

Разработан метод аналитического расчета электромагнитных процессов торцевого дугостаторного асинхронного двигателя (ТД) с дисковым электропроводящим ротором при параллельном включении противоположных от ротора статоров в сеть питания. Расчет магнитного поля двигателя выполнен на основе системы уравнений Максвелла с выполнением интегральных преобразований и с учетом переменной по радиальной координате линейной скорости вращения ротора. Получены формулы для расчета сопротивлений собственной и взаимной индуктивностей. Метод расчета включает определение фазных токов и энергетических показателей ТДАД при заданной величине напряжения питания трехфазного источника. Учитывается пространственное размещение обмотки статоров для однослойной компенсированной обмотки и с произвольным положением ротора в зазоре между статорами. Библ. 7, рисунок.

Ключевые слова: торцевой дугостаторный асинхронный двигатель, энергетические показатели, параллельное включение статоров, компенсированная обмотка, массивный ферромагнитный дисковый ротор.

O. Karlov, I. Kondratenko, R. Kryshchuk, A. Rashchepkin

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Electromagnetic processes of the axial arc-stator induction motor with the parallel inclusion windings of the alternate stators

As the title implies the article describes investigation of analytical calculation of the electromagnetic processes for axial arc-stator induction motor (AAIM) with a non-ferromagnetic electrically conductive disk rotor and with parallel connection windings of the alternate stators. Attention is given to the linear velocity of rotation of the rotor, which not uniform across non-magnetic gap. It gives a detailed analysis of mathematical model of the magnetic field in the non-magnetic gap, on the basis of Maxwell's equations and integral transforms. It is shown that the formula for the calculation of mutual induction of resistance and own winding resistance were obtained. The method of calculation involves determining the energy parameters of AAIM from the desired value of three-phase voltage source. It draws our attention to spatial arrangement of stator windings for single-layer compensated winding and with an arbitrary location of the rotor in the gap between the stators. References 7, figure.

Key words: the axial arc-stator motor, power parameters, parallel connection of the alternate stators, compensated winding, massive ferromagnetic disc rotor.

Надійшла 11.01.2016

Received 11.01.2016

УДК 621.313

ЗАКОНИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТОКАМИ ОХОЛОДЖЕННЯ КРАЙНІХ ПАКЕТІВ ОСЕРДЯ СТАТОРІВ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ У НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІНІМАЛЬНОЇ ТАНГЕНЦІАЛЬНОЇ НЕРІВНОМІРНОСТІ ТЕМПЕРАТУРИ

Н.Л. Сорокіна, пров. інж.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
e-mail: snl@ied.org.ua

Наведено алгоритми пошуку для турбогенератора типу ТГВ-200 законів регулювання газовими потоками охолодження для забезпечення мінімальної нерівномірності температури крайніх пакетів осердя статора в азимутальному напрямку, визначено низку законів регулювання потоками охолодження зубців крайніх пакетів осердя статора. Результати досліджень підтверджують можливість конструктивної реалізації таких законів, забезпечуючи мінімальне коливання температури зубців. Бібл. 5, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: турбогенератор, крайні пакети, тангенціальна теплова нерівномірність, коефіцієнт теплообміну, ітераційний метод.

Проведені дослідження тангенціальної нерівномірності електромагнітних і теплових характеристик осердя статора турбогенератора (ТГ) типу ТГВ-200 у різних режимах показують, що існують зубці крайніх пакетів осердя статора, в яких втрати і нагрів менші або більші від середніх. Максимальні втрати і температури в зубцях майже вдвічі перевищують сере-

дні значення [4]. Це явище обумовлене складними електромагнітними процесами, які мають місце в такій зоні під час роботи турбогенераторів [2-4].

Тангенціальна нерівномірність теплових характеристик, яка до того ж залежить від режиму роботи, створює складність при контролі навантажувальної здатності ТГ. Адже точки максимальної температури мігрують у процесі роботи машини, а отже, не піддаються достовірному контролю. Є велика ймовірність, що ТГ працюють в режимах, коли температура зубцевих зон статора, яка визначає ресурс високовольтної ізоляції обмотки, перевищує допустиму. Доцільно вирішити проблему тангенціальної нерівномірності на конструктивному рівні.

У публікаціях [1-4] наведено результати лише досліджень з розкриття фізичної суті цього явища. З'явилась перша спроба конструктивного вирішення такої проблеми [5]. Проте вирішити її без наукового обґрунтування неможливо.

