

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ

УДК 621.313.332

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКРАНІВ
ЗУБЦЕВО-ПАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ СТАТОРІВ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ****О.І. Титко**, чл.-кор. НАН України, **М.Д. Мишастий, А.І. Воронін, Д.І. Хвалін**

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, Україна, 03057

e-mail: denis_h@bigmir.net

На основі проведених експериментів на фізичній моделі турбогенератора показано, що електропровідні екрани, які повторюють геометрію сегментів заліза статора, ефективно захищають і зубцеву зону, і спинку осердя статора від полів розсіювання, а їх застосування суттєво підвищує механічну стійкість крайніх пакетів. У результаті екранування в електромагнітному полі багатошаровими структурами досліджено канал-ефект. Обґрунтовано ідею структурного електромагнітного екранування як найбільш ефективного. Бібл. 9, рис. 15.

Ключові слова: турбогенератор, аксіальний потік, екран зубцево-пазової конструкції.

На сьогодні значного розвитку набули різноманітні екрануючі пристрої, що зменшують або перерозподіляють потоки розсіювання лобових частин, які проникають до крайніх пакетів осердя статора [2, 6, 9]. За принципом дії екрани можна розділити на два основних типи: ті, що демпфують, та ті, що шунтують магнітний потік. Екрани першого типу виконуються з провідного матеріалу, який має малий питомий опір, переважно з міді; екрани другого типу (магнітні шунти) набираються з електротехнічної сталі.

Можна стверджувати, що для захисту крайніх пакетів осердя статора потужних турбогенераторів (ТГ) від полів розсіювання у кінцевій зоні існує ціла низка екранів різноманітної конструкції [5, 7, 8], але на той же час основним недоліком таких екранів є незахищеність або не ефективна захищеність зубцевої зони крайніх пакетів. Для того щоб зменшити нагрівання крайніх пакетів у зубцевій зоні, застосовують різні конструктивні рішення, у тому числі й скіс крайніх пакетів, а для потужних генераторів – дуже глибокий скіс, що не тільки значно послаблює механічну міцність статора, але й просто є магнітним шунтом.

Широке використання електропровідних та феромагнітних екранів у електричних машинах (ЕМ) вимагає дослідження фізичних процесів, які з'являються при електромагнітному екрануванні, та удосконалення їх конструктивного виконання. Тому пропонується зубцево-пазова конфігурація екранів, яка б набиралася, як і залізо статора, з окремих сегментів та повторювала геометрію сегментів заліза. Така конструкція екрана буде ефективно захищати також і зубцеву зону крайніх пакетів. Вона є досить простою за технологією виготовлення та дає змогу відмовитися від скосу крайніх пакетів.

Експериментальні дослідження екранування кінцевої зони статорів генераторів проведені на фізичній моделі, розробленій та виготовленій в ІЕД НАН України [1]. Магнітопровід статора набрано з листів електротехнічної сталі Е21. Експерименти на моделі проведено при живленні обмотки статора струмом 100 А, при частоті $f = 525$ Гц та зусиллях затягування магнітопроводу статора (гайок натискної плити) 3 Н·м. Величини ЕРС, що наводяться у листах, вимірювалися мілівольтметром. Для електропровідних екранів використовувалася листові

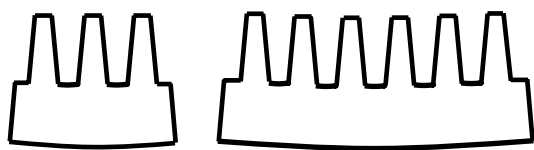


Рис. 1. Три- та шести зубцевий екрани

мідь товщиною 0,35, 0,5, 1 та 1,5 мм (два екрани товщиною по 0,35 мм мають три та шість зубців, інші – по три зубці), для шунтів – три- та шести зубцевий екрани товщиною 0,35 мм (рис. 1). Основні розміри листа: висота зубців – 67 мм, висота спинки – 108 мм.

Висновки щодо ефективності екранів, що порівнюються, зроблено при порівнянні результатів вимірювання аксіальної складової магнітної індукції B_z та густини струмів у екранах. Для вимірювання аксіальної складової індукції на поверхні листів заліза статора використовувались датчики індукції, що є плоскими безкаркасними котушками, встановленими на планках, для розміщення на поверхні листів заліза статора та проміжках між ними при значеннях індукції від часток до кількох одиниць тесла. Для зручності установки та надійності кріплення групу таких датчиків індукції змонтовано у спеціальних планках, одну з трьох таких планок показано на рис. 2.

Для кожного датчика має бути визначений градувальний коефіцієнт C . При цьому виходять з таких положень. Діюче значення ЕРС, індукованої у вимірювальному елементі змінним магнітним полем, дорівнює [3]

$$E = 4,44B_m w S f ,$$

де B_m – амплітудне значення складової магнітної індукції, спрямованої по осі котушки, Тл; w – кількість витків; S – площа витка, м²; f – частота магнітного поля. Звідси

$$B_m = \frac{E}{4,44B_m w S f} = C E ,$$

де $C = \frac{1}{4,44wSf}$.

Таким чином, при синусоїдальному характері магнітного поля коефіцієнт C характеризує геометричні розміри вимірювального елемента.

