

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТА ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУДК 621.313:621.365:621.314:537.523.9 DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.103>**ВДОСКОНАЛЕННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ**

І.В. Божко ^{*}, канд. техн. наук, **О.М. Карлов** ^{**}, канд. техн. наук, **І.П. Кондратенко** ^{***}, докт. техн. наук, **Р.С. Кришук** ^{****}, канд. техн. наук, **К.О. Липківський** ^{*****}, докт. техн. наук, **А.Г. Можаровський** ^{*****}, канд. техн. наук, **А.П. Ращепкін** ^{*****}, докт. техн. наук.
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: dep7ied@ukr.net

Представлено результати досліджень, проведених у відділі електромагнітних систем у 2018 році. Розвинено методи розрахунку електромагнітного поля в електромагнітній системі, що утворена струмовими контурами, які розміщуються в просторі за законом біжучого магнітного поля. Досліджено електродинамічні сили і розподіл джерел теплоти при взаємодії магнітного поля трифазної системи контурів і металевої стрічки обмеженої ширини. Встановлено можливість індукційного нагріву феромагнітних стрічок з задовільною рівномірністю за шириною. Визначено умови для електродинамічної стабілізації стрічки за віссю повітряного проміжку. Отримав розвиток метод розрахунку електромагнітного поля торцевих двигунів з дисковим біметалевим ротором. Встановлено аналітичні вирази для розрахунку аксіальних магнітних сил, тривимірний розподіл індукції магнітного поля в зазорі з урахуванням лінійної швидкості руху ротора. Розраховано механічну та робочу характеристики, аксіальні сили, що діють на ротор асинхронного двигуна великої потужності, який призначено для безредукторного приводу кульових млинів. Представлено результати експериментальних досліджень бар'єрного розряду на поверхню води. Експериментально доведено, що в повітрі атмосферного тиску за встановлених довжини фронту імпульсів напруги та амплітудних значень електричного поля в газі є можливим існування однорідного імпульсного бар'єрного розряду на поверхню плівки води. Виконано комплекс робіт, що обґрунтовують можливість та доцільні шляхи підвищення ефективності використання встановленої потужності трансформуючого елемента з секціонованою обвиткою в складі трансформаторно-ключової виконавчої структури стабілізатора напруги змінного струму. Бібл. 34, рис. 24, табл. 3.

Ключові слова: індукційний нагрів, торцевий асинхронний двигун, однорідний бар'єрний розряд, трансформаторно-ключові структури

Наукові дослідження відділу електромагнітних систем спрямовано на розвиток теорії та методів розрахунку електромагнітного поля, створення наукових основ електромагнітних технологій, розвиток та узагальнення теорії перетворення напруги змінного струму.

Щодо напрямку розвитку методів розрахунку електромагнітного поля у відділі в 2018 році вчергове повернулися до відомого питання про індукційний нагрів площинного прокату. Залишився нез'ясованим спосіб нагріву площинного прокату з феромагнітними властивостями із застосуванням трифазного живлення підвищеної частоти. Можливість застосування такого способу нагріву обумовлюється значними успіхами в перетворювальній напівпровідниковій техніці. Особливістю індукційного нагріву на підвищеній частоті є відсутність феромагнітного осердя. Тому розробка методу розрахунку електромагнітного поля в електромагнітній системі без феромагнітного осердя відрізняється від відомих методів [1] додатковими умовами на границях при формулюванні граничної задачі.

Електромагнітні процеси в трифазній електромагнітній системі нагріву площинного прокату без феромагнітного осердя. Основною перевагою індукційного нагріву площинного прокату металів біжучим магнітним полем є відсутність виробничого шуму, обумовленого

© Божко І.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П., Кришук Р.С., Липківський К.О., Можаровський А.Г., Ращепкін А.П., 2019

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7955-246X>, <https://orcid.org/0000-0002-1350-1870>,

<https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>, <https://orcid.org/0000-0002-1933-0144>,

<https://orcid.org/0000-0002-3292-1360>, <https://orcid.org/0000-0001-9801-2728>,

<https://orcid.org/0000-0002-3309-8032>

силовим впливом магнітного поля на стрічку, що нагрівається, і магнітним тяжінням індукторів. Вимога до такої термообробки зумовлена потребою в забезпеченні рівномірного розподілу температурного поля за довжиною і шириною смуги. Рівномірність розподілу температури за шириною внаслідок явищ поперечного крайового ефекту залежить від співвідношення ширини смуги і ширини індуктора, довжини полюсного поділу, величини магнітного числа Рейнольдса і, отже, може бути досягнута лише для цілком певного типорозміру смуги [2].

Було розглянуто виконання трифазного індуктора, який складається з двох груп колушок, кожену з яких увімкнено за схемою біжучого магнітного поля і які розрізняються між собою довжиною еквівалентного полюсного кроку. На рис. 1 наведено один з можливих варіантів виконань такого індуктора, який складається з двополюсної та чотириполюсної обвиток.

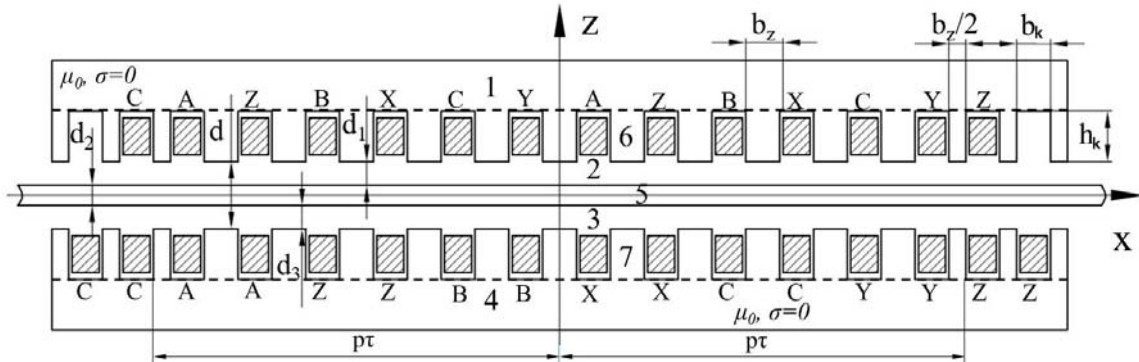


Рис. 1

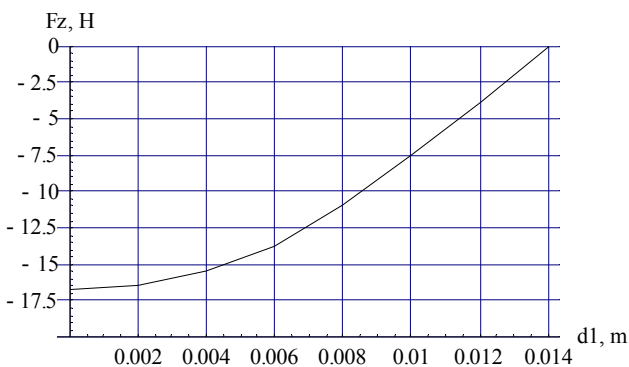
Чотириполюсна і двополюсна обвитки, схематично зображені на рис. 1, зосереджені на верхньому і нижньому статорі відповідно. Для забезпечення стабілізації стрічки за центром зазора обидві обвитки доцільно одночасно розміщувати на обох статорах, що і будемо припускати для спрощення розрахунків у подальшому.

У результаті виконаного аналізу електромагнітних процесів у індукційній системі на основі системи рівнянь Максвелла з використанням моделі індукторів, що чергуються, отримано розв’язок крайової задачі про розподіл магнітної індукції в зазорі між індукторами та визначено основні енергетичні характеристики двохобвиткового індуктора без феромагнітного осердя [3].

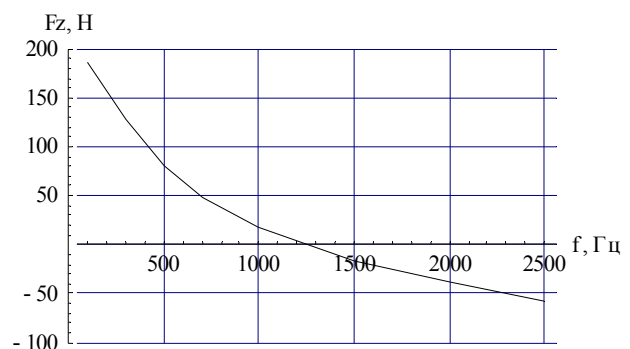
Важливою умовою індукційного нагріву площинного прокату є необхідність стабілізації положення прокату (стрічки) на повздовжній осі індукційної системи, завдяки якій на поверхні не створюються пошкодження.

Електродинамічні зусилля, що діють на феромагнітну смугу, визначені з тензора натягів Максвелла [4]. Аналіз залежностей F_z (складової сили) вказує на зростання її в процесі збільшення зміщення стрічки від центру зазора. На рис. 2 а наведено залежність цієї сили від величини зазора між стрічкою і верхнім індуктором за зустрічного включення індукторів.

За $d_1=0$ (рис. 1) стрічка безпосередньо притуляється до обвитки верхнього індуктора, а за $d_1=0,014$ м положення стрічки відповідає симетричному. З рис. 2 а видно, що спостерігається-



а



б

Рис. 2

ся електромагнітна стабілізація феромагнітної стрічки за центром зазора між індукторами.

На рис. 2 б наведено залежність сили F_z від частоти струму індуктора за зустрічного включення індукторів. Сила, що притискає стрічку до верхнього індуктора, зі зростанням частоти зменшується і за певної частоти стає негативною. Тобто стрічка відштовхується від верхнього індуктора і прагне зайняти положення, близьке до середини зазора між індукторами. На рисунку показано крайній випадок, коли стрічка знаходиться на поверхні індуктора.