У цій роботі наведено методичні засоби та результати дослідження можливостей вирівнювання в азимутальному напрямку температури крайніх пакетів статора шляхом перерозподілу газового потоку по різних гілках охолодження при постійному значенні витрати газу загального потоку охолодження статора.

Дослідження проведено для турбогенераторів типу ТГВ-200. За базовий розподіл температури прийнято криву нагрівання, отриману розрахунково-експериментальним методом [4]. На рис. 1 представлено розподіл по колу перевищень температури в зоні коронок крайніх зубців пакета осердя статора турбогенератора ТГВ-200, розрахованих на основі експериментальних даних (крива 1) та в результаті регулювання газових потоків (крива 2).

Для кожного зубця (у цій машині 60 зубців) задається середнє значення температури. Розглядаються лише номінальний режим роботи ТГ та зона коронок зубців, де температура максимальна. Рівень нерівномірності нагрівання зубців можна визначити за формулою $\omega = \sup_{x'', x' \in [a, b]} \{f(x'') - f(x')\}$, де $f(x'')$ – максимальне значення температури зубців крайніх пакетів осердя статора, а $f(x')$ – мінімальне. Враховуючи, що розглядається середнє значення температури зубців T_i , $\omega = T_{i_{\max}} - T_{i_{\min}}$.

Величина ω характеризує коливання функції температури, теплову нерівномірність на певному проміжку азимутальної координати φ . Якщо розглядати функцію температури на всіх зубцях, тобто при $\varphi \in [0, 2\pi]$, то $T_{\max} = 62^\circ\text{C}$, $T_{\min} = 28^\circ\text{C}$, $T_{\text{сер}} = 36,8^\circ\text{C}$, $\omega = 34^\circ\text{C}$.

Як видно, коливання температури зубцевої зони крайніх пакетів розточки статора досить значне навіть у номінальному режимі і досягає майже двократного значення.

Дослідимо можливість зменшення значень величини ω на основі оціночних теплових розрахунків та пошуку необхідного закону перерозподілу газових потоків. Теплові розрахунки виконаємо, виходячи з відомих співвідношень:



Рис. 1

$$T \cdot \alpha S = P, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт теплообміну, який має пряму залежність від витрати потоків охолоджуючого газу; S – поверхня охолодження; T – перегрів (різниця абсолютної температури і температури охолоджуючого середовища); P – сумарні втрати.

При зміні лише газового потоку охолодження змінюється коефіцієнт α , величини S і P в цьому випадку залишаються постійними.

Вирівнювання температурної нерівномірності зубців можна здійснювати таким чином: витрати газу для охолодження i -х зубців з меншими температурами зменшуються на певне значення, а зекономлений потік подається в зубці з високою температурою. При цьому виникає завдання пошуку закону регулювання газових потоків охолодження окремих зубців. Є ряд способів знаходження такого закону. Наведемо деякі з них.

Прийmemo допущення, що зміна газових потоків у зоні окремих зубців не призводить до зміни характеру руху газу. Тоді коефіцієнти теплообміну α_i (i – номер зубця) лінійно залежать від витрат газу q_i . При зменшенні q_i зменшується α_i , а температура зростає. Введемо коефіцієнт k , який показує наскільки змінюється коефіцієнт теплообміну α при зміні витрати газу q . Тоді

$$\alpha_i = \alpha_0/k_i; \quad q_i = q_0/k_i, \quad (2)$$

де α_0 і q_0 – коефіцієнт теплообміну і витрати газу до регулювання газових потоків, які постійні для всіх зубців.

Враховуючи співвідношення (1), (2), отримаємо розподіл k по зубцях (рис. 2), що представляє собою закон перерозподілу газових потоків охолодження зубців, при якому температура по коронках зубців в азимутальному напрямку буде постійною (рис. 1, крива 2) і дорівнюватиме

$$T_{\text{сеп}} = \sum_{i=1}^N T_i / N = 36,77 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де N – кількість зубців. При цьому очевидно, що величина ω дорівнює нулю.

Проте на практиці конструктивно реалізувати такий закон регулювання складно, оскільки він передбачає перерозподілення на всіх зубцях. Тому більш перспективним є отримання і реалізація наближеного закону регулювання.

На рис. 2 наведено функцію регулювання газових потоків охолодження для кожного із зубців крайніх пакетів статора ТГВ-200 для досягнення постійної температури в тангенціальному напрямку (крива 1) та наближену функцію для групи з зубців (крива 2). Характер еталонного закону (рис. 2) вказує на існування 12-ти зон зубців, по п'ять зубців у кожній зоні, таких, що в кожній із зон закон регулювання можна представити з постійними витратами газу.

