

УДК 621.314+621.314.214

К.А. Липковский, докт. техн. наук, **В.В. Мартынов**, канд. техн. наук, **Ю.В. Руденко**, канд. техн. наук, **А.Г. Можаровский**, канд. техн. наук, **В.А. Халиков**, канд. техн. наук

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

Исследование и проектирование полупроводниковых преобразователей для стабилизации и регулирования напряжения в источниках питания электротехнологического оборудования

В отделе регулирования параметров электроэнергии Института электродинамики НАН Украины разработаны математические модели полупроводниковых преобразователей для исследования стационарных режимов с учетом внутренних параметров трансформатора. Рассчитаны регулировочные и нагрузочные характеристики преобразователей. Созданы теоретические и методологические основы для эффективного проектирования и расширения традиционной сферы использования преобразователей напряжения переменного и выпрямленных токов, разработаны методики и адаптированы программные пакеты для их применения при исследовании систем с трансформаторно-ключевыми исполнительными структурами. Библ. 5, таблица.

Ключевые слова: мощные полупроводниковые преобразователи, преобразование напряжения, нелинейность нагрузки, трансформаторно-ключевой узел, компьютерное моделирование, оптимизация коммутации.

K.O. Lypkivskiy, V.V. Martynov, Yu.V. Rudenko, A.G. Mozharovskiy, V.A. Halikov

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

Research and design of semiconductor converters for voltage stabilization and regulation at power supplies of electric technology equipment

Mathematical models of semiconductor converters for investigation of stationary regimes, taking into account the internal parameters of the transformer. Designed regulation and load characteristics of converters. Established the theoretical and methodological framework for efficient design and expand the scope of use of traditional converters alternating and rectified currents, developed methods and software packages tailored for their application in the study of systems with transformer-and-switches executive structures. References 5, table.

Key words: powerful semiconductor converters, voltage conversion, load nonlinearity, transformer-and-switches node, computer simulation, optimization of commutation.

Надійшла 20.05.2015

Received 20.05.2015

№ 10. ВІДДІЛ МОДЕЛЮВАННЯ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

УДК 621.313

МЕТОДИКА ОЦІНКИ РІВНЯ НАГРІВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ РЕШІТЧАСТОГО ЕКРАНА НА ТОРЦІ СТАТОРА ПОТУЖНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

О.І. Титко¹, чл.-кор. НАН України, **В.А. Крамарський**², канд. техн. наук, **К.О. Кобзар**³, гол. констр.

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

3 – завод «Електроважмаш»,

Харків, Україна

kramarsky@yandex.ru

Представлено нову методику розрахункової оцінки рівня нагрівання елементів решітчастого екрана на торці статора потужного турбогенератора для захисту крайніх пакетів осердя від електромагнітних полів розсіювання, розроблену у відділі моделювання машин змінного струму Інституту електродинаміки НАН України у 2014 році. Отримано нові наукові результати щодо рівнів нагрівання елементів різних варіантів конструкції решітчастого екрана у номінальному режимі. Методика дає змогу на стадії ескізного проектування вибрати найбільш ефективний варіант його конструкції. Бібл. 8, рис. 3, табл. 2.

Ключові слова: турбогенератор, торцева зона статора, електромагнітний екран, втрати, температура.

Комплекс досліджень електромагнітних і теплових характеристик на основі математичного і масштабного фізичного моделювання, натурних випробувань турбогенераторів [3, 4] підтверджує ефективність встановлення решітчастого екрана у вигляді натискної плити і

натискних пальців з короткозамикаючими кільцями [7] на торці статора з метою зниження нагрівання крайніх пакетів осердя. Для ескізного проектування необхідно мати інструмент розрахункової оцінки рівня нагрівання елементів решітчастого екрана конкретної конструкції. Перш за все необхідно визначити величину магнітного потоку, який діє на елементи решітчастого екрана і спричиняє його нагрівання. Розрахунок цього поля є складною задачею, досі не вирішеною з достатньою для практичних цілей точністю. Більш достовірні дані можливо отримати з результатів натурних випробувань турбогенераторів, які проводились на ТЕС України. У табл. 1 наведено дані вимірювань індукції осьового магнітного B_z і радіального магнітного B_y полів на відповідних поверхнях крайнього пакета осердя в зоні коронки (рис. 1) для турбогенераторів потужністю 200, 300 і 500 МВт у номінальному режимі. Висота скосу крайнього пакета в усіх цих турбогенераторах однакова і становить 28 мм від діаметра розточки осердя. Місця розміщення датчиків індукції однотипні.

