

ЗНИЖЕННЯ ДОДАТКОВИХ ВТРАТ В ОБМОТКАХ СИЛОВИХ РЕАКТОРІВ

А.Н. Hoevenaars^{1*}, А.В. Lavreniuk^{1**}, І.В. Пентегов^{2***}, докт.техн.наук, С.В. Римар^{2****}, докт.техн.наук, В.М. Сидорець^{2*****}, докт.техн.наук

¹ MIRUS International Inc.,
31 Sun Pac Blvd., Brampton, Canada L6S 5P6.

E-mail: mirus@mirusinternational.com

² Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
вул. К. Малевича, 11, Київ, 03680, Україна.

E-mail: sydorvn@gmail.com

Запропоновано підхід до зниження додаткових втрат від вихрових і циркулюючих струмів в обмотках силових реакторів із множинними немагнітними проміжками в стрижнях магнітопроводів. Підхід базується на варіації величин немагнітних проміжків та їхнього розташування по довжині стрижня – зменшення величин проміжків відбувається від центру стрижня до його країв, а зменшення відстані між проміжками – від країв до центру стрижня. У результаті магнітні потоки розсіювання між стрижнями магнітопроводу зменшуються та відповідно зменшуються додаткові втрати в обмотках та їхній нагрів. Завдяки цьому знижуються витрати активних матеріалів і вартість реакторів та збільшується ККД, що підвищує їхню конкурентоспроможність на ринку електротехнічного устаткування. Переваги запропонованого підходу особливо ефективні в реакторах за наявності вищих гармонік струму, зокрема, в реакторах пасивних фільтрів. Библ. 9, рис. 1.

Ключові слова: електричні апарати, реактори, магнітопроводи, магнітні потоки розсіювання, немагнітні проміжки, додаткові втрати, енергозбереження.

Вступ. Обумовлений зростаючою конкуренцією на світовому ринку електротехнічного устаткування, іде постійний процес покращення його технічних характеристик за умов зменшення собівартості виготовлення та експлуатаційних витрат, а мінімізація витрат у процесі виготовлення за рахунок підвищення його ефективності завжди було і залишається актуальною науково-технічною задачею. Навіть невелике зниження вартості устаткування призводить до збільшення його конкурентоспроможності. Одним з вирішальних чинників є зменшення маси активних матеріалів за збереженням або покращенням технічних і експлуатаційних характеристик та підвищенням ККД.

Метою роботи є викладення запропонованого авторами підходу зниження додаткових втрат в обмотках силових реакторів із множинними немагнітними проміжками в стрижнях магнітопроводів, що дає змогу знизити витрати активних матеріалів і вартість силових реакторів, а відповідно підвищити їхню конкурентоспроможність на ринку електротехнічного устаткування. Це є **актуальною задачею** у ході розробки, розрахунку, проектуванні, виробництві та впровадженні нової технічної продукції.

Методологія дослідження ґрунтувалася на вивченні зміни параметрів силових реакторів за несиметричним розподілом в стрижнях магнітопроводів немагнітних проміжків у процесі практичного доведення на виробництві їхніх індуктивностей до заданого рівня. Аналіз дослідних даних дав змогу виявити істотний вплив такої асиметрії на втрати в обмотках та їхній нагрів. Саме ці знання наштовхнули на ідею **вперше** в практиці побудови трифазних реакторів зменшити ці втрати оригінальним нерівномірним розподілом немагнітних проміжків та їхніх величин в стрижнях магнітопроводів, але симетрично від центрів стрижнів. Було проведено теоретичні дослідження, що ґрунтувалися на теорії розповсюдження електромагнітних полів в трансформаторах і реакторах, втратах в обмотках від вихрових і циркулюючих струмів [1, 2]. Розрахунки і експерименти на виробництві засвідчили правильність ідеї. Це дало **позитивні результати**, використання яких **на практиці** дало змогу виготовити силові реактори із зменшеними додатковими втратами, збільшеним ККД, зменшеною масою обмоток та, відповідно, зниженою собівартістю виробів. Експериментальна апробація проводилася на науково-виробничій базі компанії MIRUS International Inc., а нові запропоновані підходи знайшли

© Hoevenaars A.H., Lavreniuk A.V., Пентегов І.В., Римар С.В., Сидорець В.М., 2020
ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0003-0643-5219>; **<https://orcid.org/0000-0002-5632-6873>;
<https://orcid.org/0000-0002-0223-4594>; *<https://orcid.org/0000-0003-0490-4608>;
*****<https://orcid.org/0000-0002-8498-4726>

застосування у процесі проектування та виробництва енергозберігаючого устаткування [3–5], що конкурує на світовому ринку електротехнічної продукції.

