



Електротехніка і Електроомеханіка

Электротехника и Электромеханика

Electrical engineering & Electromechanics

2009'1



Електротехніка і Електромеханіка
Электротехника и Электромеханика
Electrical engineering & Electromechanics

EIE

Науково-практичний журнал

2009'1

Держвидання

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України
КВ № 6115 від 30.04.2002 р.

Видання засновано Національним технічним університетом "Харківський політехнічний інститут" у 2002 р.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор

Клименко Б.В. д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків

Члени редколегії

Баранов М.І. д.т.н., начальник відділу НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", Харків

Батигін Ю.В. д.т.н., професор кафедри вищої математики НТУ "ХПІ", Харків

Босв В.М. д.т.н., професор кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ "ХПІ", Харків

Болюх В.Ф. д.т.н., професор кафедри загальної електротехніки НТУ "ХПІ", Харків

Буткевич О.Ф. д.т.н., професор, головний науковий співробітник ІЕД НАНУ, Київ

Вороновський Г.К. д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, завідувач кафедри електричних станцій НТУ "ХПІ", Харків

Гончаров Ю.П. д.т.н., професор кафедри промислової та біомедичної електроніки НТУ "ХПІ", Харків

Гурін А.Г. д.т.н., професор, завідувач кафедри електроізоляційної і кабельної техніки НТУ "ХПІ", Харків

Данько В.Г. д.т.н., професор, завідувач кафедри загальної електротехніки НТУ "ХПІ", Харків (голова редакційної ради)

Загірняк М.В. д.т.н., професор, ректор КДПУ, Кременчук

Кириленко О.В. д.т.н., професор, академік НАНУ, директор ІЕД НАНУ, Київ

Кравченко В.І. д.т.н., професор, директор НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", Харків

Лупіков В.С. д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних апаратів НТУ "ХПІ", Харків

Маслієв В.Г. д.т.н., професор кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ "ХПІ", Харків

Михайлов В.М. д.т.н., професор кафедри інженерної електрофізики НТУ "ХПІ", Харків

Мілих В.І. д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних машин НТУ "ХПІ", Харків

Набока Б.Г. д.т.н., професор кафедри електроізоляційної і кабельної техніки НТУ "ХПІ", Харків

Намітоков К.К. д.т.н., професор кафедри світлотехніки і джерел світла ХНАМГ, Харків

Омельяненко В.І. д.т.н., професор, завідувач кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ "ХПІ", Харків

Панасенко М.В. д.т.н., професор, начальник Харківської філії Державного науково-дослідного центру Укрзалізниці, Харків

Подольцев О.Д. д.т.н., провідний науковий співробітник ІЕД НАНУ, Київ

Пуйло Г.В. д.т.н., професор кафедри електричних машин ОНТУ, Одеса

Рєзцов В.Ф. д.т.н., професор, член-кореспондент НАНУ, керівник відділення ІЕД НАНУ, Київ

Рудаков В.В. д.т.н., професор, завідувач кафедри інженерної електрофізики НТУ "ХПІ", Харків

Сосков А.Г. д.т.н., професор, завідувач кафедри електротехніки ХНАМГ, Харків

Ткачук В.І. д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних машин і апаратів НУ "Львівська політехніка", Львів

Шинкаренко В.Ф. д.т.н., професор, завідувач кафедри електромеханіки НТУУ "КПІ", Київ

Юферов В.Б. д.т.н., начальник відділу ННЦ ХФТІ, Харків

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002.

Тел. (057) 707-62-81. E-mail: eie@kpi.kharkov.ua

ЗМІСТ

Електричні машини та апарати

Гаврилюк Р.Б.	Таємниці, які зберігають гармоніки намагнічуючої сили симетричних багатофазних схем обмоток	5
Заблодський М.М., Філатов М.А., Квасов В.О., Лупанов А.В.	Експериментальні дослідження спектру гармонік поліфункціонального електромеханічного перетворювача заглиблого типу	9
Зинченко Е.Е., Финкельштейн В.Б.	Методика аппроксимации кривых намагничивания вентильных индукторно-реактивных двигателей	13
Лущик В.Д., Кириянов В.В.	Асинхронні двигуни для шахтних конвеєрів з покращеними пусковими властивостями	17
Милых В.И., Иваненко В.Н., Гречко Н.В.	Математическое моделирование режимов работы вентильно-индукторного генератора	20
Павленко Т.П.	Физические процессы на поверхности контактов с учетом потоков плазмы и термоэмиссионной активности материала	25
Шавёлкин А.А.	Улучшение характеристик каскадного многоуровневого преобразователя частоты	28
Шинкаренко В.Ф., Августиневич А.А., Лысак В.В., Вахновецкая М.А.	Структурная изомерия и ее моделирование в задачах генетического синтеза электромеханических структур	33

Теоретична електротехніка

Жемеров Г.Г., Колесник В.Ю.	Уточненная модель тиристора для моделирования вентильных преобразователей в MATLAB 7	37
--	--	-----------

7 листопада 2008 року передчасно пішов з життя талановитий вчений і педагог Іваненко Віталій Микитович, який пройшов великий трудовий шлях від інженера заводу «Електроважмаш» до професора кафедри електричних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Віталій Микитович був одним з першопрохідців у такому важливому сучасному науковому напрямку, як частотно керований тяговий асинхронний електропривід. В сферу його наукових інтересів входили методи розрахунку й проектування асинхронних генераторів та індукторних машин. Він одним з перших в СРСР підготував навчальний курс «Електромеханотроніка», активно керував аспірантами, підготувавши п'ять кандидатів наук, був улюбленим викладачем у своїх студентів.

Віталій Микитович назавжди залишиться у пам'яті колег, друзів, численних учнів й усіх тих, хто його знав і цінував.

Техніка сильних електричних та магнітних полів

Баранов М.И.	Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов: история, физические основы и технические возможности	42
Баранов М.И.	Применение новых газоразрядных и твердотельных полупроводниковых коммутаторов в силовых цепях мощных высоковольтных электрофизических установок	55
Батыгин Ю.В., Сериков Г.С., Бондаренко А.Ю.	Индукционная индукторная система с двойным витком	59
Петков А.А.	Статистические характеристики распределения времени нарастания значений импульса тока высоковольтного испытательного устройства	62

Ювілеї

Баранов М.И.	К 60-летию со дня рождения	65
Список авторів		66
Abstracts		67
Перелік публікацій 2008 року		69
Вимоги до оформлення статей і інформаційних матеріалів у науково-практичному журналі "Електротехніка і електромеханіка"		74

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Науково-практичний журнал "Електротехніка і Електромеханіка" – передплатне видання. Звертаємо вашу увагу, що починаючи з 2006 року журнал виходить шість разів на рік. Вартість передплати на рік — 136,44 грн., на два місяці — 22,74 грн., на чотири місяці – 45,48 грн., на шість місяців – 68,22 грн., на вісім місяців – 90,96 грн., на десять місяців - 113,7 грн. Передплатний індекс: 01216.

ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

Постановою Президії ВАК України від 15.01.03 № 1-08/5 науково-практичний журнал "Електротехніка і Електромеханіка" внесено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.

Починаючи з 2005 року згідно з договором між редакцією журналу "Електротехніка і Електромеханіка" та Всеросійським інститутом наукової та технічної інформації Російської академії наук (ВИНИТИ РАН), інформація про статті з журналу за відбором експертів ВИНИТИ розміщується у Реферативному журналі (РЖ) та Базах даних (БД) ВИНИТИ. Згідно з цим договором ВИНИТИ надає редакції журналу звіт про відображення статей з журналу у РЖ та БД ВИНИТИ. Звіт ВИНИТИ за 2005 рік буде опубліковано в одному з номерів журналу за 2006 рік.

Починаючи з №1 за 2006 р. згідно з Наказом МОН України №688 від 01.12.2005 р. журнал надсилається до УкрІНТЕІ.

Звертаємо увагу авторів на необхідність оформлення рукописів відповідно до Вимог, які публікуються у кожному номері журналу. Статті, оформлені згідно з Вимогами будуть публікуватися у першу чергу.

ТАЄМНИЦІ, ЯКІ ЗБЕРІГАЮТЬ ГАРМОНІКИ НАМАГНІЧУЮЧОЇ СИЛИ СИМЕТРИЧНИХ БАГАТОФАЗНИХ СХЕМ ОБМОТОК

Гаврилук Р.Б., к.т.н., доц.

Івано-Франківський Національний технічний університет нафти і газу

Україна, 34014, Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, кафедра "Електропостачання та електрообладнання"

тел. (03422) 4-80-03, E-mail: feivt@ifdtung.if.ua

Розглянуто зв'язки, які існують між кількістю провідників у всіх котушках схеми обмотки та обмотковими коефіцієнтами гармонік намагнічуючої сили обмотки, пазового та диференційного розсіяння.

Rассмотрены связи, существующие между числами проводников у всех катушках схемы обмотки, обмоточными коэффициентами гармоник намагничивающей силы обмотки, пазового и дифференциального рассеяния.

ІНВАРІАНТИ СУМИ КВАДРАТІВ ОБМОТКОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ

Таблиця 1

Розташування чотирьох котушок у половині фази кільцевої обмотки у 24 пазах

z	Параметри	Паз №											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Кількість витків	1	1	1	1								
	Фаза живлення	1	1	1	1								
2	Кількість витків	1	1	1	1								
	Фаза живлення	1	1	1	3								
3	Кількість витків	1	1	1	1								
	Фаза живлення	1	1	2	5								
4	Кількість витків	1	1	1				1					
	Фаза живлення	1	1	1				1					
5	Кількість витків	1	1	1				1					
	Фаза живлення	1	3	5				4					

Вперше відомості про існування інваріантів сум квадратів обмоткових коефіцієнтів опубліковані у 1979 році [1] Вілемом Кліма (Vilém Klíma). Ця важлива інформація не була помічена у наукових сферах і не знайшла розголосу та застосовування у подальших дослідженнях. Існування інваріантів накладає певні обмеження, як на величину основної гармоніки, так і на можливості знищення шкідливих гармонік у шарі струму схеми обмотки, в якій протікають багатофазні струми. Схема обмотки може бути, як симетричною, так і асиметричною, але у цій публікації на підставі прикладів розглянемо тільки варіанти за умови, що фазні струми у симетричній (чи асиметричній) одношаровій (двошаровій) схемі обмотки є симетричними.

З метою вдосконалення праці В. Кліма ми стисло наведемо окремі його висновки, а також розширимо та узагальнимо деякі поняття.

Розглянемо $n = 4$ секції кільцевої схеми обмотки, які розташовані у пазах ($z = 24$). У котушках (елементах) схеми обмотки протікають симетричні трифазні струми. Фази цих струмів позначимо цифрами: для фази $A - 1$ та 4 (4 - зустрічне включення елемента відносно елемента 1), $B - 3$ та 6 (6 - зустрічне включення елемента), $C - 5$ та 2 (2 - зустрічне включення елемента).

Кількість елементів вибрана не випадково. По-перше - n є дільником кількості пазів z , та по-друге - на підставі чотирьох елементів можемо створити симетричні, як з 120° фазною зоною, так і з 60° , та асиметричні схеми обмоток. З метою задоволення другої умови вибрано тільки ті розташування елементів у пазах електричної машини, які відповідають теорії симетричних кілець елементів (СКЕ) [2, 3 (табл. Д4)]. У табл. 1 рядки 1 - 3 відповідають рядковій № 1 табл. Д4, 4 - 5 відповідно рядковій 2. В [2, табл. Д4] наведено всі (сім) теоретично можливі структури симетричних шарів трифазних схем обмоток.

З метою спрощення прийнято, що всі котушки одиниткові.

Рядки 1 - 3 табл. 1 мають однакове розташування елементів у пазах, але живляться струмами, що належать до різних фаз. Як буде показано нижче заміна в елементі фази стуму не призводить до зміни інваріанта.

З використанням [1 (9.b)] запишемо рівняння інваріанта

$$\sum_{j=j_0}^{j_0+z-1} k_{jn}^2 = \frac{z \sum_i N_{ki}^2}{\left(\sum_i |N_{ki}| \right)^2}, \quad (1)$$

де j_0 - ціле число; z - кількість пазів; N_{ki} - кількість витків у i - му пазі; k_{jn} - обмотковий коефіцієнт.

На підставі (1) можемо констатувати, що права частина рівняння не залежить від знаку N_{ki} та фази струму, а, отже, ліва частина є інваріантом для будь-якого значення j_0 . Але зауважимо, що, за умови заміни фази струму в будь-якому елементі, спектр гармонік намагнічуючої сили стане іншим.

В табл. 2 наведено обмоткові коефіцієнти прямих гармонік для кожної зі структур табл. 1. Для всіх цих структур задовольняється рівняння (1). За (1) знайдемо інваріант, це є число 6 ($24 \cdot 4 / 16$). Це перший фундаментальний результат [1]. Варіація кількості витків у елементах призводить до зміни інваріанта.

№ схеми табл. № 1	Обмоткові коефіцієнти прямих гармонік №/№											
	1/23	2/22	3/21	4/20	5/19	6/18	7/17	8/16	9/15	10/14	11/13	12/24
1	0,958/ 0,958	0,837 /0,837	0,653/ 0,653	0,433/ 0,433	0,205/ 0,205	0,000/ 0,000	0,158/ 0,158	0,250/ 0,250	0,271/ 0,271	0,224/ 0,224	0,126/ 0,126	0,000/ 1,000
2	0,744/ 0,531	0,837/ 0,433	0,830/ 0,407	0,750/ 0,433	0,609/ 0,454	0,433/ 0,433	0,278/ 0,360	0,250/ 0,250	0,344 /0,168	0,433/ 0,224	0,467/ 0,342	0,433/ 0,661
3	0,964/ 0,964	0,864/ 0,864	0,723/ 0,723	0,577/ 0,577	0,478/ 0,478	0,458/ 0,458	0,487/ 0,487	0,509/ 0,509	0,493/ 0,493	0,437/ 0,437	0,367/ 0,367	0,333/ 1,000
4	0,744/ 0,744	0,433/ 0,433	0,653/ 0,653	0,750/ 0,750	0,454/ 0,454	0,000/ 0,000	0,278/ 0,278	0,250/ 0,250	0,271/ 0,271	0,433/ 0,433	0,342/ 0,342	0,000/ 0,000
5	0,359/ 0,344	0,250/ 0,376	0,205/ 0,126	0,661/ 0,250	0,830/ 0,467	0,599/ 0,376	0,531/ 0,168	0,901/ 0,250	0,958/ 0,158	0,599/ 0,250	0,407/ 0,609	0,661/ 0,250

Наприклад, якщо замінити тільки в одному з елементів кількість витків із 1 на 2, то одержимо інваріант $24 \cdot 7/25 = 6,72$. Інваріант не залежить від того в якому елементі з їх сукупності замінено кількість витків, якщо до заміни всі елементи були однаковими.

Існують й інші інваріанти, наприклад:

$$\sum_{j=j_0+m \cdot c} k_{jn}^2 = \frac{z \sum_i N_{ki}^2}{m \left(\sum_i |N_{ki}| \right)^2}, \quad (2)$$

де m — можлива кількість фаз (для нашого прикладу можемо створити симетричну схему обмотки за умови, що $m = 3$ або $m = 6$);

$$c = 0, 1, 2, \dots, z/m - 1.$$

На ґрунті рівняння (2) одержимо значення нового інваріанта, що дорівнює одиниці ($24 \cdot 4/(6 \cdot 16)$). Наприклад, коли $j_0 = 1$, $m = 6$, $c = 0, 1, 2, 3$ сума квадратів обмоткових коефіцієнтів, одержаних на підставі лівої частини рівняння (2) та першого рядка табл. 2:

$$\sum_{j=j_0+6c} k_{jn}^2 = 0,958^2 + 0,158^2 + 0,126^2 + 0,205^2 = 1. \quad (3)$$

За умови, що значення $j_0 = 1, 2, 3$, $m = 3$, $c = 0 - 7$, одержимо

$$\sum_{j=1+3c} k_{jn}^2 = 2. \quad (4)$$

Зауважимо, в (4) всі три ($j_0 = 1, 2, 3$) інваріанти не залежить від значення j_0 . Аналогічні результати (з врахуванням, що у табл. 2 дані заокруглені) можемо одержати для всіх рядків табл. 2. Це справедливо, оскільки фактично, з врахуванням даних поданих у табл. 1, у табл. 2 наведено обмоткові коефіцієнти структур, у яких закладено елементи СКЕ, що уможливають створення структури всієї симетричної схеми обмотки.

Рівність інваріантів, що описані рівнянням (2) перестане існувати, якщо, наприклад, у десятому стовпчику першого рядка табл. 1 вставимо, елемент з одним витком, який належить будь-якій фазі. В (2) інваріант, одержаний на підставі значення $j_0 = 1$, буде відрізнятися від інваріанта, який одержано на підставі значення $j_0 = 2$. Отже, деякі інваріанти, які наведено в [1], не можемо практично застосовувати та одержати їх числові значення. Сказане вище не відноситься до інваріанта (1) та суми інваріантів у (2) для всіх значень j_0 .

У цій публікації розширено поняття інваріантів і винайдено інваріанти для трифазних схем обмоток, створених на підставі СКЕ або їх частин. Оскільки допускаємо можливість існування неповного СКЕ (тобто якоїсь частини окремого СКЕ), то це означає, що ми цікавимося інваріантами, як симетричних, так і "незначно" асиметричних схем обмоток, за умови, що сумарна кількість елементів незначно відрізняється від значення z .

Нехай існує $z = m \cdot n$ ($m=6$) рівномірно розподілених по поверхні якоря пазів, де m кількість фаз та n — кількість можливих трифазних СКЕ. Допустимо, що в пазах розташовано $n_i < n$ СКЕ. У такому випадку інваріанти можемо визначити на підставі формул (1) та (2). За (1) знайдемо інваріант ряду прямих гармонік, це є число

$$inv_j = z / (m \cdot n_i). \quad (5)$$

За (2) сума низки гармонік для $j_0 = 1$

$$inv_{j_1} = z / (m \cdot n_i), \quad (6)$$

а для $j_0 = 2$ та 3

$$inv_{j_2} = inv_{j_3} = 0. \quad (7)$$

На підставі рівняння (7) можемо стверджувати, що гармоніки, номери яких визначені значеннями $j_0 = 2$ та $j_0 = 3$ (див. пояснення до (2)), дорівнюють нулю.