Таблиця 1

Тип турбогенератора	Осьова магнітна індукція B_z , Тл	Індукція в зазорі машини B_y , Тл
ТГВ-200, $P=200$ МВт Ладжинська ТЕС	0,52	0,715
ТГВ-300, $P=300$ МВт Трипільська ТЕС	0,48	0,768
ТГВ-500, $P=500$ МВт Троїцька ТЕС	0,45	0,860

При розміщенні короткозамикаючого кільця екрана на рівні коронок зубців осердя складову магнітної індукції B_z на його відповідній поверхні приймаємо з табл. 1, а складову магнітної індукції B_y – з цієї ж таблиці, але з урахуванням згасання основного магнітного потоку на виході з зазору згідно з роботою [5]. Розрахунок втрат у короткозамикаючому кільці проводимо окремо за осьовим магнітним і радіальним магнітним потоками за формулою для підрахунку об'ємних втрат у провідних масивах усіх вихрових струмів [2, 6]:

$$P = \pi^2 \cdot \Delta^2 \cdot B^2 \cdot (6 \cdot \rho)^{-1} \cdot (0,01 \cdot f)^2 \cdot K \cdot V, \text{ Вт/см}^2, \quad (1)$$

де P – втрати в масиві, Вт; Δ – ширина кільця, см; ρ – питомий опір матеріалу короткозамикаючого кільця, Ом·м; f – частота, 1/с; B – магнітна індукція на поверхні масиву, Тл; K – коефіцієнт, залежний від приведеної товщини вузької сторони кільця; V – об'єм кільця, см³.

Втрати від циркуляційних струмів у масиві розраховуємо за формулою

$$P_{\text{ом}} = I_{\text{ц}}^2 \cdot R, \quad (2)$$

де $P_{\text{ом}}$ – омичні втрати від циркуляційних струмів, Вт; $I_{\text{ц}}$ – циркуляційний струм, А; R – електричний опір масиву кільця, Ом.

Розрахунок перевищення середньої температури масиву над температурою охолоджуючого газу здійснюється за формулою

$$\Delta T = P / \alpha \cdot S, \quad (3)$$

де ΔT – перевищення середньої температури масиву, °С; P – втрати в масиві; α – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні масиву; S – площа поверхні масиву, м².

Шляхом порівняння результатів розрахунку за цією методикою і натурних випробувань на стенді заводу-виробника турбогенератора з решітчастим екраном, встановленим на турбогенераторі потужністю 200 МВт типу ТГВ-200М у режимі короткого замикання, оцінюємо достовірність запропонованої методики. На рис. 1 показано решітчастий екран турбогенератора, де позначено: 1 – пакети осердя; 2 – натискна плита; 3 – натискний палець; 4 – обмотка; 5 – електромагнітний екран.

При цьому циркуляційні струми вимірювались поясами Роговського [1], а температура – термопарами. Значення циркуляційного струму в пальцях одного зубця осердя становила 1500 А, в короткозамикаючому кільці екрана – 5600 А. Середня температура короткозамикаючого кільця становила 190 °С.

