальних висновків з усієї дисертаційної роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення й результати, отримані в ході виконання дисертаційної роботи доповідалися та

обговорювалися на міжнародній науково–технічній конференції "Інформаційна техніка та електромеханіка на порозі ХХІ-го століття" (м. Луганськ, 2001 р.); на ІХ міжнародній науково–практичній конференції "Наука і соціальні проблеми суспільства: людина, техніка, технологія, довкілля" (м. Харків, 2001 р.), на міжнародних симпозіумах "SIEMA – Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика" (м. Харків, 2001, 2002, 2003, 2006 роки); на VII міжнародній конференції "Проблеми сучасної електротехніки" (м. Київ, 2002 р.); на 4-й міжнародній науково–технічній конференції "Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці" (м. Львів, 2003 р.); на XII міжнародній науково–практичній конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (м. Харків, 2004 р.), на науково–технічній конференції з міжнародною участю "Електромашинобудування та електрообладнання" (м. Одеса, 2004 р.).

У повному обсязі дисертація доповідалася на спільному засіданні кафедр загальної електротехніки та електричних машин НТУ „ХП”.

Публікації. Результати дисертаційної роботи представлені в 11 наукових статтях, що опубліковані в фахових виданнях ВАК України.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків по роботі, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації – 175 сторінок, з них 18 ілюстрацій по тексту, 41 ілюстрація на 20 сторінках, 7 таблиць по тексту і 11 таблиць на 8 сторінках, список використаних літературних джерел із 131 найменування на 13 сторінках, 2 додатки на 2 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 досліджень та їхній зв'язок з науковими програмами, планами, подана інформація про апробацію роботи, наведено відомості про публікації та впровадження.

У першому розділі розглянута конструкція торцевої зони турбогенератора та особливості фізичних процесів в ній, наведені різноманітні варіанти елементів конструкції. Досліджено сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку турбогенераторів, проведено аналіз сучасних методів розрахунку магнітних полів в кінцевих частинах турбогенераторів, розглянуті вихрові струми в елементах конструкцій та нагрів.

В результаті порівняльного аналізу методів розрахунку магнітних полів в торцевій зоні турбогенератора було з'ясовано, що на сучасному етапі розвитку обчислювальної техніки та програмного забезпечення найперспективнішим і найбільш досконалим є метод скінченних елементів. Він дозволяє з високою мірою точності описувати складну геометрію кінцевої зони, апроксимувати

будь-яку границю області, тим самим ефективно вирішуючи задачу розрахунку дуже неоднорідних полів.

Спираючись на експериментальні дослідження та отримані результати, визначено основне коло питань, виникаючих в кінцевих частинах турбогенераторів при їх експлуатації. В аналізі зазначається, що теорія розрахунку магнітних полів значно розвинена, але її сучасний стан відносно кінцевої частини турбогенераторів ще не досяг своєї завершеності і саме на цьому базується необхідність подальшого наукового дослідження з метою підвищення надійності експлуатації турбогенераторів.

Аналізуючи літературні джерела, що стосуються дисертаційної роботи були розглянуті роботи таких відомих учених, як Апсіт В.В., Бабяк А.А., Бураков А.М., Вольдек А.І., Глебов І.А., Данілевич Я.Б., Демірчан К.С., Карацуба А.С., Косачевський В.І., Маміконянц Л.Г., Мілих В.І., Озерной Н.Ф., Поландова А.Н., Постніков І.М., Пташкін А.В., Піпко Р.М., Рапцун Н.В., Смородін В.І., Счастливий Г.Г., Станіславський Л.Я., Тітко А.А., Тер-Газарян Г.Н., Цветков В.А., Чечурін В.Л., Черемісов І.Я., Шидловський Ф.К., Шуйський В.П., Яковлев В.І., Campbell P., Erdelyi E.A, Guancial E., Gupta S.D., Ito K., Jeffreys R., Sarma M.S., Silvester P.P., Trutt F.C., Weiss J. та ін.

Проведений аналіз дозволив визначити мету та основні задачі наукового дослідження.

У другому розділі викладено загальну методикку та основні методи розрахунку магнітних полів в торцевих частинах турбогенераторів, яка реалізована на ПК за допомогою методу скінченних різниць.

Метод розрахунку заснований на вирішенні задачі двохвимірного магнітного поля, проте опосередньо враховує структуру електромагнітної системи генератора по третій координаті.

Область розрахунку в аксіальному напрямку містить у собі кінцеві пакети осердя статора та декілька основних пакетів, тому що далі осьова нерівномірність магнітного поля не проявляється. Елементи конструкції, які враховуються при розрахунках представлені на рис.1: 1,2 – бочка та вал ротора; 3,4 – зубцеві зони ротору та

Рис.1. Розрахункова область магнітного поля в торцевій зоні турбогенератора статора; 5 – спинка осердя статора; 6 – натискні пальці; 7 – електромагнітний екран; 8 – натискна плита; 9 – корпус; 10,11 – лобові частини обмоток ротора та статора.

