

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТА ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ В КІНЦЕВИХ КЛИНАХ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА В АСИНХРОННИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Ю.М. Васьковський¹, докт. техн. наук, О.І. Титко², чл.-кор. НАН України, О.І. Турчин³, магістр, С.С. Цивінський⁴, асистент

1,2 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна;

3,4 – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

Розроблено математичну модель електромагнітних та теплових процесів, що виникають у кінцевих клинах роторів потужних турбогенераторів в асинхронних режимах роботи. Показано, що зазначені процеси супроводжуються перегріваннями клинів. Запропоновано технічні рішення з метою усунення негативних наслідків такого перегрівання. Бібл. 5, рис. 5.

Ключові слова: турбогенератор, кінцеві клини ротора, асинхронний режим роботи, вихрові струми, теплові процеси.

Вступ. Важливими елементами конструкції ротора турбогенератора (ТГ) є клини ротора, які закріплюють у пазах ротора обмотку збудження. З огляду на велику довжину бочки ротора довжина пазового клина ротора є значно меншою і складає 0,35...0,5 м. В асинхронних і несиметричних режимах роботи ТГ по клинах, які виготовляються з електропровідного металу, протікають вихрові струми, що викликають додаткове нагрівання клинів. Особливо складний характер електромагнітні і теплові процеси мають у клинах, розташованих на торцях ротора, які називаються *кінцевими клинами* ротора. На торцях ротора напрям протікання вихрових струмів змінюється на інший: якщо в лінійній (активній) частині ротора вихрові струми протікають уздовж осьової довжини клинів і зубців, то в торцевих зонах струми, замикаючись на полюсній поділці ротора, протікають у тангенціальному напрямку, тобто поперек зубців і клинів. Причому перетікання струмів від зубця до клина і навпаки відбувається через обмежені за площею контактні поверхні – плечики клинів, тільки на яких існує щільний механічний і електричний контакт між клином і зубцем. Досвід експлуатації потужних ТГ свідчить, що локальна густина струму і тепловиділень на контактних поверхнях сягає великих значень. Це призводить до ряду негативних наслідків: небезпечного для ізоляції обмотки ротора локального нагрівання клинів, підгорання і навіть приварювання клинів до зубців ротора тощо.

Характер процесів суттєво залежить від режиму роботи ТГ, що розглядається. В несиметричних режимах роботи частота вихрових струмів ротора складає 100 Гц. При такій частоті глибина проникнення вихрових струмів в електропровідні зубці і клини складає всього декілька міліметрів, а густина струму в контактних зонах сягає небезпечних значень. Особливості процесів, що протікають у кінцевих клинах у несиметричних режимах, вже були досліджені в роботах [1, 2], запропоновані нові конфігурації кінцевих клинів, що зменшують їх локальне перегрівання в несиметричних режимах [5]. У даній роботі аналізуються процеси в кінцевих клинах в асинхронних режимах.

В асинхронних режимах роботи ТГ у роторі протікають значні за величиною вихрові струми частоти ковзання, оскільки згідно з діючими стандартами ТГ в асинхронних режимах для забезпечення безперервності електропостачання повинен досить тривалий час (15 хв) нести значне активне навантаження. Особливе значення проблема, що розглядається, має для турбогенераторів нового типу – синхронно-асинхронних [4], для яких асинхронний режим є штатним. З огляду на мале значення ковзання ротора ТГ в асинхронному режимі ($s = 0,001...0,003$ в.о.) частота вихрових струмів складає не більше ніж 0,25 Гц, а глибина їх

проникнення у ротор перевищує висоту зубців ротора. Тому вихрові струми ротора частоти ковзання протікають не тільки в масивних сталевих зубцях і в дюралюмінієвих клинах ротора, але й в ярмі ротора. Оскільки поперечні вихрові струми через пази ротора протікати не можуть, вони обминають пази ротора і протікають по двох паралельних шляхах. Одна частина струмів обминає паз ротора зверху – поперечні вихрові струми піднімаються вгору по зубцю до клина та перетікають через контактні поверхні до наступного зубця, а інша частина струмів протікає під дном паза. У результаті в асинхронних режимах ТГ втрати та нагрівання кінцевих клинів ротора збільшуються у порівнянні з нагріванням лінійних клинів, що розташовані в активній зоні ротора.