Для цього режиму проведемо розрахунки втрат і нагрі-

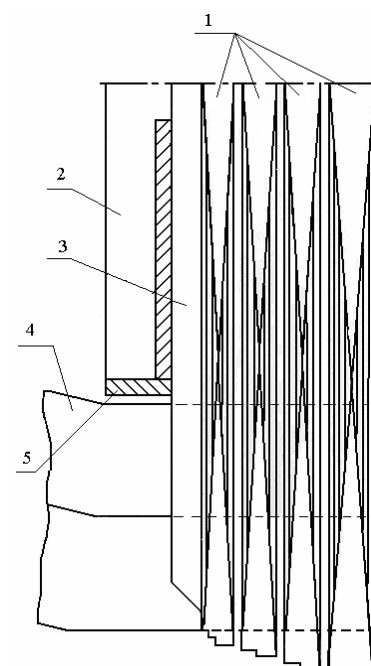


Рис. 1

вання згідно з запропонованою методикою. Індукція B_z на поверхні вкороченого зубця осердя в зоні коронки становить 0,42 Тл. Враховуючи характер розподілу складової магнітної індукції B_z , на поверхні масиву короткозамикаючого кільця з боку лобових частин обмотки її величина дорівнює 0,45 Тл. Втрати в короткозамикаючому кільці від магнітного потоку B_z становлять $P_z = 3,14^2 \cdot 2^2 \cdot 0,5^2 \cdot (6 \cdot 0,024)^{-1} \cdot (0,01 \cdot 50)^2 \cdot 0,7 \cdot 4898 = 58688$ Вт. Магнітна індукція в зазорі машини в режимі короткого замикання складає 20 % від значення індукції в номінальному режимі, і з урахуванням затухання на виході з зазору машини величина радіальної індукції B_y на поверхні короткозамикаючого кільця екрана буде дорівнювати $B_y = 0,718 \cdot 0,2 \cdot 0,6 = 0,087$ Тл. Втрати в короткозамикаючому кільці становлять: від радіального магнітного потоку $P_y = 3,14^2 \cdot 8^2 \cdot 0,087^2 \cdot (6 \cdot 0,024)^{-1} \cdot (0,01 \cdot 50)^2 \cdot 0,015 \cdot 4898 = 660$ Вт; від циркуляційних струмів $P_{ом} = 0,024 \cdot 5600^2 \cdot 4,08 / 1600 = 1920$ Вт; сумарні втрати $P = 58688 + 660 + 1920 = 61268$ Вт. Середнє перевищення температури короткозамикаючого кільця $\Delta T = 61268 / (1200 \cdot 0,408) = 125$ °С, де 1200 Вт/м²·°С – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні короткозамикаючого кільця; $0,408$ м² – площа охолоджуваної поверхні короткозамикаючого кільця. При температурі холодного газу 40 °С абсолютна середня температура короткозамикаючого кільця становить $T_{абс} = 125$ °С + 45 °С = 170 °С.

Різниця між розрахунковим значенням абсолютної середньої температури короткозамикаючого кільця і отриманим при натурних випробуваннях становить 20 °С, що не перевищує 10 %. Це підтверджує практичну достовірність методики для практичних теплових розрахунків.

Для оцінки вкладу циркуляційних струмів у решітчастому екрані в нагрівання натискних пальців визначимо омичні втрати від циркуляційного струму в одному натискному пальці статора турбогенератора ТГВ-300 (2): $P_{ом} = I_{ц}^2 \cdot \rho \cdot l / S = 1000^2 \cdot 0,9 \cdot 0,275 / 665 = 372$ Вт, де $I_{ц} = 1000$ А – циркуляційний струм (з запасом); $\rho = 90 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – питомий опір матеріалу натискного пальця; $S = 0,665 \cdot 10^{-3}$ м² – площа перерізу натискного пальця в районі зубця осердя; $l = 0,275$ м – довжина натискного пальця від натискної плити до короткозамикаючого кільця.

У роботі [6] наведено результати розрахунків втрат у натискних пальцях статора ТГВ-300 від вихрових струмів: $28,6$ кВт на одну сторону генератора, або 477 Вт в одному натискному пальці. Видно, що втрати від циркуляційних струмів у натискних пальцях, які є елементами решітчастого екрана, близькі до втрат у пальцях від вихрових струмів, і тому при проектуванні решітчастого екрана їх потрібно теж враховувати.

Застосування вдосконаленого решітчастого екрана [8] на торці статора дає змогу вирішити проблему нагрівання крайніх пакетів осердя статора в турбогенераторах з повним повітряним охолодженням, де інтенсивність охолодження в рази менша у порівнянні з водневим охолодженням. У такому решітчастому екрані (рис. 2) натискні пальці в зоні коронки зубців осердя короткозамкнені кількома кільцями, а в кожному з них з боку зазору машини виконані кільцеві канавки для зменшення втрат і рівня нагрівання від дії основного потоку.

Проведемо розрахунок втрат у короткозамикаючих кільцях екрана з кільцевими канавками. Під дією основного потоку машини в короткозамикаючих кільцях екрана наводяться контури вихрових струмів $ABCD$ на полюсному діленні (рис. 2).

Якщо на поверхні кільця величина струму I_0 , то затухання струму по товщині кільця (вісь y) визначається законом $I = I_0 \cdot e^{-y/\Delta}$, де $\Delta = (2/\omega \cdot \mu \cdot \rho)^{-2} = 9,42$ мм – глибина проникнення поля; $\mu = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; питома електропровідність $\rho = 2,32 \cdot 10^{-8}$ 1/(Ом·м); кутова частота $\omega = 314$ 1/с.