Допустимо, що ми хочемо додати до n_i СКЕ ще один із елементів у новому СКЕ в будь-якому місці, тобто кількість всіх елементів стане $3n_i + 1$.

Визначимо на підставі формули (2) суму низки прямих гармонік

$$inv_{пр} = z / (m \cdot n_i + 1). \quad (8)$$

Суми ряду гармонік, визначених за (2): для $j_0 = 1$

$$inv_{j_1} = z / (m \cdot n_i + 1) - 2V_2, \quad (9)$$

а для $j_0 = 2$ та 3

$$inv_{j_2} = inv_{j_3} = z / (m \cdot n_i + 1)^2. \quad (10)$$

На підставі (10) можемо стверджувати, що сума квадратів гармонік, для номерів які визначені величинами $j_0 = 2$ та $j_0 = 3$ (див. пояснення до (2)), не дорівнює нулю і зменшуються зі збільшенням значення n_i .

Допустимо, що ми хочемо додати до n_i СКЕ ще два елементи СКЕ у будь-якому місці, тобто кількість всіх елементів стане $3n_i + 2$. У цьому випадку може виникнути два варіанти:

перший — два додані елементи належать тому самому СКЕ;

другий — належать різним СКЕ.

У першому випадку суми рядів гармонік:

для $j_0 = 1$

$$\text{inv}_{j_1} = z / (m \cdot n_i + 2) - 2 \cdot \text{inv}_{j_2}, \quad (11)$$

а для $j_0 = 2$ та 3

$$\text{inv}_{j_2} = \text{inv}_{j_3} = z / (m \cdot n_i + 2)^2. \quad (12)$$

У другому випадку суми рядів гармонік:

для $j_0 = 1$

$$\text{inv}_{j_1} = z / (m \cdot n_i + 2) - 2 \cdot \text{inv}_{j_2}, \quad (13)$$

для $j_0 = 2$ та 3

$$\text{inv}_{j_2} = \text{inv}_{j_3} = 2z / (m \cdot n_i + 2)^2. \quad (14)$$

Рівняння (1) - (14) справедливі й для одношарових схем обмоток.

ІНВАРІАНТИ ДВОШАРОВИХ СХЕМ ОБМОТОК

Ми зупинимося на обчисленні інваріантів симетричних двошарових схем обмоток, які можемо одержати на підставі теорії СКЕ [2] з використанням понять, введених у праці [1].

На підставі [1] для двошарової трифазної схеми обмотки істинний вираз, який поєднує суму квадратів обмоткових коефіцієнтів з коефіцієнтом пазового розсіяння:

$$0 \leq \sum_{c=0}^{z-1} k_{1+c}^2 = \frac{1}{z} \sum_{k=1}^z \left| \frac{F_k}{2F_0} \right|^2 \leq 1, \quad (15)$$

де k_{1+c} — обмотковий коефіцієнт гармоніки; z — кількість пазів; F_k — геометрична сума ампер-витків у обох шарах кожного паза; $2 \cdot F_0$ — сума абсолютних значень ампер-витків у обох шарах кожного паза.

Вираз (15) правильний для будь-якої двошарової схеми обмотки. Зауважимо, у виразі (15) ліва частина рівняння залежить від суми квадратів обмоткових коефіцієнтів всіх гармонік з порядком від одиниці до z , а права частина рівняння — коефіцієнт пазового розсіяння g_p , який застосовують для розрахунку індуктивного опору пазового розсіяння у заступній схемі електричної машини. Це відкриття зроблено в [1]. Його можемо використати для оцінки генерування гармонік, якщо відомий коефіцієнт пазового розсіяння, або, навпаки, для визначення коефіцієнта пазового розсіяння, якщо відомий склад гармонік.

Рівняння (15) можемо значно спростити за умови застосування його для структур схем обмоток, спроектованих на підставі СКЕ другого порядку [2] (з діаметральною симетрією котушок):

$$\sum_{c=0}^{n-1} k_{p+c \cdot m}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{F_k}{2F_0} \right|^2, \quad (16)$$

де сумування за індексом k проводять у тих пазах, в яких є елементи, що розташовані у верхньому (нижньому) шарі обмотки та належить фазі А в інтервалі пазів від 1 до $z/2$ (для схем обмоток, із перемиканням кількості пар полюсів за схемою Даландера, сумують ампер-витки у тих пазах, які належать одному шарові обмотки однієї половини фази А);

p — кількість пар полюсів;

$m = 6$;

$n = z/m$.

Розглянемо приклад. Нехай схема обмотки створена у $z = 24$ пазах статора з 60° фазною зоною та кроком вкорочення $y = 11$ на підставі першого рядка табл. 1. В табл. 3 для заданої схеми обмотки наведено позначення фаз струмів у перших чотирьох пазах для різних шарів схеми обмотки. Для правої частини рівняння (2.49) знайдемо коефіцієнт пазового розсіяння $g_p = (1+1+1+0,8662)/4 = 0,9375$. На підставі лівої частини рівняння (16) одержимо: сума квадратів обмоткових коефіцієнтів прямих гармонік дорівнює $k_{11}^2 + k_{17}^2 + k_{13}^2 + k_{19}^2 = 0,94947^2 + 0,09591^2 + 0,01645^2 + 0,16290^2 = 0,9375$.

Таблиця 3

Номер паза	1	2	3	4
Фаза живлення елементів верхнього шару обмотки	1	1	1	1
Фаза живлення елементів нижнього шару обмотки	1	1	1	2

КОЕФІЦІЄНТ ДИФЕРЕНЦІЙНОГО РОЗСІЯННЯ

Важливою характеристикою шару струму обмотки є коефіцієнт диференційного розсіяння обмотки, який залежить від амплітуди основної гармоніки та амплітуд всіх інших шкідливих гармонік. Відомо [4, 5], що амплітуда гармоніки намагнічуючої сили обмотки пропорційна відношенню обмоткового коефіцієнта до порядку гармоніки v :

$$F_v \equiv k_{ov} / v. \quad (17)$$

Електромагнітні моменти шкідливих гармонік, які пропорційні квадратам амплітуд намагнічуючих сил обмотки, зменшують коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, викликають вібрації та шуми і часто унеможливають нормальну роботу електричної машини.

При зростанні порядку гармоніки v амплітуда шкідливої гармоніки зменшується, тому вплив шкідливих гармонік високого порядку $v \gg z$ (де z — кількість пазів) на характеристики електричної машини — невеликий. Однак, за умови, що $v < z$, шкідливі гармоніки суттєво впливають на характеристики асинхронної машини. За загально прийнятим визначенням [5] коефіцієнт диференційного розсіяння

$$\tau_d = \frac{\sum_{v=1}^{\infty} (k_{ov} / v)^2 - (k_{op} / p)^2}{(k_{op} / p)^2} = \frac{\sum_{v=1}^{\infty} (k_{ov} / v)^2}{(k_{op} / p)^2} - 1, \quad (18)$$

де p — кількість пар полюсів основної гармоніки.

Як впливає з (18), коефіцієнт диференційного розсіяння можна інтерпретувати як відношення суми шкідливих електромагнітних моментів до електромагнітного моменту основної гармоніки. При прямуванні обмоткових коефіцієнтів шкідливих гармонік до нуля, коефіцієнт диференційного розсіяння зменшується. Отже, чим менший коефіцієнт диференційного розсіяння, тим краща обмотка з огляду на вплив шкідливих гармонік на механічну характеристику машини.

Коефіцієнт диференційного розсіяння є інтегральною характеристикою схеми обмотки. Визначення

коефіцієнта диференційного розсіяння за (18) призводить до великої кількості арифметичних операцій, оскільки ряд у чисельнику (18) слабо збіжний.

Відомі геометричні способи визначення коефіцієнта диференційного розсіяння на підставі діаграми Гергеса [4, 5, 6, 7], згідно з якою коефіцієнт диференційного розсіяння визначають за відношенням площі багатокутника до площі кола, що є незручним, бо вимагає створення спеціальної трикутної сітки і забезпечує малу точність. Єдина перевага - наочне геометричне представлення: чим ближче площа багатокутника наближається до площі кола, тим менший коефіцієнт диференційного розсіяння обмотки.

Коефіцієнт диференційного розсіяння використовують для розрахунку індуктивного опору диференційного розсіяння обмотки [6], що входить у заступну схему асинхронної машини.

Сумування безконечного ряду у чисельнику рівняння (18) можна здійснити з врахуванням періодичності повторення обмоткових коефіцієнтів гармонік з періодом z . Отже

для парного значення кількості пазів z

$$\tau_d = \frac{\sum_{v=1}^{z/2-1} A_v k_{0v}^2}{k_{0p}^2 / p^2} - 1, \quad (19)$$

для непарного значення z

$$\tau_d = \frac{\sum_{v=1}^{(z-1)/2} A_v k_{0v}^2}{k_{0p}^2 / p^2} - 1, \quad (20)$$

$$\text{де } A_v = (\pi / (z \cdot \sin(\pi / z \cdot v)))^2. \quad (21)$$

На підставі аналізу значень A_v зауважимо, що вони зменшуються за умови збільшення порядку гармоніки v , яка не може перебільшувати значення $z/2$ для парного значення z і $(z-1)/2$ - для непарного.

З врахуванням (19), (20) і (21) можемо виявити, який вплив мають вищі шкідливі гармоніки, що пов'язані з основною гармонікою $v = p$ (їх називають зубцевими, на коефіцієнт диференційного розсіяння обмотки

$$\tau_d = p^2 A_p / k_{0p}^2 - 1. \quad (22)$$

В загальному випадку, при $z \geq m$ (де m - кількість фаз) складова коефіцієнта диференційного розсіяння (22) не може бути знищеною, бо зубцеві шкідливі гармоніки пропадуть тільки за умови, що амплітуда основної гармоніки дорівнює нулю, а це не має сенсу.

ВИСНОВОК

З наведеного вище аналізу можемо констатувати:

1. Сума квадратів обмоткових коефіцієнтів гармонік намагнічуючої сили будь-якої структури симетричної схеми обмотки статора тісно пов'язана з кількістю витків у котушках обмотки, які визначають інваріант суми квадратів обмоткових коефіцієнтів.

2. Коефіцієнт пазового розсіяння двошарової схеми обмотки можна визначити на підставі суми квадратів обмоткових коефіцієнтів гармонік.

3. Коефіцієнт диференційного розсіяння схеми обмотки залежить від кількості пазів та квадратів обмоткових коефіцієнтів гармонік. Побудова діаграми Гергеса, яку, зазвичай [6, 7], застосовують для визначення коефіцієнта диференційного розсіяння втрачає свій сенс.

4. Обмоткові коефіцієнти уможливають визначення коефіцієнтів пазового та диференційного розсіяння для будь-якої теоретично можливої структури [2] симетричної схеми обмотки.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Klima V. On the theorem of the sum of squares of winding factors invariance // Acta tech. Csav. -1979. – p. 365 - 388.
- [2] Гаврилюк Р.Б. Множини структур схем обмоток електричних машин змінного струму. – Івано-Франківськ: Видавничий центр Львівського національного університету імені Івана Франка. -2003. - 396 с.
- [3] Гаврилюк Р.Б. Множество неэквивалентных симметричных токовых слоев машин переменного тока // Электромеханика. -1989. -Т. 7. - С. 28-35. (Изв. высш. учебн. завед).
- [4] Кучера Я., Гапл Й. Обмотки электрических машин. - Прага, Чехословацкая АН, 1963. – 981 с.
- [5] Лившиц-Гарик М. Обмотки машин переменного тока. - М. - Л.: ГЭИ, 1959. -766 с.
- [6] Попов В.И. Матричный анализ схем обмоток совмещенных электрических машин // Электричество. 1984. - № 11. – С 36 - 43.
- [7] Попов В.И. Оценка электромагнитных свойств трех- и двухфазных схем обмоток электрических машин переменного тока // Электротехника. 2001. -№ 10. – С. 9 – 17.

Надійшла 01.09.2008

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРУ ГАРМОНІК ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗАГЛИБЛОГО ТИПУ

Заблудський М.М., к.т.н., доц., Філатов М.А., Квасов В.О., Лупанов А.В.

Донбаський державний технічний університет

Україна, 94204, Луганської обл., Алчевськ, пр. Леніна, 16, ДонДТУ, кафедра "Електричні машини та апарати", тел. (06442) 2-05-64, факс (06442) 2-68-87, E-mail: info@dgmi.edu.ua.

Наведені результати експериментальних досліджень, отримані спектрограми напруги при різних режимах роботи, встановлена природа виникнення вищих гармонік в ПЕМП.

Приведены результаты экспериментальных исследований, получены спектрограммы напряжения при разных режимах работы, установлена природа возникновения высших гармоник в ПЭМП.

ВСТУП

Створення поліфункціональних електромеханічних перетворювачів (ПЕМП) і енергозберігаючих технологій на їх основі базується на ідеї суміщення в одному електромеханічному пристрої одночасно нагрівальних, транспортуючих, змішувальних (турбулентно-формуєчих) функцій, інтеграції теплової енергії і спрямування останньої в зону переробки сировини. При цьому порожнистий феромагнітний ротор охолоджується сировиною, яка переробляється. Складність опису взаємозв'язаних теплових, електромагнітних, гідродинамічних і механічних процесів, необхідність координації потоків енергії, а також наявність нетрадиційних для сучасних асинхронних машин багатомодульної структури і режимів роботи, таких як тривала стоянка під струмом, робота при великих ковзаннях, динамічні режими форсування потребують глибоких теоретичних і експериментальних досліджень.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На відміну від методик проектування традиційних асинхронних машин увесь спектр субгармонік і вищих гармонік використовується в ПЕМП для формування оптимальної корисної теплової і механічної потужності [1, 2]. Визначення гармонічного складу магнітного поля, диференціація або суміщення дії електромагнітних моментів від дії вищих гармонік прямого і зворотнього магнітних полів, уточнені розрахунки теплової потужності при різних режимах роботи ПЕМП та ін. – низка остаточно не вирішених на сьогодні наукових і практичних задач.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В умовах несиметричності джерела живлення та параметрів ротора експериментально визначити спектр гармонік ПЕМП заглибного типу.

ФОРМУВАННЯ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ГАРМОНІК ПЕМП

Найпоширеніші варіанти конструкцій статорів двигунового модуля (ДМ) і гальмівного модуля (ГМ) ПЕМП наступні:

статорні обмотки ГМ і ДМ покладені в пазах окремих магнітопроводів і виводами підключені до

загальної живильної мережі. При цьому статор ГМ включений у режимі противключення;

статори ДМ і ГМ покладені в загальних пазах. Обмотки взаєміндуктивно не зв'язані, що досягається вибором відповідних кроків обмоток, обмеженням числа паралельних галузей і способом з'єднання фаз.

Статорні обмотки можуть бути з'єднані як зіркою, так і трикутником. Як правило, ПЕМП мають загальний зовнішній (внутрішній) порожнистий феромагнітний ротор (ПФР).

При підключенні обмотки ДМ до трифазної первинної мережі із частотою f , утвориться обертове $2p_d$ – полюсне поле Φ_d , під дією якого в масивному роторі протікають вихрові струми, створюється асинхронний момент і ротор обертається із частотою $n_n = n_1 (1 - s_d)$, де $n_1 = 60 f/p_d$ й s_d – ковзання ДМ. Частота струмів у роторі $-f_{2d} = f_1 s_d$.

При підключенні до первинної мережі статорної обмотки ТМ утвориться $2p_T$ – полюсне поле Φ_T , що наводить у масивному роторі ЕДС із частотою:

$$f_{2T} = \frac{p_T}{60} (n_p \pm n_T) = \left[\frac{p_T}{p_d} (1 - s_d) \pm 1 \right] f_1 = s_T \cdot f_1, \quad (1)$$

Ковзання гальмівного модуля $S_{ГМ}$ визначається за виразом:

$$S_{ГМ} = \frac{p_{ГМ}}{p_{ДМ}} \left[1 - \frac{1}{H} \int_{t_{РСС}}^{t_{СТ}} [M_{ЕМ,Р}(t) - M_C] dt \pm 1 \right], \quad (2)$$

де $t_{РСС}$ – тривалість режиму "стоянка під струмом"; $(t_{СТ} - t_{РСС})$ – тривалість досягнення швидкості ротора сталої величини, H – інерційна постійна ротора; $M_{ЕМ,Р} = (M_{ЕМ(ДМ)} \pm M_{ЕМ(ГМ)})$ – результуючий електромагнітний момент; $p_{ДМ}$, $p_{ГМ}$ – число пар полюсів відповідно двигунового (ДМ) та гальмівного (ГМ) модулів.

Знак "+" відповідає зустрічному, а "-" – узгодженому обертанню полів Φ_d і Φ_T .

МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Спектральний аналіз – це один з методів обробки сигналів, який дозволяє охарактеризувати частотний склад вимірюваного сигналу. Перетворення Фур'є є

математичною основою, яка пов'язує часовий або просторовий сигнал (або ж деяку модель цього сигналу) з його уявленням в частотній області. Методи статистики грають важливу роль в спектральному аналізі, оскільки сигнали, як правило, мають шумовий або випадковий характер. Якби основні статистичні характеристики сигналу були відомі точно або ж їх можна було б без помилки визначити на кінцевому інтервалі цього сигналу, то спектральний аналіз був би галуззю точної науки. Проте насправді по одному-єдиному відрізку сигналу можна отримати тільки деяку оцінку його спектру. Тому завданням є дослідження вищих гармонік, що дуже актуально з погляду енергозберігаючих технологій, оскільки окрім виявлення несправностей, поліпшення роботи електромеханічного перетворювача і його енергетичних показників, можна поліпшити і гармонійний склад наших електричних мереж.

Дослідження вищих гармонік полягає у виявленні гармонійного спектру і подальший його аналіз. Проаналізувавши, чим викликані ті або інші вищі гармоніки можна регулювати їх склад, як в первинному, так і у вторинному контурах. Нижче наведена схема стенда для дослідження вищих гармонік (рис. 1).