Вихрові струми можуть замикатися також і через бандажні кільця обмотки ротора, які консольно посаджені на торці бочки ротора. Але, як доведено дослідженнями, з урахуванням значної глибини проникнення вихрових струмів у ротор, частка струмів, що течуть через бандажні кільця в асинхронних режимах, є дуже незначною, і нею можна нехтувати.

Таким чином, протікання вихрових струмів у асинхронних режимах ТГ супроводжується додатковим нагріванням усіх елементів конструкції ротора. Але найбільш вразливими до нагрівання є кінцеві клини ротора, теплові втрати в яких характеризуються до того ж локальною неоднорідністю. Тому актуальним є обґрунтування технічних рішень і рекомендацій, спрямованих на зменшення негативних наслідків зазначених процесів. Таке обґрунтування можливо дати за результатами математичного моделювання взаємопов'язаних електромагнітних і теплових процесів у зоні кінцевих клинів ротора.

Математична модель. Розподіл поля і вихрових струмів у торцевій зоні ротора має складний тривимірний характер. Зважаючи на трудомісткість тривимірного польового аналізу, здійснимо аналіз поля у двовимірному наближенні. Розрахункову область обмежимо однією зубцевою поділкою ротора. На рис. 1 *а* зображено зубцеву поділку (вид з боку торця ротора), а на рис. 1 *б* – збільшений її фрагмент (позначено: 1 – масив ротора, 2 – клин, 3 – обмотка збудження в пазу ротора, 4 – електрична ізоляція обмотки збудження). Вважатимемо, що на суміжних зубцевих поділках поле розподілено ідентично. Струми розтікаються в

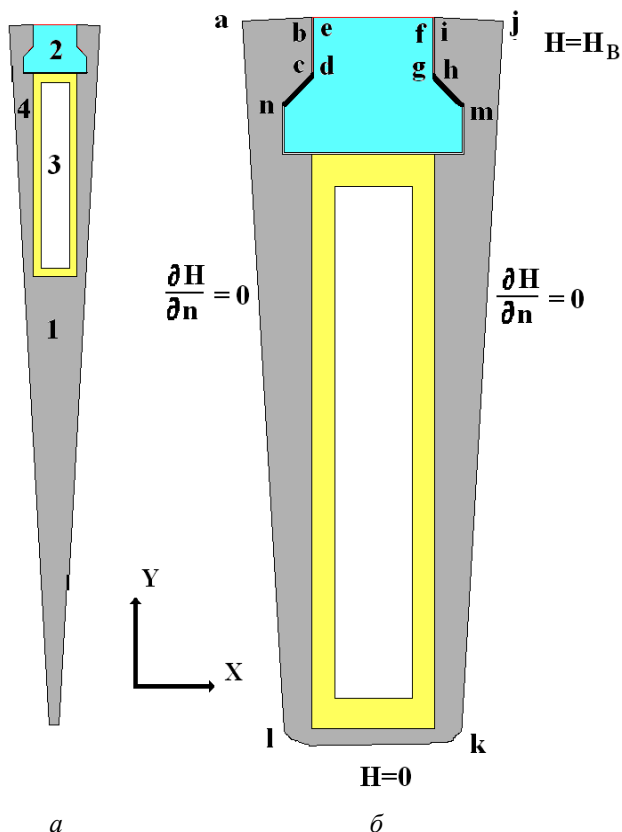


Рис. 1

площині креслення. Електричний контакт між зубцями і клином здійснюється на контактних поверхнях c_n і h_m , які можуть мати додатковий контактний опір, що залежить від механічних властивостей матеріалів клина і зубця, зусиль натягу та ін. [3].