Для вимірювання вихрових струмів у екранах останні оснащені потенціальними зондами з базою 10 мм.

Для порівняльного аналізу розглянуто чотирнадцять варіантів систем екранування торцевої зони осердя статора, з них дев'ять у вигляді структурних систем при різній варіації матеріалу та товщини екранів.

На рис. 3–14 (де N – номер листа, на якому вимірювалась індукція) зображено графіки залежності аксіальної індукції магнітного поля в кінцевій зоні фізичної моделі ТГ при різних варіантах застосування екранів зубцево-пазової конструкції, на рис. 15 – в зубцях у радіальному напрямку (вибрано ліву сторону планки та 11-й лист заліза, оскільки у цих областях найповніші дані з розподілу B_z). Амплітудне значення аксіальної складової магнітної індукції приведено в мТл.

На рис. 3–8 представлено результати дослідження при установці мідних екранів зубцево-пазової конструкції різної товщини на поверхні осердя статора фізичної моделі, у дужках показано кількість зубців цих екранів. На рис. 9–14 показано результати структурного екранування. Для зручності запису було прийнято деякі скорочення, наприклад, М 0,35 (6) – Ст 0,35 (6) – М 0,35 (3) [Н-С-В] означає розміщення структурного екрана типу мідний шести зубцевий сегмент товщиною 0,35 мм – шести зубцевий сталевий товщиною 0,35 мм та три зубцевий мідний, що має товщину 0,35 мм, причому перший з них розташований знизу, останній – зверху.

Планки встановлювалися спочатку під перший, третій та п'ятий листи фізичної моделі, потім переставлялися під шостий, дев'ятий та одинадцятий листи. Було вибрано внутрішню поверхню листів, оскільки на цій поверхні значення аксіальної складової магнітної індукції більші, ніж на зовнішній стороні листів.

Треба зауважити, що через повну чи часткову непрацездатність деяких датчиків, на жаль, не було можливості отримати повні результати.

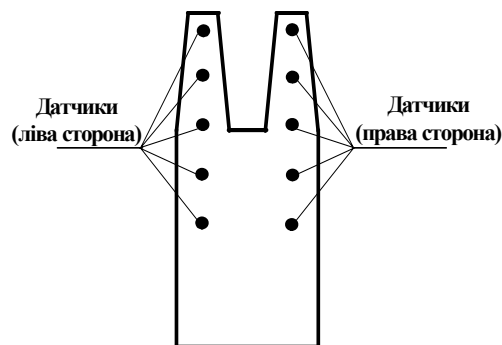


Рис. 2. Спеціальна текстолітова планка з датчиками магнітного поля

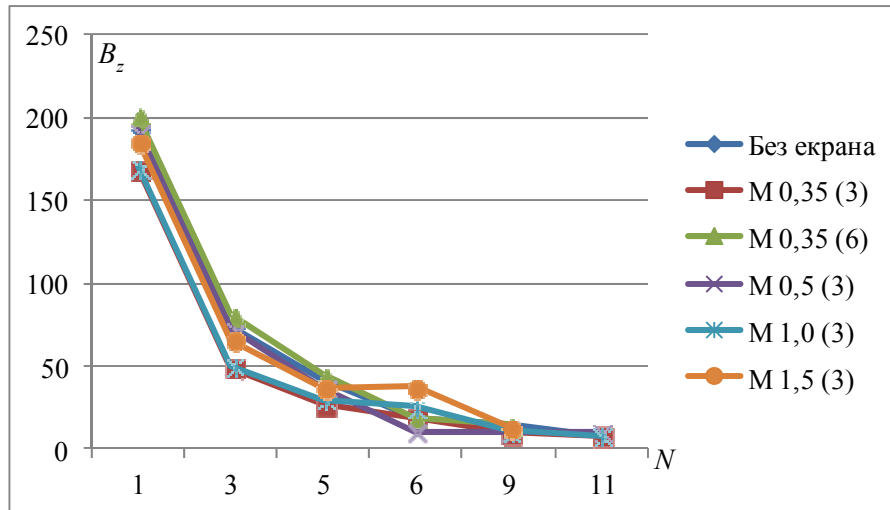


Рис. 3. Коронка зубців (ліва сторона)

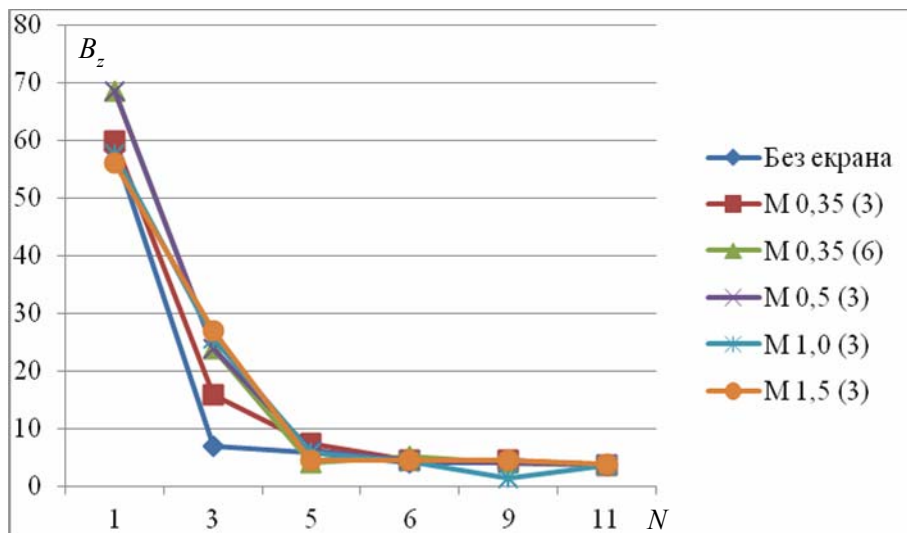


Рис. 4. Середина зубців (ліва сторона)