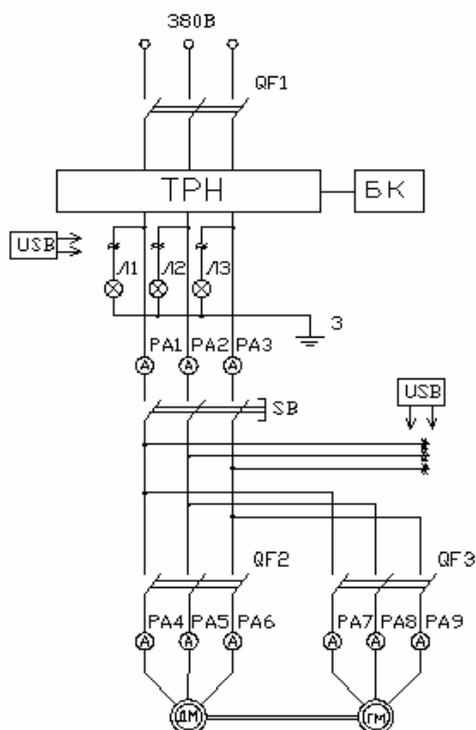


Рис. 1. Схема для дослідження вищих гармонік

В першому випадку використовується аналоговий осцилограф. В цьому випадку необхідно перенести картинку з екрану осцилографа на будь-який носій для подальшого перетворення в цифровий вигляд. Існує маса різних програм для оцифрування, найбільш зручна у використанні є Graph2digit 0.61, яка служить для оцифрування графіків представлених файлами у форматах jpg, bmp або wmf. Програма дозволяє оцифрувати графік із заданим кроком і при необхідності відредагувати отримані результати.

Результати оцифрування можна зберегти в текстовий файл або скопіювати в буфер обміну для подальшої обробки, наприклад в Excel. Для проведення спектрального аналізу використовуємо систему комп'ютерної математики MATHCAD, призначену для автоматизації вирішення масових математичних завдань в областях науки і техніки. MATHCAD має вбудовану функцію реалізації чисельного методу - це швидке перетворення Фур'є (ШПФ), що дозволяє істотно спростити процедуру наближеного спектрального аналізу. ШПФ - швидкий алгоритм перенесення відомостей про функцію, задану 2і відліками в тимчасовій області, в частотну область. Якщо мова йде про спектральному аналізі функції $y(t)$, її потрібно задавати дійсними відліками і використовувати функцію $fft(V)$, де V - вектор, елементи якого зберігають відліки функції $y(t)$. Результатом буде також вектор A з комплексними елементами - відліками в частотній області (їх удвічі менше, ніж відліків в тимчасовій області).

В другому випадку використовується цифровий осцилограф, що запам'ятовує, який оснащений алгоритмом ШПФ для проведення аналізу сигналу не тільки в тимчасовій, але і в частотній області. По отриманих спектрограмах проводиться аналіз і висновок про технічний стан ПЕМП.

Для виявлення впливу режимів роботи ПЕМП, комутаційних спотворень тиристорного регулятора напруги (ТРН), несиметрії системи керування ТРН на гармонічний склад, форму та амплітуду значення струмів і напруг ПЕМП проведенні наступні випробування дослідного зразка заглибного ПЕМП потужністю 3 кВт і зняті осцилограми:

- напруги мережі живлення;
- вхідних і вихідних напруг і струмів ТРН при активному навантаженні;
- вхідних і вихідних напруг і струмів при живленні ПЕМП через ТРН у режимі роботи - тривала "стоянка під струмом" ($s = 1$);
- вхідних і вихідних напруг і струмів при живленні ПЕМП через ТРН у режимі обертання ротора ПЕМП;
- реєстрація спектрограми напруги й струмів при живленні від ТРН відповідно активного навантаження ПЕМП.

Отримані осцилограми наведені на рис. 2 – 6.

Аналіз за допомогою швидкого перетворення Фур'є отриманих осцилограм наведено на рис. 7 – 11.

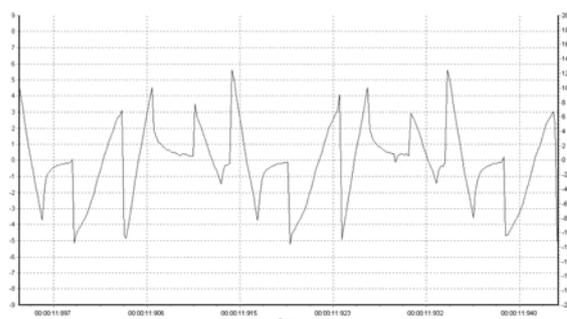


Рис. 2. Лінійна напруга (AB) на виході ТРН при обертанні ротора ПЕМП

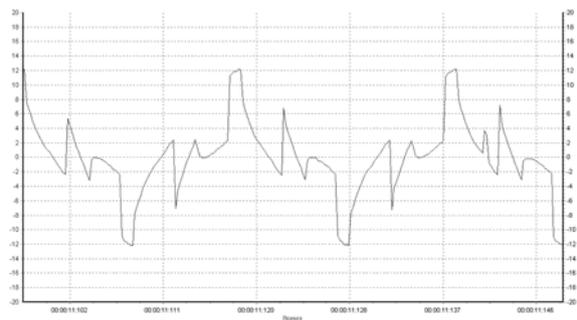


Рис. 3. Лінійна напруга (АС) на виході ТРН при обертанні ротора ПЕМП

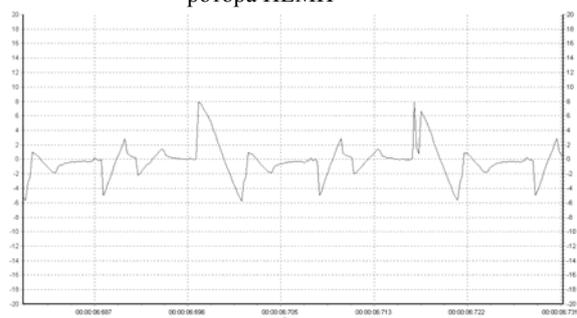


Рис. 4. Лінійна напруга (BC) на виході ТРН при обертанні ротора ПЕМП

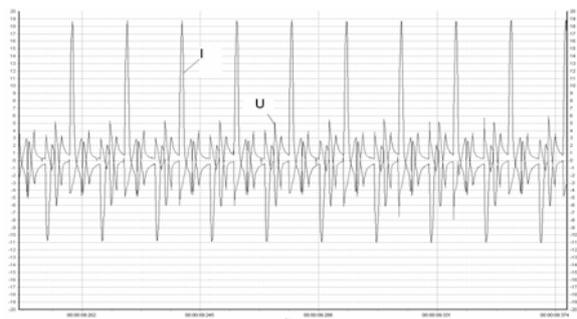


Рис. 5. Лінійна напруга (AB) на виході ТРН при активному навантаженні й струм фази С

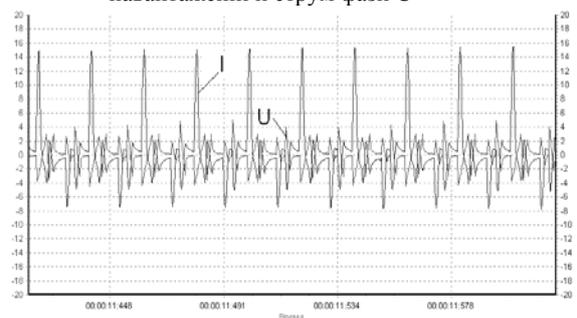


Рис. 6. Лінійна напруга (AB) на виході ТРН у режимі "стоянка під струмом" й струм фази С

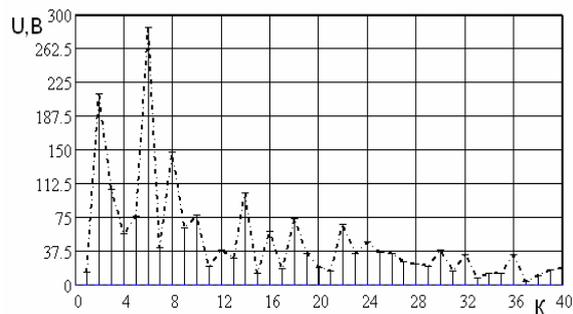


Рис. 7. Гармоніки напруги (AB) на виході ТРН при обертанні ротора ПЕМП

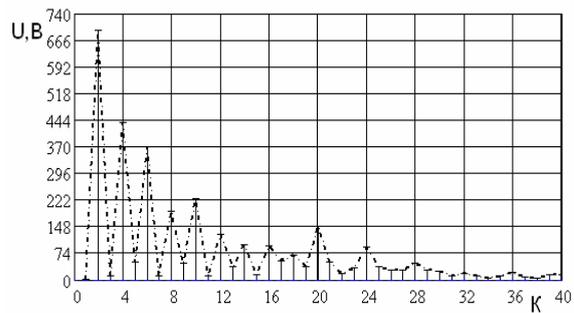


Рис. 8. Гармоніки напруги (АС) на виході ТРН при обертанні ротора ПЕМП

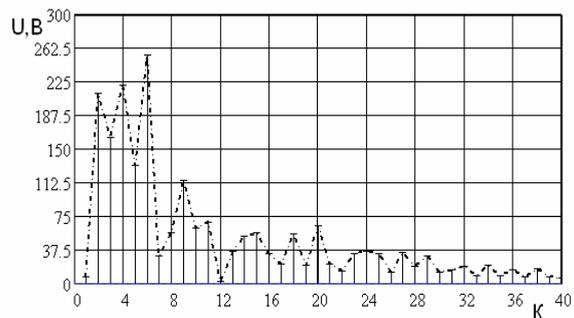


Рис. 9. Гармоніки напруги (BC) на виході ТРН при обертанні ротора ПЕМП

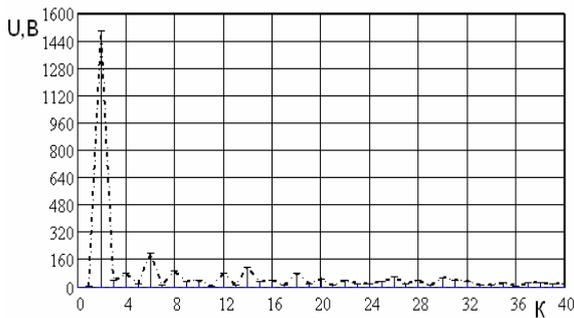


Рис. 10. Гармоніки напруги (AB) на виході ТРН при активному навантаженні

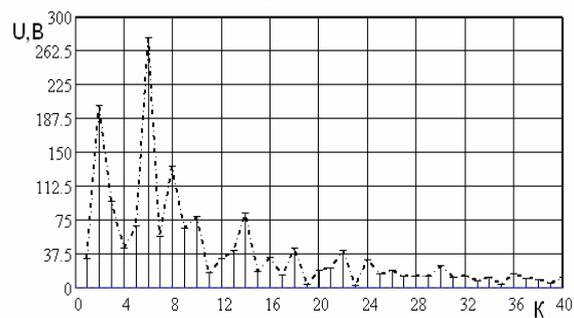


Рис. 11. Гармоніки напруги (AB) на виході ТРН у режимі "стоянка під струмом"

ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Гармонічний склад напруги промислової мережі живлення при випробуваннях повинні відповідати стандарту ГОСТ 13109-97 щодо якості електроенергії, а саме:

– коефіцієнт несиметрії зворотної послідовності

$$K_{24} = \frac{U_{3В}}{U_{пр}} \cdot 100 \%, \text{ не перевищував } 2 \%;$$

– відхилення напруги прямої послідовності $U_{пр}$ від

номінального значення $\delta U = \frac{U_{\text{пр}} - U_{\text{н}}}{U_{\text{пр}}} \cdot 100\%$ не перевищує $\pm 5\%$;

– зсув по фазі між векторами $U_{\text{пр}}$ і $U_{\text{зв}}$ для фази А ($\Delta\psi = \psi_{\text{зв}} - \psi_{\text{пр}}$) не перевищував 40° .

Підключення ТРН для регулювання напруги живлення ПЕМП суттєво змінило гармонічний склад як напруги, так струмів. Крім того виявлена несиметрія системи керування ТРН.

Незалежно від аналізованої напруги (фазної або лінійної) при несиметрії системи керування ТРН комунікаційні спотворення містять гармоніки непарних порядків. При цьому поряд із зміною амплітуд канонічних складових до $= 1,5,7,9\dots$ Частотний спектр комунікаційних спотворень доповнюється гармоніками з номерами кратними трьом. Величина їхніх амплітуд залежить від коефіцієнта несиметрії й фази зворотної послідовності.

У результати впливу несиметрії керування виникають парні гармоніки до $= 2,8,14\dots$ і до $= 4,10,16$.

Несиметрія змінює не тільки гармонічний склад вихідної напруги, алі й надає суттєвий вплив на вхідне коло ТРН. При живленні від ТРН лише активного навантаження гармонічний склад напруги й струмів містить канонічний ряд гармонік $k = 1,5,7\dots$ Поряд з цими гармоніками присутні гармоніки, кратні 3-м. Величина парних гармонік суттєво незначна.

Підключення ПЕМП до ТРН і робота його в режимі тривалої стоянки під струмом супроводжується значним посиленням парних гармонік, особливо 8-ї.

Значно посилилась 5-та гармоніка та зменшилась 7-ма гармоніка. Сьома гармоніка при $S=1$ створює позитивний момент й діє узгоджено з основною гармонікою, але коли ротор почне обертання відносна швидкість поля сьомої гармоніки і ротора почне зменшуватись. Момент від дії цієї гармоніки також буде зменшуватись і при швидкості ротора $n = n_1/7$ ($S = 6/7$) сьома гармоніка буде нерухома по відношенню до ротора й створює нульовий момент ($M_7 = 0$). Далі сьома гармоніка при підвищеній швидкості ротора буде створювати гальмівний момент.

Посилення п'ятої гармоніки, яка створює в режимі $0 < S \leq 1$ лише гальмівний момент, оскільки обертається у зворотному порядку по відношенню до основної. Для режиму стоянки під струмом спостерігається своєрідне компенсування дій п'ятої й сьомої гармоніки за електромагнітними моментами цих гармонік, але позитивно впливає на отримання теплової енергії.

Наявність гармонік кратних трьом викликає появу струмів нульової послідовності.

Обмотку ПЕМП виконано з цілим числом пазів на полюс і фазу, тому поява субгармонік (більш нижчих порядків, ніж основна) викликана лише роботою тиристорів.

Криві струмів й напруг несиметричні відносно часової вісі (абсцис), тому містять парні гармоніки.

Поява парних гармонік викликана перш за всі насиченням магнітної системи ПЕМП у режимі стоянки під струмом і статичним ексцентриситетом. У цьому ж режимі несиметрія напруги викликає підвищені локальні перегріву, що у свою чергу обумовлює параметричну несиметрію, у тому числі в масивному роторі. Це спричиняє створення прямих і зворотних магнітних полів, кожне з яких необхідно аналізувати й використовувати при формуванні результуючого електромагнітного моменту й граючої потужності.

У режимі обертання ротора ПЕМП спостерігається значне посилення сьомої гармоніки й зменшення парних та вищих гармонік у порівнянні з режимом стоянки під струмом. Тобто обертання ротора в якійсь мірі компенсує параметричну несиметрію ПЕМП.

ВИСНОВКИ

1. Підключення ТРН для регулювання напруги живлення ПЕМП суттєво змінило гармонічний склад як напруги, так струмів.

2. Посилення п'ятої гармоніки, яка створює в режимі $0 < S \leq 1$ лише гальмівний момент, оскільки обертається у зворотному порядку по відношенню до основної. Для режиму стоянки під струмом спостерігається своєрідне компенсування дій п'ятої й сьомої гармоніки за електромагнітними моментами цих гармонік, але позитивно впливає на отримання теплової енергії.

3. У режимі обертання ротора ПЕМП спостерігається значне посилення сьомої гармоніки й зменшення парних та вищих гармонік у порівнянні з режимом стоянки під струмом. Тобто обертання ротора в якійсь мірі компенсує параметричну несиметрію ПЕМП.

4. Подальші дослідження повинні бути зосередженні на визначенні взаємного впливу гальмівного та двигунового модулів ПЕМП в контурах статорів при їх живленні від одного джерела, а також на дослідженнях сигналів потужностей.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Заблодский Н.Н. Полифункциональные электро-механические преобразователи технологического назначения: Монография / Н.Н. Заблодский. – Алчевск: Дон ГТУ, 2008. – 259 с.
- [2] Заблодский Н.Н., Филатов М.А., Гринь Г.М. и др. Динамика и гармонический состав токов полифункциональных электро-механических преобразователей энергии // Сб. научн. тр. Донбасского государственного техн. ун-та. – Алчевск: Дон ГТУ, 2007, - Вып.24. – С. 370-383
- [3] Дьяконов В. Mathcad 2001: учебный курс. – СПб.: Питер, 2001. – 624 с.: ил.

Надійшла 15.09.2008

МЕТОДИКА АППРОКСИМАЦИИ КРИВЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ИНДУКТОРНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Зинченко Е.Е.

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта
Украина, 61050, Харьков, пл. Фейербаха, 7, кафедра электротехники и электрических машин
тел. (057) 730-19-96

Финкельштейн В.Б., д.т.н.

Харьковская национальная академия городского хозяйства
Украина, 61002, Харьков, ул., Революции, 12, кафедра электротехники
тел. (057) 731-95-28, E-mail: final@kharkov.ukrpack.net

На базі функцій сплайн-інтерполяції та сплайн-апроксимації системи MathCAD 2001 запропоновано методику апроксимації кривих намагнічування вентильних індукторно-реактивних двигунів і одержання залежності поточкозчеплення від струму й кута повороту ротора, які необхідні для математичного опису електромагнітних процесів в цих двигунах та розрахунку їх параметрів і характеристик.

На базе функций сплайн-интерполяции и сплайн-аппроксимации системы MathCAD 2001 предложена методика аппроксимации кривых намагничивания вентильных индукторно-реактивных двигателей и получения зависимости поточкозчепления от тока и угла поворота ротора, которая необходима для математического описания процессов в них и расчета их параметров и характеристик.

Благодаря появлению силовых полупроводниковых приборов на большие токи и напряжения стало возможным создание вентильных индукторно-реактивных двигателей. Эти двигатели имеют механическую характеристику подобную механической характеристике двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением, но при этом они значительно проще по конструкции и значительно надежнее в эксплуатации. Вентильные индукторно-реактивные двигатели (ВИРД) могут работать от однофазных и трехфазных цепей переменного тока, а также от источников постоянного тока. Указанные факторы обусловили бурный рост серийного производства вентильных индукторно-реактивных двигателей в странах дальнего зарубежья и началом производства их отдельных типоразмеров в странах СНГ.

Для расчета параметров и характеристик таких двигателей необходима зависимость поточкозчепления Ψ от тока I и угла поворота ротора ζ . Определение такой зависимости является целью настоящей статьи.