Даний матеріал публікується авторами вперше.

Результати досліджень. Зазвичай, на першому етапі тестування дослідних зразків силових реакторів з рівномірно розподіленими вздовж стрижнів магнітопроводів однаковими немагнітними проміжками вимірюється їхня індуктивність. В трифазному виконанні в компанії MIRUS International Inc. – це реактори з прохідною потужністю від 100 до 3500 кВт. Якщо виміряні та розрахункові величини індуктивностей не співпадають, здійснюється корегування величин немагнітних проміжків під верхніми ярами. Після збігу фактичних і розрахункових величин індуктивностей, на другому етапі, отримані скореговані сумарні немагнітні проміжки знову рівномірно розподіляються по всім немагнітним проміжкам вздовж стрижнів. Дані прототипи реакторів слугують контрольними зразками для всіх серій подібних реакторів.

У процесі більш ґрунтовного дослідження першого етапу проміжного тестування реакторів, коли в них були змінені розміри верхніх немагнітних проміжків, було виявлено, що в цих реакторах *суттєво* змінюється температура нагріву обмоток. У реакторах, в яких обмотки було виконано із фольги, за збільшеного верхнього немагнітного проміжку температури зростали, а за зменшеного – спадали. Це природно і пояснюється тим, що у першому випадку зростає величина магнітних потоків розсіювання між стрижнями магнітопроводу та, відповідно, збільшуються додаткові втрати в провідниках обмоток від вихрових струмів [1, 2, 6, 7], а в другому – вони зменшуються. У разі використання в обмотках паралельних провідників прямокутного поперечного перетину, розташованих в аксіальному напрямку, температура їхнього нагріву зростала як за збільшених, так і зменшених верхніх немагнітних проміжках, але в першому випадку більш суттєво. Це пов'язано із збільшенням додаткових втрат в паралельних провідниках обмоток від циркулюючих в них струмів (зрівняльних струмів) [1, 2] у зв'язку з виникненням асиметрії розповсюдження полів розсіювання між стрижнями магнітопроводів відносно їхніх центрів. Але вже після другого етапу, коли немагнітні проміжки пропорційно і рівномірно розподіляються вздовж стрижнів магнітопроводів, потоки розсіювання стають симетричними відносно центрів, додаткові втрати від вихрових струмів зменшуються, а втрати від циркулюючих струмів ставали мінімальними або зовсім зникали. Втрати в обмотках та їхні температури поверталися до номінальних значень.

Наприклад, в силовому трифазному реакторі фільтра вищих гармонік струму з обмотками із фольги, з прохідною потужністю 350 кВт, лінійною напругою 480 В, частотою струму 60 Гц, індуктивністю 0,244 мГн, немагнітними проміжками в одному стрижні $4 \times 1,5 \text{ мм} = 6,0 \text{ мм}$ за струму в обмотці 292,3 А і напрузі на ній 26,9 В активні втрати становили **452 Вт**. За розподілом в тому ж реакторі проміжків $1 \times 3,9 \text{ мм} + 3 \times 0,8 \text{ мм} = 6,3 \text{ мм}$, тобто збільшеному у 2,6 рази верхньому немагнітному проміжку і зменшеними у 2 рази іншими проміжками, активні втрати за струму в обмотці 283,9 А і напрузі на ній 26,9 В становили **667 Вт**. Таким чином, втрати за збільшеного верхнього немагнітного проміжка зросли на **215 Вт**, що становить **48%**. Оскільки обмотки в реакторі виконані із фольги, в них немає ще втрат від циркулюючих струмів. Подібні тенденції спостерігалися у всіх досліджених реакторах.

Видно, що розподіл немагнітного проміжку дуже суттєво впливає на величину додаткових втрат в обмотках реактора, а відповідно і на їхній нагрів.