Вектор напруженості магнітного поля H_B в активній зоні ротора направлений з боку повітряного проміжку ТГ перпендикулярно поверхні ротора і викликає в ній аксіально направлені (уздовж осі Z) вихрові струми. У торцевій зоні ротора ці струми, замикаючись на полюсній поділці, протікають у тангенціальному напрямку. Оскільки активна довжина бочки ротора ТГ у декілька разів перевищує довжину полюсної поділки, то на величину індукованих струмів впливають, перш за все, процеси, що відбуваються на активній довжині ротора. При цьому можна вважати, що аксіальні струми в середині довжини ротора і сумарні тангенціальні струми на торці в середині полюсної поділки є однаковими.

Визначальне рівняння електромагнітного поля, сформульоване для комплекс-

ної амплітуди напруженості магнітного поля, має такий вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial H_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial H_z}{\partial y} - j\omega_1 s \gamma(T) H_z = 0, \quad (1)$$

де $\gamma(T), \mu, \omega_1, s$ – електропровідність, що залежить від температури; магнітна проникність; кутова частота обертання магнітного поля; ковзання ротора. Електропровідність прямо пропорційно залежить від температури :

$$\gamma(T) = \gamma_0 / [1 + \alpha_\gamma (T - T_0)], \quad (2)$$

де γ_0 – електропровідність при початковій температурі T_0 ; α_γ – температурний коефіцієнт.

При відомому розподілі напруженості поля складові густини струму визначаються за співвідношеннями

$$J_x = \frac{\partial H_z}{\partial y}, J_y = -\frac{\partial H_z}{\partial x}. \quad (3)$$

Граничні умови для електромагнітної задачі задаються таким чином. На зовнішній поверхні розрахункової області, яка відображається контуром a b c d e f g h i j, задається гранична умова першого роду – напруженість зовнішнього магнітного поля H_B :

$$H_z|_{abcdefghij} = H_B = B_\delta / \mu_0, \quad (4)$$

де B_δ – магнітна індукція в повітряному проміжку ТГ.

Слід зазначити, що між границями зубців b c, h i і відповідними границями клина d e, f g існує технологічний повітряний проміжок товщиною 0,5...1 мм. Вважатимемо, що зовнішнє магнітне поле вільно проникає в зазначені проміжки, що дозволяє і на цих границях задати граничну умову (4). З огляду на передбачувану симетрію поля в суміжних зубцевих поділках на границях a l, j k задаються однорідні граничні умови другого роду:

$$\partial H_z / \partial n = 0. \quad (5)$$

На границі l k задаються однорідні граничні умови першого роду:

$$H_z = 0. \quad (6)$$

Стационарне теплове поле в сталому режимі описується таким рівнянням:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = Q. \quad (7)$$

Об'ємна густина теплових втрат Q задається наступним чином. У електропровідних масивах ротора і клина вона знаходиться за виразом

$$Q_J(H) = [J_x^2(H) + J_y^2(H)] / \gamma(T). \quad (8)$$

У зоні паза ротора 3, де знаходиться обмотка збудження, задається відома густина теплових втрат Q_f , якщо по обмотці протікає відомий струм збудження.

Для теплового поля задаються такі граничні умови. Виходячи з припущення, що теплообмін між сусідніми зубцевими поділками не виникає, на границі a l k j задаються умови теплоізоляції – однорідні граничні умови другого роду:

$$\partial T / \partial n = 0. \quad (9)$$

Теплообмін з навколишнім середовищем відбувається через відрізки зовнішньої поверхні зубців і клина a b, e f, i j, на яких задаються граничні умови третього роду:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha_T (T - T_0), \quad (10)$$

де α_T – коефіцієнт тепловіддачі між поверхнею ротора і охолоджуючим агентом (воднем); T_0 – температура охолоджуючого агента (при подальших розрахунках приймалося $\alpha_T = 1100$ Вт/м² °С, а $T_0 = 40$ °С).

Взаємозв'язок між рівняннями електромагнітного і теплового полів враховується за допомогою заданих залежності електропровідності від температури (2), а також виразу (8). Сформульована математична модель (1)...(10) реалізована чисельно методом скінченних елементів.