При заданных массивах b_n и h_n кривой намагничивания стали с помощью функций сплайн-интерполяции и сплайн-аппроксимации системы MathCAD 2001:

$$S1:=\text{lspline}(b,h) \quad (1)$$

$$H(B):=\text{interp}(S1,b,h,B) \quad (2)$$

зависимость напряженности магнитного поля H от магнитной индукции B представляется как встроенная программная функция. При этом аппроксимация получается настолько точной, что, практически, не наблюдается отклонений точек заданного массива от кривой построенной по аппроксимирующей функции. Таким образом, становится возможным, задавшись массивом значений магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ определить массивы поточкозчеплений и намагничивающей силы при согласованном положении ротора:

$$\Psi_i = B_{\delta_i} \cdot \tau \cdot l \cdot W; \quad (3)$$

$$F_{Fe_i} = \left[2 \cdot h_{z1} \cdot H(B_{\delta_i} \cdot K_{z1}) + 2 \cdot h_{z2} \cdot H(B_{\delta_i} \cdot K_{z2}) + (D_{вн} - 2 \cdot h_{z2}) \cdot H \left[B_{\delta_i} \cdot \frac{b_{z2} \cdot K_{z2}}{(D_{вн} - 2 \cdot h_{z2})} \right] \cdot \frac{\pi}{2} + D_n \cdot H \left(\frac{B_{\delta_i} \cdot K_{z1}}{k_2} \right) \cdot \frac{\pi}{2} \right] \cdot 100; \quad (4)$$

$$F_{\delta_i} = \frac{B_{\delta_i} \cdot 2 \cdot \delta}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}; \quad (5)$$

$$I_i = \frac{F_{\delta_i} + F_{Fe_i}}{W}, \quad (6)$$

где τ – полусная дуга статора; l – длина магнитопровода; W – число витков фазной обмотки; F_{Fe} , F_δ – массивы намагничивающих сил приходящихся на магнитопровод и воздушный зазор соответственно; δ – величина воздушного зазора; h_{z1} , h_{z2} – высоты зубцов статора и ротора соответственно; D_n , $D_{вн}$ – наружный и внутренний диаметр статора, соответственно; b_{z2} – ширина зубца ротора; k_2 – коэффициент изменения высоты спинки статора относительно половины ширины его зубца;

$$K_{z1} = \begin{cases} \frac{\gamma_r}{\gamma_s} & \text{если } \gamma_s \geq \gamma_r \\ 1 & \text{если } \gamma_s \leq \gamma_r \end{cases}; \quad K_{z2} = \begin{cases} 1 & \text{если } \gamma_s \geq \gamma_r \\ \frac{\gamma_s}{\gamma_r} & \text{если } \gamma_s \leq \gamma_r \end{cases},$$

γ_s, γ_r – величины дуг зубцов статора и ротора соответственно. По рассчитанным значениям поточкозчеплений и токов может быть построена кривая намагничивания в согласованном положении (рис. 1, верхняя пунктирная кривая) и с использованием процедур (1,2) получена зависимость $\Psi(i)$.

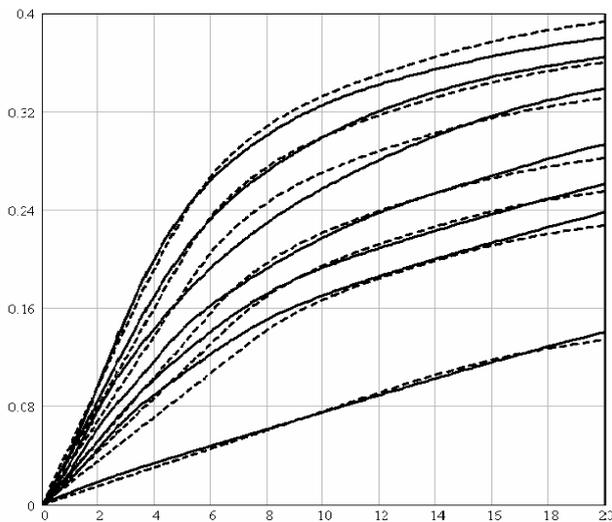


Рис. 1. Семейство кривых намагничивания ВИРД $\Psi(i, \zeta)$ при углах поворота ротора 180, 126, 108, 84, 72, 60 и 0 электрических градусов (сплошные линии – экспериментальные кривые, штриховые – расчетные)

Анализ семейств кривых намагничивания $\Psi(i, \zeta)$ при фиксированных значениях угла поворота ротора, полученных расчетом поля и экспериментально различными авторами [1, 2, 4, 5, 8, 9, 11] позволяет заключить:

- до "колена" зависимость потокосцепления от тока при всех значениях угла поворота ротора линейна;
- после "колена" при всех значениях угла поворота ротора зависимости также линейны и параллельны друг другу;

– в рассогласованном положении кривая намагничивания параллельна касательной к кривой в согласованном положении на краю насыщенного участка, соответствующего максимальному току.

Эти закономерности позволили использовать [1, 2] билинейную аппроксимацию кривых намагничивания.

Такая аппроксимация в связи с наличием скачка производной в точке пересечения прямых, при расчете ЕДС также приводит к её скачку, физически не существующему.

В [5] участок кривой намагничивания от "колена" до насыщения аппроксимируется квадратичной функцией, но, как показывает сравнение расчетных кривых с опытными, они существенно отличаются. В [11] аппроксимация осуществляется с помощью трансцендентной функции от тока и угла поворота ротора. Сравнение расчетных и опытных данных, к сожалению, не приведено.

Представляется целесообразным уточнить расчет кривых намагничивания, избавившись от скачка производной, получив функциональную зависимость потокосцепления от тока и угла поворота ротора в удобном для дальнейших расчетов виде.

Наклон линейного участка кривых намагничивания определяется индуктивностью, определяемой магнитной проводимостью воздушного промежутка при заданном значении угла поворота ротора $\lambda(\zeta)$ и магнитной проводимостью магнитопровода на линейном участке кривой намагничивания стали (Пренебрежение на линейном участке магнитным сопротив-

лением стали т.е. допущение о бесконечности магнитной проницаемости неоправданно. Магнитная проницаемость стали на линейном участке велика, но велика и длина магнитной силовой линии в стали в десятки и сотни раз превышающая величину воздушного зазора. Соотношение между результирующей намагничивающей силой и магнитным напряжением воздушного зазора в согласованном положении на этом участке может достигать до 1,8). Зависимость проводимости от угла поворота ротора аппроксимировали разностью постоянной и косинусоидальной составляющих [3, 6, 9, 11], кусочно-линейной [2, 7], параболической [10]. Наиболее распространенная аппроксимирующая функция – это указанный отрезок ряда Фурье. Но, как показано [5, 8], ширина участка наибольших значений может быть меньше участка наименьших значений, что не отражается при аппроксимации отрезком ряда Фурье. Поэтому, для определения линейного участка кривых намагничивания при различных углах поворота ротора приняты формулы [11]. При этом учитывается магнитное сопротивление магнитопровода в ненасыщенном состоянии:

$$L(\zeta) = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot W^2}{1 + \frac{F_{FeK} \cdot \mu_0 \cdot l \cdot W}{\lambda(\zeta) \Psi_k}}, \quad (7)$$

где $L(\zeta)$ – зависимость индуктивности от угла поворота ротора; k – номер точки на линейном участке кривой намагничивания в согласованном положении, $\lambda(\zeta) = 0.5 \cdot [\lambda_{\max} + \lambda_{\min} - (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \cdot \cos(\zeta)]$ – проводимость воздушного зазора в зависимости от угла поворота ротора, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ – магнитная проницаемость воздуха. Индуктивность на линейном участке при заданном значении угла поворота ζ одновременно является производной от потокосцепления по току, в том числе и в точке сопряжения линейного участка кривой намагничивания с коленом. Следовательно, для определения этой точки необходима зависимость тока от производной потокосцепления по току (динамической индуктивности). Массив точек этой зависимости может быть определен методом конечных разностей:

$$\frac{\partial \Psi_k}{\partial i_k} = \frac{\Psi(1.001 \cdot i_k) - \Psi(i_k)}{0.001 \cdot i_k}. \quad (8)$$

Получив массив точек, зависимость тока от производной $i(\Psi')$ (рис. 2) получаем, используя функции сплайн-интерполяции и сплайн-аппроксимации. Подставив в эту зависимость (7) определим значения граничных токов линейных участков кривых намагничивания $i_{\text{гр}}[L(\zeta)]$ как функцию от угла поворота ротора.

Величина параллельного смещения отрезков ОМ (рис. 3) нелинейной части кривой намагничивания в согласованном (после смещения пунктирная кривая) положении определяется (10)

$$\Delta \Psi(\zeta) = \Psi \Big|_{i_{\text{гр}}[L(\zeta)]} - L(\zeta) \cdot i_{\text{гр}}[L(\zeta)]. \quad (10)$$

С учетом (10) искомая зависимость потокосцепления от тока и угла поворота ротора примет вид:

$$\Psi(i, \zeta) = \begin{cases} L(\zeta) \cdot i & \text{если } i \leq i_{\text{гр}} \\ \Psi(i) - \Delta \Psi(\zeta) & \text{если } i > i_{\text{гр}} \end{cases}$$

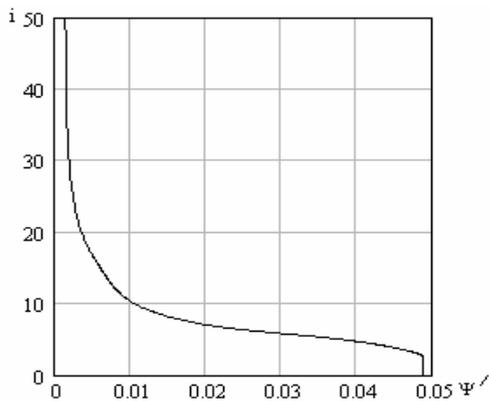


Рис. 2. Зависимость тока от производной от потокосцепления по току (динамической индуктивности)

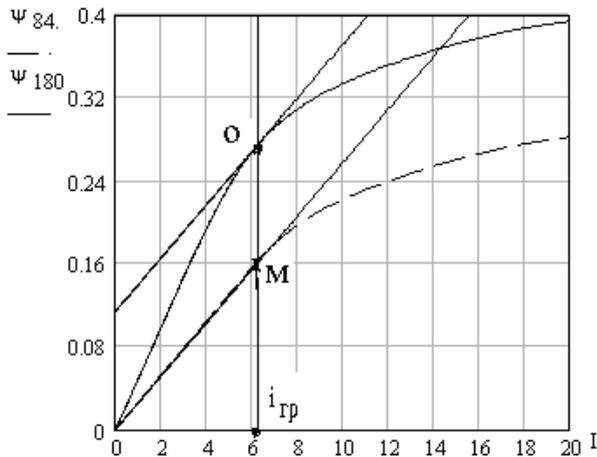


Рис. 3. Параллельный перенос участка кривой намагничивания от линии граничного тока до максимального тока в согласованном положении ротора на кривую при рассогласованном положении ротора

Сравнение рассчитанных по полученной формуле и экспериментальных кривых (рис. 1) демонстрирует их достаточное для практических целей совпадение.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗМЕРЕНИЮ КРИВЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ

К одной фазе $C_1 - C_5$ четырехфазного двигателя было подведено переменное синусоидальное напряжение частотой 50 Гц. Свободный конец вала был зажат в патроне делительной головки (рис. 4).

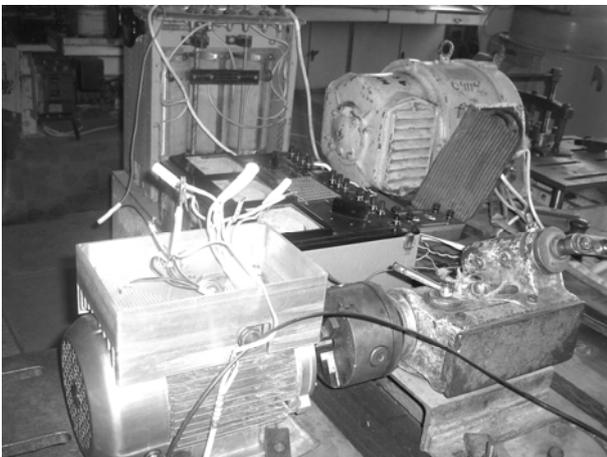


Рис. 4. Вентильный индукторно-реактивный двигатель, спаренный с делительной головкой

При нескольких фиксированных напряжениях измерялись ток и мощность при различных углах поворота ротора относительно рассогласованного положения. Угол изменялся поворотом патрона делительной головки. Максимальное потокосцепление, на основании измеренных величин вычислялось (11)

$$\Psi = \frac{U \cdot 1,41}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P}{UI}\right)^2} \quad (11)$$

При определении максимальной величины тока следует учитывать, что, так как он несинусоидальный соотношение между действующим значением и максимальным не равно 1,41. Поэтому при каждом напряжении снималась осциллограмма (рис. 5) и по ней определялось максимальное значение тока. По осциллограммам было установлено, что в пределах рабочих потокосцеплений соотношение между амплитудным и действующим значениями тока может достигать до 1,68.

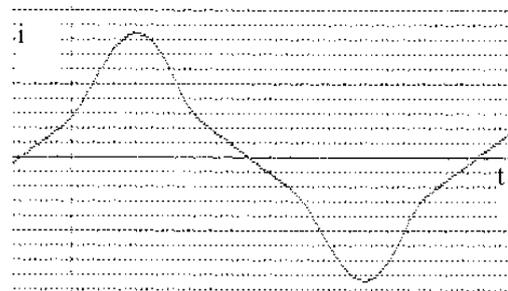


Рис. 5. Осциллограмма тока при насыщенном магнитопроводе

Этот результат был также подтвержден теоретически. Экспериментально снятая кривая намагничивания для согласованного положения была аппроксимирована для нелинейного участка аналитической зависимостью:

$$i(\Psi) = \frac{Y_3\Psi - Y_0}{2 \cdot (Y_1 - Y_4\Psi)} + \sqrt{\left(\frac{Y_3\Psi - Y_0}{2 \cdot (Y_1 - Y_4\Psi)}\right)^2 - \frac{1 - Y_2\Psi}{Y_1 - Y_4\Psi}} \quad (12)$$

Линейный участок представлен в виде:

$$i = \frac{\Psi}{L} \quad (13)$$

Зависимость (12) можно представить в виде:

$$Y_0 i_n + Y_1 i_n^2 - Y_2 \Psi_n - Y_3 \Psi_n i_n - Y_4 \Psi_n^2 = -1 \quad (14)$$

Для определения пяти констант возьмем пять точек кривой $n = 1 \dots 5$ начиная с граничной точки линейного участка. Причем вторую точку для обеспечения сопряжения линейного участка и "колена" следует брать как можно ближе к граничной точке линейного участка. Подставив значения потокосцеплений и токов в пяти точках в (14) получим систему пяти линейных уравнений с пятью неизвестными относительно констант Y_0, Y_1, Y_2, Y_3 и Y_4 решив которую найдем их значения (рис. 6).

В эксперименте потокосцепление изменялось синусоидально. Подставив синусоидальную функцию в (12, 13) получаем зависимость тока от времени. После вычисления 180 значений массива тока с шагом равным одному градусу и замены интеграла суммой представляется возможным определение действующей величины тока:

$$I = \sqrt{\frac{2}{T} \sum_{n=0}^{180} (i_n)^2 \cdot t_n}, \quad (15)$$

где T - период, i_n - мгновенное значение тока, t_n - шаг по времени, соответствующий одному градусу. Соотношение между амплитудным и действующим значением тока $K = I_{\max} / I$. Указанные вычисления повторялись при ряде амплитудных величин потокосцепления, в результате получен график изменения K от амплитуды потокосцепления (рис. 7).

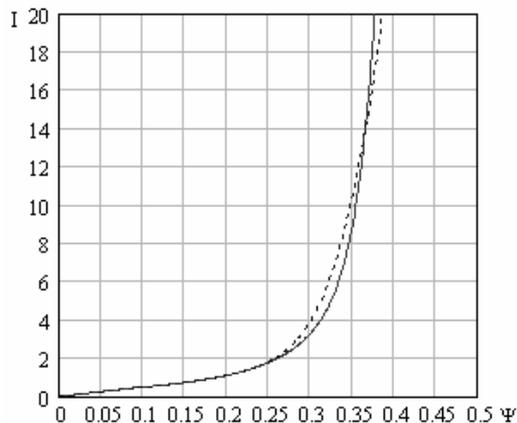


Рис. 6. Зависимость тока от потокосцепления (сплошная линия – расчетная кривая, пунктирная – аппроксимированная)

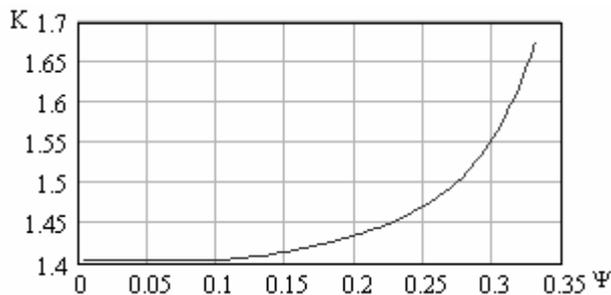


Рис. 7. Зависимость соотношения между амплитудным и действующим значением тока K от амплитуды потокосцепления Ψ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика аппроксимации кривых намагничивания вентильных индукторно-реактивных двигателей обеспечивает удовлетворительную сходимость с экспериментальными кривыми и может быть использована при их расчете и проектировании.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бычков М.Г. Анализ вентильно-индукторного электропривода с учетом локального насыщения магнитной системы // *Электричество*, 1998. - №6. – С. 50-53.
- [2] Бут Д.А. Линейные вентильно-индукторные двигатели. Часть 1 // *Электричество*. – 1999. - №12. – С. 32-41.
- [3] Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. Санкт-Петербург: 2003. – 149 с.
- [4] Красовский А.Б. Анализ процесса отключения фазной обмотки вентильно-индукторного двигателя при локальном насыщении зубцовой зоны // *Электричество*, 2001. - №5. – С. 41-47.
- [5] Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. – М.: издательство МЭИ, 2003. – 70 с.
- [6] Кузнецов В.А., Садовский Л.А., Виноградов В.Л., Лопатин В.В. Особенности расчета индукторных двигателей для вентильного электропривода // *Электротехника*, 1998. - №6. – С. 35 – 43.
- [7] Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. – CRC Press, 2001. – 398 p.
- [8] Miller T.J.E. Switched Reluctance Motor and their Control. – Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993. – 203 p.
- [9] Рымша В.В. Математическое моделирование линейных вентильно-реактивных двигателей // *Электротехника і електромеханіка*, 2003. - №4. – С. 72-76.
- [10] Смирнов Ю.В. Линейные вентильно-индукторные двигатели. // *Электричество*. – 2002. - №1. – С. 37-43.
- [11] Ткачук В.І. Електромеханотроніка. – Львів: видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. - 440 с.