За малих відхилень стрічки від центрального положення частота, за якої F_z переходить через 0, дещо знижується. У загальному випадку частота, за якої забезпечується стабілізація стрічки, істотно залежить від геометричних розмірів стрічки та її електрофізичних характеристик і визначається в кожному конкретному випадку самостійно. Таким чином, є змога здійснювати нагрів феромагнітних стрічок у високочастотних індукторах біжучого магнітного поля без феромагнітного осердя зі стабілізацією положення стрічки за центром повітряного проміжку. У такому випадку поверхня стрічки не пошкоджується механічно.

Необхідно звернути увагу на відмінність структури розподілу джерел теплоти в індукторі без феромагнітного осердя від відомих результатів, що отримані для індукторів біжучого магнітного поля з феромагнітним осердям [1]. На рис. 3 показано розподіл джерел теплоти в смузі для узгодженого (рис. 3 а) і зустрічного (рис. 3 б) розповсюдження біжучих полів. Струми в обвитках для обох випадків прийнято за однакові.

$$- I_1=800 \text{ А}, I_2=600 \text{ А}, f=1500 \text{ Гц}, a=0,6 \text{ м}, \sigma = 3 \cdot 10^6 \text{ См/м}, \mu = 100 \cdot \mu_0.$$

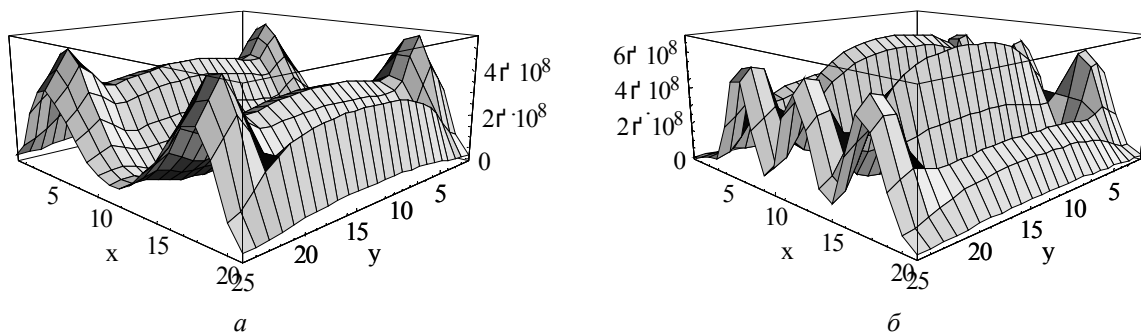


Рис. 3

Помітно різкі неоднорідності тепловиділень у смузі за обох напрямків поширення біжучих полів обвиток. Причому в разі зустрічного розповсюдження біжучих полів кількість цих неоднорідностей з кожного краю смуги дорівнює сумі кількості пар полюсів двох обвиток. У центральній зоні смуги розподіл тепловиділень також є неоднорідним. Виникнення зазначених неоднорідностей викликано структурою результуючого магнітного поля в смузі, що призводить до утворення багатовихрової структури індуктованих струмів. У разі узгодженого напрямку поширення біжучих полів обвиток спостерігається більш виражена неоднорідність тепловиділень за довжиною машини.

Присутність явно виражених неоднорідностей тепловиділень у смузі під час використання двохобвиткового індуктора може призводити до небажаного короблення, особливо при нагріванні тонких стрічок.

Застосування двохобвиткових індукторів є доцільним у разі розширення діапазону розмірів стрічок, що нагріваються.

На рис. 4 показано розподіл температури на виході із зони нагріву для стрічок товщиною 2 мм, шириною 600 мм (крива 1) і шириною 550 мм (крива 2). Полюсні поділи, як і в попередньому прикладі, обрано рівними $\tau_1 = 0,42$ м, $\tau_2 = 0,21$ м. Ширина котушок не змінюється за зміни ширини стрічки і становить $b = 0,44$ м. Струми в обвитках під час нагрівання стрічки шириною 600 мм складають $I_1 = 800$ А, $I_2 = 600$ А, а під час нагрівання стрічки шириною 550 мм – $I_1=1250$ А, $I_2=250$ А. На рис. 4 продемонстровано результат нагріву стрічок різної ширини із задовільною за технологічними вимогами рівномірністю за шириною. Це здійснено лише шляхом зміни величини струму в котушках кожної обвитки, без зміни будь-яких конструктивних розмірів індукційного пристрою.

Таким чином, застосування індукторів біжучого магнітного поля без феромагнітного осердя дає змогу позбутися акустичного шуму під час нагрівання феромагнітних стрічок, про

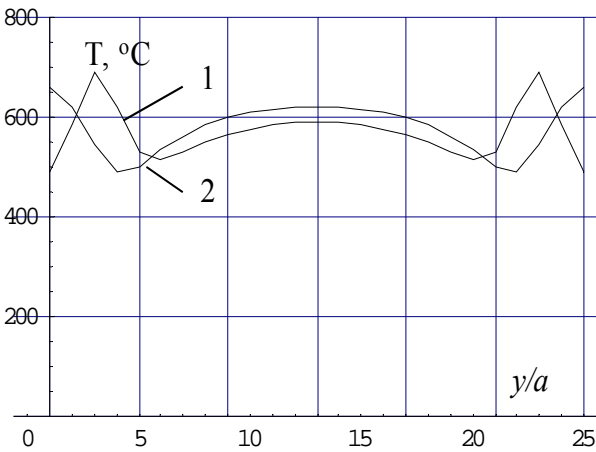


Рис. 4

що свідчить мінімальне значення електродинамічної сили. При перевищенні певної частоти електродинамічні сили забезпечують стабілізацію феромагнітної стрічки за віссю зазора між індукторами. Величина частоти залежить від електромагнітних параметрів феромагнітної стрічки та її геометричних розмірів.

У 2018 році у відділі було продовжено дослідження особливого класу асинхронних машин – торцевих асинхронних машин з дисковим ротором. Особливістю розрахунку електромагнітного поля в таких машинах є ускладнення аналітичного розв’язку через залежність лінійної швидкості ротора від радіуса дискового ротора. Ця особливість пере-

водить диференціальне рівняння для індукції магнітного поля з однорідного до рівняння зі змінними коефіцієнтами. У відділі електромагнітних систем Інституту електродинаміки НАН України розроблено аналітичний метод розрахунку таких електромагнітних систем, що продемонстровано на прикладі дослідження торцевого дугостаторного двигуна, перебіг електромагнітних процесів у якому ускладнюється поздовжнім, поперечним та товщинним крайовими ефектами.

Електромагнітні процеси та електродинамічні зусилля в торцевих дугостаторних двигунах з дисковим біметалевим ротором. На теплових електростанціях (ТЕС), де як паливо використовується кам’яне вугілля, застосовуються кульові барабанні млини для подрібнення кам’яного вугілля шляхом обертання барабану, наповненого сталевими кулями [5]. Для приведення млинів у дію застосовується електропривод з механічною зубчастою передачею від синхронного двигуна. Потужність кульових барабанних млинів на електростанціях сягає до 2,5 МВт. Електропривод на зубчастій передачі має значні недоліки. Це, зокрема, зношення зубців, необхідність у регулюванні їх стиковки та змащення, заміна механічних деталей.

У відділі для привода кульових барабанних млинів запропоновано торцевий дугостаторний асинхронний двигун (ТДАД) з масивним дисковим ротором. Для електричного двигуна такої конструкції розроблено аналітичний метод розрахунку електромагнітного поля і електродинамічних сил з урахуванням особливостей обвитки та багат шарової конструкції ротора [6].

Метою представленого дослідження було визначення аналітичних виразів для розрахунку осової магнітної сили, що діє на дисковий біметалевий ротор торцевого дугостатор-

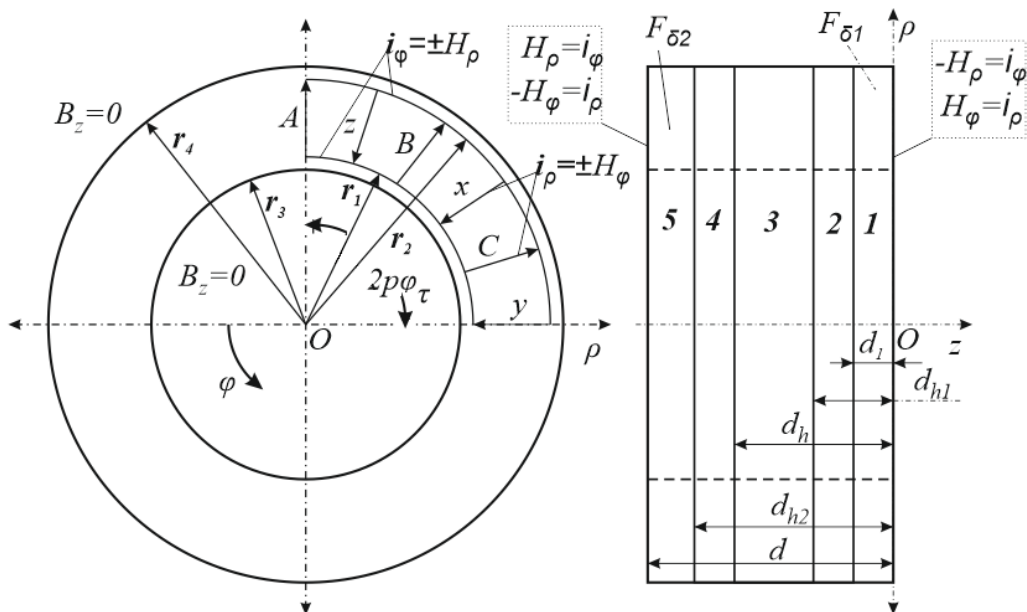


Рис. 5

ного асинхронного двигуна за асиметричного положення ротора в зазорі.