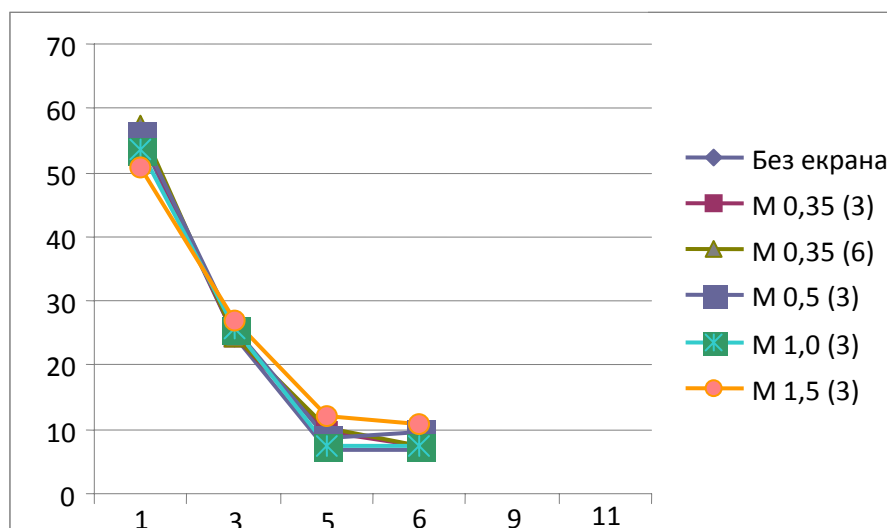


Рис. 5. Середина зубців (права сторона)

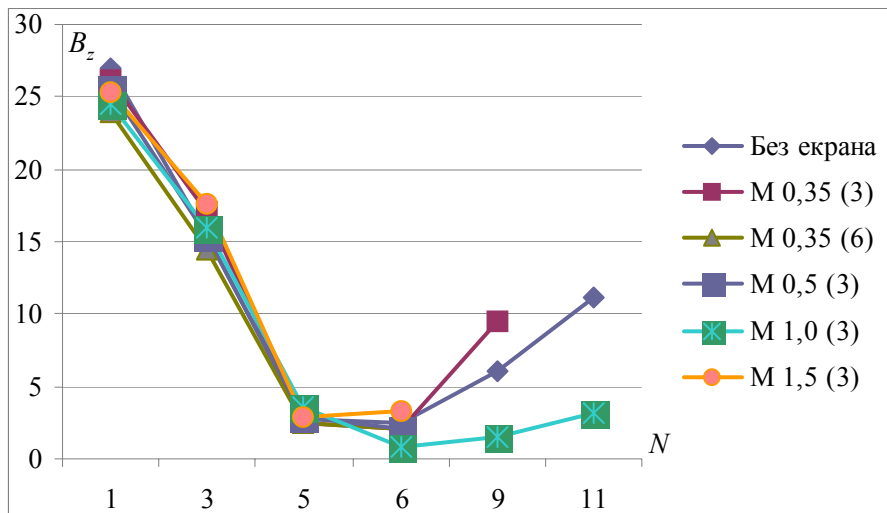


Рис. 6. Верх ярма (права сторона)

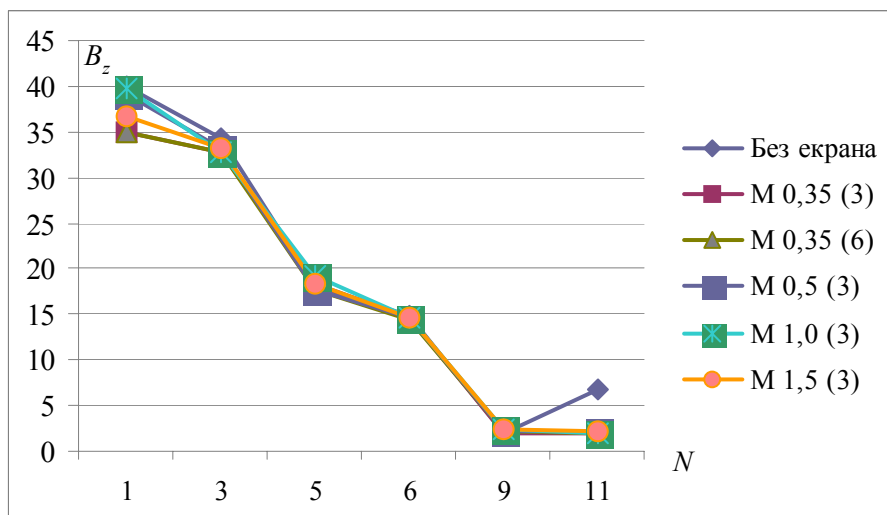


Рис. 7. Середина ярма (ліва сторона)