Геометрично структура області розрахунку магнітного поля в поперечному перерізі турбогенератора задається двохвимірними масивами розподілу по комірках розрахункової полярної сітки питомого магнітного опору ν та аксіальної складової густини струму $J_z: \nu_{j,i}; J_{z,j,i}, j = 1, 2, \dots, j_m - 1; i = 1, 2, \dots, i_m - 1$, де i_m, j_m – кількість радіальних та дугових ліній сітки. Оскільки магнітопровід по аксіальній координаті не однорідний (рис.2) врахуємо шихтованість осердя статора за допомогою коефіцієнта заповнення - $k_{зун}$ та зазорів між пакетами. Для цього визначаємо еквівалентний питомий магнітний опір в тих комірках, які належать до шихтованого осердя статора

$$\nu_{e,j,i} = \nu_{j,i} \cdot k_{зун} + \nu_0 \cdot (1 - k_{зун}), \quad (1)$$

де ν_c, ν_0 – питомі магнітні опори сталевих листів та немагнітних прошарків між ними. Далі враховується неоднорідність осердь по аксіальній довжині, шляхом приведення осердь до ефективної довжини повітряного зазору – l_a :

$$\nu_{e,j,i} = \nu_{e,j,i} \cdot l_a; \quad (2)$$

де $k_{np,m}$ – коефіцієнт приведення; m – це індекс, який позначає ротор чи статор; $k_{\sigma,m}$ – коефіцієнт торцевого розсіяння магнітного поля. В інших частинах області розрахунку магнітна анізотропія відсутня, і ν беремо залежно від відповідного середовища. Магнітне поле описується рівнянням

$$\Delta A_z = -\nu_{e,j,i} \cdot J_{z,j,i}; \quad (3)$$

де A_z – аксіальна складова векторного магнітного потенціалу.

Розв'язання рівняння (3) досягалось чисельно за допомогою методу скінченних різниць. Результатом розрахунку є розподіл векторного магнітного потенціалу $A_z(r, \varphi)$, а потім на основі рівняння $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$ визначались складові магнітної індукції:

$$B_r = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial A_z}{\partial \varphi}; \quad B_\varphi = \frac{\partial A_z}{\partial r}; \quad (4)$$

Для масивного осердя та немагнітних частин за (4) отримуємо відразу заключні значення радіальної B_r та дотичної B_φ складових магнітної індукції, а у шихтованому осерді статора для сталевих листів робимо перетворення

обернене по відношенню до (1), щоб перейти до реальних значень:

По складових знаходимо модуль магнітної індукції $B = \sqrt{B_r^2 + B_\varphi^2}$. Отримана в результаті розрахунку картина магнітного поля представлена на рис.3 силовими лініями рівного векторного магнітного потенціалу.

Повздовжній переріз турбогенератора співпадає з координатною площиною (r, z) , яка є площиною симетрії ротора і на рис.2 проходить по лінії ab . Розрахунок поля проведено за допомогою методу скінченних різниць з використанням прямокутної сітки. Структуру області розрахунку геометрично задано двовимірними масивами питомого магнітного опору $\nu_{\omega,j,i}$ та тангенціальною складовою густини струму $J_{\varphi,j,i}$, $j = \overline{1; j_m - 1}$; $i = \overline{1; i_m - 1}$, де i_m , j_m – кількість вертикальних та горизонтальних ліній сітки.

Рис.2. Повздовжній переріз ТГ в його кінцевій частині

Рис.3. Поперечний переріз ТГ

Для того, щоб в повздовжньому перерізі обмежитись розглядом двовимірної структури магнітного поля приймаємо, що розрахункова модель з геометрією повздовжнього перерізу в ортогональній до нього площині має профіль, який відповідає „шару” магнітного поля між двома поруч розташованими силовими лініями в поперечному перерізі. На рис. 3 цей шар заштриховано, він безпосередньо обмежується лінією ab , по якій пройшов повздовжній переріз, а з іншого боку – найближчою силовою лінією a_1b_1 . Таким чином, розрахункова модель зі структурою повздовжнього перерізу має неоднорідну товщину $\omega(r)$, яка залежить від радіальної координати, так само як і виділений на рис.3 „шар” магнітного поля. Цю модель приводимо до плоскої моделі певної постійної товщини Ω , використовуючи функцію зведення

$$, \tag{5}$$

через яку реальні значення питомого магнітного опору $\nu_{\omega}(r, z)$ для повздовжнього перерізу перетворюються в еквівалентні

(6)

Функція зведення (5) природна на протязі осьової довжини осердя турбогенератора, тому що отримана за магнітним полем, розрахованому на рис.3 в їх межах. В торцевій зоні поза осердям (рис.2), але вище поверхні ротору, тобто над лінією gh , цю функцію визначено по формулі $\xi(r) = \frac{r}{r_{\Omega}}$, де r_{Ω} – радіус поверхні ротора, на якому прийнято базове значення $\omega(r) = \Omega$.

Завдяки формуванню по (6) еквівалентної плоскої моделі, магнітне поле описуємо двомірним диференційним рівнянням

(7)

де $A_{\varphi}(r, z)$ – складова векторного магнітного потенціалу, ортогональна площині (r, z) ; для шихтованих пакетів осердя статора введена двокоординатна анізотропія питомого магнітного опору з урахуванням їх коефіцієнта заповнення сталлю $k_{зи}$:

;, (8)

а на інших ділянках $\nu_{\Omega}^{(r)} = \nu_{\Omega}^{(z)} = \nu_{\Omega}$.