На рис. 5 зображено модель ТДАД, де 1, 5 – повітряні проміжки; 2, 4 – електропровідне покриття ротора; 3 – феромагнітний матеріал ротора.

У результаті виконаного аналізу електромагнітних процесів двигуна на основі системи рівнянь Максвелла за заданого струму отримано рішення крайової задачі про розподіл магнітної індукції в ТДАД. Приведемо для прикладу розрахунок аксіальної магнітної сили, що діє на дисковий ротор, який розміщується між двома статорами. Усі задані параметри представлено у табл. 1.

Таблиця 1

Параметр	Пояснення	Параметр	Пояснення
$r_1 = 2,2$ м	розміри модельного представлення двигуна показано на рис. 1	$h_k = 0,005$ м	товщина клинів
$r_2 = 2,8$ м		$p = 13$	кількість пар полюсів
$r_3 = 2,0$ м		$q = 2$	кількість пазів на полюс і фазу
$r_4 = 3,0$ м		$\beta = 1$	коефіцієнт вкорочення обвитки
$d_1 = 0,002$ м		$m = 3$	кількість фаз обвитки
$d_{h1} = 0,005$ м		$w_n = 8$	кількість витків у пазах
$d_h = 0,045$ м		$\sigma_{Fe} = 2 \cdot 10^6$ СМ/М	електропровідність сталі ротора
$d_{h2} = 0,048$ м		$\mu_{rFe} = 300$	відносна магнітна проникність сталі ротора
$d = 0,056$ м		$\sigma_{Cu} = 4 \cdot 10^7$ СМ/М	електропровідність міді ротора
$C_s = 1/2$	коефіцієнт розкриття	$f = 8,6$ Гц	частота
$h_n = 0,06$ м	висота пазів	$I_{m ном.} = 320$ А	номінальний струм
$b_n = 0,022$ м	ширина пазів	$U_\phi = 1,57$ кВ	задана напруга живлення

Виконано розрахунок аксіальних магнітних сил та енергетичних показників аналітичним методом для дугостаторного двигуна за даними табл. 1. На рис. 6 показано розподіл індукції в немагнітному проміжку двигуна в межах однієї пари полюсів з урахуванням вищих просторових гармонік. Видно, що індукція магнітного поля поступово зростає в момент входження ротора в область дії статора і загасає на $1/4$ частині ротора за виходом (рис. 6). На рис. 7 зображено розподіл індукції в повітряному проміжку d_1 у межах однієї пари полюсів з урахуванням зубцевих гармонік.

На рис. 8 відображено механічну характеристику, де $F_{\delta 1}$ – сила, що діє на правий статор (рис. 1), $F_{\delta 2}$ – сила, що діє на лівий статор, F_z – аксіальна сила, що діє на ротор і підшипники барабанного млина в напрямку меншого повітряного проміжку, M – момент сумарний електромагнітний.

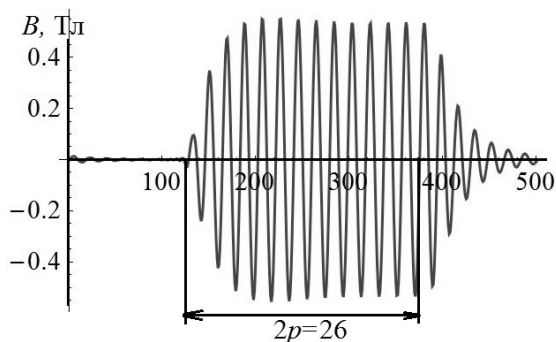


Рис. 6

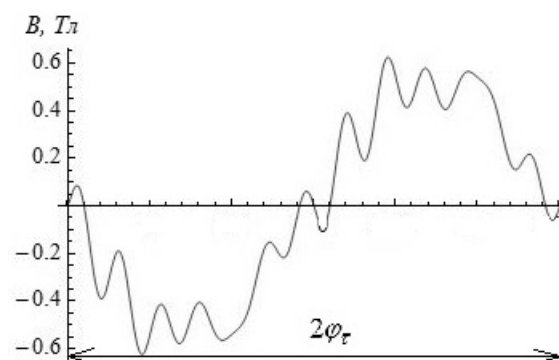


Рис. 7

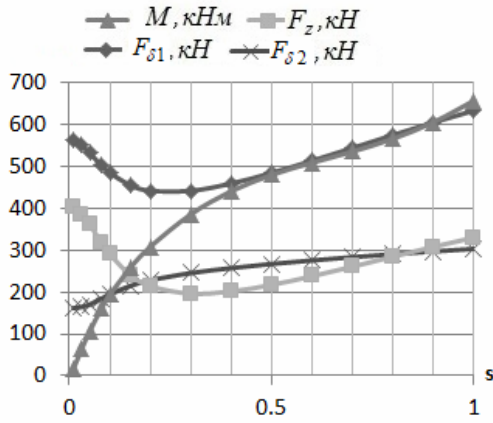


Рис. 8

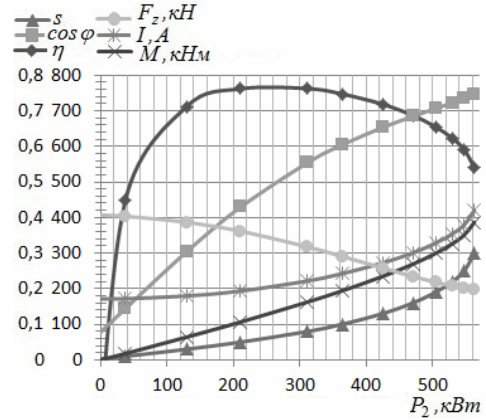


Рис. 9

На рис. 9 показано робочу характеристику ТДАД з біметалевим ротором, розміщеним несиметрично в зазорі між статорами. Номінальний режим вибрано в точці з корисною потужністю $P_2=311$ кВт при ковзанні $s_n = 0,08$. ККД двигуна $\eta=76,2$ %, а коефіцієнт потужності $\cos\varphi=0,55$. Номінальний діючий струм $I=222$ А, що більше від струму холостого ходу на 29 %. Аксіальні магнітні сили, що діють на підшипники барабанного млина, при повітряних проміжках біля правого і лівого статорів відповідно $d_1=2$ мм і $d_2=8$ мм становлять $F_z=318$ кН для номінального режиму і зменшуються за зростання корисної потужності. Сила, яка діє на правий статор, – $F_{\delta 1}=503$ кН, на лівий – $F_{\delta 2}=185$ кН. Електромагнітний момент $M=162$ кНм.

Якщо порівнювати біметалевий ротор з монометалевим феромагнітним за інших однакових умов (тобто якщо зняти немагнітне покриття з ротора), то для номінального режиму при ковзанні 0,08 з монометалевим ротором одностороння магнітна сила F_z , що діє на ротор, зростає вдвічі й буде становити 628 кН, електромагнітний момент – $M=42$ кНм, струм – $I=100$ А, ККД, коефіцієнт потужності – відповідно $\eta=80,9$ % та $\cos\varphi=0,29$.

Притягнення дискового ротора до одного зі статорів можна уникнути двома способами: застосуванням спеціальної конструкції з механічним вирівнюванням ротора; використанням немагнітного матеріалу ротора. Актуальним залишається питання щодо використання ротора з такою товщиною немагнітного покриття, щоб уникнути проникнення магнітного поля в феромагнітний матеріал.

За частоти напруги живлення 8,6 Гц глибина проникнення буде становити при нерухомому роторі 0,027 м. У табл. 2 представлено параметри, які відрізняються від параметрів табл. 1 для товщини покриття 0,03 м.

Таблиця 2

$d_1 = 0,002$ м	$d_{h1} = 0,032$ м	$d_h = 0,072$ м	$d_{h2} = 0,102$ м
$d = 0,110$ м	$h_n = 0,100$ м	$U_\phi = 1,38$ кВ, ($f=8,3$ Гц)	$I_{m\text{ ном.}} = 720$ А

На рис. 10 наведено механічну характеристику та графік зміни магнітних сил від ковзання. Порівнюючи приведену на

рис. 8 характеристику, спостерігаємо перехід аксіальної сили, яка діє на ротор, до протилежного напрямку при ковзанні від 0,12 і більше. Тобто сила, що притягувала ротор до ближчого статора, стала відштовхувати його від статорів. У табл. 2 показано, що було збільшено глибину пазів двигуна від 0,06 м до 0,1 м, а переріз провідників – від 100 до 185 мм². Механічна характеристика на рис. 10 набула явно вираженого мінімального моменту при ковзанні 0,75. За такої характеристики номінальний момент буде близьким до 160 кНм при ковзанні майже 0,05, що рівнозначно номінальному моменту попереднього двигуна (рис. 9). ККД двигуна зменшився до 65 %, коефіцієнт потужності досяг значення 0,35. Густина струму в провідниках зросла від 2,22 до 2,77 А/мм².

Характеристики на рис. 8 і 10 можна вважати граничними для двигуна з вибраними розмірами (табл. 1). На рис. 8 – характеристика за мінімальної товщини немагнітного покриття ротора, а на рис. 10 – за максимальної товщини.

