



КЕНСИЦЬКИЙ О.Г., докт. техн. наук,
ХВАЛІН Д.І., аспірант, Інститут електродинаміки НАН України,
ВИГОВСЬКИЙ О.В., канд. техн. наук, Інститут проблем
безпеки АЕС НАН України

ЕКРАНИ ЗУБЦЕВО-ПАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Показано що електропровідні екрани, які повторюють геометрію сегментів заліза статора, ефективно захищають елементи торцевої зони осердя статора від аксіальних полів розсіювання. Проведені розрахункові й експериментальні дослідження щодо ефективності запропонованих рішень. Розташування екранів зубцево-пазової конструкції у глибині шихтованого осердя дозволяє відмовитися від скосу і ступінчастості зубців крайніх пакетів, підвищує його механічну міцність, а також безпеку, надійність, навантажувальну здатність та ефективність експлуатації потужної електричної машини в цілому.

Ключові слова: електрична машина, торцева зона осердя статора, екран зубцево-пазової конструкції.

Розподіл електромагнітного поля і, як наслідок, температурний стан торцевої зони електричної машини (ЕМ), зокрема гідрогенератора (ГГ), визначається перш за все її конструктивним виконанням. А саме:

- формою скосу крайніх пакетів;
- співвідношенням довжин осердя статора та ротора;
- геометричною формою лобових частин обмоток статора та ротора;
- співвідношенням ширини зубця й паза статора тощо.

Наявність гострих кутів та виступів феромагнітних деталей спричиняє місцеві концентрації магнітного поля. Зокрема, дослідження R.Hawley [10] довели, що індукція поля у нижньої кромки феромагнітної натискної плити, яка виконана з кутом 90° , на 40–50 % вища ніж у випадку, коли кромка має округлений профіль.

Дієвим засобом зменшення потоків розсіювання лобових частин є встановлення демпфувальних мідних екранів, розташованих між натискною плитою і крайнім пакетом осердя статора [9]. Розроблено ряд екранів різноманітної конструкції [1, 4, 8]. У деяких конструкціях з метою зменшення проникнення потоку розсіювання у масивні частини натискної плити та корпусу статора замість мідного екрана використовується кільцеве осердя, набране з листів електротехнічної сталі. Застосовуються магнітні шунти – пакети з електротехнічної сталі зменшеної товщини з укороченими зубцями (або взагалі без них). Ці пакети замикають аксіальні потоки розсіювання лобових частин обмотки статора, які проникають крізь натискну плиту та екран. Для покращення вентиляції магнітні шунти відділені від основного осердя статора натискними пальцями.

Аксіальний потік розсіювання лобових частин обмоток статора та ротора при обертанні останнього перетинає масивні деталі торцевої зони ЕМ і викликає в них додаткові теплові втрати. Для зменшення цих втрат деталі кріплення осердя та обмотки статора а також бандажні кільця

ротора виконуються із немагнітних матеріалів [5, 9]. У цьому випадку сама немагнітна натискна плита є електричним екраном.

Небажаною стороною дії електричного екрана є те, що струми, які наводяться в екрані, не тільки послаблюють аксіальний потік за ним, а й спотворюють магнітне поле, витискаючи його у найближче оточення екрана. У зв'язку з чим втрати у деяких деталях можуть збільшитися. Так, електричний екран, захищаючи спинку осердя статора, частково витісняє аксіальний потік у його зубцеву зону. Таким чином, основним недоліком екранів є недостатня їхня ефективність щодо захисту зубцевої зони крайніх пакетів. Застосування же скосу крайніх пакетів, а для потужних генераторів – глибокого скосу значно послаблює механічну міцність осердя статора [3].

У [6] запропоноване конструктивне рішення, спрямоване на вирішення проблеми нагріву зубців крайніх пакетів без застосування скосу. Осердя статора ЕМ змінного струму має у торцевій частині окремі високоелектропровідні (ВЕП) та феромагнітні сегменти з пазами для стержнів обмотки. Сегменти виконані частково ізолюваними в зоні ярма та набираються по черзі. Недоліком такого рішення є виконання осердя статора лише частково ізолюваним в області ярма, що може спричинити його підвищений нагрів за рахунок радіально-тангенціального поля, особливо в зоні дна паза. До того ж, не визначене місце встановлення електропровідного екрана в крайніх пакетах. При розташуванні на значній відстані від торця осердя його екрануючий ефект буде незначним, а при встановленні на торцевій поверхні або близько до неї підвищується ймовірність пошкодження зубців екрана.