З метою проведення порівняльного аналізу величин струмів і втрат у кінцевих і лінійних клинах попередньо була розв'язана задача для активної (лінійної) зони ротора. Розрахункова область приймалася такою ж, як показано на рис. 1. Але вихрові струми в розрахунковій області мають тільки одну (уздовж осьової довжини клина) просторову складову J_z , спрямовану перпендикулярно площині креслення. Рівняння для векторного магнітного потенціалу, який має також одну просторову складову A_z , записано таким чином:

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} - j\omega_1 s \gamma A_z = 0. \quad (11)$$

На границі a b c d e f g h i j, що межує з повітряним проміжком, задавалася гранична умова другого роду, яка безпосередньо витікає з рівняння $B = \text{rot } A_z$:

$$\frac{\partial A_z}{\partial n} = B_\delta. \quad (12)$$

На границях a l, j k задавалися умови періодичності:

$$A_z|_{al} = A_z|_{jk}. \quad (13)$$

Результати моделювання. Наведемо деякі результати чисельного моделювання за представленою вище математичною моделлю на прикладі серійного ТГ типу ТГВ – 200. Вихідними даними для розрахунків були наступні. Діаметр ротора – 1,075 м; довжина ротора – 5 м; висота паза ротора – 0,1715 м; ширина паза ротора – 0,0306 м; висота клина – 0,033 м; кількість пазових поділок ротора – 52. Матеріал клину – дюралюміній марки Д16Т з електропровідністю $1,75 \cdot 10^7$ 1/Ом · м. Матеріал зубця – турбороторна сталь з електропровідністю $1 \cdot 10^7$ 1/Ом · м. Магнітна індукція в повітряному проміжку $B_\delta = 0,715$ Тл, ковзання – 0,001 в.о. Обмотка ротора вважається розімкнутою.

На рис. 2 представлено розподіл вихрового струму уздовж радіуса ротора в активній зоні ротора. На поверхні ротора густина струмів сягає $2,5$ А/мм². Найбільший градієнт струму спостерігається у верхівці зубця, що межує з клином, у межах зубця струм змінюється незначно. Інтегральні втрати в клині на один метр довжини складають 686,4 Вт/м. Питомі втрати дорівнюють $0,52 \cdot 10^6$ Вт/м³ (або $0,52$ Вт/см³). Сумарні втрати в усіх лінійних клинах ротора складають 122,9 кВт.