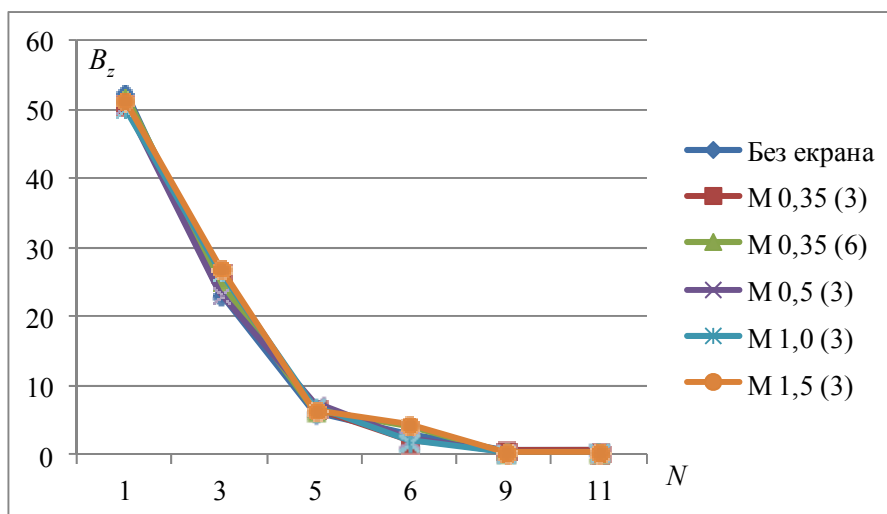


Рис. 8. Середина ярма (права сторона)

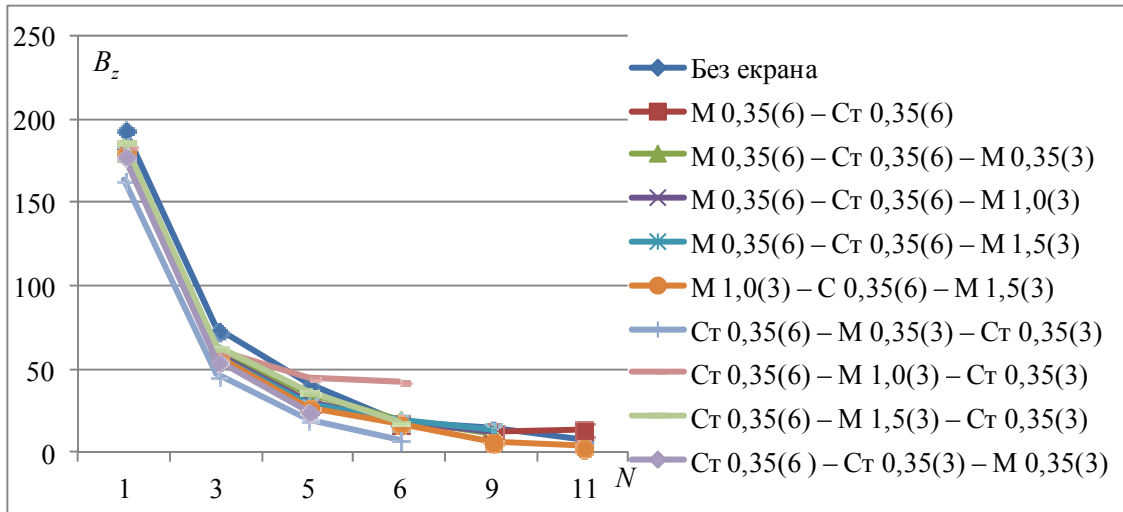


Рис. 9. Коронка зубців (ліва сторона)

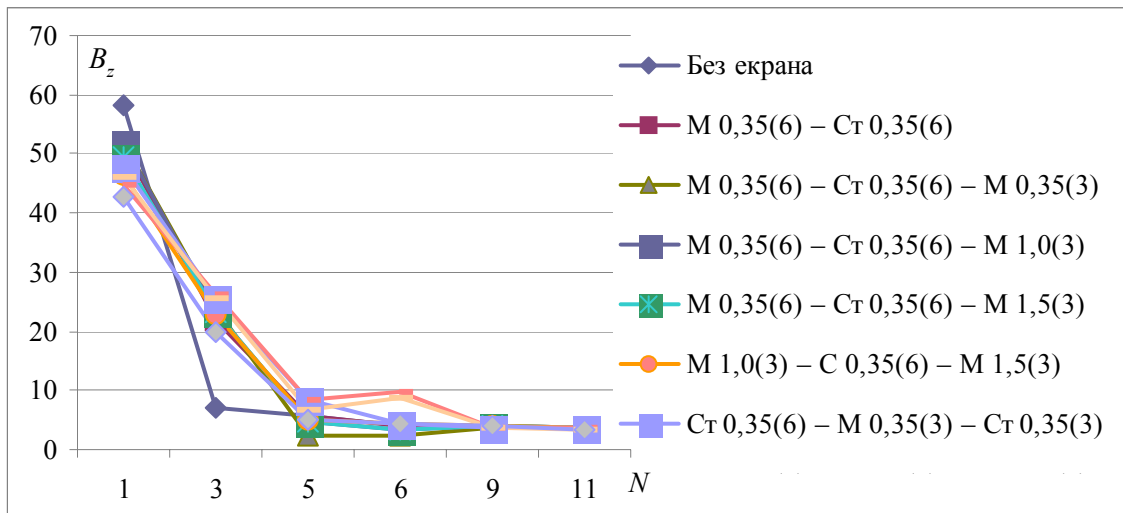


Рис. 10. Середина зубців (ліва сторона)