Таким чином, встановлено аналітичні вирази для розрахунку аксіальних магнітних сил торцевих дугостаторних асинхронних двигунів з біметалевими дисковими роторами, тривимірний розподіл індукції магнітного поля в зазорі з урахуванням лінійної швидкості руху ротора. Розраховано механічну та робочу характеристики, які показують спадання аксіальної сили, що діє на ротор, за зростання навантаження двигуна. Аксіальні сили за несиметричного положення ротора становлять 318 кН. Тому під час проектування потужних ТДАД важливо враховувати дію магнітних сил. Встановлено, що аксіальні магнітні сили можна усунути в разі збільшення товщини немагнітного покриття ротора.

Суттєве місце в розробках відділу електромагнітних систем займає дослідження електрофізичних процесів при електричному розряді в газах атмосферного тиску. Такі дослідження спрямовано на створення електротехнологічних систем різного функціонального призначення. Найбільш яскравим прикладом застосування електророзрядних технологій є пристрої генерації хімічно активних речовин, передусім озону, які успішно використовуються в процесі знезараження повітря і води, поверхонь і приміщень. Серед великого різноманіття видів електричного розряду особливе місце як найбільш економічний займає імпульсний бар'єрний розряд. Зусилля дослідників відділу в 2018 році були зосереджені на встановленні умов створення однорідного бар'єрного розряду.

Однорідна та неоднорідна форми імпульсного бар'єрного розряду на поверхню води в атмосферному повітрі. Бар'єрні розряди (БР) забезпечують відносно просту технологію створення нерівноважної плазми в газах атмосферного тиску, що стало причиною їх промислових застосувань, як-от генерація озону, модифікація поверхні твердих матеріалів, очищення води та газів тощо [7]. Залежно від виду газу та його тиску, параметрів джерела живлення та електродної системи БР може мати просторово неоднорідний (ниткоподібний) або однорідний (дифузний) зовнішній вигляд [8]. Між цими двома крайніми формами існує також проміжна, коли в розрядному проміжку одночасно спостерігаються зони як з однорідним, так і з ниткоподібним БР [8–11]. Дослідження ниткоподібного БР мають довгу історію, і він у значній мірі вивчений [12]. Однорідний БР, або як його ще називають гомогенний чи тліючоподібний (glow-like), завдяки просторово рівномірному розподілу густини струму та високій конверсійній ефективності активних частинок у ньому, знайшов застосування при нанесенні тонких плівок, у медицині тощо [10, 13, 14]. Однак, незважаючи на те, що останні два десятиліття ведуться інтенсивні дослідження таких розрядів, можна вважати, що до цього часу вони недостатньо вивчені. Підсумком таких досліджень є виділення двох основних груп БР: традиційний БР, який збуджується змінною (синусоїдальною) напругою з частотою до десятків кГц [7, 8, 15, 16], та імпульсний бар'єрний розряд (ІБР) з короткими фронтами (~5–40 нс) та тривалістю (~100 нс) імпульсів напруги [9, 10, 13, 14]. Однорідні БР першої групи більш досліджені. Вони мають характер таундсендівського чи тліючого розряду і характеризуються відносно малими густинами струмів, котрі не перевищують десятків mA/cm^2 , а середня енергія електронів T_e в них зазвичай знаходиться в межах 1–3eV [14, 16].

Однорідні імпульсні бар'єрні розряди (ОІБР), завдяки сильним електричним полям в газі, котрі можуть у кілька разів перевищувати поля, необхідні для ініціювання звичайного БР, мають суттєві позитивні якості. Вони полягають у тому, що в ОІБР можна досягти великих густин струму (десятки A/cm^2) [14] та величин $T_e \sim 5\text{eV}$ [9]. Окрім цього, внаслідок відносно тривалої паузи без струму між імпульсами зменшуються непродуктивні витрати енергії. Все це формує суттєві переваги ОІБР при практичному застосуванні над однорідними БР першої групи за енергоефективністю та продуктивністю.

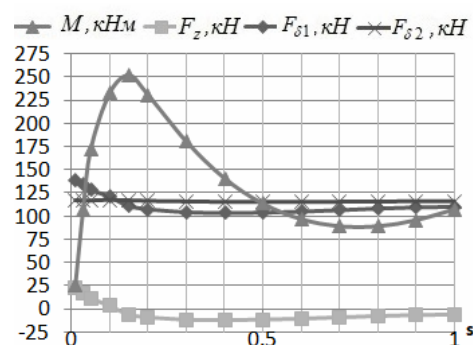


Рис. 10

Однією зі сфер застосування ІБР є пряма обробка води (розряд діє на плівку води) [12, 17–19]. Априорі можна вважати, що така обробка ефективніша тоді, коли ІБР є однорідним. У відомих дослідженнях ІБР на поверхню води не уточнюється, про яку саме форму (ниткоподібну чи однорідну) йде мова. Тому *метою роботи* було виявлення можливості створення ОІБР на поверхню води в атмосферному повітрі, а також умов його існування.

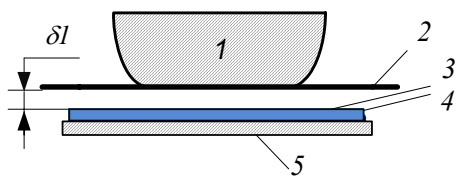


Рис. 11

Експериментальна установка. Дослідження проводилися з електродною системою, яка схематично показана на рис. 11. ІБР проходив у атмосферному повітрі в проміжку $\delta_l = 1 \dots 4$ мм між скляним бар'єром 2 товщиною 1 мм та поверхнею водопровідної води 3. Діаметр плоскої частини верхнього бронзового електроду 1, яка торкалась скла, становив 28 мм. Бар'єр мав розміри 100×100 мм² та відносну діелектричну проникність

$\varepsilon = 6$. На нижньому електроді 5 з нержавіючої сталі діаметром 90 мм знаходився диск 4 з гідрофільного паперу товщиною 0,07 мм, який мав діаметр 80 мм. Початкова питома електропровідність води становила $\sigma = 2,6 \cdot 10^{-4}$ См/см.

Однією з ключових проблем створення ОІБР на поверхню води є її коливання під дією імпульсів напруги, що викликає нестабільність розряду, а за досить малих проміжків $\delta_l \leq 2-3$ мм стає можливим навіть їх перемикання стійкими стовпчиками води. У цій роботі в електродній системі (рис. 1), завдяки шару паперу на поверхні нижнього електроду, з'явилась змога створити на його гідрофільній поверхні тонку рівномірну плівку води. Дослідження велись при товщинах цієї плівки $\delta_2 \sim 10-60$ мкм.

Під час досліджень використовувався генератор імпульсів (ГІ), котрий забезпечував уніполярні імпульси напруги амплітудою до 40кВ з фронтами ~ 15 нс та тривалістю ~ 100 нс. До складу ГІ також входив магнітний ключ, який сприяв розряджанню діелектричного бар'єра після проходження прямого імпульсу струму через електродну систему. Амплітуда імпульсів регулювалась шляхом зміни постійної напруги U_0 , що подавалась на вхід ГІ. Більш детально про ГІ викладено в [12]. Осцилограми напруги та струму через електродну систему записувалися за допомогою осцилографа TDS1012 та відповідно датчиків P6015 і P6021.

Форма розряду визначалась на основі візуальних спостережень та аналізу фотознімків, зроблених камерою Cannon A630. Фотозйомка велась за максимальної чутливості камери (ISO 800) та мінімально допустимого часу експозиції τ для отримання якісних знімків. Здебільшого це вдавалось зробити при часі τ , коли під час зйомки інтегрувалось випромінювання кількох десятків ІБР. Дві крайні форми ІБР (однорідна чи ниткоподібна) легко розпізнавалися неозброєним оком. Але також існували режими, коли візуально важко було зробити однозначні висновки стосовно характеру ІБР. У цьому випадку фотографії давали більш визначену картину.

Результати досліджень. Знімок ОІБР для $\delta_l = 2$ мм за частоти повторення імпульсів $f = 300$ Гц ($U_0 = 120$ В, $\tau = 0,1$ с, $\delta_2 \sim 15$ мкм) показано на рис. 12. З нього видно, що світіння в газовому проміжку має однорідний характер і займає приблизно вдвічі більшу площу, ніж площа стикання верхнього електроду з бар'єром, котрий на фото видно як темну смугу (світіння над нею – крайові ефекти від верхнього електроду, котрі на решті знімків не показано). У процесі подальшого зростання частоти ІБР стає неоднорідним.

У цілому перехід у неоднорідний імпульсний бар'єрний розряд (НІБР) залежить від величин f , δ_l та часу дії ІБР τ_l . На зміну форми ІБР може також впливати товщина плівки води. За малих величин $\delta_2 \sim 10$ мкм вже при $f \sim 100$ Гц у розряді з'являються ниткоподібні утворення (рис. 13). Їх появу можна пояснити наявністю над поверхнею води мікрорівнів внаслідок шорсткості папера. Це підтверджує дослід, під час якого на нижньому електроді замість паперового диску розміщувався диск з бавовняної тканини товщиною ~ 250 мкм, який мав мікрорівні ~ 40 мкм. У цих експериментах товщина плівки води становила $\delta_2 \sim 20$ мкм. З рис. 14 видно, що за таких умов розряд має неоднорідну структуру з виразним прив'язуванням ниток на поверхні води та їх розмитим кінцем на бар'єрі. Навпаки, коли величина δ_2 достатньо велика, під час розряду проходить перемикання газового проміжку во-

дяним стовпчиком води, котрий на рис. 15 виділено еліпсом ($\delta_1=2$ мм, $\delta_2\sim 20$ мкм, $f=100$ Гц). Слід зауважити, що за межами цього стовпчика розряд залишається однорідним.