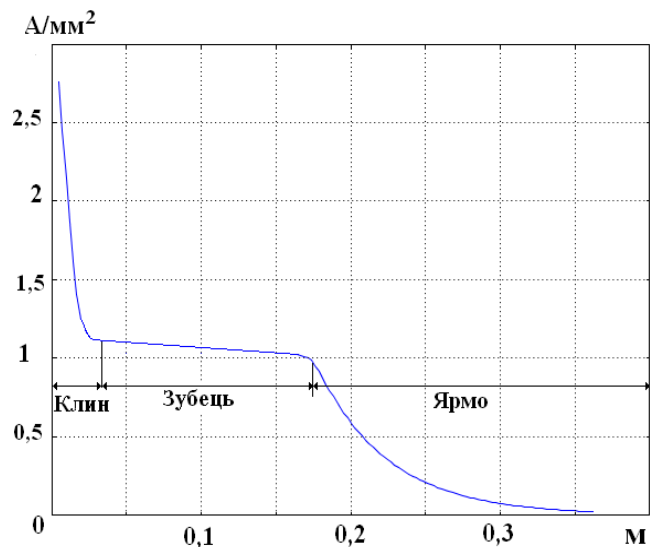


Рис. 2

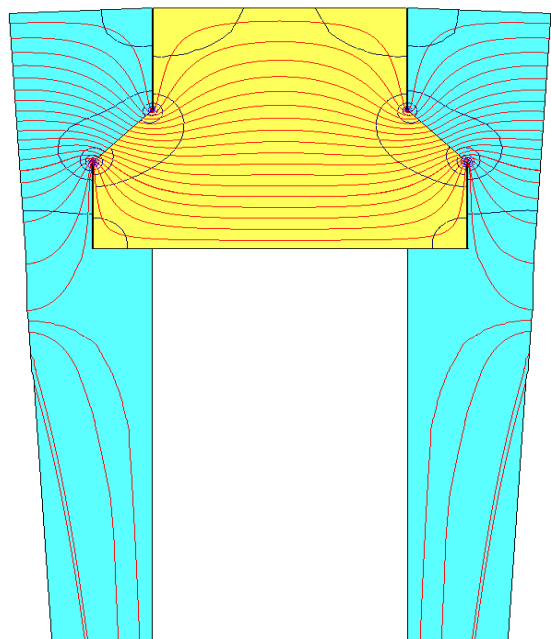


Рис. 3

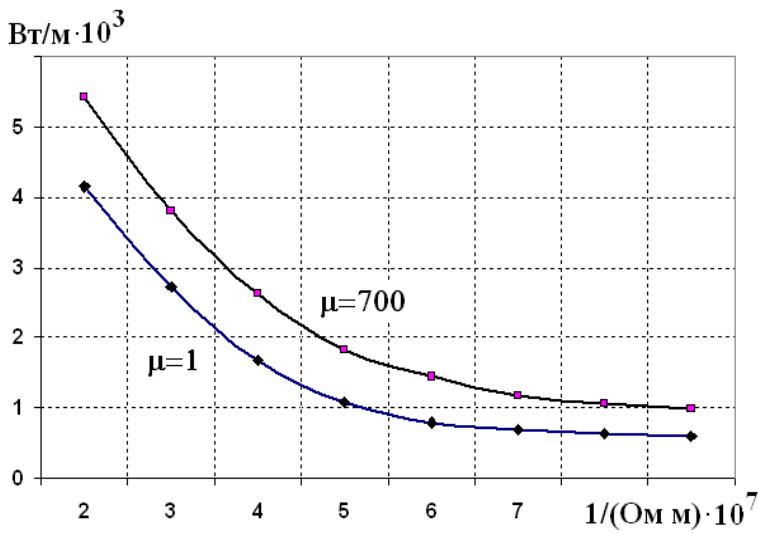


Рис. 4

клина. Густина струму в цих зонах складає 6,5...8,2 А/мм².

Одним із засобів зменшення втрат є оптимальний вибір електропровідності та магнітної проникності матеріалу клина. На рис. 4 зображені розрахункові залежності втрат у клині від його електропровідності для двох типів клинів: немагнітного з $\mu = \mu_0$ і магнітного з $\mu = 700 \mu_0$. З рис. 4 можна зробити такі висновки:

1. Зі збільшенням електропровідності втрати в кінцевому клині зменшуються. Наприклад, при використанні кінцевих клинів, виконаних з бронзи марки БрХ05 з електропровідністю $5 \cdot 10^7$ 1/Ом · м, у порівнянні з дюралюмінієвими клинами з марки Д16Т втрати зменшуються до 1084 Вт/м (у 2,2 разу). А у порівнянні з дюралюмінієвими лінійними клинами втрати збільшуються усього в 1,57 разу. Іноді кінцеві клини виконуються зі сталі, наприклад зі сталі марки 1Х18Н9Т з електропровідністю $1,38 \cdot 10^6$ 1/Ом · м. У цьому випадку спостерігається значне збільшення втрат у клині. До того ж більша частка струмів вимушена замикатися під дном паза, підвищуючи загальне перегрівання торця ротора і становлячи небезпеку для обмотки збудження.

2. Використання магнітних клинів недоцільне. Наприклад, при клині, який має магнітну проникність $\mu = 700 \mu_0$, втрати збільшуються на 30...40 %.

Радикальним способом зменшення втрат у кінцевих клинах є збільшення площі контакту між зубцем і клином. Необхідно підкреслити, що щільний механічний і електричний контакт між зубцем і клином здійснюється на поверхнях e і h за рахунок відцентрових сил.