Поступила 02.06.2008

АСИНХРОННІ ДВИГУНИ ДЛЯ ШАХТНИХ КОНВЕЄРІВ З ПОКРАЩЕНИМИ ПУСКОВИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Лущик В.Д., д.т.н., проф.

Донбаський державний технічний університет, кафедра "Електричні машини і апарати"
Україна, 94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16

Кирьянов В.В.

ВАТ "Донецький електротехнічний завод"
Україна, 83030, Донецьк, вул. Галлінська, 1.

Розглянутий на прикладі конвеєрного двигуна новий спосіб покращення пускових характеристик.

Рассмотрен на примере конвейерного двигателя новый способ улучшения пусковых характеристик.

Зараз на прикладі суміщеної Для конвеєрних двигунів важливим показником є пусковий момент, який бажано мати як можна більшим.

Загальновідомо, що пускові властивості асинхронних двигунів недосконалі. На протязі 120-літньої історії існування асинхронних двигунів чи не найосновніші зусилля були направлені на покращування їх пускових характеристик. Виконано тисячі, десятки тисяч наукових досліджень, зафіксовано тисячі патентів по цій проблемі.

Удосконалення конструкції короткозамкнених обмоток роторів проводилось в таких напрямках:

1. Оптимізація конструкції стержнів роторних обмоток.
2. Удосконалення конструкції короткозамикаючих кілець (короткозамикаючі кільця охоплюються залізним екраном).
3. Ротори з масивним феромагнітним сердечником.
4. Дво і тришарові конструкції роторів.

Будь-яке поліпшення пускових характеристик в асинхронних двигунах незмінно супроводжувалось погіршенням енергетичних показників в номінальному режимі роботи. Якій конструкції роторної обмотки віддати перевагу вирішувалось з урахуванням режиму роботи асинхронного двигуна.

Але найкращою і найбільш поширеною конструкцією роторної обмотки для асинхронних двигунів з покращеними пусковими властивостями продовжує залишатись двоклітинна роторна обмотка, запропонована Доліво-Добровольським майже відразу після винайдення ним трифазного асинхронного двигуна.

На сьогодні можна сказати, що знайдено рішення, яке дозволяє без погіршення енергетичних показників покращувати пускові властивості асинхронних двигунів. Для цього потрібно конструктивно виконати асинхронний двигун таким способом, щоб обмотки статора і ротора виконували подвійну функцію, тобто щоб вони були суміщеними $2p_1/2p_2$ -полюсними обмотками і при пуску створювали каскадний режим роботи, а в номінальному режимі роботи каскадний режим повністю (або майже повністю) зникав.

Каскадні асинхронні машини відомі давно [1, 2]. Якщо виконувати каскадну асинхронну машину в

одному магнітопроводі, їх обмотки для можливості суміщення повинні бути різнополюсними.

Для асинхронного конвеєрного двигуна, який є чотириполюсною машиною ($2p_1 = 4$), $2p_2$ - полюсне поле, яке буде утворюватись при пуску, може бути $2p_2 = 2, 6, 8$. Більш оптимально, якщо $2p_2 = 2$. Тобто роторна обмотка повинна бути суміщеною $2p_1/2p_2 = 4/2$ - полюсною обмоткою, при цьому $2p_2$ - полюсне поле повинно обертатись зустрічно $2p_1$ -полюсному полю.

$2p_1/2p_2$ - полюсної роторної обмотки буде показаний принцип створення такої обмотки і її переваги перед двома окремими обмотками.

На рис. 1 показані роторні обмотки, розміщені в одних і тих же пазах ротора і зображені одна над другою. Обмотка 1 - $2p_1$ -полюсна, $2p_1 = 4$ (рис. 1а), обмотка 2 - $2p_2$ -полюсна, $2p_2 = 2$ (рис. 1б), виконана такими ж котушками, як і обмотка 1, тобто виконана із скороченням кроку $y = 0,5 \cdot \tau_2 = \tau_1$. Обидві обмотки виконані однакою кількістю витків в котушках і однакою кількістю витків в магнітопроводі. Кожна обмотка займає половину пазового простору. Початки фаз обмотки 1 зміщені один відносно другого на 240° ел. в $2p_1$ -полюсному полі, початки фаз обмотки 2 зміщені на кут 120° ел. в $2p_2$ -полюсному полі, тому струм $I_1 = I_2$, який протікає по обом послідовно ввімкненим обмоткам, буде створювати магнітні поля, що обертаються в протилежних напрямках.

Роторні обмотки 1 і 2 можна об'єднати і створити одну суміщену обмотку. Це можливо зробити завдяки тому, що обмотки виконані однакою кількістю витків в котушках. Фази кожної із обмоток складаються із двох послідовно ввімкнених котушок. В перших котушках всіх фаз обох обмоток струми направлені в одному напрямі, в других котушках - в протилежному. Тому МРС, створювана другими котушками всіх фаз обмоток, дорівнює нулю, і другі котушки виявляються зайвими. Залишаються послідовно ввімкнені тільки перші котушки, другі котушки зникають. Суміщена обмотка, показана на рис. 1в, виконує такі ж функції, як і дві обмотки, обмотка 1 і обмотка 2, тобто при однаковому струмові I створює такі ж по величині магнітні поля Φ_1 і Φ_2 . В кожній котушці су-

міщеної обмотки в два рази більше витків (при незмінному діаметрі проводу), ніж в окремій котушці кожної із обмоток. В половині пазів мідь відсутня, витрата міді зменшується в два рази. Відповідно там, де нема міді, пази можна не виконувати. Так як ЕРС E_2 $2p_1$ -полюсного поля наводиться тільки в обмотці 1, із якої залишилось три котушки зі збільшеним в два рази числом витків, то ЕРС E_2 , яка буде наводитись в котушках суміщеної обмотки, не зменшується. Враховуючи, що повний опір Z_1+Z_2 суміщеної обмотки в два рази зменшується, так як зменшується в два рази число послідовно ввімкнених витків, то при незмінному ковзанні s струм I_2 в суміщеній обмотці суттєво зростає і відповідно зростає електромагнітний момент і потужність.

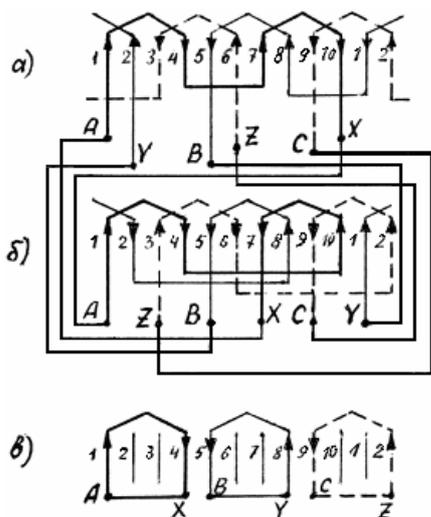


Рис. 1. Роторні обмотки каскадного асинхронного двигуна

Взагалі ж роторні короткозамкнені котушки доцільно виготовлять одновитковими із неізолюваної мідної шини, яка на кінцях зварюється.

У випадку з короткозамкненим ротором асинхронного двигуна імітацію трьох короткозамкнутих контурів можна здійснити, виконавши по три розрізи на кожному із короткозамикаючих кілець [3].

Експериментальні дослідження були проведені на асинхронних двигунах для шахтних конвеєрів ВКДВ250LC4 потужністю 132 кВт і напругою 660/1140В, які виготовляє ВАТ "Донецький електротехнічний завод". Двигун має зовнішній діаметр статора 368 мм, внутрішній – 244 мм, довжину осердя 580 мм, повітряний зазор $\delta=0,9$ мм, числа пазів $Z_1=48$, $Z_2=42$, обмотка двошарова, крок $y=9$ (1-10), число провідників в пазу 4+4, число витків в фазі $W_1=64$, провід $2,8 \times 7,1$. Обмотка ротора – двоклітинна, верхні стержні – латунні діаметром $d=9$ мм, нижні стержні – мідні трапецієподібні, висота 34,3 мм, ширина $8,1 \times 2,9$ мм. Верхні і нижні короткозамикаючі кільця із міді.

В експериментальному двигуні для підвищення ефективності каскадного режиму і для поліпшення енергетичних показників верхні латунні стержні роторної обмотки були замінені на мідні такого ж діаметра: $d=9$ мм, і обидва верхні короткозамикаючі кільця були розрізані навпроти зубців в трьох рівновіддальних одне від одного місцях. Розрізи одного короткозамикаючого кільця виконують навпроти розрізів

другого короткозамикаючого кільця. На рис. 2 показані розрізи між 42-м і 1-м пазами, між 14-м і 15-м пазами, між 28-м і 29-м пазами.

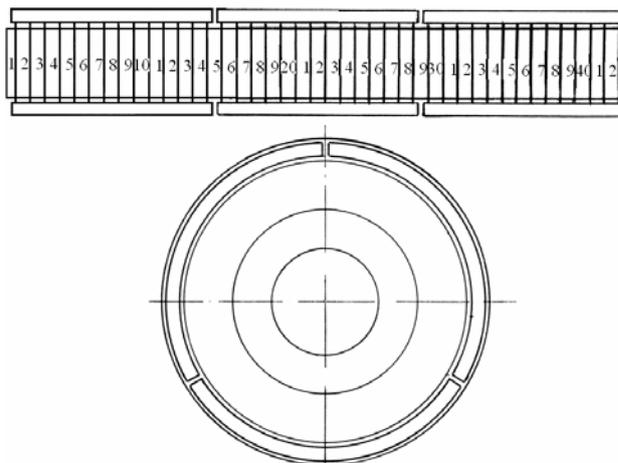


Рис. 2. Схема розрізів верхніх короткозамкнених кілець ротора

Так як неодмінною умовою існування каскадного режиму є взаємодія $2p_2$ -полюсного поля із статорною обмоткою, статорну обмотку було виконано в кожній фазі із двох паралельних віток із розміщенням котушкових груп у вітках так, як показано на рис. 3.

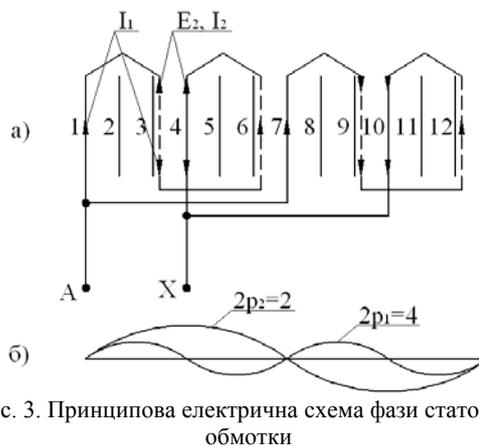


Рис. 3. Принципова електрична схема фази статорної обмотки

$2p_2$ -поле, створюване роторною обмоткою, наводить ЕРС E_2 , показану у верхніх частинах пазів. Ця ЕРС в котушкових групах фази складується і під її дією протікає струм I_2 . При іншому варіанті розміщення котушкових груп сумарна ЕРС в фазі дорівнює нулю. Статорна обмотка з двома паралельними вітками в фазах була виконана числом провідників в пазу 8+8 проводом $1,4 \times 7,1$.

Асинхронний двигун працює так. При пуску в верхній і нижній роторних обмотках виникають струми. Струм нижньої клітки створює $2p_1$ -полюсне поле ($2p_1=4$), а так як індуктивний опір нижньої клітки при пуску значно перевищує активний, електромагнітний момент, створюваний нижньою кліткою при пуску, незначний. Верхня клітка завдяки розрізам створює не тільки $2p_1$ -полюсне поле, а ще й $2p_2$ -полюсне ($2p_2=2$), яке в паралельних вітках статорної обмотки наводить ЕРС E_2 , в статорній обмотці виникає струм I_2 . Взаємодія цього струму з $2p_2$ -полюсним полем утворює додатковий електромагнітний момент. Цей

додатковий момент складується з основним при швидкості ротора в діапазоні від $n = 0$ до $n = \frac{60 \cdot f_1}{p_1 + p_2}$.

В діапазоні швидкості від $n = \frac{60 \cdot f_1}{p_1 + p_2}$ до $n = n_1$ додат-

ковий момент діє зустрічно, тому в номінальному режимі роботи від каскадного режиму роботи потрібно позбавлятися.

Частково каскадний режим нівелюється тим, що в номінальному режимі роботи на повну потужність починає працювати нижня клітка. Додатково можна рекомендувати скріплювати місця розрізів стальними пластинами товщиною 2÷3 мм, які будуть шунтувати розрізи в номінальному режимі роботи, коли частота

струмів в роторі становить всього 0,5±1 Гц.

Були виготовлені 2 асинхронні двигуни ВКДВ 250LC4: один в серійному виконанні, другий модернізований, названий експериментальним, і обидва досліджені в електромашинній лабораторії ДП "ХЕМЗ", м. Харків.

Нижче приведена зведена таблиця даних випробувань. Для одержання об'єктивних даних по енергетичним показникам двох машин, що порівнюються між собою, потрібно, щоб механічні втрати їх були однаковими. В третьому стовпці приведені енергетичні показники експериментального двигуна з такими ж механічними втратами, як і в серійного двигуна.

Зведена таблиця результатів випробувань електродвигунів типу ВКДВ 250LC4

Позначення показника	Розрахункові дані	Дані по ТУ	Дані випробувань		
			серійний	експеримент	експеримент
			I	II	III
P_H , кВт	132		132,09	132,34	132,940
U , В	660/1140		660/1140	660/1140	660/1140
I , А	152,2/87,9		146	148	148
$\cos \varphi$	0,82		0,853	0,84753	0,84753
η , %	92,5		93,02	92,55	92,968
S , %	1,1		0,94	0,97	0,97
I_K / I_H	6,4	7,5	6,1	7,817	
M_K / M_H	2,8	2,8	2,73	3,356	
M_{\max} / M_H	3,0	3,0	3,42	4,28	
$\tau_{\text{обм.стат.}}$, °С			96	98	
P_{M1} , кВт			3,26	3,35	3,35
P_{M2} , кВт			1,27	1,32	1,32
$P_{\text{ст.}}$, кВт			3,42	3,42	3,42
$P_{\text{мех.}}$, кВт			1,25	1,85	1,25
$P_{\text{доб.}}$, кВт			0,71	0,715	0,715
$\sum P$, кВт			9,91	10,655	10,055
P_1 , кВт			142	142,995	142,995
$R_{\text{фст.}}$ при 20°С	0,111		0,1095	0,111	0,111
I_0 , А			59	60	60
δ , мм			0,9	0,9	0,9
Вага, кг	865				

ВИСНОВКИ

1. Пусковий момент в експериментального двигуна збільшився порівняно з серійним на 23%.
2. Енергетичні показники практично залишились незмінними.

ЛІТЕРАТУРА

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. – Л.: Энергия. – 1973. – Ч. II. – 648 с.
2. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с., ил.
3. Луцки В.Д. Суміщені електричні машини та апарати. – К.: Техніка, 1993. – 203 с.

Надійшла 31.08.2008

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Милых В.И., д.т.н., Иваненко В.Н., к.т.н.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические машины"
тел. (057) 707-65-14, e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

Гречко Н.В.

Горный факультет Украинской инженерно-педагогической академии,
Украина, 94000, Стаханов, ул. Тельмана, 53, e-mail: ngretchko@ukr.net

Розглянута математична модель вентильно-індукторного генератора з суміщеними обмотками збудження і якоря, працюючого з вентильним навантаженням активного характеру і допоміжними діодами в фазах обмотки якоря.

Рассмотрена математическая модель вентильно-индукторного генератора с совмещенными обмотками возбуждения и якоря, работающего с вентильной нагрузкой активного характера и вспомогательными диодами в фазах обмотки якоря.

Из большого разнообразия известных конструктивных исполнений вентильно-индукторных генераторов (ВИГ) интерес представляет генератор, рассмотренный в [1, 2]. Особенностью такого генератора является возможность использования реакции якоря в режиме нагрузки для увеличения магнитного потока возбуждения, что приводит к уменьшению числа витков обмотки возбуждения или, с другой стороны, к увеличению напряжения на выходе генератора и увеличению его мощности, что было подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями.

Электромагнитная схема генератора приведена на рис. 1. На явно выраженных полюсах магнитной системы статора расположены трехфазная катушечная обмотка якоря ($A-A'$, $B-B'$, $C-C'$) и обмотка возбуждения (ОВ) (i_f – ток возбуждения, i_a, i_b, i_c – фазные токи якорной обмотки). В конкретном варианте исполнения катушки обмотки якоря и возбуждения на полюсах на рис. 1 не разделены, так как намотаны параллельно сдвоенными проводниками.

Из основных параметров расчетной модели генератора отметим следующие: наружные диаметры ротора и статора – 80,4 и 128 мм, зазор – 0,3 мм, числа витков обмотки возбуждения и якоря, приходящиеся на один зубец статора – 52; осевые длины сердечников ротора и статора – 52 и 50 мм; коэффициент заполнения сталью – 0,95.

Электрическая схема генератора, работающего на выпрямительную нагрузку активного характера, показана на рис. 2. Благодаря последовательно включенным диодам в фазах обмотки якоря создается добавочный магнитный поток возбуждения, увеличивающий общий поток возбуждения.

Идеализированная диаграмма предполагаемых изменений токов в фазных обмотках генератора на периоде повторяемости циклов 2π , с допущением синусоидальности фазных ЭДС e_a, e_b, e_c , представлена на рис. 3, где $\gamma_e = z_r \gamma$ – угол поворота ротора в электрических радианах, выраженный через абсолютный

угол γ и число зубцов ротора z_r . Угол γ_e можно рассматривать и как относительное время, учитывая, что $\gamma_e = \omega_e t$, где $\omega_e = z_r \frac{\pi n}{30}$ – угловая электрическая частота; n – частота вращения в об/мин, t – время.