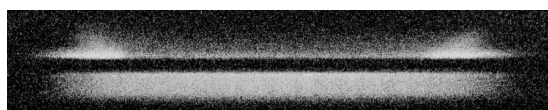


Рис. 12



Рис. 13

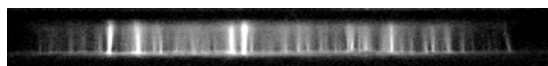


Рис. 14



Рис. 15

Час існування ОІБР за збільшення частоти f понад ~ 100 Гц починає зменшуватися з необмеженого до десятків секунд. На рис. 16 зображено знімок ОІБР за $\delta_1=3$ мм, $\delta_2\sim 60$ мкм, $f=300$ Гц, який зроблено в момент $\tau_1\sim 20$ с. Пізніше в розряді з'являються ниткоподібні елементи, які з часом (~ 30 с) перетворюються в локальні розширені зони (одну чи декілька) більш інтенсивного світіння (рис. 17). У разі зростання f до 500 Гц час τ_1 зменшується до ~ 10 с. Знімок за цієї частоти, який зроблено через ~ 30 с після початку ІБР, показано на рис. 18. З нього видно, що приблизно половину площі електродів займає ОІБР. Узагальнюючі результати досліджень, що відображують значення граничної частоти f_m , за якої є можливим існування ОІБР залежно від величин δ_1 та τ_1 , наведено в табл. 3. У ній також показано, що за відсутності водяної плівки та паперового диска на нижньому електроді за $\delta_1=2$ мм, $f=500$ Гц час існування ОІБР необмежений. Це свідчить про те, що присутність водяної плівки суттєво впливає на умови створення ОІБР.

Зміни параметрів ОІБР у залежності від величини газового проміжку показано на рис. 19 та 20 ($U_0=320$ В, $f=12$ Гц). З рис. 19 видно, що за зростання δ_1 в межах 1–4 мм амплітудні значення струму I_m , напруги U_m та енергії W_g , що виділяється в міжелектродному проміжку, змінюються у відносно невеликій мірі (~ 20 – 40 %). Хоча в цьому разі амплітуда електричного поля в ньому E_{gm} зменшується втричі (від 220 до 75 кВ/см), її величини вистачає для виникнення ОІБР. Залежності амплітудних значень густини струму ОІБР j_m , концентрації електронів N_e та їх середньої енергії T_e від довжини газового проміжку δ_1 наведено на рис. 20. З нього випливає, що за $\delta_1=2$ – 3 мм густина струму досягає максимуму ~ 18 А/см². Ця величина подібна тій, що була досягнута при ОІБР у повітрі [20], але вона на кілька порядків вища за значення, характерні для БР змінного струму (~ 10 – 100 мА/см²). Концентрація електронів N_e досягає величин $\sim 4\cdot 10^{12}$ см⁻³, які є характерними для ІБР у повітрі [9], а їх енергія $T_e\sim 8$ еВ. Слід відмітити, що за $\delta_1=1$ – 2 мм ця енергія суттєво вища за середню енергію електронів у стримерах БР змінного струму (1–3 еВ) [14], що відкриває можливості для більш інтенсивного проходження плазмохімічних реакцій з пороговою енергією понад 3 еВ. Значення величин j_m , W_g , N_e та T_e розраховувалися на основі методики, викладеної в [21].

У результаті виконаної роботи експериментально доведено, що в повітрі атмосферного тиску за фронтів імпульсів напруги ~ 15 нс та амплітудних значень електричного поля в газі понад 75 кВ/см є можливим існування однорідного імпульсного бар'єрного розряду на поверхню плівки води за величини газового проміжку 1–4 мм. Однорідний розряд, у якому амплітудні значення електричного поля в газі досягають 220 кВ/см, характеризується густи-

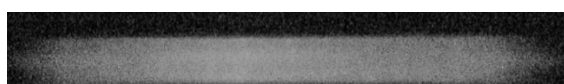


Рис. 16

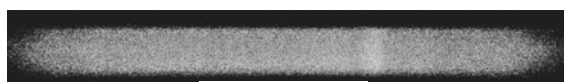


Рис. 17



Рис. 18

Таблиця 3

δ_1 , мм	δ_2 , мкм	f_m , Гц	τ_1 , с
1	15	500	~ 90
1,5	15	500	~ 100
2	15	300	~ 60
3	60	300	~ 30
3	60	200	~ 90
3	60	200	~ 30
4	60	50	~ 30
2	0	500	∞

нами струму до $\sim 18 \text{ A/cm}^2$ та концентраціями і енергіями електронів відповідно до $\sim 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ та $\sim 8 \text{ eV}$. Зі зростанням довжини газового проміжку вказаних межах гранична частота повторення імпульсів, за якої розряд однорідний, зменшується від ~ 500 до ~ 50 Гц. Гранична частота також зменшується зі збільшенням часу дії розряду, який зі збільшенням частоти повторення імпульсів до 500 Гц та величини газового проміжку до 4 мм складає десятки секунд. Відносно велике значення часу вказує на те, що перехід імпульсного бар'єрного розряду в неоднорідну форму ймовірно пов'язаний з неоднорідним розподілом температурного поля в газовому проміжку внаслідок значної густини енергії ($\sim 1 \text{ Дж/см}^3$), що виділяється в ньому. Можна припустити, що охолодження газового проміжку за рахунок рухомої плівки води і помпування через нього газу приводитиме до збільшення стабільності ОІБР і розширення діапазону параметрів, за яких він існує. За результатами проведених досліджень стає можливим визначити технологічні межі, в яких обробка води ІБР є доцільною, тобто визначити продуктивність промислового устаткування та ефективність обробки.

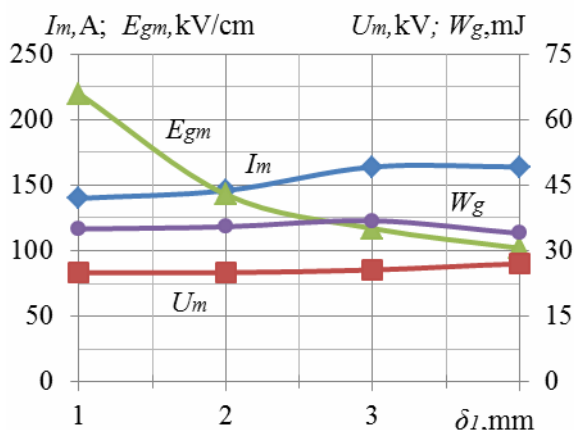


Рис. 19

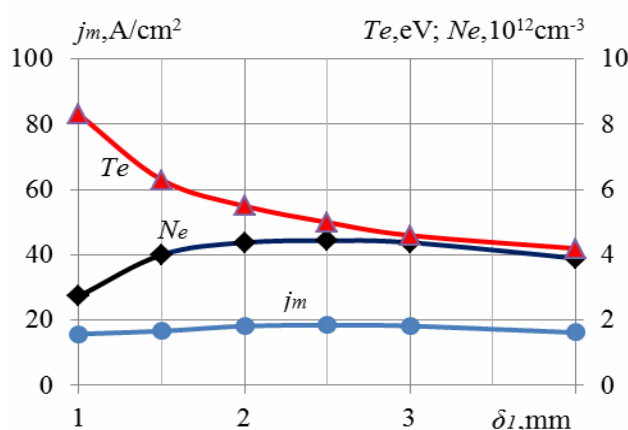


Рис. 20

У науковому напрямі Дослідження електромагнітних систем з дискретно-разовим керуванням [22] протягом 2018 року згідно з планом НДР "Рестан" було розроблено та сформовано концептуальні схемотехнічні та алгоритмічні принципи організації роботи силових виконавчих структур перетворювачів напруги змінного струму з секціонованими (багатообвитковими) трансформуючими елементами.

Такі трансформаторно-ключові виконавчі структури (ТКВС) [23, 24, 25] інтенсивно розробляються, патентуються як tap changing [26], tap switching [27], discrete smart transformer [28] та широко впроваджуються переважно для узгодження (adjusting [29], compensation [30]) роботи споживачів електроенергії з реальними умовами електроживлення, зокрема, поля стабілізації напруги змінного струму. Незважаючи на великий масив інформації щодо виконавчих структур цього класу, вона зазвичай містить лише чисельні дані – конкретні кількості секцій обвитки ТЕ та кількості витків у них для конкретних діапазонів зміни вхідної напруги, що не дає змогу дослідити вплив на ці дані зміни умов роботи або провести порівняльний аналіз різних варіантів побудови структури [31].

Виходячи з цього, було зроблено загальнення основних положень створення ТКВС – визначення оптимального закону зміни коефіцієнта передачі виконавчої структури за напругою K_j та відповідного закону секціонування обвитки трансформуючого елемента (ТЕ), а також запропоновано аналітичні залежності для розрахунку в нормованому вигляді напруг, струмів секцій ТЕ, його встановленої потужності тощо. Об'єктом дослідження було обрано виконавчу структуру стабілізатора напруги змінного струму, яка реалізує єдине конкретне функціональне перетворення напруги – підтримання з припустимою похибкою напруги живлення споживача на певному визначеному рівні в разі дії всіх дестабілізуючих факторів (насамперед, відхилень вхідної напруги від номінального значення), хоча отримані результати можна переносити й на регулятори напруги, вимоги до яких щодо закону зміни вихідної напруги можуть бути найрізноманітнішими.