Значення k у кожній із зон є середнім значенням k_i у цій зоні (рис. 2, крива 2). За цим законом отримаємо $T_{\text{max}} = 41,15^\circ\text{C}$; $T_{\text{min}} = 32,11^\circ\text{C}$; $T_{\text{сеп}} = 35,64^\circ\text{C}$; $\omega = 9,04^\circ\text{C}$.

При такому наближеному регулюванні величина ω зменшилась у 3,8 разу. Для пошуку раціонального закону регулювання газовими потоками для охолодження зубців доцільно також застосовувати ітераційні методи.

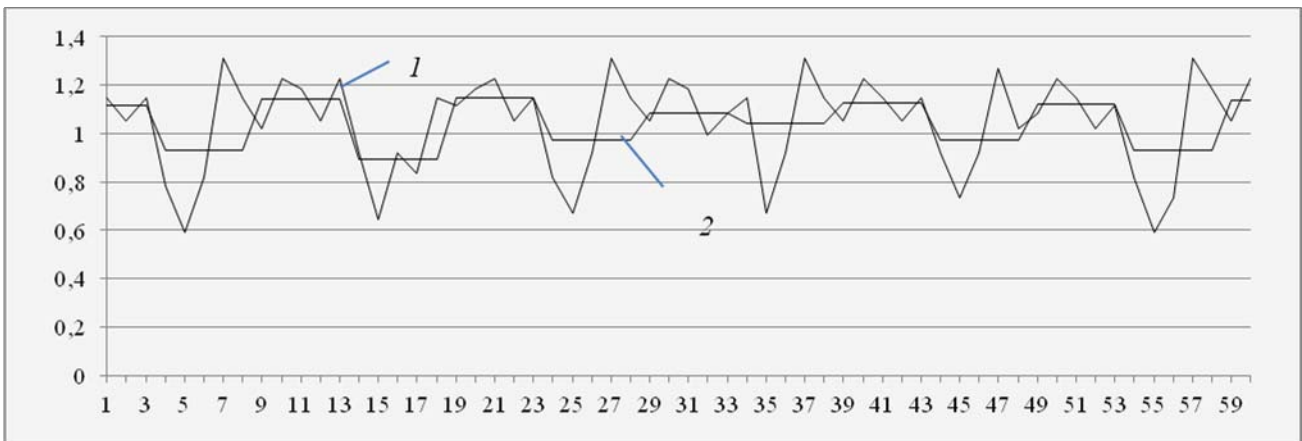


Рис. 2

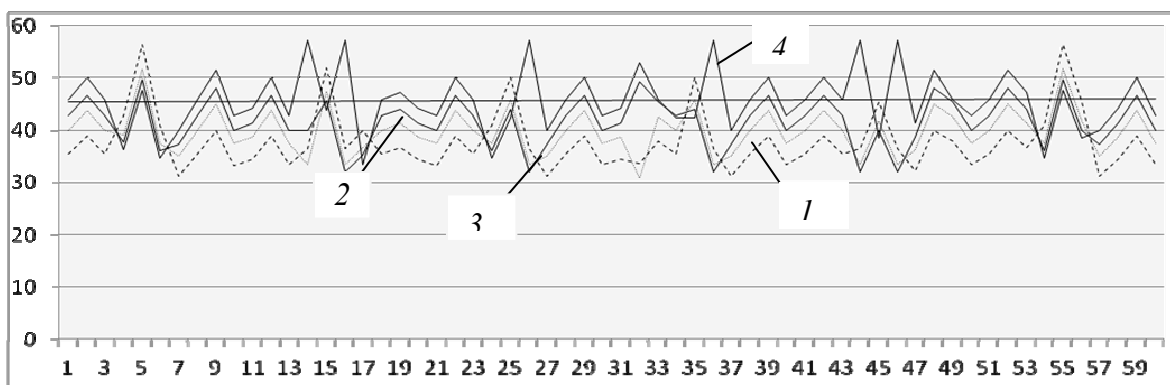


Рис. 3

Побудуємо наступний ітераційний процес. Спочатку задамо величину Δk , яка характеризує частину витрат газу, що перерозподіляється. Знаходимо далі $k_{\max} = 1 + \Delta k$; $k_{\min} = 1 - \Delta k$. За вихідним масивом чисел T_i знаходимо новий масив за алгоритмом: при $T_i > T_{\text{сеп}}$, $T_{i\max} = T_i/k_{\max}$ та при $T_i < T_{\text{сеп}}$, $T_{i\min} = T_i/k_{\min}$.