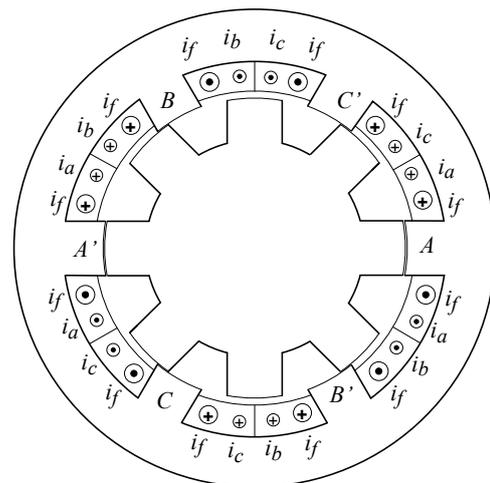


Рис. 1. Электромагнитная система ВИГ

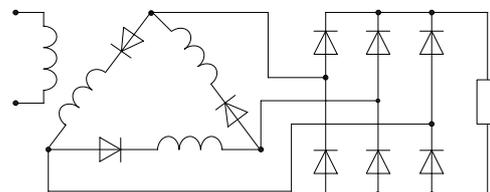


Рис. 2. Электрическая схема ВИГ

Жирной обводной линией по верхним волнам ЭДС показан возможный характер изменения напряжения на нагрузке генератора.

Математическое моделирование ВИГ рассматриваемого типа встречает трудности, связанные со сложной магнитной системой и наличием полупроводниковых элементов в фазах генератора, а также работой генератора на выпрямительную нагрузку активного характера или нагрузку с противо-ЭДС.

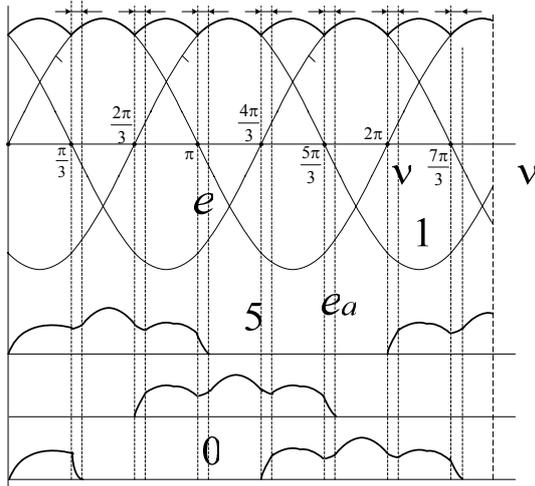


Рис. 3. Гипотетический идеализированный характер изменения ЭДС и токов в фазных обмотках ВИГ

В реальных условиях работы генератора ЭДС фаз оказываются несинусоидальными за счет влияния переменной составляющей тока обмотки возбуждения. В этом случае коммутация фаз начинается не в опорных точках синусоиды, а со сдвигом на некоторый угол β , при котором ЭДС фазы становится равной нулю и далее меняет свой знак (направление). Тогда физические процессы в генераторе можно представить шестью циклами, которые начинают повторяться с периодом 2π , но только после завершения первой серии циклов в интервале $0 \div 2\pi + \beta + \nu$, где ν – угол коммутации вентилях. Отличие первой серии возникает из-за нулевых начальных условий, впоследствии же эти условия наследуются из предыдущих циклов.

Работающие фрагменты полной схемы (рис. 2) для первых двух циклов включающих в себя рабочий режим и режим коммутации вентилях, показаны на рис. 4. На интервале $\gamma_e = 0 \div \pi/3 + \beta$ работают фазы a и c при включенных вентилях моста $V4$ и $V5$ (рис. 4,а). В момент $\gamma_e = \pi/3 + \beta$, когда ЭДС e_c меняет знак, начинается процесс коммутации: вентиль $V5$ отключается и включается вентиль $V1$ (рис. 4,б).

В момент времени $\gamma_e = \pi/3 + \beta + \nu$ ток в фазе c равен нулю и вентиль $V5$ закрывается, начинается второй цикл длительностью $\gamma_e = \pi/3 + \beta + \nu \div 2\pi/3 + \beta$, при котором работает фаза a (рис. 4,в). При $\gamma_e = 2\pi/3 + \beta$, когда ЭДС e_b меняет знак, начинается новый процесс коммутации, в результате которой вентиль $V4$ отключается и включается вентиль $V6$, присоединяя фазу b к нагрузке (рис. 4,г). Коммутация заканчивается в момент равенства токов в фазах a и b . В дальнейшем в интервале $\gamma_e = 2\pi/3 + \beta + \nu \div \pi + \beta$ работают фазы a и b , соединенные последовательно. Физические процессы в генераторе в последующие моменты времени могут быть охарактеризованы такими же циклами, но с изменением чередования фаз, что вытекает из диаграммы рис. 3.

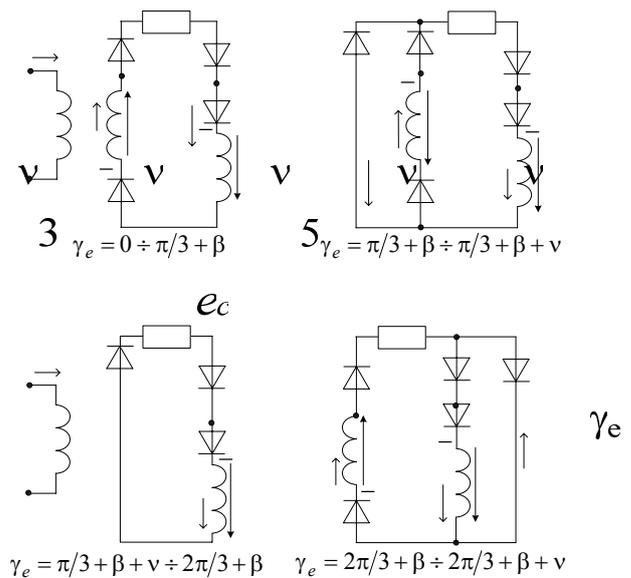


Рис. 4. Схемы двух циклов работы генератора

Электромагнитные процессы в фазах генератора описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$-u_\varphi = r i_\varphi + \frac{d\psi_\varphi}{dt}, \quad (1)$$

где $\varphi = a, b, c$ – индексы фаз; $u_\varphi, i_\varphi, \psi_\varphi, r$ – напряжение; ток; полное магнитное потокосцепление и активное сопротивление фазной обмотки.

Эта система дополняется уравнением для обмотки возбуждения:

$$u_f = r_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt}, \quad (2)$$

где обозначения величин и структура уравнения аналогичны предыдущему, но имеют свой индекс f .

Входящие в систему уравнений полные магнитные потокосцепления обмоток генератора включают в себя собственные потокосцепления и потокосцепления взаимной связи между обмотками:

$$\begin{aligned} \psi_a &= l_a i_a + m_{ab} i_b + m_{ac} i_c + m_{af} i_f; \\ \psi_b &= l_b i_b + m_{ba} i_a + m_{bc} i_c + m_{bf} i_f; \\ \psi_c &= l_c i_c + m_{ca} i_a + m_{cb} i_b + m_{cf} i_f; \\ \psi_f &= l_f i_f + m_{fa} i_a + m_{fb} i_b + m_{fc} i_c. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь l и m – коэффициенты собственных и взаимных индуктивностей, а система индексов соответствует уже принятому в выражениях (1) и (2).

Изменения собственных индуктивностей обмоток l и индуктивностей взаимной связи m носит сложный характер в зависимости от углового положения ротора. Наиболее достоверно расчетным путем это можно установить посредством численно-полевого подхода [3]. Соответствующие расчеты были проведены методом конечных элементов на основе программного пакета FEMM [4].

Для получения собственной и взаимных индуктивностей обмотки возбуждения достаточно было проводить расчеты ее магнитного поля, для аналогич-

ных параметров фазных обмоток – поля одной из них, причем все при достаточном множестве угловых положений ротора. Отметим, что магнитная система расчетного варианта генератора в магнитном отношении оказалась слабо насыщенной. Поэтому принятые в (3) линейные зависимости величин являются оправданными, как и оперирование далее со статическими индуктивными параметрами обмоток.

Примеры картин магнитного поля в конкретных положениях ротора (γ – абсолютный угол его поворота), создаваемого обмоткой возбуждения и фазной обмоткой a , представлены на рис. 5 и рис. 6, соответственно (A_{\max} – максимальное значение векторного магнитного потенциала в области расчета [3]).

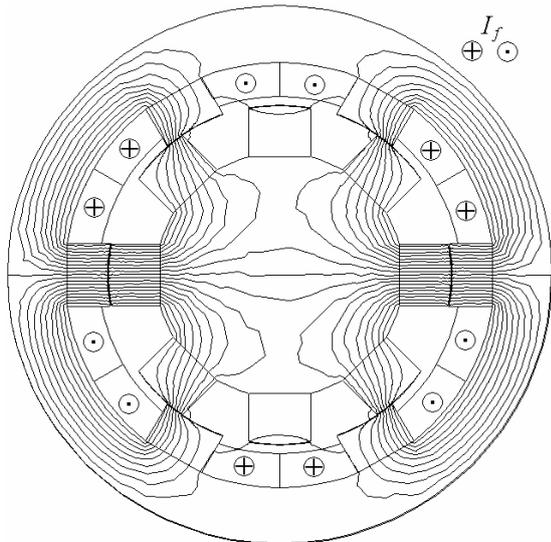


Рис. 5. Картина магнитного поля обмотки возбуждения при $\gamma = 0$ и $I_f = 6$ А ($A_{\max} = 0,008857$ Вб/м)

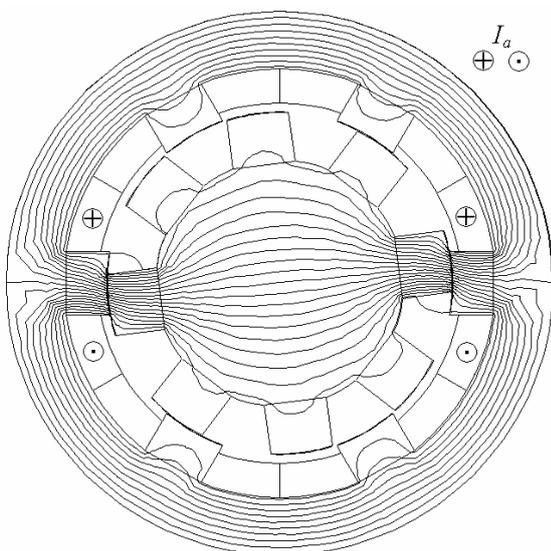


Рис. 6. Картина магнитного поля фазной обмотки якоря при токе фазы $I_a = 4$ А и $\gamma = 7,5^\circ$ ($A_{\max} = 0,004471$ Вб/м)

Полученные угловые зависимости индуктивных параметров обмотки возбуждения представлены на рис. 7. Полный период изменения взаимных индуктивностей m_{fa} , m_{fb} и m_{fc} составляет 45° , а фазовый сдвиг – 15° . Для собственной индуктивности обмотки

возбуждения l_f период оказывается в три раза меньше и составляет 15° . Графическая структура угловых зависимостей собственных индуктивностей фазных обмоток l_a , l_b и l_c аналогична структуре зависимостей m_{fa} , m_{fb} и m_{fc} , но, естественно, с несколько иными числовыми значениями.

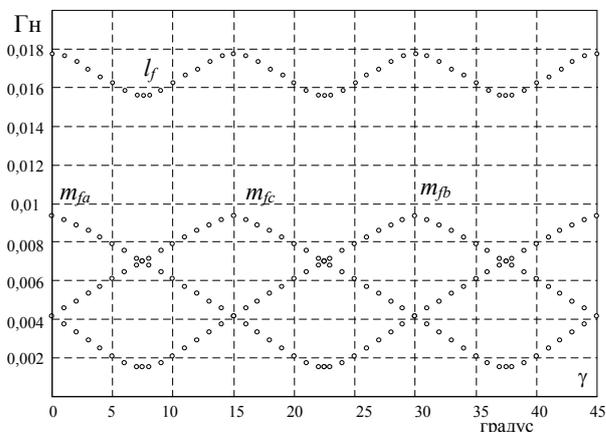


Рис. 7. Изменение индуктивных параметров обмотки возбуждения при повороте ротора и ее токе $I_f = 4$ А

На основе гармонического анализа угловых зависимостей индуктивных параметров обмоток можно с достаточно высокой степенью точности считать, что каждая из зависимостей состоит из постоянной и гармонической составляющих. Учитывая зубчатое строение магнитной системы статора и ротора (числа зубцов $z_s = 6$, $z_r = 8$) и принимая за начало отсчета углового положения ротора совпадение осей зубцов статора и ротора (как на рис. 1), можно получить законы изменения индуктивных параметров обмоток генератора.

Собственные индуктивности фазных обмоток:

$$\begin{aligned} l_a &= l_0 + l_m \cos \gamma_e; \quad l_b = l_0 + l_m \cos(\gamma_e - 2\pi/3); \\ l_c &= l_0 + l_m \cos(\gamma_e + 2\pi/3), \end{aligned} \quad (4)$$

где $l_0 = 0,5(l_{a\max} + l_{a\min})$, $l_m = 0,5(l_{a\max} - l_{a\min})$ – постоянная составляющая и амплитуда колебания индуктивности; $l_{a\max}$, $l_{a\min}$ – ее максимальное и минимальное значения.

Собственная индуктивность обмотки возбуждения может быть представлена следующим образом

$$l_f = l_{f0p} + l_{fmp} \cos 3\gamma_e. \quad (5)$$

Коэффициенты взаимной индуктивной связи между фазными обмотками:

$$\begin{aligned} m_{ab} &= -m_0 - m_m \cos(\gamma_e + \pi/3); \\ m_{bc} &= -m_0 + m_m \cos \gamma_e; \\ m_{ca} &= -m_0 + m_m \cos(\gamma_e - \pi/3). \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициенты взаимной индуктивной связи между фазными обмотками якоря и обмоткой возбуждения:

$$\begin{aligned} m_{af} &= m_{0f} + m_{mf} \cos \gamma_e; \\ m_{bf} &= m_{0f} + m_{mf} \cos(\gamma_e - 2\pi/3); \\ m_{cf} &= m_{0f} + m_{mf} \cos(\gamma_e + 2\pi/3). \end{aligned} \quad (7)$$

Постоянные и переменные составляющие индук-

тивных параметров обмотки в (5), (6) и (7) определяются аналогично составляющим в (4). Численные значения составляющих коэффициентов само- и взаимноиндуктивностей, полученные в соответствии с [3] из расчета магнитного поля генератора для заданной геометрии магнитной системы составили, мГн: $l_{f0p} = 16,66$; $l_{fmp} = 1,08$; $l_0 = 5,22$; $l_m = 3,80$; $m_{0f} = 5,41$; $m_{mf} = 3,92$; $m_0 = 0,102$; $m_m = 0,059$.

Отметим, что реальные функции (6) имеют более сложный характер, но принятое упрощение расчета оправдано, так как численные значения этих величин гораздо меньше, чем остальных индуктивных параметров (4), (5) и (7).

Как было показано, режим работы генератора на выпрямительную нагрузку можно рассматривать как поочередное подключение одной или двух фазных обмоток к нагрузке с учетом коммутационного периода между подключениями (рис. 3 и рис. 4).

Дифференциальные уравнения, описывающие процессы в обмотках ВИГ, получаются на основе базовых выражений (1), (2) и (3) с учетом аппроксимирующих функций (4)-(7).

Электромагнитные процессы в генераторе для интервала времени $\gamma_e = 0 \div \pi/3 + \beta$, когда работают фазы a и c генератора (рис. 4,а), характеризуются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{di_c}{dt} + C_2 \frac{di_f}{dt} &= C_3; \\ C_2 \frac{di_c}{dt} + C_4 \frac{di_f}{dt} &= C_5, \end{aligned} \quad (8)$$

где $C_1 = 2(l_0 - m_0) + l_m \cos(\gamma_e + \pi/3) - 2m_m \cos(\gamma_e - \pi/3)$;
 $C_2 = 2m_{0f} + m_{mf} \cos(\gamma_e + \pi/3)$; $C_4 = l_{fop} + l_{fmp} \cos 3\gamma_e$;
 $C_3 = -(r + R_H)i_a + l_m \omega_e i_c \sin(\gamma_e + \pi/3) -$
 $- 2m_m \omega_e i_c \sin(\gamma_e - \pi/3) + m_{mf} \omega_e i_f \sin(\gamma_e + \pi/3)$;
 $C_5 = U_f - r_f i_f + m_{mf} \omega_e i_c \sin(\gamma_e + \pi/3) + 3l_{fmp} \omega_e i_f \sin 3\gamma_e$.

Система уравнений (8) решается при начальных условиях: $i_c = 0$, $\gamma_e = 0$, $i_f = U_f / r_f$.

Конец рабочего интервала генератора определяется моментом достижения нуля и изменения знака ЭДС фазы c , наводимой обмоткой возбуждения:

$$e_c = -\frac{\partial \Psi_{cf}}{\partial t} = -\frac{\partial (m_{cf} i_f)}{\partial t} = \quad (9)$$

$$m_{mf} \omega_e i_f \sin(\gamma + 2\pi/3) - [m_{of} + m_{mf} \cos(\gamma + 2\pi/3)] \frac{di_f}{dt} \leq 0.$$

Система уравнений для интервала коммутации включает в себя уравнения для контура обмоток якоря $V4-Va$ -фаза $a-V1-R_H$, контура Vc -фаза $c-V5-V1$ и контура обмотки возбуждения (рис.4,б). Система уравнений для интервала коммутации $\gamma_e = \pi/3 + \beta \div \pi/3 + \beta + v$ запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} A_1 \frac{di_a}{dt} + A_2 \frac{di_c}{dt} + A_3 \frac{di_f}{dt} &= L_1; \\ A_2 \frac{di_a}{dt} + A_4 \frac{di_c}{dt} + A_5 \frac{di_f}{dt} &= L_2; \\ A_3 \frac{di_a}{dt} + A_5 \frac{di_c}{dt} + F_f \frac{di_f}{dt} &= L_f, \end{aligned} \quad (10)$$

где $A_1 = l_0 + l_m \cos \gamma_e$; $A_2 = -m_0 + m_m \cos(\gamma_e - \pi/3)$;
 $A_3 = m_{0f} + m_{mf} \cos \gamma_e$; $A_4 = l_0 + l_m \cos(\gamma_e + 2\pi/3)$;
 $L_1 = -(r + R_H)i_a + l_m \omega_e i_a \sin \gamma_e -$
 $- m_m \omega_e i_c \sin(\gamma_e - \pi/3) + m_{mf} \omega_e i_f \sin \gamma_e$;
 $A_5 = m_{0f} + m_{mf} \cos(\gamma_e + 2\pi/3)$; $F_f = l_{fop} + l_{fmp} \cos 3\gamma_e$;
 $L_2 = -r_i c + l_m \omega_e i_c \sin(\gamma_e + 2\pi/3) - m_m \omega_e i_a \sin(\gamma_e - \pi/3) +$
 $+ m_{mf} \omega_e i_f \sin(\gamma_e + 2\pi/3)$;
 $L_f = U_f - r_f i_f + 3l_{fmp} \omega_e i_f \sin 3\gamma_e + m_{mf} \omega_e i_a \sin \gamma_e +$
 $+ m_{mf} \omega_e i_c \sin(\gamma_e + 2\pi/3)$.