Необхідна структура силових ліній магнітного поля формується за допомогою комплексу граничних умов для векторного магнітного потенціалу, які встановлюються назовні області $abcdef$ (рис.2). Приймаємо, що за достатньо віддалені границі cd , de та ef магнітне поле не виходить, тому на лінії $cdef$ маємо умову Діріхле $\mathcal{A}_{\varphi} \text{ cdef} = C$, де $C = const$ (наприклад, $C=0$). На лініях bc и af встановлюємо умови Неймана: ; , які імітують віддалення магнітного поля вздовж осердя статора в тангенціальному напрямку і в симетричну половину осердя ротора (рис.3). Вздовж лівої границі ab (рис.2) встановлено умову, яка зв'язує магнітне поле в поперековому та повздовжньому перерізах

Ця умова встановлює такий самий розподіл напруженості магнітного поля вздовж границі ab , як і радіальної складової аналогічної величини $(H_r)_{ab}$ вздовж тієї ж лінії в поперековому перерізі. При цьому не виключається існування на лінії ab в повздовжньому перерізі осьової складової магнітної індукції, чим

досягається вирівнюючий розподіл поля між осердями статора і ротора, якщо границю ab розташовано дуже близько до неоднорідної торцевої структури магнітопровода турбогенератора (рис.2). В результаті розв'язку рівняння (7) отримуємо розподіл векторного магнітного потенціалу $A_\varphi(r,z)$ та визначаємо

складові магнітної індукції: $B_{z,\Omega} = \frac{\partial A_\varphi}{\partial r}$; $B_{r,\Omega} = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z}$, які відповідають плоскій

моделі з товщиною Ω . Тому виконуємо перехід до реального слою з нерівномірною товщиною $\omega(r)$ в межах аксіальної довжини осердь та з

меридіональною структурою в торцевій зоні за формулою $B_{r,\omega} = \frac{B_{r,\Omega}}{\xi(r)}$. В

шихтованих пакетах осердя статора безпосередньо для сталевих листів $B_{z,\omega,c} = B_{z,\omega}$, а радіальна складова магнітної індукції підлягає оберненому до (8)

перетворенню $B_{r,\omega,c} = B_{r,\omega} \frac{v_\Omega^{(r)}}{v_\Omega}$.

За складовими визначаємо модуль магнітної індукції $B_\omega = \sqrt{B_{r,\omega}^2 + B_{z,\omega}^2}$, де в шихтованому осерді замість $B_{r,\omega}$ беремо $B_{r,\omega,c}$. Таким чином, отримуємо модуль магнітної індукції $B_{\omega,c}$, за яким за допомогою кривих намагнічення сталей перераховуються значення v_c . Це робиться ітераційно і розрахунок магнітного поля завершується при досягненні певних критеріїв.

Було проведено порівняльний аналіз магнітного поля турбогенератора у зоні кінцевих пакетів осердя статора на основі кількісних оцінок аксіальної складової магнітної індукції та активної довжини статора. При цьому продемонстровано ті зміни електромагнітних параметрів осердя статора, які трапляються при скороченні та зміні форми зубців.

На рис.4. показано дві моделі з різними варіантами виконання торцевої структури: 1 – зубці скорочені зі сходинками; 2– не має скорочених зубців і сходинок, що притаманно для машин відносно невеликого рівню потужності. Значення магнітного потоку на силових лініях нормовані його максимальним значенням, зціпленим центральною частиною обмотки ротору, тобто дорівнює 1. По мірі розкриття кінцевої зони, тобто скорочення зубців – від моделі 1 до моделі 2 зменшується осьова складова магнітної індукції в кінцевих пакетах. Через розкриття зазору цей перехід скоротив активну довжину на половину ширини основного пакету. На рис.5. по радіусу r взято ділянки від розточки кінцевого пакету відповідної моделі до зовнішньої поверхні ярма осердя статора.

Рис.4. Варіанти структури кінцевих пакетів осердя статора

Рис.5. Розподіл аксіальної складової магнітної індукції: КрЗС – крайній зубець статора; ЯС – ярмо статора по по-верхні кінцевого пакету осердя статора для моделей 1 і 2.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень магнітного поля в кінцевих пакетах осердя статора та порівняння їх з розрахунками.

Продемонстровано, що фізично картина магнітного поля відповідає об'єктивному уявленню про структуру магнітних полів в торцевій зоні турбогенератора. Значення магнітної індукції та характеру кривих $B_z(r)$ відповідають тим даним, які відомі із теоретичних та експериментальних досліджень.

Четвертий розділ містить у собі визначення рівню магнітної індукції на ґрунті запропонованої оригінальної методики, отримано розподіл аксіальної складової магнітної індукції на поверхні кінцевих пакетів, а також проведено дослідження подальшого проникання B_z у глиб осердя. Розраховано магнітне поле всередині кінцевого пакета осердя статора, що має особливе значення, тому що усі попередні дослідження обмежувались тільки зоною лобових частин обмоток та поверхнею кінцевих пакетів осердя статора.