Збільшення немагнітних зазорів біля ярем збільшує додаткові втрати в обмотках від вихрових струмів, а їхнє зменшення – знижує, асиметрія розподілу немагнітних проміжків відносно центрів стрижнів збільшує втрати від циркулюючих струмів за паралельними провідниками обмоток, розташованими в аксіальному напрямку.

В зв'язку з цим було поставлено задачу – за рахунок варіації величин немагнітних проміжків вздовж стрижнів домогтися зменшення додаткових втрат в обмотках трифазних реакторів в порівнянні з рівномірно розподіленими проміжками без зміни конфігурації обмоток. Було проведено всебічний аналіз такої можливості та запропоновано два варіанти вирішення цієї задачі, які можна поєднувати один з одним. Розглянемо ці варіанти і шляхи їхнього втілення.

Варіант I. Проаналізуємо епюри розподілу поперечних складових магнітних індукцій у вікнах різних типів магнітопроводів реакторів.

У відсотковому відношенні найбільші поперечні магнітні потоки розсіювання, від яких додаткові втрати найбільші, спостерігаються у вікнах реакторів з Ш-подібними магнітопроводами, у яких немагнітні проміжки розташовані біля одного ярама. На рис. 1, а показано епюру поперечних складових

вих магнітних індукцій у вікні такого реактора, де позначено: 1 – обмотки на стрижні однієї фази; 2 – стрижні магнітопроводів; 3 – ярма; 4 – епюри магнітних індукцій потоків розсіювання у вікнах магнітопроводів при плоско-паралельному поперечному полі без врахування скін-ефекту в провідниках обмоток (тобто тонких провідниках); δ – сумарний немагнітний проміжок; n – кількість немагнітних проміжків; B_s – максимальна поперечна складова амплітуди магнітної індукції на краях обмотки біля проміжку в Ш-подібному магнітопроводі. Розподіл магнітних потоків тут аналогічний його розподілу в пазах електричних машин [8]. На рис. 1 скін-ефект [1, 2] в провідниках обмоток не врахований, оскільки показано лише тенденції зміни рівня магнітних індукцій у вікнах магнітопроводів. Поблизу ярем епюри також умовні.

На рис. 1, а ($n = 1$) магнітна індукція у вікні магнітопроводу біля стрижня і ярма без проміжку дорівнює нулю, а біля проміжку – B_s .

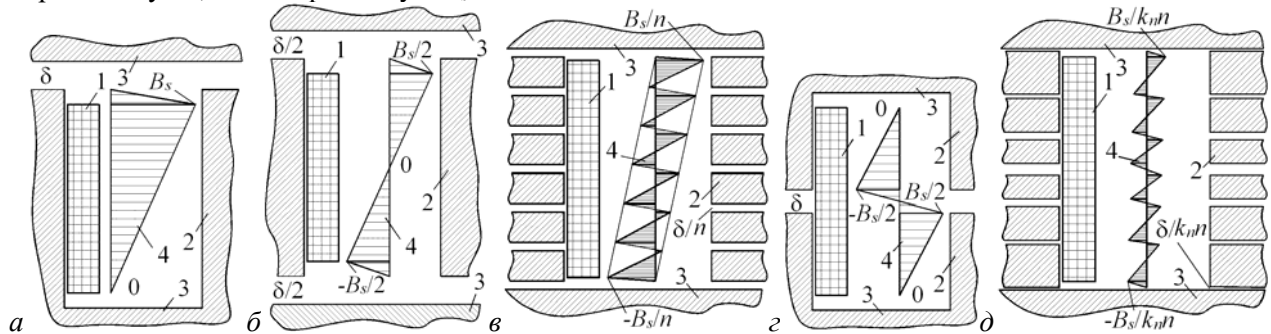


Рис. 1

В стрижневих магнітопроводах з двома немагнітними проміжками ($n = 2$), розташованими по краях стрижнів (рис. 1, б), індукція біля ярем у вікні магнітопроводу, у порівнянні з рис. 1, а, знижується вдвічі $B_s/2$, нульове значення індукції знаходиться по центру стрижнів, а площа епюр, яка пропорційна втратам, зменшується приблизно у 4 рази.