Начальными условиями для системы (10) являются конечные значения токов после решения системы (8) на предыдущем интервале. Конец интервала коммутации определяется по выполнению условия $i_c = 0$.

В интервале времени $\gamma_e = \pi/3 + \beta + v \div 2\pi/3 + \beta$ работает фаза a (рис. 4,в) и система уравнений, характеризующая процессы в генераторе, имеет вид:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{di_a}{dt} + C_2 \frac{di_f}{dt} &= C_3; \\ C_2 \frac{di_a}{dt} + C_4 \frac{di_f}{dt} &= C_5, \end{aligned} \quad (11)$$

где $C_1 = l_0 + l_m \cos \gamma_e$; $C_2 = m_{0f} + m_{mf} \cos \gamma_e$;
 $C_3 = -(r + R_H)i_a + l_m \omega_e i_a \sin \gamma_e + m_{mf} \omega_e i_f \sin \gamma_e$;
 $C_4 = l_{fop} + l_{fmp} \cos 3\gamma_e$;
 $C_5 = U_f - r_f i_f + m_{mf} \omega_e i_a \sin \gamma_e + 3l_{fmp} \omega_e i_f \sin 3\gamma_e$.

Система уравнений (11) решается при начальных условиях, взятых из завершения предыдущего коммутационного интервала по системе (10). Конец рабочего интервала $\gamma_e = 2\pi/3 + \beta$, когда ЭДС фазы b доходит до нуля и изменяет свой знак (направление):

$$\begin{aligned} e_b &= -\frac{\partial \Psi_{bf}}{\partial t} = -\frac{\partial (m_{bf} i_f)}{\partial t} = \\ &= m_{mf} \omega_e i_f \sin(\gamma - 2\pi/3) - \\ &- [m_{of} + m_{mf} \cos(\gamma - 2\pi/3)] \frac{di_f}{dt} \geq 0. \end{aligned} \quad (12)$$

В интервале времени $\gamma_e = 2\pi/3 + \beta \div 2\pi/3 + \beta + v$ к нагрузке подключается фаза b (рис. 4,г) и система уравнений для этого промежутка времени имеет вид:

$$\begin{aligned} A_1 \frac{di_a}{dt} + A_2 \frac{di_b}{dt} + A_3 \frac{di_f}{dt} &= L_1; \\ A_2 \frac{di_a}{dt} + A_4 \frac{di_b}{dt} + A_5 \frac{di_f}{dt} &= L_2; \\ A_3 \frac{di_a}{dt} + A_5 \frac{di_b}{dt} + F_f \frac{di_f}{dt} &= L_f, \end{aligned} \quad (13)$$

где $A_1 = l_0 + l_m \cos \gamma_e$; $A_2 = -m_0 - m_m \cos(\gamma_e + \pi/3)$;
 $A_3 = m_{0f} + m_{mf} \cos \gamma_e$; $A_4 = l_0 + l_m \cos(\gamma_e - 2\pi/3)$;
 $L_1 = -(r + R_H)i_a + l_m \omega_e i_a \sin \gamma_e - m_m \omega_e i_b \sin(\gamma_e + \pi/3) +$
 $+ m_{mf} \omega_e i_f \sin \gamma_e$;
 $A_5 = m_{0f} + m_{mf} \cos(\gamma_e - 2\pi/3)$; $F_f = l_{fop} + l_{fmp} \cos 3\gamma_e$;
 $L_2 = -ri_b + l_m \omega_e i_b \sin(\gamma_e - 2\pi/3) - m_m \omega_e i_a \sin(\gamma_e + \pi/3) +$
 $+ m_{mf} \omega_e i_f \sin(\gamma_e - 2\pi/3)$;
 $L_f = U_f - r_f i_f + 3l_{fmp} \omega_e i_f \sin 3\gamma_e + m_{mf} \omega_e i_a \sin \gamma_e +$
 $+ m_{mf} \omega_e i_b \sin(\gamma_e - 2\pi/3)$.

Начальными условиями для системы (13) являются конечные значения токов после решения системы (11) на предыдущем интервале. Конец интервала коммутации определяется по выполнению условия $i_k = 0$, что соответствует $i_a = i_b$.

После окончания коммутации в интервале времени $\gamma_e = 2\pi/3 + \beta + \nu \div \pi + \beta$ работают фазы a и b генератора. Так как циклы работы повторяются, то системы уравнений для последующих циклов могут быть составлены аналогичным образом, используя диаграмму, приведенную на рис. 3.

Конкретные расчеты были проведены на основе взаимосвязанного решения двенадцати систем дифференциальных уравнений. Их интегрирование проводилось численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка по специально разработанной программе на ЭВМ.

В качестве частных иллюстраций на рис. 8 и рис. 9 приведены расчетные функции токов ВИГ при относительно малой нагрузке и номинальной нагрузке. Здесь наряду с токами обмотки возбуждения и фазными токами приведен ток нагрузки i_0 , который дан с обратным знаком ($-i_0$), чтобы не смешивать его график с графиками других токов. Ось времени представлена в относительных единицах с использованием периода повторяемости T , которому на рис. 3 соответствует угол поворота ротора $\gamma_e = 2\pi$.

Из анализа графиков токов можно сделать следующие замечания. Функции токов становятся достаточно быстро повторяющимися после прохождения исходного цикла, для которого начальные условия были нулевыми. Несмотря на то, что обмотка возбуждения питается от источника постоянного напряжения, ее ток оказывается переменным из-за влияния изменяющихся токов фазных обмоток, где токи изначально являются переменными (в данном случае, как очевидно из рисунков – пульсирующими).

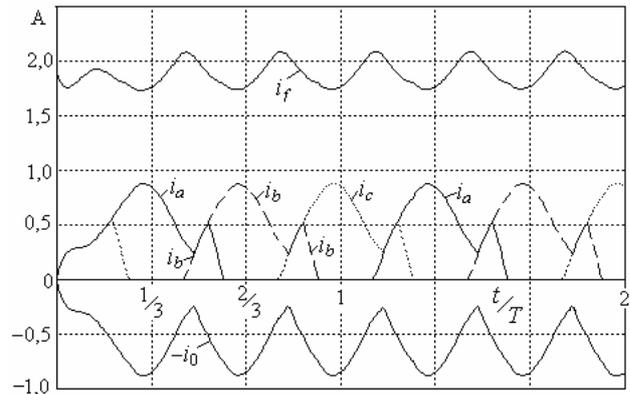


Рис. 8. Функции токов ВИГ при малой нагрузке

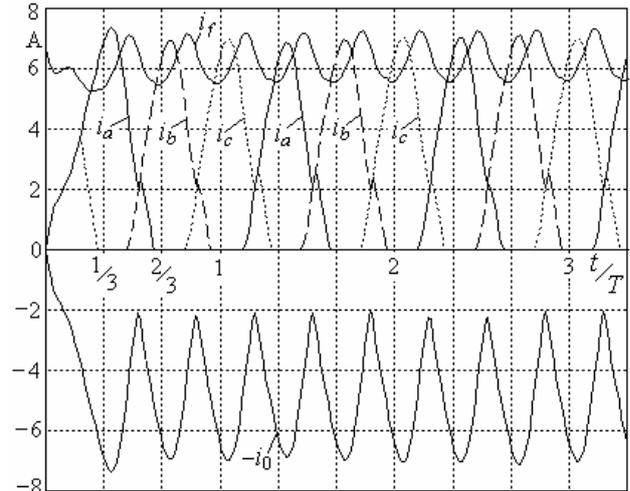


Рис. 9. Функции токов ВИГ при номинальной нагрузке

В итоге можно заключить, что представленный подход к составлению математической модели ВИГ позволяет весьма наглядно представить физику электромагнитных процессов, имеющих место в квазиустановившихся режимах работы генератора на нагрузку активного характера.

Достоверность математической модели подтвердилась тем, что по форме и экстремальному значению представленные на рис. 9 импульсы фазных токов достаточно близко совпадают с осциллограммами, полученными на экспериментальной модели ВИГ, параметры которой упоминались выше.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Луцик В.Д., Гречко М.В. Дослідження індукторного генератора з несиметричною суміщеною обмоткою // Вісник НТУ "ХП". – 2002. - № 4. – С. 49-52.
- [2] Гречко М.В., Дяченко В.В. Шляхи поліпшення питомих показників вентильних індукторних генераторів // Електротехніка і електромеханіка. - 2007. № 4. – С. 9-12.
- [3] Мильх В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Електротехніка і електромеханіка.-2006.-№2. - С. 40-46.
- [4] Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003.

Поступила 01.07.2008

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТОВ С УЧЕТОМ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ И ТЕРМОЭМИССИОННОЙ АКТИВНОСТИ МАТЕРИАЛА

Павленко Т.П., к.т.н, доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические машины"

тел. (057) 707-64-84,

Фізичні процеси на робочій поверхні контакту і усередині всієї композиції роблять істотний вплив на роботу всієї контактної системи. Аналіз взаємодії даних процесів з урахуванням властивостей контактної композиції завжди був актуальним. У даній роботі розглядається питання взаємодії потоків плазми з урахуванням термоемісійної здатності матеріалу контакту.

Физические процессы на рабочей поверхности контакта и внутри всей композиции оказывают существенное влияние на работу всей контактной системы. Анализ взаимодействия данных процессов с учетом свойств контактной композиции всегда являлся актуальным. В данной работе рассматривается вопрос взаимодействия потоков плазмы с учетом термоэмиссионной способности материала контакта.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство исследователей рассматривают электрическую эрозию рабочей поверхности контакта как следствие термического эффекта, возникающего в межконтактном промежутке и на контактах в результате дугового разряда. Однако мало кто учитывает структуру разрядного канала, фазовый состав продуктов эрозии, дискретность и непрерывность процесса, эвакуацию металла с электродов, значение факельного компонента дуги и т.п.

В последнее время при теоретических и экспериментальных исследованиях дуговых катодов преобладает комплексный подход, заключающийся в совместном рассмотрении процессов в прикатодной области, на поверхности и в материале самого катода. К сожалению, во многих работах при теоретическом анализе не учитываются ряд процессов на катоде, которые могут существенно влиять на его работу. К ним следует отнести термоэмиссионную активность материала, химическое взаимодействие элементов с плазмообразующим газом, испарение, конденсация, поглощение и выделение газов, выход активирующих присадок, рекристаллизация, кристаллизация [1]

Кроме того, подвод энергии к эмитирующей поверхности катода может осуществляться за счет ионной бомбардировки, потока "обратных" электронов, излучения из плазмы, джоулева тепловыделения и нагрева от внешнего источника. Отвод энергии происходит, в основном, за счет эмиссионного охлаждения, теплопроводности, теплового излучения.

На основании общего подхода к исследованию катодных процессов с учетом ряда допущений можно найти распределение параметров по длине прикатодной зоны, ее размер, катодное падение потенциала, температурное поле катода и т.п.

Таким образом, катодные процессы представляют собой взаимосвязанную замкнутую систему явлений, протекающих в прикатодной области, на поверхности и в теле самого катода.

Целью данной работы является анализ взаимодействия физических процессов на рабочей поверхности контакта (катода) при возникновении потоков плазмы и термоэмиссионной активности материала.

АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Процессы нагрева контактов происходят весьма неравномерно, что приводит к образованию катодных пятен различного типа. Быстрый нагрев катодного пятна приводит к значительным термоупругим напряжениям. Они вызывают взрывное разрушение рабочей поверхности контактов. Продукты этого разрушения уносятся потоками плазмы.

На поверхности контактов, содержащих компоненты с различными температурами кипения, потоки плазмы исходят из зерен тугоплавкого материала и стабилизируются парами легкоплавкого компонента (рис. 1).

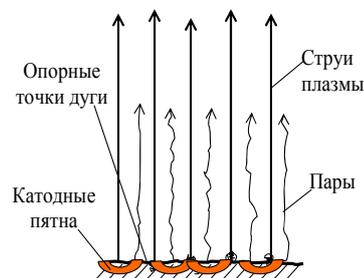


Рис. 1. Схема процессов, происходящих на поверхности электрических контактов

В зависимости от того, какую работу выхода будут иметь компоненты материала и будет зависеть движение дуги по рабочей поверхности.

С учетом различных факторов, влияющих на процесс движения электрической дуги можно решать ряд сложных и важных задач:

- оценка размеров основания электрической дуги на контактах;
- зависимость определяющих факторов износа поверхности контакта;
- закон изменения температуры основания дуги при охлаждении;
- влияние на процесс охлаждения оснований дуги остаточного столба дуги, имеющего высокую температуру и т.п.

К сожалению, в виду сложности данного явления и кратковременного его протекания не всегда удается

исследовать все факторы, хотя результаты испытания контактных материалов подтверждают влияние некоторых из них [1,2].

Исходя из того, что энергия к локальной поверхности электрода подводится из канала разряда, можно составить термодинамический баланс

$$\frac{dW}{dt} - \frac{dQ_{ГО}}{dt} = \frac{dQ_0}{dt}, \quad (1)$$

где $\frac{dW}{dt}$ – изменение поверхностной энергии электрода при разряде;

$\frac{dQ_{ГО}}{dt}$ – теплоотдача за счет теплопроводности и излучения;

$\frac{dQ_0}{dt}$ – количество тепла, расходуемого в единицу времени на испарение некоторого объема металла.

Состояние, описываемое уравнением (1) соответствует термодинамическому равновесию, имеющему место при дуговом разряде, когда происходит испарение вещества с рабочей поверхности контакта.

Нагреваемый объем становится частью монолитного тела. Это приводит к метастабильному состоянию перегретого металла, которое при малейшем изменении взрывообразно испаряется. Инициированием такого элементарного взрыва могут служить как флуктуации плотности пара, так и колебания давлений в канале дуги.

В момент взрывного испарения металла образуется лунка на поверхности контакта. Бомбардировка лунки заряженными частицами прекращается, и канал дуги перескакивает на соседнюю область, где в новом объеме снова начинается процесс накопления внутренней энергии и при некотором критическом ее значении происходит следующий взрыв и т.д. В дальнейшем все эти лунки могут сливаться в одну, которая представляет собой интегральный эффект всего разряда.

Таким образом, можно сказать, что эмиссия паровой фазы вещества контакта путем последовательных взрывов элементарных объемов перегретого жидкого металла носит дискретный характер. Следующие при взрыве с каждого контакта друг за другом с большой частотой сгустки металла в квазипаровой фазе, удаляясь от электрода, расширяются, образуя струи и факелы паров.

Для вычисления массы паровой фазы, эмитированной при элементарном взрыве, необходимо знать толщину перегретого слоя, находящегося перед взрывом в метастабильном состоянии.

Исходя из того, что дуга создает на поверхности контакта плоский круглый источник тепла площадью ΔS и, полагая поток тепла с этой площади нормальным с учетом отсутствия потоков тепла через боковую поверхность, получим в теле контакта цилиндрический объем с изотермами температур: T_k – перегретый слой поверхности (1); $T_{пк}$ – жидкая фаза пятна (2); $T_{пл}$ – плавление твердой фазы (3), (рис. 2).

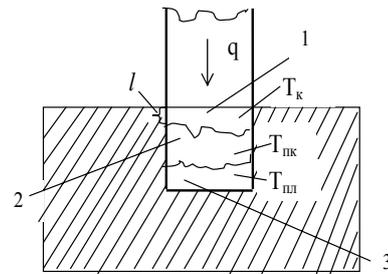


Рис. 2. Сечение цилиндрического объема: 1 – перегретый слой; 2 – жидкая фаза; 3 – твердая фаза

Зная длину l перегретого слоя и его площадь ΔS , можно рассчитать величину перегретого объема ΔV , взрывообразно превращающегося в пар при элементарном взрыве и соответствующую ему массу Δm :

$$l = \frac{\lambda}{q} (T_k - T_{пк}), \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала; \bar{q} – эффективное значение теплового потока

$$\Delta V = \Delta S l = \pi r_0^2 \frac{\lambda}{q} (T_k - T_{пк}), \quad (3)$$

где r_0 – радиус перегретого слоя поверхности;

$$\Delta m = \pi r_0^2 \frac{\lambda}{q} (T_k - T_{пк}), \quad (4)$$

При испарении массы материала расходовалось тепло:

$$\Delta Q = \Delta m Q_0, \quad (5)$$

где Q_0 – количество тепла, необходимое для нагревания единицы массы вещества до максимальной температуры перегрева с учетом теплоты фазовых превращений.

Но это же тепло, поступившее в объем ΔV , также можно определить как:

$$\Delta Q = \bar{q} \Delta S \Delta t, \quad (6)$$

где Δt – время, необходимое для взрывообразного испарения массы материала, которое определяется как:

$$\Delta t = \lambda j \frac{T_k - T_{пк}}{q^2} Q_0, \quad (7)$$

где j – плотность тока.

Зная продолжительность разряда τ можно рассчитать число элементарных взрывов за время разряда:

$$n = \frac{\tau}{\Delta t} = \frac{\bar{q}^2}{\lambda j Q_0 (T_k - T_{пк})}. \quad (8)$$

В механизме электрической эрозии контактных пар, периодически коммутирующих электрическую цепь, немалую роль играет внутренний источник тепла. Уравнение теплового баланса для замкнутых контактных пар может быть записано в следующем виде:

$$j^2 \rho dV = c j \frac{dT}{dt} + k_T (T - T_0) dS, \quad (9)$$

где ρ – удельное сопротивление материала контакта; c – теплоемкость материала; k_T – коэффициент тепло-

отдачи; T , T_0 – соответственно температура катода (контакта) и окружающей среды.

Левая часть представляет собой интенсивность выделения ленц-джоулева тепла в элементарном объеме dV , прилегающем к контактной области; первое выражение правой части – интенсивность накопления теплоты, второе – интенсивность теплоотдачи.