Перше. Трансформаторно-ключова виконавча структура в процесі роботи (за зміни вхідної напруги в діапазоні від U_{min} до U_{max}) може знаходитися в одному з J станів, у кожному з яких вона функціонує як звичайний двохобвитковий трансформатор з відповідним коефіцієнтом передачі за напругою. Кожен з цих станів відповідає певному піддіапазону зміни вхідної напруги $\overline{U_{1jmin}, U_{1jmax}}$. Найбільша ефективність використання складових ТКВС – трансформуючого елемента та комутатора (переважно на напівпровідникових ключових елементах з природною комутацією) – досягається при виборі масиву коефіцієнтів передачі за законом

$$K_j = K_1 \cdot \gamma^{j-1}, \quad (j = \overline{1, J}), \tag{1}$$

де K_1 – перший, максимальний коефіцієнт передачі, що відповідає піддіапазону біля нижньої межі зміни вхідної напруги; γ – коефіцієнт, що визначається похибкою стабілізації вихідної напруги відносно номінального значення U_{1n} вхідної напруги $\delta = (U_{2max} - U_{2min}) / 2U_{1n}$, а саме: $\gamma = (1 + \delta) / (1 - \delta)$.

Нормуючи для узагальнення вхідну U_1 та вихідну U_2 напруги за номінальним значенням U_n ($U_1^* = U_1 / U_{1n}$, $U_2^* = U_2 / U_{1n}$), отримуємо для ТКВС залежність $U_{2j}^* = f(U_{1j}^*, K_j)$, яку наведено на рис. 21. Вона утворена відрізками J променів, що виходять з центру ординат, значення тангенсів кутів нахилу цих променів до осі абсцис чисельно дорівнюють відповідним коефіцієнтам передачі.

Друге. Обраний закон зміни коефіцієнтів передачі за напругою (1) визначає необхідний спосіб секціонування обвитки (обвиток) ТЕ. У найпоширенішому варіанті ТКВС з автотрансформатором та комутаторами у вхідному та вихідному колах, що мають N_1 , та N_2 ключових елементів відповідно (загальна кількість КЕ $N = N_1 + N_2$, а кількість станів $J = J_1 \times J_2 = N_1 \times N_2$), обвитка АТ виконується з n проміжними виводами ($n = (N_1 - 1)N_2$), до яких можуть під'єднуватися КЕ комутаторів. В обвитці між сусідніми відводами утворюються елементарні (по суті – "структуруючі") секції.

У [32] доведено, що доцільним є таке розташування зазначених відводів, при якому потенціал кожного з них, нормований за напругою базової секції обвитки W_0 , повинен обиратися за законом $\varphi_i^* = \varphi_i / U_{W_0} = \gamma^{i-1}$ ($i = \overline{1, (n-1)}$). Таким чином, обвитка АТ складається з базової секції W_0 та n елементарних секцій (рис. 22), відносна кількість витків яких змінюється за законом

$$W_i^* = W_i / W_0 = (\gamma - 1) \gamma^{i-1} \quad (i = \overline{1, (n-1)}). \tag{2}$$

Третє. За однієї й тієї ж загальної кількості ключових елементів можлива побудова певної множини виконавчих структур, що відрізняється розподілом КЕ між двома комутаторами та кроками зміни кількості витків секцій обвитки АТ у вхідному та вихідному колах ТКВС. У [32] доведено, що кращі масогабаритні показники мають стабілізатори напруги на основі структур, у яких "вихідний" комутатор реалізує "дрібний" крок регулювання, перемикаючи елементарні секції у вихідному колі ТКВС, а "вхідний", що має $(N_1 - 1)$ комбіновану секцію, – у N_2 рази більший крок, перемикаючи зазначені комбіновані секції, що складаються з $(N_2 - 1)$ відповідних елементарних секцій. За цих обставин структура залишається незмінною навіть за певної реконфігурації, а саме – за зміни місця приєднання до відводів обвитки ключів вихідного комутатора (що умовно показано стрілками на рис. 22). Кількість можливих конфігурацій

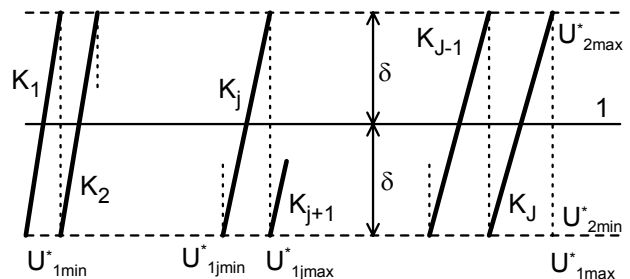


Рис. 21

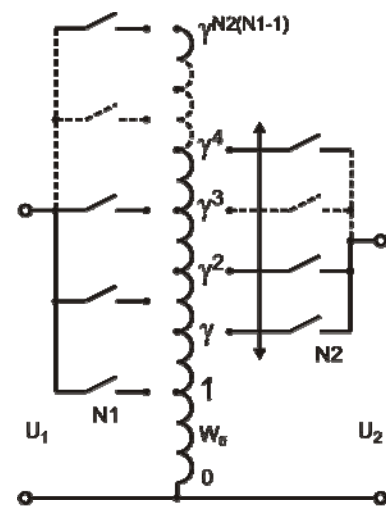


Рис. 22

такої ТКВС визначається залежністю $Q=(N_1-2)N_2+2$.

Реконфігурація обраної структури ТКВС (яку можна трактувати як синтез масиву нетотожних конфігурацій незмінної структури) використовують або в разі необхідності зміни рівня напруги, що стабілізується, або при зсуві меж діапазону вхідної напруги, в якому відбувається стабілізація вихідної напруги.

Четверте. У процесі роботи ТКВС (при зміні вхідної напруги) у певний момент відбувається дискретно-разовий її перехід з j -го стану в $(j+1)$ -й стан (коли $U_1^* > U_{1jmax}^*$) або в $(j-1)$ -й стан (коли $U_1^* < U_{1jmax}^*$). При цьому за незмінної (з похибкою $\pm\delta$) величини вихідного струму I_{2H} змінюється вхідний струм. Відповідно змінюється сумарне струмове завантаження обвитки, змінюються й втрати енергії у міді обвитки – джерелі її нагріву. Причому в жодному з J робочих станів ТКВС струмове завантаження одночасно всіх секцій не може бути максимальним. Найбільше струмове завантаження обвитки зазвичай припадає на перший або J -й стан залежно від конфігурації, що розглядається.

П'яте. Для врахування зазначеної особливості функціонування АТ у складі виконавчої структури стабілізатора напруги розроблено методику його розрахунку. Вона полягає: у попередньому визначенні для гіпотетичного (неробочого) стану ТКВС з максимальним струмовим завантаженням обвитки максимальних втрат енергії в міді обвитки та сталі осердя; знаходженні за допомогою відповідних аналітичних методів або програмних засобів (наприклад, Comsol Multiphysics [33]) значення його максимальної температури t_{max} (її ми приймаємо за максимально допустимі для обраного АТ); на основі цього, обваженні найбільш завантаженого стану (першого або J -го) шляхом збільшення щільності струму в обвитках до досягнення найвищою температурою в елементах АТ визначеної раніше температури t_{max} . При цьому відповідно зростає й вихідний струм та допустиме значення вихідної потужності. Це дає змогу підвищити ефективність використання встановленої потужності автотрансформатора залежно від обраної конфігурації на 5...25 %.

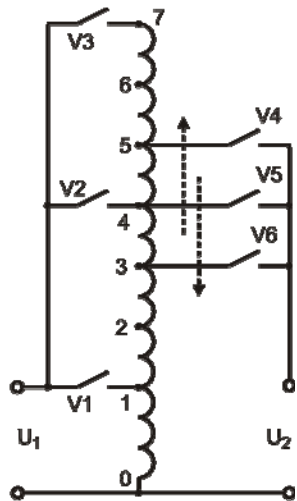


Рис. 23

Шосте. Доведено, що різні конфігурації однієї структури навіть за одних і тих же значень J та γ можуть відрізнятися величиною встановленої потужності АТ, яка визначає масогабаритні показники ТКВС. Зображена на рис. 23 конфігурація виконавчої структури з дев'ятьма робочими станами ($J=3 \times 3=9$) реалізує стабілізацію напруги на рівні $U_{2H}^* = U_{1H}^* = 1$. Якщо ключі $V4, V5, V6$ під'єднати до відводів 7, 6, 5, то стабілізація буде відбуватися на максимальному рівні $U_{2H}^* = \gamma^2$, а якщо під'єднати до відводів 1, 2, 3, – то на мінімальному рівні $U_{2H}^* = \gamma^{-2}$.

У [34] для цих трьох конфігурацій ТКВС отримано аналітичні залежності встановленої потужності автотрансформатора від коефіцієнта γ (δ):

$$P_{nom}^* = (\gamma^2 - 1)(3\gamma^2 + 2) / 2\gamma^2 \approx 4,89(\gamma - 1), \tag{3}$$

$$P_{max}^* = (\gamma^6 - 1) / \gamma^4 \approx 5,27(\gamma - 1), \tag{4}$$

$$P_{min}^* = (3\gamma^8 - \gamma^7 - \gamma^5 - 1) / 2\gamma^6 \approx 5,28(\gamma - 1). \tag{5}$$

Ці встановлені потужності пронормовано по значеннях максимальної потужності навантаження на відповідному рівні. Тому індекс при P^* свідчить не про величину цього параметра, а лише про рівень напруги, що стабілізується.