Прийmemo $I_0 = 1$ на поверхні короткозамикаючого кільця, тоді на глибині проникнення $\Delta = 9,42$ мм величина струму становить $0,36 \cdot I_0$. Інтегруючи струм I по координаті y , отримуємо значення струму I в контурі

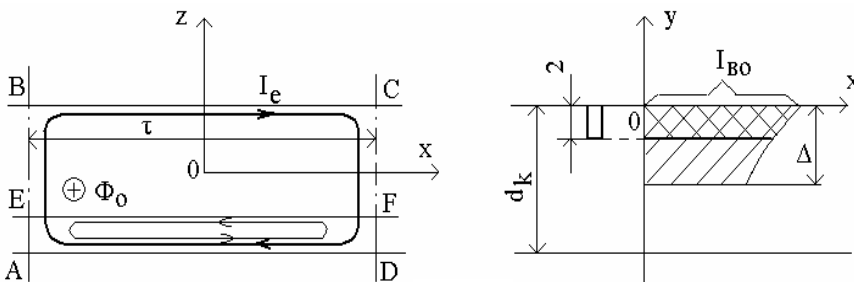


Рис. 2

$ABCD$ короткозамикаючого кільця, причому в шарі 2 мм від поверхні кільця протікає струм $0,4 \cdot I_0$, а в залишковій частині по товщі кільця – $0,6 \cdot I_0$. Виконаємо в короткозамикаючому кільці екрана кільцеві канавки глибиною 2 мм з кроком по ширині кільця (25 мм) 2,5 мм, тобто ширину кільця розіб'ємо канавками на 11 частин, у результаті чого від основного потоку на полюсному діленні τ на глибині 2 мм отримаємо 11 контурів $A E F D$ (рис. 2), значення струмів у яких значно менші за $0,4 \cdot I_0$. Далі визначаємо значення струму в контурі $A E F D$. Вважаємо, що довжина контура $A E F D$ дорівнює довжині контура $ABCD$, оскільки $\tau \gg AB$, тобто $L_{ABCD} = L_{A E F D}$, і електричний опір контура практично не змінюється. Потокозчеплення з контуром $A E F D$ зменшується в 11 разів порівняно з контуром $ABCD$, тому величина струму в контурі $A E F D$ складе $I_{A E F D} = 0,4 \cdot I / 11 = 0,036 \cdot I$. Таким чином, при виконанні кільцевих канавок струм у шарі глибиною 2 мм зменшується в 11 разів, і ним практично можна знехтувати. Нижче дна канавок залишається струм $0,6 \cdot I$, що надалі використовується при розрахунку втрат. Оскільки втрати пропорційні квадрату струму, то у відносних одиницях втрати в короткозамикаючому кільці складають 0,36 в.о. від втрат у короткозамикаючому кільці без канавок.

Таким чином, при виконанні кільцевих канавок у короткозамикаючих кільцях у даному варіанті конструкції втрати в них від основного потоку зменшуються на 64 % у порівнянні з втратами в кільцях без канавок.

Для порівняння було розраховано втрати в короткозамикаючих кільцях для низки варіантів конструкції при однаковому значенні магнітної індукції основного потоку, рівному 0,5 Тл (табл. 2). З результатів розрахунків видно, що найменші втрати в короткозамикаючих кільцях за варіантом 8, але з точки зору компромісу між складністю технології виготовлення і мінімізацією втрат найкращим є варіант конструкції за варіантом 4.

Ще одним варіантом конструкції є виконання короткозамикаючих кілець екрана не з кільцевими канавками з боку зазору машини, а з канавками в осьовому напрямку за окружністю кілець. Вибір оптимальної конструкції потребує більш подібних варіантних розрахунків для конкретного турбогенератора.

Таблиця 2

№ з/п	Варіант конструкції	Втрати, Вт
1	Одне кільце з перерізом 2x6 см	42,4
2	Одне кільце з перерізом 2x6 см з 9 кільцевими канавками глибиною 2 мм	18,5
3	Два кільця 2x3 см	21,2
4	Одне кільце з перерізом 2x3 см з 4 кільцевими канавками глибиною 2 мм	10,7
5	Два кільця 2x2 см	16,2
6	Два кільця з перерізом 2x2 см з 4 кільцевими канавками глибиною 2 мм	9,2
7	Три кільця 2x2 см	14,1
8	Три кільця з перерізом 2x2 см з 4 кільцевими канавками глибиною 2 мм	7,1

Наведені дані та методика розрахунків дають можливість на стадії ескізного проектування оцінювати рівень нагрівання елементів решітчастого екрана і приймати обґрунтоване рішення щодо доцільності використання конкретної конструкції.