Сформований масив буде першою ітерацією. На наступних ітераціях діємо аналогічно. Ітераційний процес призупиняється при отриманні мінімального значення величини ω . На рис. 3 і в табл. 1 наведено результати досліджень для $\Delta k = 0,1$. Видно, що після третьої ітерації величина ω починає вже зростати й ітераційний процес закінчується на четвертому кроці. Адже при підвищенні величини k_{\max} нерівномірність нагрівання починає зростати.

На рис. 3 показано перевищення температури в зубцях крайніх пакетів осердя статора турбогенератора типу ТГВ-200 при різних перерозподілах існуючих витрат газу q з зон мінімальних в зоні максимальних температур (крива 1 – $k_{\max} = 1,1$, $k_{\min} = 0,9$, крива 2 – $k_{\max} = 1,2$, $k_{\min} = 0,8$, крива 3 – $k_{\max} = 1,25$, $k_{\min} = 0,75$, крива 4 – $k_{\max} = 1,30$, $k_{\min} = 0,70$).

У табл. 1 наведено параметри, які характеризують коливання функції температури для чотирьох варіантів (рис. 3) перерозподілу витрат газу.

Застосуємо другий ітераційний метод вирівнювання температури, суть якого полягає в наступному. Для кожного i -го зубця знаходимо масив чисел $k_i = T_{\text{сеп}}/T_i$. Задаємо $k = (k_{\max} + k_{\min})/2$. Далі на кожному кроці ітерації отримуємо новий масив T_i за алгоритмом

$$\text{при } T_i < T_{\text{сеп}} \quad T_i = T_i \cdot k; \quad \text{при } T_i > T_{\text{сеп}} \quad T_i = T_i/k. \quad (3)$$

Спочатку видно, що значення ω дуже велике. Для його зменшення величину k можна знаходити із співвідношення $T_{\min}/k = T_{\max} \cdot k$, що дає можливість швидше вирівняти різницю нагрівання зубців, наблизивши її до середньої $T_{\text{сеп}}$. Виконуючи декілька ітерацій, можна довести криву відхилення температур зубців до мінімальної величини ω . З результатів розрахунків (рис. 4, табл. 2) видно, що після четвертої ітерації $\omega = 14,88^\circ\text{C}$.

На рис. 4 зображено криву розподілу температури по зубцях крайніх пакетів статора в процесі ітерації перерозподілу витрат газу за другим методом ітерації: крива 1 – після I ітерації; крива 2 – після II ітерації; крива 3 – після III ітерації; крива 4 – після IV ітерації.

У табл. 2 наведено параметри, які характеризують температурну нерівномірність при ітераційному перерозподілі газових потоків із зон мінімальної температури в зоні максимальної температури.

Закон регулювання газовими потоками охолодження зубців, оснований на даному методі його пошуку, є найбільш прийнятним і простим з точки зору його конструктивної реалізації, оскільки він передбачає лише одне значення приросту Δq , який треба відібрати від групи зубців і додати його в іншу групу.

Таблиця 2

№	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$T_{\min}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{сеп}}, ^\circ\text{C}$	$\omega, ^\circ\text{C}$
1	62	28	36,8	34
2	59,15	29,35	37,17	29,81
3	52,83	32,69	37,97	20,14
4	49,66	34,78	38,69	14,88

Таблиця 1

№	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$T_{\min}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{сеп}}, ^\circ\text{C}$	$\omega, ^\circ\text{C}$
1	56,36	31,1	37,86	25
2	51,67	30,8	39,79	20,87
3	49,6	32	41,58	17,6
4	57,14	33,48	45,63	23,66