Побудовані за виразами (3)...(5) залежності встановленої потужності АТ від параметра γ , який варіюється у діапазоні (1,03...1,1), що відповідає зміні похибки стабілізації в прийнятних межах $\delta = \pm (1,52...4,76)$ % (при цьому

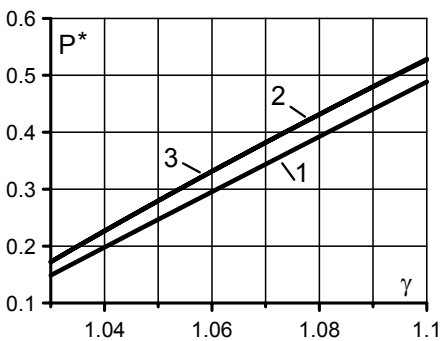


Рис. 24

глибина діапазону вхідної напруги становить $U_{1max}/U_{1min}=1,3\dots2,36$, відображені на рис. 24 (лінія 1 відповідає рівню напруги, що стабілізується, $U_{2n}^*=1$, лінія 2 – $U_{2n}^* = \gamma^2$, лінія 3 – $U_{2n}^* = \gamma^{-2}$). Ці залежності близькі до лінійних, а зсув нормованого рівня вихідної напруги від одиниці веде до певного збільшення необхідної потужності АТ (у нашому випадку приблизно на 8 % незалежно від значення γ).

Розглянута ТКВС може забезпечити, наприклад, стабілізацію вихідної напруги на рівні U_{1n} з похибкою $\pm 3\%$ ($\gamma=1,0618$) при зміні вхідної напруги у 1,716 раза, маючи АТ, встановлена (розрахункова) потужність якого складає 30,2 % потужності споживача стабілізованої напруги; за похибки $\pm 4\%$ ($\gamma=1,0833$) та зміні вхідної напруги у 2,055 раза необхідна потужність АТ зростає до 40,7 %. Слід зауважити, що при застосуванні розробленої методики розрахунку АТ з певним обважненням режиму, ці показники можуть бути поліпшені.

Підсумовуючи представлені теоретичні положення, можна стверджувати, що виконаний комплекс робіт обґрунтовує можливість та доцільні шляхи підвищення ефективності використання встановленої потужності трансформуючого елемента з секціонованою обвиткою в складі трансформаторно-ключової виконавчої структури стабілізатора напруги змінного струму.

Робота фінансується за держбюджетною темою «Розвиток теорії електрофізичних процесів в імпульсних системах електромагнітної обробки електропровідних середовищ» (шифр "БАР'ЄР-2"), яка виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ Президії НАН України від 04.07.2018 р., протокол №11, державний реєстраційний номер теми 0117U007714 та за темою "Розвиток та узагальнення теорії трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТКВС) перетворювачів напруги з урахуванням багатоваріантності схематехнічних рішень та мультифізичності процесів" (шифр "Рестан"), державний реєстраційний номер 0115U002579.

1. Ращепкин А.П., Кондратенко И.П. Методологические основы анализа электромагнитных процессов в линейных индукционных машинах. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2017. 355 с.
2. Виштак П.А., Кондратенко И.П., Крутилин В.А., Ращепкин А.П. Метод расчета линейных индукторов с концентрическими обмотками для нагрева металлических лент. *Техн. электродинамика*. 1987. № 2. С. 6–12.
3. Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Кришук Р.С., Ращепкин А.П. Двухобмоточный безжелезный индуктор бегущего магнитного поля. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2018. Вип. 49. С. 39–50.
4. Тамм И.Е. Основы теории электричества. Москва: Наука. 1989. 504 с.
5. Карлов О.М., Кондратенко И.П., Кришук Р.С., Ращепкин А.П. Энергетичні показники торцевих дугостаторних асинхронних двигунів з біметалевими дисковими роторами. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. Вип. 48. С. 76–82.
6. Карлов О.М., Кондратенко И.П., Кришук Р.С., Ращепкин А.П. Аксіальні магнітні сили торцевого дугостаторного двигуна з дисковим біметалевим ротором. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2018. Вип. 50. С. 71–78.
7. Kogelschatz Ulrich. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics and Industrial Applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2003. Vol. 23. No 1. Pp. 1–46.
8. Kogelschatz Ulrich. Filamentary, Patterned, and Diffuse Barrier Discharges. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2002. Vol. 30. No 4. Pp. 1400–1408.
9. Shao Tao, Long Kaihua, Zhang Cheng, Yan Ping, Zhang Shichang, Pan Ruzheng. Experimental study on repetitive unipolar nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41. Pp. 215203 (8 pp).
10. Shuai Zhang, Li Jia, Wen-chun Wang, De-zheng Yang, Kai Tang, Zhi-jie Liu. The influencing factors of nanosecond pulse homogeneous dielectric barrier discharge in air. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2014. Vol. 117. Pp. 535–540.
11. T. Somekawa, T. Shirafuji, O. Sakai, K. Tachibana, K. Matsunaga. Effects of self-erasing discharges on the uniformity of the dielectric barrier discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005. Vol. 38. Pp. 1910–1917.
12. Божко І.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П., Чарний Д.В. Розробка комплексу для обробки води імпульсним бар'єрним розрядом. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 6. С. 80–86.
13. Chong Liu, Danil Dobrynin, Alexander Fridman. Uniform and non-uniform modes of nanosecond-pulsed dielectric barrier discharge in atmospheric air: fast imaging and spectroscopic measurements of electric fields. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014. Vol. 47. Pp. 252003 (7 pp).
14. Walsh J. L., Konga M. G. 10 ns pulsed atmospheric air plasma for uniform treatment of polymeric surfaces. *Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 91. Pp. 251504 (3pp).
15. Baroch P., Saito N., Takai O. Special type of plasma dielectric barrier discharge reactor for direct ozonization of water and degradation of organic pollution. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41. P. 085207 (6 pp).
16. Golubovskii Yu.B., Maiorov V.A., Behnke J. F., Tepper J., Lindmayer M. Study of the homogeneous glow-like discharge in nitrogen at atmospheric pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2004. Vol. 37. Pp. 1346–1356.

17. Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu, Qinhui Zhang, Zifeng Yan, Qingzhong Xue. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2014. No 236. Pp. 348–363.
18. Magureanu Monica, Piroi Daniela, Mandache Nicolae Bogdan, Parvulescu Vasile. Decomposition of methylene blue in water using a dielectric barrier discharge: Optimization of the operating parameters. *Journal of Applied Physics*. 2008. No 104. Pp. 103306 (7 pp).
19. Shen Zhao, Chunjing Hao, Di Xu, Yiyong Wen, Jian Qiu, Kefu Liu. Effect of Electrical Parameters on Energy Yield of Organic Pollutant Degradation in a Dielectric Barrier Discharge Reactor. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. No 6. Pp. 1043–1050.
20. Кондратенко І.П., Ращепкин А.П. Индукционный нагрев плоского проката металлов. *Новини енергетики*. 1998. № 11. С. 40–42.
21. Bozhko I.V., Serdyuk Y.V. Determination of Energy of a Pulsed Dielectric Barrier Discharge and Method for Increasing Its Efficiency. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. No 12. Pp. 3064–3069.
22. Bimal, K Bose. Power Electronics. Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter*. 2007. V. 19. No 4. P. 11–20.
23. Липковський К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. Киев: Наук. думка, 1983. 216 с.
24. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Особливості комплексування секцій обвитки трансформуючого елемента трансформаторно-ключової виконавчої структури перетворювача змінної напруги. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2018. Вип. 51. С. 60–64.
25. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Пристрій для регулювання величини напруги змінного струму. Патент України на корисну модель №126885, МПК G05F 1/00, H02M 7/00. 2018.
26. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98–105. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>
27. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. URL: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 05.03.2019)
28. Willems W., Vandoom T.L., De Kooning, J. D., Vandeveld L. Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. *4th International Conf. Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*. 6-9 Oct. 2013, At Lyngby, Denmark. Pp. 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
29. Voltage Adjuster VA-1200. URL: https://www.radiomuseum.org/r/instant_voltage_adjuster_va_1200.html (accessed 16.03.2019).
30. Szczesniak, Pawel. The compensator of voltage sage/swell installed in connection terminals of small industrial plant or selected loads. In: *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications*. Europe, 2017. Pp. 1–6. DOI: <http://dx.doi.org/10.23919/EPE17ECCEurope.2017.8099029>
31. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Сучасний стан та тенденції розвитку перетворювачів напруги змінного струму з трансформаторно-ключовими виконавчими структурами. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 5. С. 44–51.
32. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Визначення потужності трансформуючих елементів при реконфігурації трансформаторно-ключових виконавчих структур стабілізаторів напруги змінного струму. Аналіз факторів впливу. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 3. С. 48–55.
33. COMSOL Multiphysics. URL: <http://www.comsol.com>.
34. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Визначення впливу зміни меж діапазону вхідної напруги на потужність трансформуючого елемента стабілізатора напруги з трансформаторно-ключовою виконавчою структурою. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 3. С. 46–54.