У [7] наведені недоліки запропоновано усунути наступним чином (Рис. 1, 2). Осердя статора 1 набирається із сегментів електротехнічної сталі 2 з пазами 3, в які укладаються стержні обмотки статора 4. Осердя стягується натискними плитами 5 за допомогою стяжних шпильок 6 і натискних пальців 7. Торцева частина набирається по черзі із феромагнітних 8 та ВЕП пакетів 9 сег-



ментів зубцево-пазової конструкції, повністю ізолюваних один від одного. Вказані ВЕП сегменти набрані таким чином, що кожний наступний шар сегментів в аксіальному напрямку перекриває стики між ними. З метою підвищення механічної міцності осердя статора ВЕП пакет установлено за феромагнітним, товщина якого не перевищує глибини проникнення аксіального електромагнітного поля, а ВЕП сегменти набрані на відстані від торця, меншій за глибину проникнення цього поля в осердя.

При роботі ЕМ електромагнітне поле в кінцевій частині, що складається з поля лобових частин обмоток статора і ротора та поля, витісненого із повітряного зазору і пазів статора, буде розсіюватись екраном в навколишнє середовище, виключаючи його проникнення як в зубцеву зону, так і в область ярма осердя статора.

З метою визначення кількісних показників ефективності запропонованого рішення розрахований коефіцієнт екранування k в залежності від товщини феромагнітного пакета δ та визначенні ЕРС для випадку розташування екрана на поверхні осердя статора. Величини наведеної у листах сталі ЕРС вимірювалися відомим методом [2]. На Рис. 3 наведена схема розташування датчиків магнітного поля на вимірювальній планці.

Електропровідні екрани були виготовлені із листової міді завтовшки 0,5, 1,5, 2 і 3,5 мм. Екран завтовшки 0,5 мм охоплює шість зубців, усі інші – три (Рис. 4).

Ефективність запропонованих екранів була перевірена на фізичній моделі статора ЕМ. Результати розрахунків та досліджень на фізичній моделі наведені у Табл. 1 та 2 відповідно.

Відповідно до розрахунку (Табл. 1), при збільшенні товщини феромагнітного пакета δ ступінь його екранування (k) знижується, а при деякому значенні $\delta > \delta_{кр}$, коефіцієнт k різко падає. Очевидно, що величина $\delta_{кр}$ є граничною, коли ефективність екрана щодо захищеності торцевої зони від полів розсіяння достатня при збереженні механічної міцності осердя статора. Значення $\delta_{кр}$ менше глибини затухання аксіального електромагнітного поля. У даному випадку $\delta_{кр} = 0,05$ м. Поле визначалося з врахуванням зубцево-пазової конструкції сталі й міді осердя статора, та зменшення екрануючих властивостей такої конструкції

Таблиця 2.

Датчик	Вихідний варіант без екрана	Шестизубцевий екран завтовшки 0,5 мм		Тризубцевий екран завтовшки 1,5 мм		Тризубцевий екран завтовшки 2 мм		Тризубцевий екран завтовшки 3,5 мм	
		Вимірювальна планка під екраном	Вимірювальна планка над екраном	Вимірювальна планка під екраном	Вимірювальна планка над екраном	Вимірювальна планка над екраном	Вимірювальна планка над екраном	Вимірювальна планка під екраном	Вимірювальна планка над екраном
А	18,5	16,2	14,6	14,6	13	11	15,7		
Б	9,4	8,4	8,1	7,3	6	5,7	7,3		
В	11,8	9,3	7,5	8,1	6	6	8		

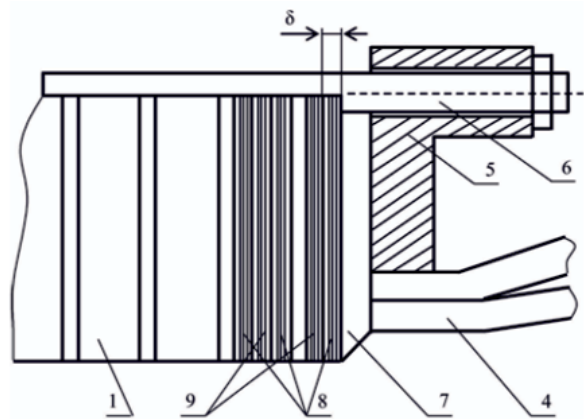


Рис. 1. Осердя статора електричної машини змінного струму

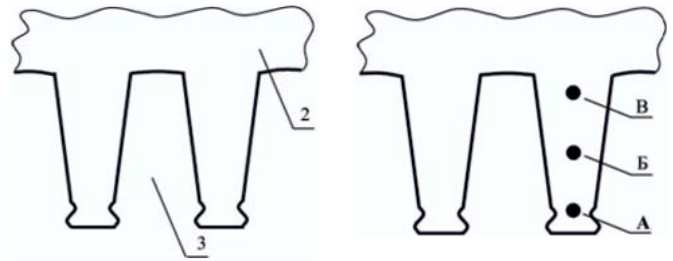


Рис. 2. Профіль сегментів осердя.