В стрижневих магнітопроводах з сімома немагнітними проміжками (рис. 1, в) рівень магнітних індукцій у вікні магнітопроводу у ярем, у порівнянні з рис. 1, а, знижується приблизно у 7 разів – $B_s/7$. Тобто збільшення кількості однакових немагнітних проміжків в n -разів знижує рівень магнітних індукцій у вікні магнітопроводу в зоні ярем приблизно n разів – B_s/n , а втрати від них – в n^2 разів. У цьому випадку суттєво зменшуються додаткові втрати в обмотках реакторів.

Важливо відмітити, що зменшення магнітної індукції, як і для магнітопроводу з двома проміжками, можна досягти в реакторах з двома Ш-подібними магнітопроводами, у яких один немагнітний проміжок розташований по центру стрижнів (рис. 1, г). З розгляду картини розподілу магнітного поля можна побачити, що за величини проміжку δ , такому ж як і для рис. 1, а, рівень індукції біля немагнітних проміжків у вікні магнітопроводу, у порівнянні з рис. 1, а, знижується вдвічі $B_s/2$, як для рис. 1, б, а нульове значення індукції спостерігається біля ярем. Тобто розташування одного великого немагнітного проміжку у центрі стрижнів вдвічі знижує магнітну індукцію потоків розсіювання у вікні магнітопроводу в порівнянні з одним таким же проміжком, розташованим біля ярма.

Цю важливу властивість щодо зменшення додаткових втрат в силових реакторах з множинними немагнітними проміжками було вперше використано авторами і компанією MIRUS International Inc. при встановленні закономірності розподілу немагнітних проміжків по довжині стрижнів магнітопроводу та варіації їхніх величин. Це можна сформулювати так: *найбільші величини немагнітних проміжків розташовуються ближче до центру стрижнів і поступово зменшуються до їхніх країв в сторону ярем*. Це є перший варіант підходу.

Даний варіант підходу до зниження додаткових втрат було досліджено і експериментально випробувано на науково-виробничій базі компанії на ряді силових реакторів. Було одержано позитивний результат.

Наприклад, у силовому трифазному реакторі з обмотками, виконаними із паралельних провідників прямокутного поперечного перетину, розташованих в аксіальному напрямку, з прохідною потужністю 175 кВт, лінійною напругою 480 В, частотою струму 60 Гц, індуктивністю 0,917 мГн, проміжками в одному стрижні $3 \times 1,968 \text{ мм} = 5,904 \text{ мм}$, за струмом в обмотці 88,3 А і напругою на ній 30,5 В активні втрати становили **98 Вт**. У разі розподілу в тому ж реакторі проміжків $1 \times 3,175 \text{ мм} + 2 \times 1,175 \text{ мм} = 5,525 \text{ мм}$, активні втрати за струмом в обмотці 87,0 А і напругою на ній 31,6 В становили

91 Вт. Таким чином, втрати за зменшених крайніх і збільшеному центральному проміжку зменшилися на **7 Вт**, що становить **7%**.

Варіант II. Цей ефект можна посилити, якщо варіювати відстань між проміжками секцій, а саме, зменшувати відстань між проміжками від країв до центру стрижнів. Це формулюється так: *на краях стрижня необхідно встановлювати найдовші його секції і зменшувати довжину секцій до центру стрижня, тим самим зміщуючи проміжки ближче до центру стрижня.* Це є другим варіантом зменшення додаткових втрат, який також було вперше використано авторами і компанією MIRUS International Inc. для зниження додаткових втрат в обмотках трифазних силових реакторів.

Зазначимо, що досліди з варіювання відстані між немагнітними проміжками секцій стрижнів двохстрижневих магнітопроводів однофазних реакторів, але за дослідженням зміни їхньої загальної індуктивності, описано у роботі [9]. В ній показано, що індуктивність однофазних реакторів збільшується за умови концентрації проміжків в стрижнях біля ярем і зменшується – ближче до центрів стрижнів.

Ці дослідження також підтверджують, що таким же чином збільшуються і зменшуються потоки розсіювання між стрижнями, які і викликають зміну загальної індуктивності реакторів, а відповідно і зміну додаткових втрат в їхніх обмотках.