1. Езовит Г.П. Справочник электротехника. – К.: Наук. думка, 1975. – 296 с.
2. Костенко М.П. Электрические машины (Специальная часть). – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955.
3. Смородин В.И., Крамарский В.А., Кузьмин В.В., Черемисов И.Я. Концепция нетрадиционного исполнения торцевой зоны статора турбогенераторов с полным воздушным охлаждением // Техн. электродинамика. – 1993. – № 2. – С. 47–50.
4. Смородин В.И., Крамарский В.А., Руденко Л.Н. и др. Повышение нагрузочной способности турбогенератора ТГВ-200М с помощью электропроводного экрана на торце статора // Электротехника. – 1984. – № 3. – С. 55–57.
5. Титов В.В. и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. – М.-Л.: Энергия, 1967.
6. Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов / Под ред. И.М. Постникова, Л.Я. Станиславского. – К.: Наук. думка, 1971. – 341 с.
7. А.с. 1045327 СССР, М.кл.Н02К 3/42. Статор электрической машины / И.М. Постников, Л.Н. Руденко, В.И. Смородин. – Опубл. 30.09.83, Бюл. № 36.

8. Пат.303 Україна. Статор електричної машини / В.І. Смородін, В.А. Крамарський, І.Я. Черемісов, В.В. Кузьмін. – Опубл. 30.04.93. Бюл. № 1.

УДК 621.313

А.І. Титко¹, докт. техн. наук, В.А. Крамарський², канд. техн. наук, К.А. Кобзарь³, гл. констр.

1,2 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ - 57, 03680, Україна

3 – завод «Електротяжмаш»,

Харьков, Україна

Методика оцінки рівня нагрівання елементів решітчатого екрана на торці статора потужного турбогенератора

Представлена нова методика розрахункової оцінки рівня нагрівання елементів решітчатого екрана на торці статора потужного турбогенератора для захисту крайніх пакетів статора від електромагнітних полів дисипації, розроблена в відділі моделювання машин переменного току Інституту електродинаміки НАН України в 2014 році. Отримані нові наукові результати щодо рівня нагрівання елементів різних варіантів конструкції решітчатого екрана в номінальному режимі. Методика дозволяє на стадії ескізного проектування вибирати найбільш ефективний варіант його конструкції. Бібл. 8, рис. 3, табл. 2.

Ключові слова: турбогенератор, торцева зона статора, електромагнітні втрати, температура.

О.І. Titko¹, V.A. Kramarsky², K.A. Kobzar³

1, 2 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, Ukraine

3 – SE plant Electrovazhmash,

Kharkiv, Ukraine

The technique of estimation of a level of heating of the elements of electromagnetic lattice screen on the stator end face of powerful turbogenerator

Presented new technique estimates a level of heating of the elements of electromagnetic lattice screen on the stator end face of powerful turbogenerator for protecting the extreme packet of a stator core from electromagnetic fields dissipation. New scientific results relative to level of heating of the elements of different design options lattice screen in the nominal mode were obtained. The technique allows in the preliminary design phase select the most effective variant of design for protect the extreme packet of a stator core from electromagnetic fields dissipation. References 8, figures 3, tables 2.

Key words: turbogenerator, stator core, electromagnetic losses, temperature, electromagnetic screen.

Надійшла 6.04.2015

Received 6.04.2015

УДК.621.313

ВПЛИВ ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ ОБМОТКИ СТАТОРА НА РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

М.С. Гуторова, інж. 1-ї кат.

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

У відділі моделювання машин змінного струму Інституту електродинаміки НАН України у 2014 році досліджено особливості залежностей струмів, напруг, втрат і ковзання від навантаження асинхронного двигуна при різній кількості замкнених витків обмотки статора. Розглянуто вплив виткових замикань обмотки статора на розподіл та величину магнітної індукції в зубцях у зоні дефекту та за межами її залежно від навантаження. Запропоновано для ідентифікації дефектів ефективні чутливі діагностичні параметри і процедури. Виявлено області навантажень асинхронного двигуна, коли коефіцієнти чутливості набувають максимальних значень. Бібл. 5, рис. 7, табл. 5.

Ключові слова: асинхронний двигун, обмотка статора, замкнені витки обмотки, фазні струми, втрати, напруги, ковзання, потужність, діагностика, коефіцієнти чутливості.

Виткові замикання обмоток асинхронних двигунів (АД) є найбільш поширеними дефектами і причиною відмов машин. Завчасне визначення наявності таких дефектів під час роботи – це важливий фактор надійної роботи двигунів, продовження їх ресурсу. І хоча про-