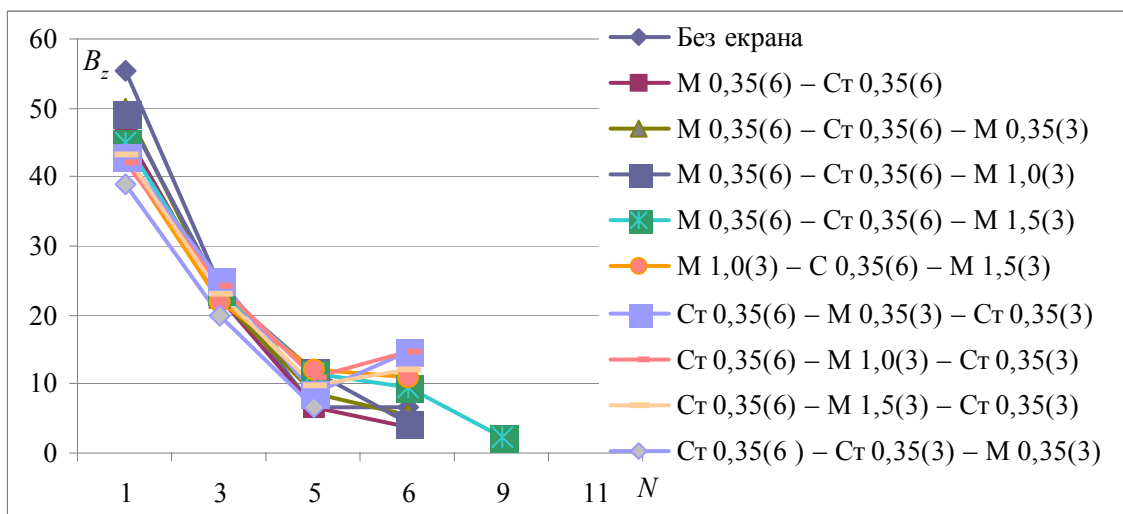


Рис. 11. Середина зубців (права сторона)

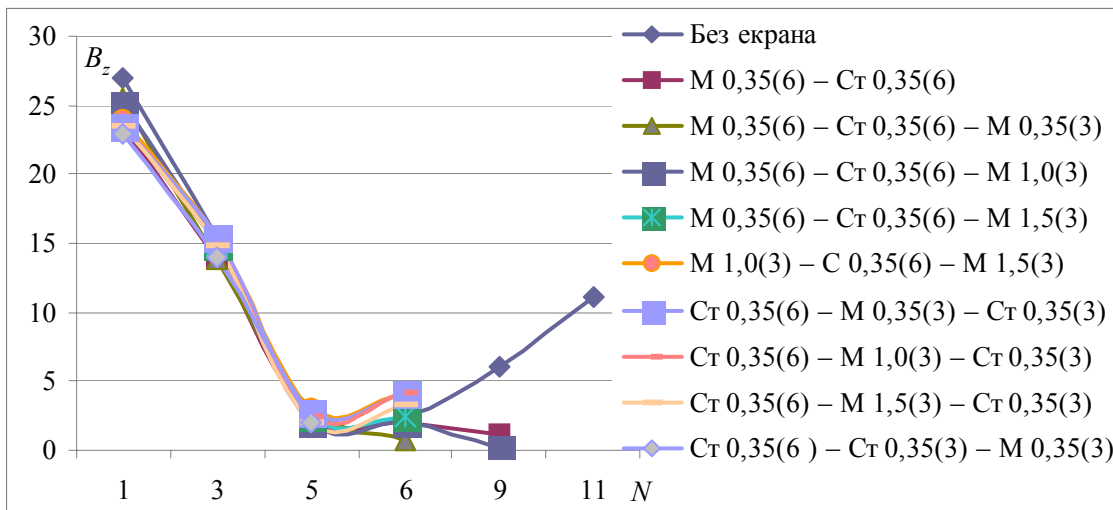


Рис. 12. Верх ярма (права сторона)