Обидва варіанти підходу до зниження додаткових втрат в силових реакторах з множинними немагнітними проміжками можна застосовувати одночасно (рис. 1, *д*). Видно, що рівень індукцій, у порівнянні з рис. 1, *в*, тут зменшений. На рисунку k_n – коефіцієнт при n -му проміжку.

За даними компанії MIRUS International Inc. у досліджених реакторах різних типів з обмотками із провідників прямокутного поперечного перетину зниження втрат коливалося у діапазоні 5...40%, а з обмотками із фольги – 4...10%. Це особливо ефективно в реакторах за наявності вищих гармонік струму.

Значення величин проміжків і довжин секцій стрижня, коли з врахуванням скін-ефекту максимальні значення індукцій на епоках наближали до менших значень і одна до одної, можна одержати, розв'язуючи «гладку» варіаційну задачу, тобто варіаційну задачу з неперервними аргументами. Але дотримання цих розмірів на практиці забезпечити не просто, оскільки у виробництві використовуються стандартні товщини ізоляційних матеріалів, з яких набираються немагнітні проміжки. Розмір секцій стрижнів магнітопроводу також може змінюватися лише дискретно. Лімітується максимальний та мінімальний розмір секцій. Така «дискретна» варіаційна задача з обмеженнями складніша за «гладку», але і вона дає прийнятний для практики результат зменшення додаткових втрат. Розроблення методики та алгоритму розв'язку такої варіаційної задачі потребує подальшої роботи.

Висновки. Вперше встановлено, що в силових реакторах з множинними немагнітними проміжками зменшення величин немагнітних проміжків між секціями стрижнів магнітопроводів від центру стрижнів до їхніх країв і зменшення відстані між ними від країв до центру стрижнів призводить до зменшення додаткових втрат в обмотках та їхнього нагріву завдяки зменшенню магнітних потоків розсіювання між стрижнями магнітопроводу. Застосування такого підходу дає змогу знизити витрати активних матеріалів і вартість реакторів та підвищити ККД. Це призводить до підвищення конкурентоспроможності реакторів на ринку електротехнічного устаткування. Практичний досвід компанії MIRUS International Inc. засвідчив, що переваги запропонованого підходу особливо ефективні в реакторах за наявності вищих гармонік струму, зокрема в реакторах пасивних фільтрів.

1. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. Москва: Энергия, 1981. 392 с.

2. Сергеевков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А. Электрические машины: Трансформаторы. Москва: Высшая школа, 1989. 352 с.

3. Farbis M., Hoveenaars A.H., McGraw M. Marine Duty Harmonic Mitigation on DC Propulsion Saves Oil Service Vessel Program. *IEEE Transactions on Industry Applications*. March-April, 2017. Vol. 53. Issue 2. Pp. 1617-1626. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2621102>

4. Hoveenaars A.H., McGraw M., Alexander J. Right-Sizing Generators through Harmonic Mitigation Realizes Energy, Emissions, and Infrastructure Reductions. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Jan.-Feb., 2017. Vol. 53. Issue 1. Pp. 675-683. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2603143>

5. Farbis M., Hoveenaars A.H., Greenwald J.L. Oil Field Retrofit of ESPs to Meet Harmonic Compliance. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Jan.-Feb., 2016. Vol. 52. Issue 1. Pp. 718-728. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2481358>

6. Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. Москва-Ленинград: Энергия, 1967. 208 с.

7. Туровский Я. Техническая электродинамика. Москва: Энергия, 1974. 488 с.

8. Вольдек А.И. Электрические машины. Ленинград: Энергия, 1974. 840 с.