Тому між іншими границями клина і зубців, наприклад d e, f g, де відцентрові сили не

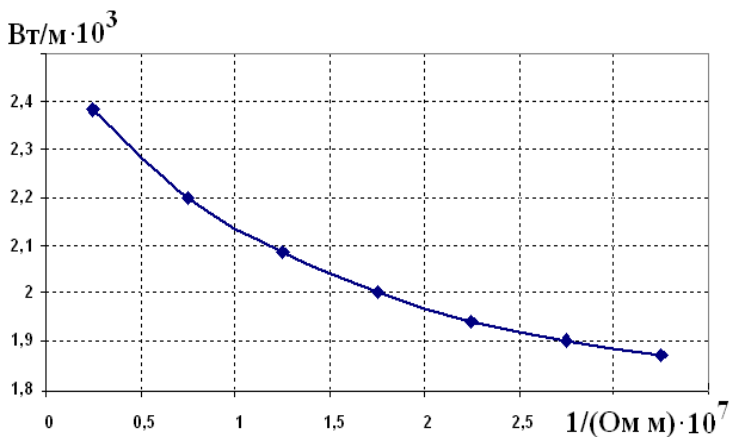


Рис. 5

сприяють щільності контакту, для запобігання локальній електроерозії клинів між клинами і зубцями виконуються невеличкі технологічні проміжки. Але в разі створення надійного електричного контакту, наприклад за рахунок додаткового натягу при монтажі кінцевих клинів, площа контактної зони збільшується, що сприяє не тільки зменшенню максимальної густини струму, але й втрат у клині у цілому.

На рис. 3 зображено картину розтікання ліній вихрових струмів для кінцевого клина, на якому видно шляхи перетікання струмів через плечики клина. Втрати в кінцевому клині збільшуються. Так, при індукції $B_\delta = 0,715$ Тл втрати на метр довжини складають 2384 Вт/м, тобто у порівнянні з лінійними клинами втрати в кінцевих клинах збільшуються у 3,48 разу.

Але найбільшу небезпеку складають локальні втрати і вихрові струми, що виникають в контактних зонах на плечиках

На рис. 5 зображена розрахункова залежність втрат у клині від

електропровідності контактних ділянок b c d e і f g h i. Сам клин виконано з дюралюмінію Д16Т. З рис. 5 витікає, якщо зазначені ділянки також мають електропровідність дюралюмінію, то сумарні втрати в клині зменшаться в 1,19 разу до величини 2008 Вт/м. Причому більш суттєво зменшується локальна густина струму на контактних зонах: з 6,5...8,2 А/мм² до 4,61...5,82 А/мм², що у цілому сприяє більш надійному функціонуванню клинів. Аналогічні співвідношення мають місце при виконанні клинів з бронзи.

Розрахунки розподілу сталої температури показали, що найбільша температура спостерігається на контактних поверхнях “зубець – клин” c n і h m. У разі, якщо клини виконуються з дюралюмінію, максимальне перегрівання на цих поверхнях складає $\Delta\theta = 181$ °С. При виконанні клинів з бронзи максимальне перегрівання зменшується до величини $\Delta\theta = 138$ °С. Якщо бронзові клини виконані таким чином, що на бокових ділянках клина b c d e і f g h i існує ідеальний електричний контакт між клином і зубцем, тобто ці ділянки мають електропровідність бронзи, то максимальне перегрівання клина додатково зменшується до величини $\Delta\theta = 112$ °С. Таким чином, кінцеві клини повинні мати хороший електричний контакт з зубцями з розвиненою контактною поверхнею. Це може бути забезпечено як за рахунок додаткового механічного натягу між зубцями і боковими поверхнями кінцевих клинів при їх монтажі, так і за рахунок розробки кінцевих клинів нової конфігурації з розвиненою контактною поверхнею між клином і зубцем.