Розрахунки поля проводились з використанням даних конкретного турбогенератора потужністю 200 МВт без урахування вихрових струмів в елементах конструкції, при цьому магніторушійна сила обмотки ротору

складала 40 кА. Результати рівня магнітної індукції наведені в табл.1, де B_c , $B_{c\ max}$ – середнє та максимальнє значення модуля магнітної індукції; B_{zc} , $B_{z\ max}$ – теж саме для її аксіальної складової.

Вагоме збільшення магнітної індукції в першому пакеті демонструє „збір” магнітного поля в торцевій зоні, а „провал в подальших пакетах” – збільшеним зазором в кінцевій частині осердя статора і ротора. На рис.6 подано розподіл

осьової складової магнітної індукції на поверхні самого крайнього пакету. Саме за цими даними можна судити про можливий рівень вихрових струмів в листах осердя статора. Розрахунки також підтверджують, що без урахування реакції вихрових струмів аксіальна складова магнітної індукції достатньо швидко знижується вже по товщині самого крайнього пакету. Показано, що B_z має достатньо високе значення на бічних поверхнях основних пакетів осердя статора поблизу його розточки.

Таблиця 1

Магнітна індукція в сталі зубців осердя статора, Тл

Рис.6. Розподіл $B_z(r)$ на двох поверхнях крайнього пакету на висоті зубця h_z (1 – ліворуч, 2 – праворуч)

Проаналізовано граничні умови що до квазітривимірного варіанту розв'язку задачі аналізу магнітного поля торцевої зони турбогенератора на засаді методу плоско – ортогональних розрахункових моделей.

Обрано задовільний розмір області розрахунку та виявлено рівень впливу на поле властивостей елементів, які заповнюють цю зону. Зазначимо, що при використанні запропонованої методики область розрахунку може бути обмеженою в радіальному напрямку з одного боку віссю осердя ротора, а з протилежного – рівнем зовнішнього радіусу осердя статора. В аксіальному напрямку з боку осердя статора вздовж його глибини достатньо взяти 1,5– 2,5 його основних пакети, а з боку лобових частин – треба доходити до зовнішнього корпусу турбогенератора.

Такі результати розрахунку, як магнітна індукція в сталі пакетів осердя статора, чутливі до рівня сіткової дискретизації розрахункової області. Це насамперед стосується максимальних значень індукції, бо середні значення підлягають впливу сіткової дискретизації в значно меншому ступіні. Вагомий вплив на магнітне поле має урахування насичення та анізотропії магнітних властивостей осердь. Також впливовою є екрануюча дія електропровідних елементів конструкції. Причому в кінцевих пакетах зубцевої зони осердя статора вплив екрану та натискного фланцю веде до збільшення осьової складової магнітної індукції, а в ярмі вона зводиться до мінімуму. Натискні пальці помірно знижують величину цієї складової індукції в зубцевій зоні.

Також у цьому розділі було проведено розрахунок магнітного поля в торцевій зоні в режимі навантаження з урахуванням насичення магнітопроводу, використовуючи викладену в другому розділі методику. Для обмотки статора відсутні вісі симетрії через двохшарову структуру та скорочення. Тому мінімальною областю розрахунку в поперечному перерізі є полюсне ділення за граничних умов, які враховують періодичну структуру поля по кутовій координаті, а саме $A_z \left[0, 2\pi \right] = -A_z \left[\pi, 3\pi \right]$.

У фазі A-A' обмотки статора завдавали миттєве значення струму, яке дорівнює амплітудному значенню $i_A = I_{ma} = \sqrt{2}I_a$, а в фазах B-B' і C-C' – відповідні значення: $i_B = I_{ma} \cdot \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right)$, $i_C = I_{ma} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)$. Отримавши розподіл $A_z \left[\varphi, \varphi + 2\pi \right]$ визначається магнітне потокозціплення фази A-A' з урахуванням потокозціплень інших фаз $\Psi_{SA} = \frac{2}{S_A} \int A_z dS$, де S_A - площа поперекового перерізу сторін секцій цієї фази в межах полюсного ділення. Визначаємо індуктивність фази обмотки статора $L_a = l_a w_a \frac{\Psi_{SA}}{I_{ma}}$ та її індуктивний опір $X_d = 2pfL_a$.

Тоді діючі значення ЕРС від поля реакції якоря в фазі A-A' буде $E_s = X_d I_a$, а від поля обмотки ротора $E_{a ном} = \sqrt{U_\phi \cos^2 \varphi + E_s + U_\phi \sin^2 \varphi}$. Оскільки в розглянутому турбогенераторі характеристика холостого ходу наближається до прямолінійної МРС обмотки ротора (на полюс) в номінальному режимі буде

такою $F_{f ном} = F_{fx} \frac{E_{a ном}}{U_\phi}$, а амплітуда МРС обмотки статора -

$F_s = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_a w_a k_{wl}$, де k_{wl} – обмоточний коефіцієнт. За отриманими даними

будуємо векторну діаграму (рис.7) та визначаємо кутові зміщення: фазовий зсув $\varphi = \arccos \frac{E_s}{U_\phi}$, при $\cos \varphi = \alpha$; кут навантаження $\theta = \arctg \frac{E_s + U_\phi \sin \varphi}{U_\phi \cos \varphi} - \varphi$ і кут

зсуву вісей намагнічення обмоток ротора та статора $\beta = \varphi + \theta + 90^\circ$. Потім розраховуємо магнітне поле обмотки ротора в повздовжньому перерізі, яке зорієнтовано в напрямку дії МРС F_{fx} його обмотки. Аналогічні розрахунки проводимо для обмотки статора, але зараз повздовжній переріз перетинається з поперековим перерізом по лінії дії МРС F_s , яка зрушена на кут β (рис.8).