Рис. 3. Схема розташування датчиків магнітного поля.

при товщині пакета шихтованого екрана 0,01 м.

В Табл. 2 наведені значення ЕРС (мВ) в залежності від товщини екрана та розташування вимірювальної планки для випадку, коли екран знаходиться на поверхні осердя статора.

Результати досліджень підтверджують ефективність екранування по всій області осердя статора. При застосуванні екранів запропонованої конструкції значення ЕРС у зубцевій зоні зменшується у такому ж співвідношенні, як і в ярмі осердя статора.

Висновок.

Запропоноване технічне рішення забезпечує підвищення ефективності екранування крайніх пакетів осердя статора. Це забезпечує зниження нагріву крайніх пакетів, наближуючи їх температури до температури пакетів центральної частини осердя. Що у свою чергу підвищує його механічну міцність, особливо при динамічних навантаженнях. При цьому виключається зниження механічної міцності шихтованого осердя статора. Виконання

Таблиця 1.

k	5,5	6	13,4	33,4	60
$\delta, \text{ м}$	0,07	0,05	0,02	0,007	0,0001

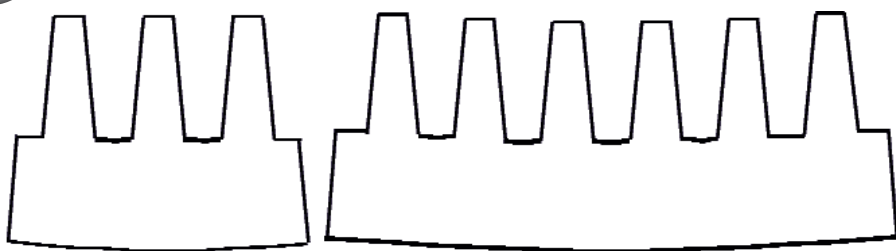


Рис. 4. Тризубцевий і шестизубцевий екрани.

екрана є високотехнологічним. Все це підвищує безпеку, надійність, навантажувальну здатність та ефективність експлуатації ЕМ, розширює їх функціональні можливості за рахунок зниження електромагнітного і теплового навантаження на крайні пакети осердя статора та зниження втрат в елементах екрана. Застосування запропонованого рішення у практиці виробництва потужного генеруючого обладнання відкриває нові можливості по розширенню верхньої межі потужностей ЕМ та їх експлуатації в позапроектних режимах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вольдек А.И., Данилевич Я.Б., Косачевский В.И., Яковлев В.И. Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1983. — 216 с.
2. Езовит Г.П. Справочник электроэнергетика. — Киев: Наукова думка, 1974. — 272 с.

3. Титко О.І., Мишастий М.Д., Воронін А.І., Хвалін Д.І. Експериментальні дослідження ефективності екранів в зубцево-пазовій конструкції статорів турбогенераторів // Праці ІЕД. — 2017. — №46. — С. 34–42.

4. Титко А.И. Электромагнитное экранирование незамкнутыми структурами в электрических машинах. — Киев: Наук. думка, 1994. — 304 с.

5. Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А., Варта-
ньяк Г.П. и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. — Ленинград: Энергия, 1967. — 896 с.

6. А.С. 1617535 (СССР). Сердечник статора электрической машины переменного тока / Титко А.И.; заявл. 03.03.88; опубл. 30.12.90, Бюл. № 48.

7. Патент Україна МПК H02K 3/42. Осердя статора електричної машини змінного струму / Титко О.І., Кобзар К.О., Хвалін Д.І.; заявл. 21.12.2015; опубл. 10.11.2016, Бюл. №21.

8. Патент 303 Україна. Статор електричної машини / Смородін В.І., Крамарський В.А., Черемісов І.Я. і ін.; заявл. 26.02.90; опубл. 30.04.93, Бюл. №1.

9. Das J.C. Power system analysis: short-circuit load flow and harmonics. — New York: Taylor & Francis, 2002. — 868 p.

10. Hawley R. End-region analysis for large generators // Electrical Times, vol. 152. — 1967. — № 20. — P. 771–774.

© Кенсіцький О.Г., Хвалін Д.І., Виговський О.В., 2017