УДК 621.313:621.365:621.314:537.523.9

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ

И.В. Божко, канд. техн. наук, **А.Н. Карлов**, канд. техн. наук, **И.П. Кондратенко**, докт. техн. наук, **Р.С. Кришук**, канд. техн. наук, **К.А. Липковский**, докт. техн. наук, **А.Г. Можаровский**, канд. техн. наук, **А.П. Ращепкин**, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Представлены результаты исследований, проведенные в отделе электромагнитных систем в 2018 году. Развита методика расчета электромагнитного поля в электромагнитной системе, созданной токовыми контурами, которые размещаются в пространстве по принципу бегущего магнитного поля. Исследованы электродинамические силы и распределение источников теплоты при взаимодействии магнитного поля трехфазной системы контуров и металлической ленты ограниченной ширины. Установлена возможность индукционного нагрева ферромагнитных лент с удовлетворительной равномерностью по ширине. Определены условия для электродинамической стабилизации ленты по оси воздушного промежутка через выбор частоты тока. Получил развитие метод расчета электромагнитного поля торцевых дугостаторных двигателей с дисковым биметаллических ротором. Метод включает задание реального распределения трехфазной обмотки двусторон-

ней дугостаторной машины. Установлены аналитические выражения для расчета аксиальных магнитных сил торцевых дугостаторных асинхронных двигателей с биметаллическими дисковыми роторами, трехмерное распределение индукции магнитного поля в зазоре с учетом линейной скорости движения ротора. Рассчитаны механическая и рабочая характеристики, аксиальные силы, действующие на ротор асинхронного двигателя большой мощности, предназначенного для безредукторного привода шаровых мельниц. Представлены результаты экспериментальных исследований барьерного разряда на поверхность воды. Экспериментально доказано, что в воздухе атмосферного давления при установленных длине фронта импульсов напряжения и амплитудных значениях электрического поля в газе возможно существование однородного импульсного барьерного разряда на поверхности пленки воды. Выполнен комплекс работ, обосновывающий возможность и целесообразные пути повышения эффективности использования установленной мощности трансформирующего элемента с секционированной обмоткой в составе трансформаторно-ключевой исполнительной структуры стабилизатора напряжения переменного тока. Библ. 34, рис. 24, табл. 3.

Ключевые слова: индукционный нагрев, торцевой асинхронный двигатель, однородный барьерный разряд, трансформаторно-ключевые структуры.

IMPROVEMENT OF MULTIFUNCTIONAL ELECTROMAGNETIC SYSTEMS FOR ELECTRICAL TECHNOLOGIES

I.V. Bozhko, O.M. Karlov, I.P. Kondratenko, R.S. Kryshchuk, K.O. Lypkivskyi, A.G. Mozharovskyi, A.P. Raschepkin

Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The article deals with the results of research in 2018, the department of electromagnetic systems. It is reported that analytical methods for calculating electromagnetic fields in electromagnetic systems are developed. The methods simulate current contours in space to create alternating magnetic fields and induce currents in electrically conductive regions. It is shown that magnetic forces and heat distribution in the inductor for heating moving ferromagnetic strip are investigated. Inductor for heating ferromagnetic strip is without ferromagnetic core, and it takes into account the finite width of the strip. Much attention is given to the ability to heat ferromagnetic strip with a satisfactory uniformity in width. The conditions for electrodynamic stabilization of strip at the center of the air gap have been determined by frequency control. Also this article deals with the analytical method for calculating electromagnetic fields of arc-stator axial induction disk motors with bimetallic rotors. This method takes into account the real spatial current distribution three-phase winding of two arc-stators on both sides at disk rotor. The method allows calculating three-dimensional electromagnetic field distribution in air-gap between two stators, and it takes into account the linear speed of moving disk rotor. It is spoken in detail about the analytical expressions for the calculation magnetic forces in the air gap. It should be noted that energy characteristics and magnetic forces of the gearless axial arc-stator disk motor for powerful ball mills are calculated by the developed analytical method. The paper gives valuable information about experimental studies of the barrier discharge to the water surface. Experiments shows the existence of a uniform barrier discharge to the water surface at atmospheric pressure, at the fixed length of the voltage pulse region and at fixed values of the electric field in a gas space. The complex of works, which substantiates in detail the possibility and expedient ways of increasing the efficiency of using the installed source power, are done. The power source consists of the transforming element with sectional winding in the transformer-key actuating structure of the AC voltage stabilizer. References 34, figures 24, table 3.

Key words: induction heating, axial arc-stator induction motor, uniform barrier discharge, transformer-key actuating structure.

1. Raschepkin A.P., Kondratenko I.P. Methodological foundations of the analysis of electromagnetic processes in linear induction machines. Kiev: Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2017. 355 p. (Rus)
2. Vishtak P.A., Kondratenko I.P., Krutilin V.A., Raschepkin A.P. Method for calculating linear inductors with concentric windings for heating metal tapes. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 1987. No 2. Pp. 6–12. (Rus)
3. Karlov O.M., Kondratenko I.P., Krischuk R.S., Raschepkin A.P. The linear non-iron inductor with rotating magnetic field. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2018. No 49. Pp. 39–50. (Rus)
4. Tamm I.E. Fundamentals of the theory of electricity. Moskva: Nauka. 1989. 504 p. (Rus)
5. Karlov O.M., Kondratenko I.P., Kryshchuk R.S., Raschepkin A.P. Energy parameters of axial arc-stator motors with bimetallic disk rotors. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2017. No 48. Pp. 76–82. (Ukr)
6. Karlov O.M., Kondratenko I.P., Kryshchuk R.S., Raschepkin A.P. Axial magnetic forces of the axial arc-stator induction motor with disc bimetallic rotor. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2018. No 50. Pp. 71–78. (Ukr)
7. Kogelschatz Ulrich. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics and Industrial Applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2003. Vol. 23. No 1. Pp. 1–46.
8. Kogelschatz Ulrich. Filamentary, Patterned, and Diffuse Barrier Discharges. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2002. Vol. 30. No 4. Pp. 1400–1408.
9. Shao Tao, Long Kaihua, Zhang Cheng, Yan Ping, Zhang Shichang, Pan Ruzheng. Experimental study on repetitive unipolar nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41. Pp. 215203 (8 pp).

10. Shuai Zhang, Li Jia, Wen-chun Wang, De-zheng Yang, Kai Tang, Zhi-jie Liu. The influencing factors of nanosecond pulse homogeneous dielectric barrier discharge in air. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 2014. Vol. 117. Pp. 535–540.
11. Somekawa T., Shirafuji T., Sakai O., Tachibana K., Matsunaga K. Effects of self-erasing discharges on the uniformity of the dielectric barrier discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005. Vol. 38. Pp. 1910–1917.
12. Bozhko I.V., Karlov O.M., Kondratenko I.P., Charnyi D.V. Development of complex for water treatment with pulse barrier discharge. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 6. Pp. 80–86. (Ukr)
13. Chong Liu, Danil Dobrynin, Alexander Fridman. Uniform and non-uniform modes of nanosecond-pulsed dielectric barrier discharge in atmospheric air: fast imaging and spectroscopic measurements of electric fields. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014. Vol. 47. Pp. 252003 (7 pp).
14. Walsh J. L., Konga M. G. 10 ns pulsed atmospheric air plasma for uniform treatment of polymeric surfaces. *Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 91. Pp. 251504 (3 pp).
15. Baroch P., Saito N., Takai O. Special type of plasma dielectric barrier discharge reactor for direct ozonization of water and degradation of organic pollution. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41. Pp. 085207 (6 pp).
16. Golubovskii Yu. B., Maiorov V. A., Behnke J. F., Tepper J., Lindmayer M. Study of the homogeneous glow-like discharge in nitrogen at atmospheric pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2004. Vol. 37. Pp. 1346–1356.
17. Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu, Qinhui Zhang, Zifeng Yan, Qingzhong Xue. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2014. No 236. Pp. 348–363.
18. Magureanu Monica, Piroi Daniela, Mandache Nicolae Bogdan, Parvulescu Vasile. Decomposition of methylene blue in water using a dielectric barrier discharge: Optimization of the operating parameters. *Journal of Applied Physics*. 2008. No 104. Pp. 103306 (7 pp).
19. Shen Zhao, Chunjing Hao, Di Xu, Yiyong Wen, Jian Qiu, Kefu Liu. Effect of Electrical Parameters on Energy Yield of Organic Pollutant Degradation in a Dielectric Barrier Discharge Reactor. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. No 6. Pp. 1043–1050.
20. Kondratenko I.P., Raschepkin A.P. Induction heating of flat metal. *Novyny energetyky*. 1998. No 11. Pp. 40–42. (Rus)
21. Bozhko I.V., Serdyuk Y.V. Determination of Energy of a Pulsed Dielectric Barrier Discharge and Method for Increasing Its Efficiency. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. No 12. Pp. 3064–3069.
22. Bimal, K Bose. Power Electronics. Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter*. 2007. V. 19. No 4. P. 11–20.
23. Lipkovskiy K.A. Transformer-key executive structures of AC voltage converters. Kiev: Naukova dumka, 1983. 216 p. (Rus)
24. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.H. Features of the integration of sections of the turns of the transforming element of the transformer-and-switches executive structure of the ac voltage converter. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2018. No 51. Pp. 60–64. (Ukr)
25. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.H. Device for controlling the amount of AC voltage. Patent of Ukraine for utility model No 126885, MPK G05F 1/00, H02M 7/00, 2018. (Ukr)
26. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98–105.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>
27. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. URL: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 05.03.2019)
28. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning, J. D., Vandeveld L. Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. *4th International Conf. Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*. 6-9 Oct. 2013, At Lyngby, Denmark. Pp. 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
29. Voltage Adjuster VA-1200. URL: https://www.radiomuseum.org/r/instant_voltage_adjuster_va_1200.html (accessed 16.03.2019).
30. Szczesniak, Pawel. The compensator of voltage sag/swell installed in connection terminals of small industrial plant or selected loads. In: *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications*. Europe, 2017. Pp. 1–6. DOI: <http://dx.doi.org/10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099029>
31. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.H. Current state and development trends of ac voltage converters with transformer-and-switches executive structure. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 5. Pp. 44–51. (Ukr)
32. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.H. Determination of the power of transforming elements in the reconfiguration of the transformer-and-switches executive structures of ac voltage stabilizers. Analysis of influence factors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 3. Pp. 48–55. (Ukr)
33. COMSOL Multiphysics. URL: <http://www.comsol.com>.
34. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.H. Determination of the influence of changes in the limits of the input voltage range on the power of a transformer element of a voltage stabilizer with a transformer-and-switches executive structure. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 3. Pp. 46–54. (Ukr)