Для того, щоб отримати магнітне поле в торцевій зоні турбогенератора в

Рис.7. Векторна діаграма ЕРС обмотки статора і МРС обмоток ротора і статора.

Рис.8. Зсув МРС обмотки статора на кут ν .

режимі навантаження був використаний метод накладання полів обмоток статора і ротора. Розрахункові площини цих полів співпадають з вісями прикладення амплітудних значень ЕРС відповідних обмоток, тому отримані розподіли векторного магнітного потенціалу для обмотки ротора $A_{\phi x}(r, z)$ та обмотки статора $A_{\phi s}(r, z)$ розглядалися як амплітудні та, які змінюються за гармонійним законом по кутовій координаті ψ з періодом в два полюсних ділення. Тоді сумування полів обмоток ротора та статора можна проводити, як для гармонійних функцій з урахуванням зсуву площин їх амплітудних значень на кут ν . Складові магнітної індукції B_z і B_r отримуємо за розподілом векторних магнітних потенціалів $A_{\phi x}$ і $A_{\phi s}$, а потім сумуємо їх:

$$B_{zN} = \sqrt{B_{zXном}^2 + 2 \cdot B_{zXном} \cdot B_{zS} \cdot \cos\beta + B_{zS}^2};$$

$$B_{rN} = \sqrt{B_{rXном}^2 + 2 \cdot B_{rXном} \cdot B_{rS} \cdot \cos\beta + B_{rS}^2}.$$

При окремих розрахунках магнітних полів двох обмоток об'єктивно урахування насичення проблематично. Тому потрібен розрахунок магнітного поля в торцевій зоні турбогенератора в режимі навантаження при сукупній дії обох обмоток з супутнім урахуванням насичення через перерахунок питомого магнітного опору сталевих осердь по кривих намагнічення. Використовуючи рис.8 знаходимо проекції МРС обмоток ротора $F_{fном}$ та статора F_s на вісь, по якій направлена МРС обмотки ротора F_{fx} в режимі ХХ: $F_{f\phi} = F_{fном} \cos\theta$; $F_{S\phi} = F_s \cos\gamma$. Спад магнітної напруги на лінії ab (рис.9) визначаємо за формулою $U_m = k_{Um} (F_{f\phi} - F_{S\phi})$. Граничні умови аналогічні наведеним у другому розділі. Розрахунки проводимо на основі рівняння (7), отримуючи в результаті розподіли питомого магнітного опору та векторного магнітного потенціалу з урахуванням насичення.

Розглянутий принцип об'єднання у спільній розрахунковій площині магніторушійних сил обмоток статора і ротора, зорієнтованих по різних площинах, ефективніший за відомий метод накладання, тому що дозволяє розраховувати магнітне поле в торцевій зоні турбогенератора в режимі навантаження з урахуванням насичення магнітопроводу.

Рис.9. Магнітне поле в кінцевій зоні турбогенератора р режимі навантаження

В п'ятому розділі розв'язано задачу розрахунку вихрових струмів і додаткових магнітних втрат потужності в сегментах крайнього пакета осердя статора чисельним методом з урахуванням реальної конструкції турбогенератора в цілому і його елементів. Проведено аналіз розподілу вказаних втрат по площині і товщині сегментного пакета у різних варіантах його виконання. Основою для розрахунку вихрових струмів є методика чисельного розрахунку магнітного поля кінцевої зони в режимі навантаження, яка спирається на розподіл аксіальної складової в крайньому пакеті. При цьому використовується не тільки магнітне поле на поверхні цього пакету, що є недоліком багатьох попередніх методик, а по всій його товщині.

Через нерівномірність розподілу магнітного поля в сегменті кінцевих пакетів осердя статора турбогенератора вихрові струми та додаткові магнітні втрати потужності теж розподілені вкрай нерівномірно. На зубцевий шар припадає приблизно половина втрат. Через введення просічок в ярмі можна знизити в цілому сумарні додаткові магнітні втрати потужності приблизно на 10%, порівняно з конструкцією без просічок, а в зоні на висоті цих прорізів вони зменшуються в 1,5 рази. Середня густина вихрових струмів по товщині пакету змінюється в 5,1 рази, питомі додаткові магнітні втрати потужності – в 14,8 раз, тоді як збуджуючий магнітний потік – тільки в 3,4 рази.