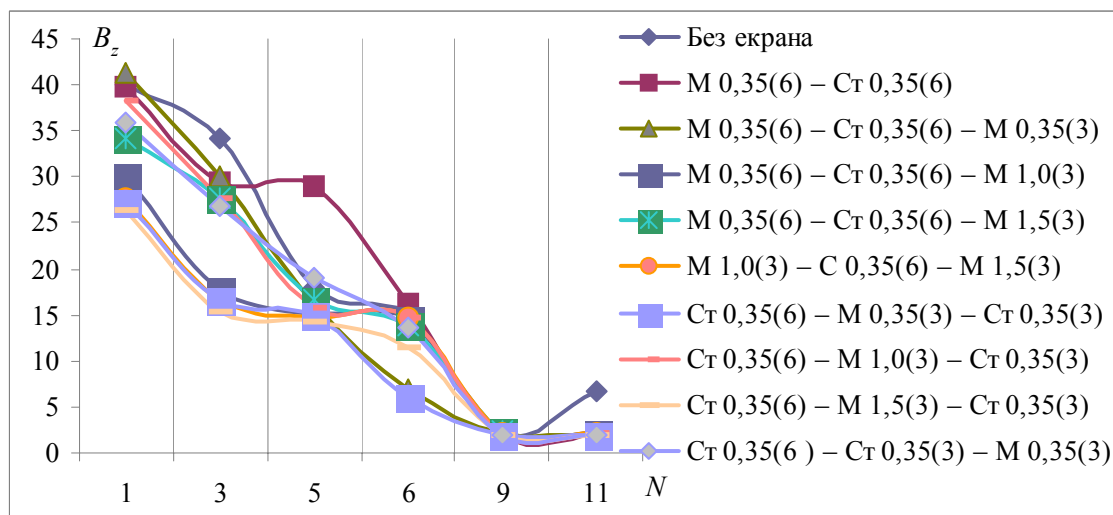


Рис. 13. Середина ярма (ліва сторона)

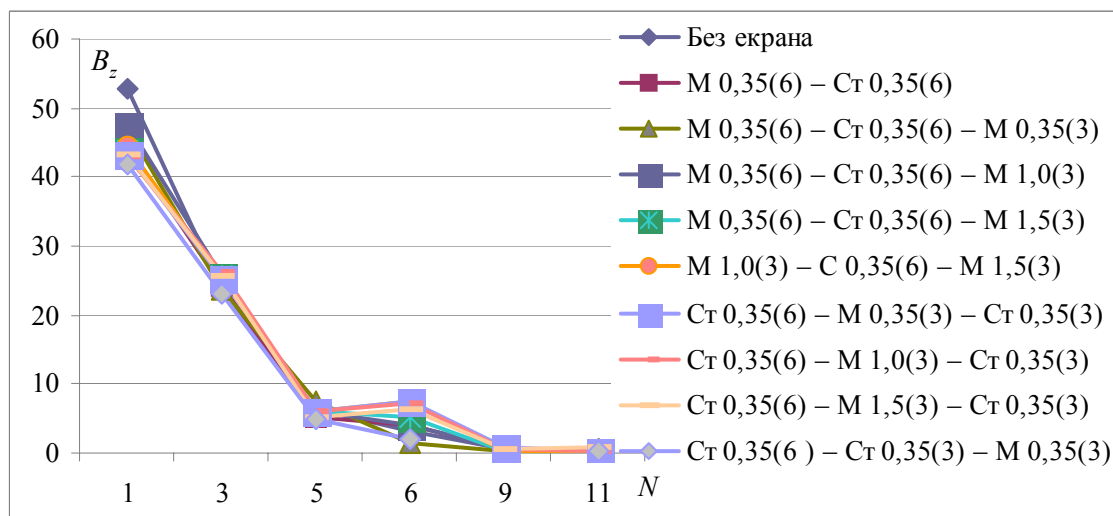


Рис. 14. Середина ярма (права сторона)

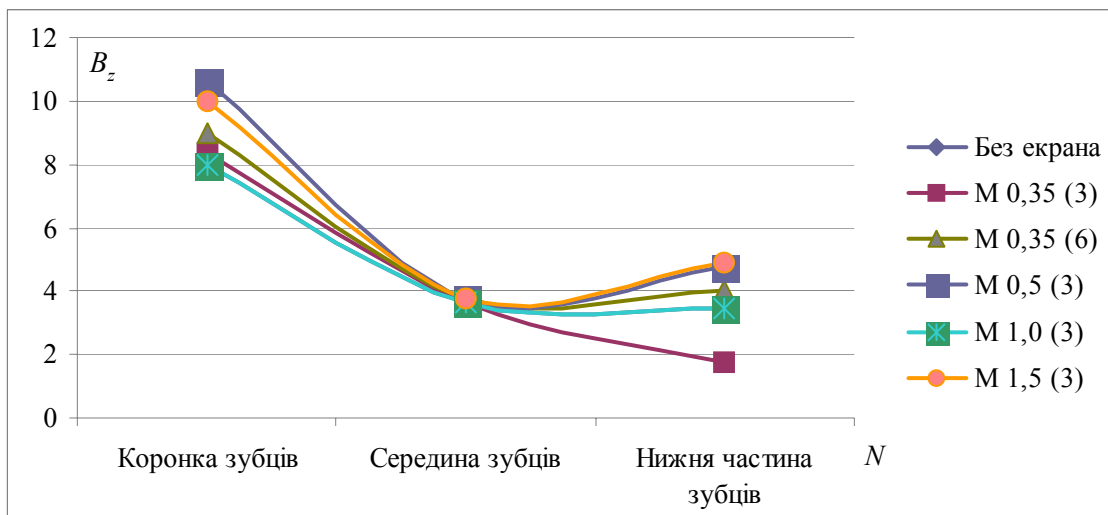


Рис. 15. В зубцях у радіальному напрямку (ліва сторона, 11-й лист)