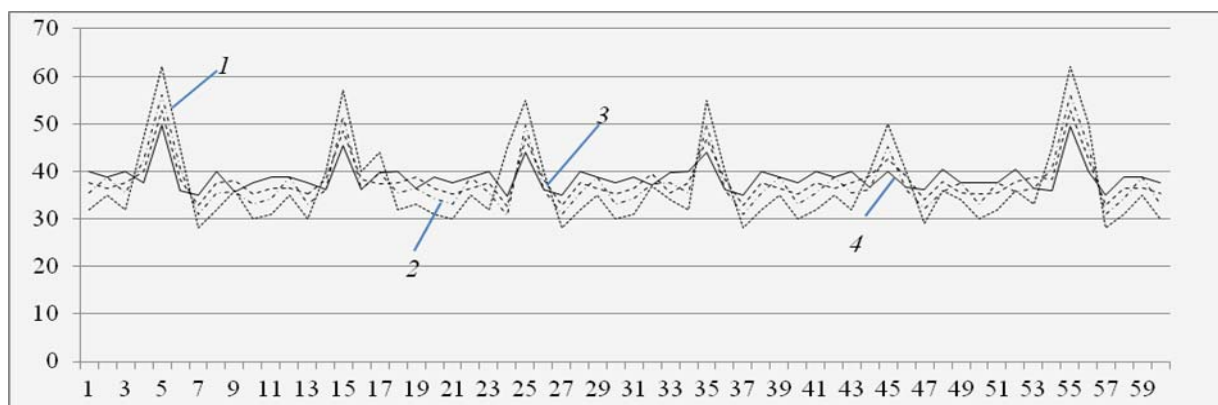


Рис. 4

Висновки. Наведені алгоритми і результати досліджень для турбогенератора типу ТГВ-200 підтверджують можливість забезпечення мінімальної нерівномірності температури крайніх пакетів осердя статора в азимутальному напрямку, визначивши на етапі проектування за мінімальним коливанням функції температури та простою конструктивної реалізації оптимальний закон регулювання газовими потоками охолодження зубців.

Для турбогенераторів типу ТГВ-200 встановлено низку законів регулювання потоками охолодження зубців крайніх пакетів осердя статора для забезпечення мінімальної температурної нерівномірності.

1. Данилевич Я.Б., Пипко Р.М. Магнитное поле в торцевой зоне сердечника статора электрической машины переменного поля с учетом влияния пазового рассеяния // Электротехника. – 1982. – № 9. – С. 36–39.
2. Смородин В.И., Карацуба А.С., Руденко Л.Н. и др. Некоторые особенности электромагнитных процессов на торце статора турбогенератора // Техн. электродинамика. – 1983. – № 3. – С. 65–72.
3. Титко А.И. Электромагнитное экранирование незамкнутыми структурами в электрических машинах. – К. Наук. думка, 1994. – 139 с.
4. Титко А.И., Федоренко Г.М., Лившиц А.Л., Кобзарь К.А. Тангенциальная неравномерность электромагнитных и тепловых характеристик в крайних пакетах турбогенератора при изменении нагрузки // Гідроенергетика України. – 2012. – № 3. – С. 48–53.
5. Пат. України на корисну модель № 88667. Статор потужних електричних машин / К.О. Кобзар, О.М. Мішко, О.І. Титко. – Опубл. 25.03.14; Бюл. № 6.

УДК 621.313

Н.Л. Сорокина, вед. инж.

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Законы регулирования потоками охлаждения крайних пакетов сердечника статоров турбогенераторов в номинальном режиме для обеспечения минимальной тангенциальной неравномерности температуры

Приведены алгоритмы поиска законов регулирования газовыми потоками охлаждения для турбогенератора типа ТГВ-200 для обеспечения минимальной неравномерности температуры крайних пакетов сердечника статора в азимутальном направлении. Определен ряд законов регулирования потоками охлаждения зубцов крайних пакетов. Результаты исследований подтверждают возможность конструктивной реализации таких законов для обеспечения минимальных колебаний температуры зубцов. Библ. 5, рис. 4, табл. 2.

Ключевые слова: турбогенератор, крайние пакеты, тангенциальная тепловая неравномерность, коэффициент теплообмена, итерационный метод.

N.L. Sorokina

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kiev-57, 03680, Ukraine

Adjusting laws by the streams of cooling of extreme packages of core of stator of turbogenerators in the nominal mode for providing of minimum tangential unevenness of temperature

Algorithms for finding the laws regulating gas flow for cooling of turbo generator type TGV-200 to ensure minimal non-uniformity of temperature extreme packages stator core in the azimuthal direction. There are a number of laws regulating the flow of cooling teeth extreme packages. The results confirm the possibility of a constructive implementation of such laws to ensure minimal temperature fluctuations teeth. References 5, figures 4, tables 2.

Key words: turbogenerator, end packages core of stator, tangential thermal unevenness, thermal conductivity, iteration method.

Надійшла 7.04.2016

Received 7.04.2016