Виявлено кількісний вплив на додаткові магнітні втрати потужності принципів конструкційних рішень в зубцевій зоні кінцевих пакетів осердя статора. В середньому густина додаткових магнітних втрат потужності по товщині пакету змінюється в 7 разів, а по висоті зубця в шарі пакету з боку торцевої зони, додаткові втрати відрізняються приблизно в 19 разів, а в протилежному шарі значно менше – в два рази. В дисертаційній роботі проводилися дослідження конструкції турбогенератора ТГВ – 200М і було показано, що введення прорізу в зубцях кінцевого пакету призводить до зниження додаткових втрат потужності в 3,2 рази, при цьому ефективність прорізу підвищується у відносно довгих зубцях. Скорочення зубців крайнього пакету осердя статора у вигляді сходинок призводить до зменшення додаткових втрат потужності в 1,8 рази.

Проведено чисельний аналіз втрат потужності в сегменті кінцевого пакета статора турбогенератора з урахуванням обертання магнітного поля.

Отримано залежності питомих додаткових магнітних втрат потужності в поверховому шарі сегмента кінцевого пакету осердя статора турбогенератора від

обертаючого магнітного поля, та проведено порівняльний аналіз з пульсуючим магнітним полем.

У додатках наведені акти із застосування розробок та результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена важливій та актуальній науково–практичній задачі, що полягає в розробці науково обґрунтованої методики аналізу магнітного поля в кінцевих частинах турбогенератора для виявлення резервів підвищення його надійності.

Робота турбогенератора визначається магнітним полем, тому безпосереднє використання результатів його розрахунку є найбільш перспективним шляхом розвитку що до проектування та удосконалення турбогенераторів.

Основні наукові й практичні результати, одержані в роботі, полягають у такому:

1. Проаналізовано існуючі методи розрахунку магнітних полів у торцевій зоні турбогенераторів, при цьому доведено, що найбільш перспективними для створення універсальної методики розрахунку є чисельні методи скінченних різниць та скінченних елементів.

2. Запропановано розрахункову математичну модель магнітного поля в торцевій частині турбогенератора, яка дозволяє отримати не тільки якісні, але і кількісні оцінки впливаючих факторів. Вона відрізняється від відомих моделей такого типу урахуванням реальної конструкції торцевої зони та великої кількості впливаючих факторів, у тому числі по третій координаті, тобто враховуючи факт тримірності магнітного поля. Така модель дозволяє проводити конкретні розрахунки магнітних полів в торцевій зоні турбогенератора з наступним аналізом розподілу складових магнітної індукції та, особливо, аксіальної складової B_z в кінцевих пакетах, що викликає основні проблеми – збуджує вихрові струми в листах осердя статора, які призводять до відповідних тепловиділень та нагріву локальних зон.

3. Доведено, що розрахунок магнітного поля у режимі навантаження необхідно проводити при сукупній збуджуючій дії обмоток ротора та статора з супутнім урахуванням насичення через перерахунок питомого магнітного опору сталевих осердь за допомогою кривих намагнічення.

4. Розв'язано задачу знаходження вихрових струмів у кінцевому пакеті осердя статора, яка має за основу розрахунок магнітного поля в режимі навантаження. Отримано картину розподілу вихрових струмів, який дозволив цілеспрямовано робити просічки в зубцях осердя статора та скорочувати їх.

5. Показано, що наскісні діагональні просічки в зубці осердя статора за обмеженням вихрових струмів в незначній мірі поступаються прямим. Але при склеюванні, таким чином, що в сусідніх листах просічки виконано в протилежних діагональних напрямках, підвищується монолітність зубців. Це в свою чергу збільшує довговічність осердя та призводить до підвищення надійності турбогенератора в цілому. Упровадження більш глибоких просічок на

дні паза дозволяє скоротити просічки в зубці і навпаки подовжені просічки зубця дають можливість зменшити довжину просічки на дні паза. Це спрощує конструкцію осердя, веде до його зміцнення, цим підвищуючи надійність турбогенератора.

6. Досліджено розподіл додаткових магнітних втрат потужності в сегменті кінцевого пакету осердя статора турбогенератора. Виявлено, що на зубцевий шар припадає приблизно половина всіх втрат та показано, що при впровадженні прорізів в ярмі підсумкові втрати потужності знижуються приблизно на 10%.

7. Для підтверження та перевірки методики розрахунку магнітних полів порівняно експериментальні дані по турбогенератору ТГВ–200–М в режимі ХХ з результатами чисельного моделювання. Отримані розрахункові дані мають розбіжність з експериментальними не більше ніж на 5–6%.

8. Впровадження отриманих результатів дозволило знизити додаткові магнітні втрати потужності в кінцевій зоні дизель–генераторів, які випускає ДП ”Завод ім. Малишева” (м. Харків), а також більш цілеспрямовано обирати параметри елементів кінцевої зони турбогенераторів, які виробляються на ДП завод „Електроважмаш” (м. Харків), що призводить до підвищення рівня їхньої надійності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Милых В.И., Черемисов И.Я., Дубинина О.Н. Анализ магнитного поля возбуждения турбогенератора в его торцевой зоне // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2001.– №5. – С. 100–105.

Здобувачем отримано та проаналізовано розподіл аксіальної складової магнітної індукції на різних радіальних рівнях осердя статора, а також на обох поверхнях кінцевого пакету по висоті зубця.

2. Милых В.И., Дубинина О.Н. Формирование расчетной модели магнитного поля в торцевой зоне турбогенератора на основе анализа факторов влияния // Вісник Східноукраїнського національного університету. Луганськ: СНУ, 2001.– №3(37). – С. 48–55.