Висновки

1. Розроблено математичну модель, яка дозволяє аналізувати електромагнітні і теплові процеси в кінцевих клинах ротора турбогенератора в асинхронних режимах роботи.
2. При виконанні кінцевих клинів ротора з такого ж матеріалу, як і лінійні клини – дюралюмінію Д16Т, втрати в кінцевих клинах в асинхронних режимах у порівнянні з втратами лінійних клинів збільшуються в 3 ... 4 рази. Перегрівання контактних зон “зубець – клин” сягають небезпечних значень $\Delta\theta = 181$ °С.
3. Для зменшення втрат у кінцевих клинах необхідно виконувати їх з немагнітних матеріалів з високою електропровідністю. Наприклад, при їх виконанні з бронзи втрати у порівнянні з дюралюмінієм зменшуються в 2,2 разу, а перегрівання зменшується до $\Delta\theta = 138$ °С.
4. Ефективним способом зменшення втрат і локальної густини струму є збільшення площі електричного контакту між клинами і зубцями. Так, при створенні додаткового механічного натягу між зубцями і боковими поверхнями кінцевого клина при його монтажі втрати бронзового клина додатково зменшуються в 1,23 разу, а максимальне перегрівання зменшується до величини $\Delta\theta = 112$ °С. Актуальними є удосконалення та розробка кінцевих клинів нової конфігурації з розвиненою контактною поверхнею між клином і зубцем.

1. *Васьковський Ю.М.* Польовий аналіз електричних машин. – К.: НТУУ «КПІ», ВПІ ВПК «Політехніка», 2007. – 191 с.
2. *Васьковський Ю.Н., Цивинський С.С., Гайденко Ю.А.* Оптимизация концевых клиньев ротора турбогенератора для повышения надежности его работы в несимметричных режимах работы // *Електротехніка і електро-механіка.* – 2006. – № 3. – С. 26–28.
3. *Лившиц А.Л., Федоренко Г.М., Саратов В., Васьковський Ю.Н.* Исследование контактных сопротивлений в зоне бандажного узла ротора турбогенератора // *Новини енергетики.* – 2003. – № 3–4. – С. 58–63.
4. *Титко А.И., Васьковський Ю.Н.* Синхронно-асинхронные турбогенераторы. – К.: Наук. думка, 2010. – 248 с.
5. *Пат. України № 52366.* Кінцевий клин ротора турбогенератора / Ю.М. Васьковський, С.С. Цивинський, О.І. Титко; Опубл. 25.08.10, Бюл. №16.

Ю.Н. Васьковський¹, докт. техн. наук, **А.И. Титко²**, чл.-корр. НАН України, **А.И. Турчин³**, магістр, **С.С. Цивинський⁴**, асистент

1,2 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна;

3,4 – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

Електромагнітні і теплові процеси в концевих клиньях ротора турбогенератора в асинхронних режимах роботи
Разработана математическая модель электромагнитных и тепловых процессов, которые возникают в концевых клиньях роторов мощных турбогенераторов в асинхронных режимах работы. Показано, что указанные процессы сопровождаются перегревами клиньев. Предложены технические решения для устранения негативных последствий такого перегрева.
Библ. 5, рис. 5.

Ключевые слова: турбогенератор, концевые клинья ротора, асинхронный режим работы, вихревые токи, тепловые процессы.

Yu.M. Vaskovskiy¹, O.I. Tytko², O.I. Turchin³, S.S. Tsyvinskyi⁴

1,2 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine;

3,4 – National Technical University of Ukraine “Kyiv polytechnic institute”,
Peremogy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine

Electromagnetic and thermal processes in end slot rotor wedges of the turbogenerator in asynchronous operating modes
The mathematical model of electromagnetic and thermal processes which arise up in the end wedges of rotors of powerful turbogenerators in the asynchronous modes of operations is developed. It is shown, that the indicated processes are accompanied by the overheats of wedges. Technical solutions for the removal of negative consequences of such overheat are offered. References 3, figures 6.

Key words: turbogenerator, end slot rotor wedges, asynchronous operating mode, eddy currents, thermal processes.

Надійшла 16.12.2010

Received 16.12.2010