9. Abe T., Hamakake H., Kikuchi K. Reactor Core and Reactor. Patent US № 20100171580 A1. 2010.

СНИЖЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ В ОБМОТКАХ СИЛОВЫХ РЕАКТОРОВ

А.Н. Hoevenaars¹, А.В. Lavreniuk¹, И.В. Пентегов², С.В. Рымар², В.Н. Сидорец²

¹MIRUS International Inc.,

31 Sun Pac Blvd., Brampton, Canada L6S 5P6, e-mail: mirus@mirusinternational.com

²Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,

ул. К. Малевича, 11, Киев, 03680, Украина, e-mail: sydorvn@gmail.com

Предложен подход снижения дополнительных потерь от вихревых и циркулирующих токов в обмотках силовых реакторов с множественными немагнитными зазорами в стержнях магнитопроводов. Подход базируется на вариации величин немагнитных зазоров и их распределении по длине стержня – уменьшение величин зазоров происходит от центра стержня к его краям, а уменьшение расстояния между зазорами имеет место от краев к центру стержня. В результате магнитные потоки рассеяния между стержнями магнитопровода уменьшаются, и, соответственно, уменьшаются дополнительные потери в обмотках и их нагрев. Благодаря этому снижаются расходы активных материалов и стоимость реакторов и увеличивается КПД, что повышает их конкурентоспособность на рынке электротехнического оборудования. Преимущества предлагаемого подхода особенно эффективны в реакторах при наличии высших гармоник тока, в частности, в реакторах пассивных фильтров. Библи. 9, рис. 1.

Ключевые слова: электрические аппараты, реакторы, магнитопроводы, магнитные потоки рассеяния, немагнитные зазоры, дополнительные потери, энергосбережение.

REDUCING ADDITIONAL LOSSES IN POWER REACTOR WINDINGS

А.Н. Hoevenaars¹, А.В. Lavreniuk¹, I.V. Pentegov², S.V. Rymar², V.M. Sydorets²

¹MIRUS International Inc.,

31 Sun Pac Blvd., Brampton, Canada L6S 5P6, e-mail: mirus@mirusinternational.com

²Paton Welding Institute National Academy of Sciences of Ukraine,

11, K. Malevicha str., Kyiv, 03680, Ukraine, e-mail: sydorvn@gmail.com

An approach to reduce the additional losses from eddy and circulating currents in the windings of power reactors with non-magnetic multi-gaps in the legs of the magnetic cores is proposed. The approach is based on variations of the values of non-magnetic gaps and their distribution along the leg – decrease of the gaps occurs from the center of the leg to its edges, and decrease of the distance between the gaps takes place from the edges to the center of the leg. As a result, the magnetic leakage fluxes between the legs of the magnetic core are reduced, and additional losses in the windings and their heating are reduced, accordingly. Due to this, expenses on the active materials and the cost of reactors are reduced and efficiency is increased, which increases their competitiveness in the market of electrical equipment. The advantages of the proposed approach are especially effective for reactors while the higher current harmonics present, in particular, for passive filter reactors. References 9, figure 1.

Key words: electrical apparatus, reactors, magnetic circuits, magnetic fluxes of scattering, non-magnetic gaps, additional losses, energy conservation.

1. Leites L.V. Electromagnetic calculations of transformers and reactors. Moskva: Energiya, 1981. 392 p. (Rus)
2. Sergeenkov B.N., Kiselev V.M., Akimova N.A. Electric machinery: Transformers. Moskva: Vysshay Shkola, 1989. 352 p. (Rus)
3. Farbis M., Hoevenaars A.H., McGraw M. Marine Duty Harmonic Mitigation on DC Propulsion Saves Oil Service Vessel Program. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53. Issue 2. Pp. 1617-1626. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2621102>
4. Hoevenaars A.H., McGraw M., Alexander J. Right-Sizing Generators through Harmonic Mitigation Realizes Energy, Emissions, and Infrastructure Reductions. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53. Issue 1. Pp. 675- 683. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2603143>
5. Farbis M., Hoevenaars A.H., Greenwald J.L. Oil Field Retrofit of ESPs to Meet Harmonic Compliance. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. Vol. 52. Issue 1. Pp. 718-728. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2481358>
6. Lammeraner J., Staffl M. Eddy currents. Moskva-Leningrad: Energiya, 1967. 208 p. (Rus)
7. Turowski J. Technical electrodynamics. Moskva: Energiya, 1974. 488 p. (Rus)
8. Voldek A.I. Electrical machines. Leningrad: Energiya, 1974. 840 p. (Rus)
9. Abe T., Hamakake H., Kikuchi K. Reactor Core and Reactor. Patent US № 20100171580 A1. 2010.

Надійшла 04.03.2020
Остаточний варіант 01.04.2020