Здобувачем створено розрахункову модель магнітного поля в торцевій частині турбогенератора.

3. Милых В.И., Дубинина О.Н., Поляков И.В. Анализ факторов влияния на магнитное поле в торцевой зоне турбогенератора // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2001. – №17.–С.105–109.

Здобувачем проведено порівняльний розрахунковий аналіз магнітного поля в торцевій зоні турбогенератора для вибору розмірів області розрахунку, та виявлення рівню впливу на магнітне поле властивостей елементів, заповнюючих цю зону.

4. Данько В.Г., Милых В.И., Дубинина О.Н. Сравнительный анализ магнитного поля турбогенератора в зоне крайних пакетов при варьировании их структурой // Вісник Східноукраїнського національного університету. –Луганськ: СНУ, 2002.– №1(47). – С. 69–76.

Здобувачем було виконано розрахунки магнітного поля та проведено аналіз залежності аксіальної складової магнітної індукції та активної довжини статора від скорочення та зміни форми зубців.

5. Милых В.И., Дубинина О.Н. Сравнительный анализ граничных условий при численном расчёте магнитного поля в концевой зоне турбогенератора методом плоско–ортогональных расчетных моделей // Технічна електродинаміка.– Київ: ІЕД НАНУ, 2002.– Тем. вип. „Проблеми сучасної електротехніки”, ч. 5.– С. 10–15.

Здобувачем реалізовано методика розв'язання задачі по розрахунку магнітних полів в кінцевій зоні турбогенератора та обґрунтовано отримані результати.

6. Милых В.И., Дубинина О.Н. Сравнительный анализ вихревых токов и потерь мощности в зубцах крайнего пакета статора в турбогенераторе // Вісник національного університету „Львівська політехніка”. – Львів: НУ „Львівська політехніка”, 2003.– №485. – С.93 – 99.

Здобувачем було розроблено методика розрахунку вихрових струмів в торцевій частині турбогенератора, що має в основі чисельний розрахунок магнітного поля в режимі навантаження.

7. Милых В.И., Дубинина О.Н. Численный расчёт магнитного поля в концевой зоне турбогенератора в режиме нагрузки // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2003. – №1. – С. 64–69.

Здобувач дослідила урахування насичення магнітопроводу при розрахунку магнітного поля в торцевій зоні турбогенератора в режимі навантаження.

8. Милых В.И., Дубинина О.Н. Расчёт вихревых токов и потерь мощности в сегментах крайнего пакета статора турбогенератора // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2004. – №1. – С.44–48.

Здобувач дослідила вплив просічок в ярмі осердя статора на питомі величини вихрових струмів та додаткових магнітних втрат потужності в шарах сегменту осердя.

9. Милых В.И., Дубинина О.Н. Численный анализ потерь мощности в сегменте крайнего пакета статора турбогенератора с учётом вращения магнитного поля // Електромашинобудування та електрообладнання. – Київ: Техніка, 2004. – №62. – С. 125–129.

Здобувачем отримано залежності питомих додаткових магнітних втрат потужності в поверховому шарі сегмента кінцевого пакету осердя статора турбогенератора від обертаючого магнітного поля, та проведено порівняльний аналіз з пульсуючим магнітним полем.

10. Дубинина О.Н. Современное состояние, проблемы и перспективы развития турбогенераторов // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2004. – №21. – С.55–60.

11. Дубинина О.Н. Сравнительный анализ методов расчёта магнитных полей в концевой зоне турбогенераторов // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2006. – №27, тем вип. – С.– 30–36.

АНОТАЦІЯ

Дубініна О.М. Чисельне моделювання магнітного поля і вихрових струмів у кінцевих частинах турбогенератора з метою підвищення його надійності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – Електричні машини й апарати. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2007.

Дисертація присвячена підвищенню надійності турбогенератора за допомогою розрахунку магнітних полів та вихрових струмів у його торцевій зоні шляхом математичного моделювання на основі методів скінченних різниць та скінченних елементів, з урахуванням анізотропії та складної конструктивної форми елементів кінцевої зони.

Основні результати роботи, які одержані у вигляді рекомендацій та методик розрахунку магнітних полів, вихрових струмів і додаткових магнітних втрат потужності в торцевій зоні турбогенератора, реалізовано у вигляді комп'ютерних програм. Вони можуть бути використані для оптимізації розрахунків та при складанні програми комплексної системи проектування при розробці нових турбогенераторів. Використання запропонованої моделі та методики дозволяє чисельно вирішувати польові задачі у кінцевих частинах турбогенераторів, що необхідно для забезпечення визначення розмірно–конструкційних параметрів торцевої зони, які відповідають заданим техніко–експлуатаційним параметрам та характеристикам конкретної машини.

Сформульовано практичні рекомендації відносно конструкційного виконання кінцевих частин турбогенераторів і можливостей зниження додаткових теплових виділень та нагріву торцевої зони.

Ключові слова: надійність турбогенератора, магнітне поле, інформаційні технології, вихрові струми, додаткові магнітні втрати потужності.

АННОТАЦІЯ

Дубинина О.Н. Численное моделирование магнитного поля и вихревых токов в концевых частях турбогенератора с целью повышения его надёжности. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электрические машины и аппараты. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2007.