При аналізі даних експерименту треба мати на увазі відповідність товщини мідних сегментів для моделі ($f = 525$ Гц) і генератора ($f = 50$ Гц). Аналіз показує, що ефективність електромагнітного екранування такими сегментами є досить висока. Для допустимої товщини екрана (в генераторах застосовуються екрани товщиною 10 мм) можна добитися зменшення аксіальної складової індукції магнітного поля в крайніх пакетах осердя статора в середньому до 1,3 – 1,5 разу залежно від точки вимірювання, тобто питомі витрати зменшуються в 1,7 – 2,3 разу. Причому зі збільшенням радіуса ефективність екранів підвищується.

Треба зауважити, що результати наведені для випадків, коли екрани та листи заліза статора неелектроізолювані з бокових поверхонь. Як показують дослідження, у тому числі на фізичній моделі, екранування осердя статора у випадку наявності електроізоляції більш ефективне, ніж при наявності контакту, коли простежується перетікання струмів [5]. Розміщення ізоляції розриває контури струмів, запобігаючи перетіканню струмів та їх концентрації на внутрішньому краю. Крім того, ізоляція перерозподіляє струми в екрані. Розподіл густини струму в екрані стає більш рівномірним за висотою екрана, у свою чергу, рівномірний розподіл струмів у екрані обумовлює і більш рівномірний розподіл струмів у крайньому листі заліза статора. Як показано в [5], розміщення електроізоляційного шару товщиною 0,001 м між екраном і листом, яке обумовлює підвищення ефективності екранування, до помітного збільшення нагрівання системи екранів не призводить.

Треба зазначити, що отримані експериментальні дані є середньостатистичними, бо вони залежать від різних факторів, у тому числі від деформації листів заліза статора, яка змінюється від варіанта до варіанта, ідентичного розміщення вимірювальних планок щодо зразків екранів і т.д.

У процесі експериментів вказані фактори, які впливають на точність результатів експериментів при переході від одного варіанта до другого, було враховано, у тому числі шляхом декількох повторень одного і того варіанта екранування.

З кривих, зазначених на рисунках, можна зробити висновок, що незамкнені екрани типу зубцево-пазової конструкції екранують неоднаково різні області зубцевої зони.

Встановлено, зокрема, що у радіальному напрямку підвищене значення аксіальної складової магнітної індукції B_z , яка є причиною підвищеного нагрівання, має місце у зубцевій зоні, найбільші – у коронках зубців. На глибині 2 – 3 см від нижньої частини зубців аксіальна складова магнітного потоку значно згасає, що пов'язано, скоріш за все, з достатньо надійним екрануванням масивного кільця натискної плити. В аксіальному напрямку найбільші значення B_z спостерігаються у внутрішній частині першого листа, у третьому листі і далі аксіальна складова поля значно послаблюється. Наразі з аксіальними та радіальними градієнтами температури у кінцевій зоні осердя статора спостерігаються тангенціальні нері-

вномірності складової B_z залежно від розташування фазних зон обмотки статора [4]. Для проведення експерименту вибиралися зубці, розміщені у міжфазній зоні, оскільки на фізичній моделі тільки в них спостерігається помітна відмінність поля.

У результаті екранування в електромагнітному полі багатошаровими структурами досліджено канал-ефект. Його суть у тому, що при розміщенні магнітних сегментів всередині високоелектропровідних (або високоелектропровідних всередині магнітних) різко підвищується ефективність екранування таких структур у порівнянні зі структурами, в яких спочатку розміщені магнітні шари, а за ними високоелектропровідні, або навпаки. На рисунках наводяться дані, які вказують на значний прояв канал-ефекту.

Акцентуємо увагу на дуже важливій особливості – екстремальний прояв канал-ефекту, який спостерігається при рівності товщини непровідних магнітних та провідних мідних шарів. Для будь-яких інших відношень товщини шарів структури екранування стають менш ефективними.

Викладені дослідження обґрунтовують ідею структурного електромагнітного екранування ЕМ та інших пристроїв як найбільш ефективного, в основі якого є застосування оптимальної структури магнітних і електропровідних елементів, тобто розміщення їх таким чином, щоб забезпечити максимальний екрануючий ефект.

З даних видно, що екрани шарової структури найбільш ефективні. Магнітний потік обмоток ухилиється у магнітні листи заліза і майже повністю замикається в них. Струми в екрані більш рівномірно розподіляються та підвищуються у верхній його частині.

Для збільшення коефіцієнта екранування як екран може бути застосована гібридна екрануюча система. Вона має вигляд три- чи багатошарового екрана, у якому всередині двох сталевих сегментів розміщено сегмент з високоелектропровідного матеріалу. Такий екран внаслідок проявлення канал-ефекту при мінімальній товщині (масі та габаритах) має високий коефіцієнт екранування. Лінійні теплові розширення електропровідних шарів такої системи, а отже і внутрішні механічні напруження зменшуються внаслідок зменшення їх нагрівання. Причому окремі сегменти можуть бути ізольовані один від одного.