Диссертация посвящена повышению надёжности турбогенератора с помощью расчёта магнитных полей и вихревых токов в его торцевой зоне путём математического моделирования на основе методов конечных разностей и конечных элементов, с учётом анизотропии и сложной конструктивной формы элементов концевой зоны. Рассмотрены вопросы дополнительных магнитных потерь мощности в сегментах крайнего пакета статора турбогенератора.

Аналитический обзор технической литературы, относящийся к методам расчёта магнитных полей в концевой зоне турбогенераторов показал: несмотря на большое количество работ проблема концевых частей остаётся открытой.

Изложена общая методика и основные методы расчёта магнитного поля в торцевой зоне турбогенератора, реализованная на ПК с помощью метода конечных разностей. Был проведен сравнительный анализ магнитного поля турбогенератора в зоне концевых пакетов сердечника статора на основе количественных оценок аксиальной составляющей магнитной индукции в концевых пакетах и активной длины статора. При этом продемонстрированы те изменения электромагнитных параметров сердечника статора, которые происходят при укорочении и изменении формы зубцов.

Приведены результаты экспериментальных исследований и сравнение их с расчётами, выполненными с помощью метода конечных элементов.

Определён уровень магнитной индукции на основе предложенной оригинальной методики, получено распределение аксиальной составляющей магнитной индукции на поверхностях концевых пакетов, а так же проведены исследования по дальнейшему проникновению B_z в глубину сердечника статора. Практически рассчитано магнитное поле внутри крайнего пакета.

Проанализированы граничные условия для квазитрёхмерного варианта решения задачи анализа магнитного поля в торцевой зоне. Выбран приемлемый размер области расчета и выявлен уровень влияния на поле свойств элементов, заполняющих указанную зону. Рассмотрено магнитное поле при совместном возбуждающем действии обмоток ротора и статора в режиме нагрузки.

Представлена методика, по ней составлена программа и выполнены расчёты вихревых токов и потерь мощности в сегментах концевых пакетов статора турбогенератора. Выявлено количественное влияние на дополнительные магнитные потери принципиальных конструктивных решений в зубцовой зоне крайних пакетов сердечника статора. Показано, что косые диагональные просечки в зубце по ограничению вихревых токов незначительно уступают прямым. Но при склейке, таким образом, что в соседних местах просечки выполнены в противоположных диагональных направлениях повышается монолитность зубцов. Что в свою очередь увеличивает долговечность сердечника, и ведёт к повышению надёжности турбогенератора. Введение более высоких просечек над дном паза позволяет укоротить просечки в зубце и наоборот удлинённые просечки зубца позволяют сократить просечки над дном паза. Это упрощает конструкцию сердечника, ведёт к его упрочнению и повышению надёжности турбогенератора. Проведен численный анализ потерь мощности в сегменте концевого пакета статора турбогенератора с учётом вращения магнитного поля.

Результаты работы, полученные в виде рекомендаций и методик расчёта, магнитных полей и вихревых токов в торцевой зоне турбогенератора, реализованы в виде компьютерных программ. Они могут использоваться для оптимизации расчётов и при составлении комплексной системы машинного

проектирования при разработке новых турбогенераторов. Использование предлагаемой модели и методики позволяет численно решать полевые задачи в торцевой зоне турбогенератора, что необходимо для обеспечения определения размерно–конструктивных параметров, отвечающих их заданным технико–эксплуатационным параметрам и характеристикам.

В итоге результаты диссертационной работы нашли практическое применение в разработке Перспективного плана НИОКР на 2006–2010 г.г. и в процессе решения насущных задач повышения конкурентоспособности выпускаемых турбогенераторов на ГП Завод "Электротяжмаш", а так же использовались при расчётах дизель–генераторов типа Д80, изготавливаемых на ГП "Завод им. Малышева".

Ключевые слова: надёжность турбогенератора, магнитное поле, информационные технологии, вихревые токи, дополнительные магнитные потери мощности.

SUMMARY

Dubinina O.N. Numerical modeling of the magnetic field and eddy currents in the end area of turbo generator with the purpose of rising its reliability. – Manuscript.

The thesis is presented for Ph.D degree, in the specialty 05.09.01 – electric machines and devices. – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, 2007.

The thesis is devoted to the rising the reliability of turbo generator using calculation of the magnetic fields and eddy currents in the end area of turbo generator by the way of mathematical modeling based on the methods of finite difference and finite elements in view of anisotropy and complex constructive form of the elements of the end area.

The main results of the work obtained in the form of recommendation and methods of calculation of magnetic fields, eddy currents and additional magnetic power wastes in the end area of turbo generator were realized in the form of computer programs. They can be used for calculation optimization and during making the complex system for designing and development new turbo generators. The use of offering models and methods allows to solve the fields problems in the end area of turbo generator in numerical way, which is necessary for providing the definition of the size–construction parameters in the end area, which correspond to the given technical and operational parameters and characteristics of the particular machine.

The practical recommendation for the construction of the end area of turbo generators and possibilities for decreasing the additional thermal allocations and heating of the end area were formulated.

Key words: turbo generator reliability, magnetic field, information technologies, eddy currents, additional magnetic power loss.