Застосування гібридної системи екранування у кінцевих частинах ТГ не тільки зменшує струми та електродинамічні зусилля і тим самим збільшує навантажувальну здатність та його механічну міцність, але й значно збільшує ефективність екранування незамкненими електропровідними екранами.

На основі проведених експериментів на фізичній моделі ТГ можна зробити висновок, що електропровідні екрани, які повторюють геометрію сегментів заліза статора, ефективно захищають і зубцеву зону, і спинку осердя статора від полів розсіювання, а їх застосування суттєво підвищить механічну стійкість крайніх пакетів за рахунок відмови від виконання скоосу і сходинок.

Створення системних екранів у ТГ визначається їх здатністю максимально захищати екрануючі деталі та вузли машин від змінних магнітних потоків, технологічністю виготовлення та нагріванням самих екранів у експлуатаційних режимах. Ефективність розроблених екранів доведено проведеними дослідженнями.

1. *Бабяк А.А.* Исследование экранирующих устройств концевых частей турбогенераторов с использованием физической модели. Автореф. ... канд. дис. / АН УССР. Ин-т электродинамики. – К., 1973. – 28 с.
2. *Вольдек А.И., Данилевич Я.Б., Косачевский В.И., Яковлев В.И.* Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 216 с.
3. *Езовит Г.П.* Справочник электроэнергетика. – К.: Наук. думка, 1974. – 272 с.
4. *Титко А.И., Федоренко Г.М., Ливишц 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. *Титко А.И.* Электромагнитное экранирование незамкнутыми структурами в электрических машинах. – К.: Наук. думка, 1994. – 304 с.
6. *Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А., Вартаньян Г.П. и др.* Турбогенераторы. Расчет и конструкция. – Ленинград: Энергия, 1967. – 896 с.
7. *А.с. 1617535 СССР.* Сердечник статора электрической машины переменного тока / А.И. Титко; Заявл. 03.03.88; Опубли. 30.12.90, Бюл. № 48.

8. Пат 303 Україна. Статор електричної машини / В.І. Смородін, В.А. Крамарський, І.Я. Черемісов та 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.

УДК 621.313.332

А.І. Титко, чл.-корр. НАН України, **Н.Д. Мышастый, А.І. Воронин, Д.І. Хвалин**

Інститут електродинамики НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, Україна, 03057

Экспериментальные исследования эффективности экранов зубцово-пазовой конструкции статоров турбогенераторов

На основе выполненных экспериментов на физической модели турбогенератора показано, что электропроводящие экраны, которые повторяют геометрию сегментов железа статора, эффективно защищают и зубцовую зону, и спинку сердечника статора от полей рассеяния, а их применение существенно повысит механическую устойчивость крайних пакетов. В результате экранирования в электромагнитном поле многослойными структурами исследовано канал-эффект. Обосновано идею структурного электромагнитного экранирования как наиболее эффективного. Библи. 9, рис. 15.

Ключевые слова: турбогенератор, аксиальный поток, экран зубцово-пазовой конструкции.

O.I. Titko, N.D. Myshasty, A.I. Voronin, D.I. Hvalin

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Experimental studies of the effectiveness of tooth-slot design screens of Turbo generators stators

Shown on the basis of experiments performed at a physical model of Turbo generator that conductive screens being repeat geometry of the stator iron segments are effectively protect against of scattering fields both the tooth zone and back stator core, and their application will significantly increase the mechanical stability of the front package. As a result of the screening in the electromagnetic field of multilayer structures the channel effect is investigated. The idea of the structure electromagnetic shielding as the most effective is substantiated. References 9, figures 15.

Key words: turbo generator, axial flow, tooth-slot design screens.

Надійшла 22.11.2016

Received 22.11.2016

УДК 62-52 : 621.313.33

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ЗАДАЧІ МАКСИМІЗАЦІЇ МОМЕНТУ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У РЕЖИМІ ОСЛАБЛЕННЯ ПОЛЯ

Б.І. Приймак, канд. техн. наук

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського",
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна
e-mail: bp-08@ukr.net

Досліджено особливості максимізації моменту векторно-керованих асинхронних двигунів за ослаблення поля. Отримано аналітичний вираз для межової швидкості ротора, з якої слід починати зниження потоку. Встановлено, що межові швидкості, які виокремлюють зони оптимізації моменту з різними умовами визначення екстремуму, суттєво залежать від максимального струму статора. Якщо обмеження струму статора перевищує критичне значення, то зона оптимізації В, де обмежуються водночас напруга та струм, зникає, а залишаються зони А та С, де обмежуються лише струм та напруга відповідно. У цьому разі перестає зростати показник відносного приросту моменту двигуна, який визначає ступінь поліпшення властивостей привода внаслідок максимізації моменту. Для обчислень використано дані двох двигунів, потужності яких відрізняються у двадцять разів. Біблі. 10, рис. 6, таблиця.

Ключові слова: асинхронний двигун, векторне керування, ослаблення поля, оптимізація, межева швидкість.

Вступ. Асинхронні електроприводи (АЕП) з векторним керуванням, що використовуються у моталках, верстатах, електротранспорті тощо, мають працювати на низьких та значно вищих від номінальної швидкостях ротора. В області номінальної швидкості асинх-