Рост температуры $dT/dt > 0$ приводит к плавлению и взрывообразному испарению элементарных объемов dV материала контактов. В этот момент контакты отбрасываются, возникает дуговой разряд с вышеуказанными последствиями.

Если значение левой части превышает значение правой, то взрыв может не произойти. В этом случае металл в контактных точках только плавится, что способствует развитию мостиковой эрозии с переносом материала с одного контакта на другой.

Для оценки баланса энергии необходимо значение условий на поверхности привязки разряда и в зоне пространственного заряда, которые зависят от многих факторов: плазмообразующих потоков материала, геометрии и условий охлаждения катода, уровня тока, термоэмиссионной способности материала, рода давления газа и др. [3]

Оценка баланса энергии, на поверхности катода исходя из параметров теплопроводности, термоэмиссии и излучения представляет собой:

$$q_3 + q_e^k + q_\lambda = q_i + q_e^{\text{обр}} + q_R^{\text{пл}} + q_a, \quad (10)$$

где q_3 – энергия, уносимая электронами эмиссии, которая зависит от плотности тока электронов при эмиссионном охлаждении; q_e^k – энергия теплового излучения с поверхности катода, которая зависит от рода материала, состояния поверхности, уровня температуры; q_λ – энергия, отводимая за счет теплопроводности в тело катода; q_i – энергия, приносимая ионами, которая зависит от плотности тока, потенциала ионизации, эффективной работы выхода электронов; $q_e^{\text{обр}}$ – энергия, приносимая обратными электронами, которая зависит от плотности тока обратных электронов, температуры электронов на границе катодного падения потенциалов, концентрации электронов, тепловой скорости электронов, массы электронов; $q_R^{\text{пл}}$ – подвод энергии за счет излучения плазмы, который зависит от объемного коэффициента изотропного излучения плазмы, от рода, давления, температуры плазмы, длины и радиуса столба дуги.

Данное выражение может быть дополнено уравнениями для полного тока, тока термоэмиссии обратных электронов, Маккоуна:

$$j = j_e^{\text{эм}} + j_i - j_e^{\text{обр}};$$

$$j_e^{\text{эм}} = A_0 T^2 \exp \left[-\frac{e(\phi_{\text{эф}} - \sqrt{eE_k})}{kT} \right];$$

$$E_k^2 = 7,6 \cdot 10^5 U_k^2 \left\{ j_i \left(\frac{m_i}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} - j_e^{\text{эм}} \right\}, \quad (10)$$

где j_i , $j_e^{\text{эм}}$ – плотности токов ионов, электронов; $j_e^{\text{обр}}$ – плотности токов обратных электронов; A_0 – универсальная постоянная для всех металлов; $\phi_{\text{эф}}$ – эффективная работа выхода электронов; E_k – напряженность электрического поля у гладкой поверхности катода; k – постоянная Больцмана; U_k – катодное падение потенциала; m_i , m_e – масса ионов, электронов.

Обзор работ [4, 5] показывает, что электроны под действием высокой температуры пара занимают состояние выше уровня Ферми, с которых затем осуществляется термоэлектронная эмиссия. Мощное джоулево тепловыделение обуславливает взрывное испарение микроострия, после которого наблюдается резкое усиление тока. При этом число электронов, переносимых в импульсе в 10-1000 раз превышает число атомов в плазменном ступке, что вызвано дальнейшим усилением электрического поля под влиянием образующейся плазмы. Прикатодная плазма не только не идеальна, но и существенно не равновесна.

ВЫВОД

Из данного анализа взаимодействия физических процессов видно, что существенную роль играет взрывообразное испарение металла с контактной поверхности. Уменьшение эрозии можно достичь путем подбора контактного материала с большим значением полной теплоты испарения, коэффициентов теплопроводности, теплоотдачи и малой величиной удельного сопротивления. Но также необходимо учитывать движение плазменных потоков, которые могут изменять форму столба дуги с учетом термоэмиссионной активности частиц за счет увеличения поверхностной энергии, уменьшения давлений газа и металлического пара в межэлектродном промежутке.

Полученные оценочные расчеты позволяют определить параметры катодных процессов, которые влияют на скорость и время существования электрической дуги, что способствует динамике развития катодных пятен различного типа, которые и определяют эрозию контактной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Крыгина Т.П., Павленко Ю.П. Электрические контакты высокой эрозионной стойкости., Сб. научн. тр. "Низковольтные аппараты защиты и управления", -Харьков, ВНИИЭА, 1993. - С. 230-235.
- [2] Куляпин В.М., Галкин Н.И., Рыбаков О.Е., Печенкин А.И. Теория катодных процессов дугового разряда. - Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1978, № 1.- С. 82-85.
- [3] Гордеев В.Ф., Пустогаров А.В., Кучеров Я.Р. и др. Структура поверхности и работа выхода электронов дуговых электродов // Поверхность, 1985, № 11. - С. 74-78.
- [4] Мойжес Б.Я., Пикус Г.Е. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма. - М.: Наука, 1973.- 479 с.
- [5] Энгельшт В.С. Математическое моделирование электрической дуги.- Фрунзе: Илим, 1983 – 361 с.

Поступила 25.04.2008

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАСКАДНОГО МНОГОУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Шавѐлкин А.А., к.т.н., доц.,
Донецкий национальный технический университет
Украина, 83000, Донецк, ул. Артема 58, ДонНТУ, кафедра "Электротехника"
тел.(062) 304-90-28, E-mail: sha@dgtu.donetsk.ua

Досліджується можливість забезпечення високої якості вихідної напруги і вхідного струму каскадних багаторівневих перетворювачів частоти при мінімумі витрат на комутацію ключів інверторного блоку. Запропоновано вибіркове формування напруги інверторів при мінімумі комутацій ключів та зсуві за основною гармонікою напруг інверторів у фазі перетворювача.

Исследуется возможность обеспечения высокого качества выходного напряжения и входного тока каскадных многоуровневых преобразователей частоты при минимуме потерь на коммутацию ключей инверторного блока. Предложено избирательное формирование напряжения инверторов при минимуме коммутаций ключей и сдвиге по основной гармонике напряжений инверторов в фазе преобразователя.

В последних публикациях совершенствование каскадных многоуровневых преобразователей частоты (МПЧ) обычно связывается с улучшением качества выходного напряжения при снижении потерь в инверторном блоке. Единственный путь снижения потерь в силовых цепях – уменьшение количества переключений ключей. Это достигается при использовании многоуровневой и векторной ШИМ [1], при избирательном управлении с подавлением гармоник [2] и т.п. Большинство алгоритмов можно отнести к амплитудным, когда каждый уровень выходного напряжения фазы МПЧ формируется определенным АИН.

Серьезной проблемой является обеспечение качества входного тока при подавлении высших гармоник. Вопрос усложняется наличием во входном токе выпрямителей субгармоник с частотами кратными выходной частоте, что, как показано в [3] обусловлено использованием однофазных АИН. Эффективное их подавление предполагает определенную структуру звена постоянного тока при использовании многофазных схем выпрямления. Отсутствуют методики расчета гармоник тока с учетом распределения нагрузки в процессе регулирования выходного напряжения.

В выпускаемых серийно преобразователях используется мультиплексорная ШИМ (МШИМ) [1], когда выходное напряжение фазы МПЧ формируется как сумма импульсов напряжений отдельных АИН, сдвинутых по несущей частоте. При этом наряду с основной гармоникой суммируются и высшие (5я, 7я и т.д.), доля их при глубоком регулировании растет. Для эффективного подавления гармоник низкого порядка несущая частота должна быть достаточно высокой. Этим обеспечивается высокое качество выходного напряжения и, за счет симметрии нагрузки, входного тока. Существенный недостаток МШИМ – значительные потери на переключение ключей даже при минимальной несущей частоте 600 Гц.

Уход от "классического" принципа МШИМ к новым принципам управления осуществляется без учета влияния на распределение нагрузки элементов схемы МПЧ и процесс формирования входного тока, что ставит под вопросом целесообразность их применения и эффективность.

Цель работы: исследование возможностей улучшения характеристик каскадного МПЧ в плане снижения потерь в схеме при обеспечении высокого качества выходного напряжения и входного тока.

При этом следует решить следующие задачи:

- выполнить исследование принципов формирования выходного напряжения с учетом количества переключений ключей и загрузки элементов силовой цепи;
- исследовать принципы обеспечения эффективного подавления гармоник входного тока МПЧ;
- обосновать принцип управления, обеспечивающий высокое качество выходного напряжения и входного тока при снижении потерь на переключение ключей

Результаты работы. Фаза каскадного МПЧ состоит из n последовательно соединенных однофазных автономных инверторов напряжения (АИН) с изолированными источниками постоянного тока. Рассмотрим амплитудное регулирование с использованием многоуровневой синусоидальной ШИМ, когда среднее значение выходного напряжения фазы МПЧ на интервале модуляции изменяется по синусоидальному закону. Известно, что активная мощность, передаваемая АИН в нагрузку, определяется первыми гармониками его выходного напряжения $U_{(1)}$ и тока $I_{(1)}$. Таким образом, загрузка в процессе регулирования выходного напряжения МПЧ при постоянном выходном токе однозначно определяется $U_{(1)}$. Относительное значение амплитуды первой гармоники для АИН с номерами $i=1...n$, формирующими соответствующие уровни напряжения (рис. 1) при амплитудном регулировании:

$$U_{mi(1)} = \frac{4}{\pi} \left[\frac{\mu}{2} (\theta_i - \theta_{i-1}) - \frac{1}{2} (\sin 2\theta_i - \sin 2\theta_{i-1}) + \frac{1}{n} (i \cos \theta_i - (i-1) \cos \theta_{i-1}) \right],$$

при $\frac{i-1}{n} < \mu$

при $\frac{n-1}{n} < \mu < 1$

$$U_{mn(1)} = \frac{4}{\pi} \left[\frac{\mu}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{n-1} + \frac{1}{2} \sin 2\theta_{n-1} \right) - \frac{n-1}{n} \cos \theta_{n-1} \right],$$

где: $\theta_i = \sin^{-1} \left[\frac{i}{n\mu} \right]$, μ - коэффициент модуляции результирующего выходного напряжения фазы МПЧ

(относительное значение его первой гармоники к максимальному значению).

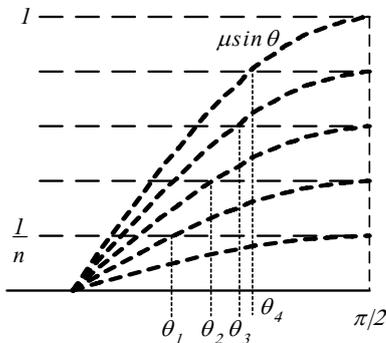


Рис. 1. Определение загрузки АИН

Зависимости на рис. 2 при $n=6$ демонстрируют, что в процессе регулирования нагрузка отдельных АИН существенно различается (при равномерном распределении она не превышает $U_{mi(1)}=1/n=0.167$). Используемое далее значение $U_{(1)}^*=U_{mi(1)}n$.

Рассмотрим влияние загрузки АИН и соответствующих выпрямителей на гармонический состав входного тока МПЧ. Если пренебречь потерями мощности в АИН, получаем равенство мощностей на входе P_d (потребляемой от выпрямителя) и выходе P_H :

$$P_d = U_d I_d = P_H = U_{(1)} I_{(1)} \cos \varphi,$$

где: $U_{(1)}$, $I_{(1)}$ - действующие значения первых гармоник выходного напряжения и тока АИН, U_d , I_d - напряжение и ток на входе АИН.

В соответствии с методикой [4] для расчета используем базисные величины, тогда:

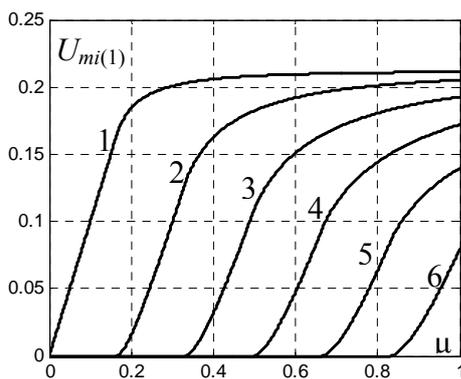


Рис. 2. загрузка АИН при амплитудном регулировании

$$I_d = I_d^* \frac{E_m}{X}, U_d = u_d \sqrt{3} E_m, U_{(1)} = U_{(1)}^* E_m u_d \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}},$$

где: $U_{(1)}^*$ - относительное значение первой гармоники АИН, X - индуктивное сопротивление входной фазы выпрямителя, E_m - амплитуда ЭДС вторичной обмотки трансформатора.

$$\text{Тогда } P_d = I_d^* \frac{E_m^2 u_d \sqrt{3}}{X} = \frac{\sqrt{3} U_{(1)}^* E_m u_d I_{(1)}}{\sqrt{2}} \cos \varphi.$$

$$\text{Отсюда } I_d^* = \frac{X U_{(1)}^* I_{(1)}}{\sqrt{2} E_m} \cos \varphi = U_{(1)}^* I_{dH}^*,$$

где $I_{dH}^* = \frac{X I_{(1)}}{\sqrt{2} E_m} \cos \varphi$ - базисное значение входного тока при $U_{(1)}^*=1$.

Таким образом, каждому значению загрузки $U_{(1)}^*$ АИН можно привести в соответствие значение I_d^* и u_d . В соответствии с [4]:

при $u_d < 0.95$

$$I_d^* = 4.38 \cdot (u_d)^3 - 10.3 \cdot (u_d)^2 + 7.02 \cdot u_d - 1.10,$$

при $u_d \geq 0.95$

$$I_d^* = 0.736 \cdot (u_d)^3 - 2.21 \cdot u_d + 1.47.$$

В соответствии с зависимостями, приведенными на рис. 3, для каждого u_d можно определить значения гармоник входного тока $I_{1(1)}^*$, $I_{1(k)}^*$.

Входной ток фазы трехфазной мостовой схемы выпрямителя:

$$i(\omega t) = \sum_{l=0}^{\infty} I_{m(k)} \cos(k\omega t + \psi_k),$$

где: при $k=6l-1$ $\psi_k = +\pi/6$, при $k=6l+1$ $\psi_k = -\pi/6$.

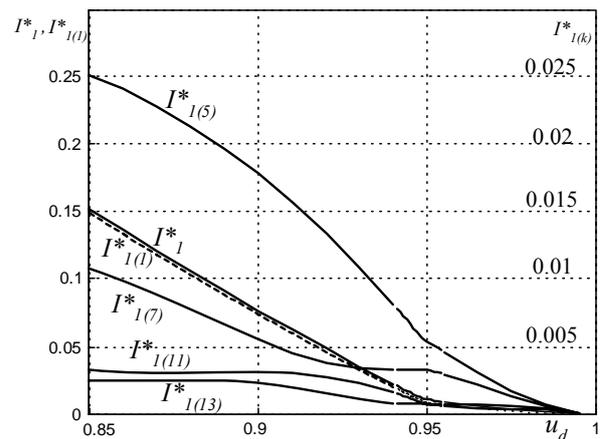


Рис. 3. Универсальные зависимости для гармоник входного тока трехфазного выпрямителя

В звене постоянного тока МПЧ для подавления высших гармоник входного тока используются многофазные (12ти-, 18ти- и т.д.) схемы выпрямления. Рассмотрим влияние загрузки выпрямителей на эффективность подавления гармоник.

Входной ток 12ти- фазной схемы выпрямления (вторичные обмотки трансформатора соединены по схемам "звезда" и "треугольник" с количеством витков w_1 и $w_2 = \sqrt{3}w_1$, при количестве витков первичной обмотки w коэффициент трансформации $n = w/w_1$):

$$i_{1A} = n \left(\sum_{l=0}^{\infty} (I_{m1(k)} + (-1)^l I_{m2(k)}) \cos(k\omega t + \psi_k) \right) = n \sqrt{2} \frac{E_m}{X} \left[\sum_{l=0}^{\infty} (I_{1(k)}^* + (-1)^l I_{2(k)}^*) \cos(k\omega t + \psi_k) \right],$$

где: $k = 6l \pm 1$ - порядок гармоник, индексы 1, 2 относятся к токам первого и второго выпрямителей.

Таким образом, амплитуды гармоник тока зависят от загрузки АИН и полное подавление гармоник с кратностями 5,7,17,19 (l – нечетное число) достигается только при идентичной загрузке АИН. В силу этого данное решение при амплитудном регулировании не целесообразно.

18ти - фазная схема выпрямления включает в себя 3 выпрямителя, которые питаются от трех комплектов обмоток [1] со сдвигом напряжений 20° .

При этом входной ток:

$$i_{1A} = \frac{n\sqrt{2}E_m}{X} \left[\sum_{k=18l \pm 1}^{\infty} (I_{1(k)}^* + I_{2(k)}^* + I_{3(k)}^*) \cos(k\omega t + \psi_k) + \sum_{k \neq 18l \pm 1}^{\infty} A_k \cos(k\omega t + \psi_k + \varphi_k) \right],$$

$$\text{где: } A_k = \sqrt{(I_{1(k)}^* - 0.5(I_{2(k)}^* + I_{3(k)}^*))^2 + 0.75(I_{2(k)}^* - I_{3(k)}^*)^2},$$

$$\varphi_k = \arctg((-1)^{l+1} \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{(I_{2(k)}^* - I_{3(k)}^*)}{I_{1(k)}^* - 0.5(I_{2(k)}^* + I_{3(k)}^*)}).$$

Эффективное подавление высших гармоник с кратностями 5,7,11,13 возможно только, когда выпрямители питают АИН одного уровня напряжения разных фаз МПЧ при одинаковой загрузке.

Следует отметить еще один фактор – наличие во входном токе выпрямителя, работающего на однофазный мостовой АИН [3] субгармоник с частотой $\omega_c = 2\omega_2 - \omega$ (ω_2, ω – частоты соответственно выходного напряжения МПЧ и сети). Субгармоники обусловлены пульсациями входного напряжения АИН с частотой $2\omega_2$.

При конечном значении емкости конденсатора на выходе выпрямителя подавление субгармоник входного тока только за счет снижения коэффициента пульсаций напряжения K_{Π} не реально. Их компенсация возможна при соответствующей организации звена постоянного тока [3]. Практически полное подавление субгармоник во входном токе МПЧ достигается при междуфазовой их компенсации без сдвига напряжений, когда выпрямители АИН одного уровня в разных фазах МПЧ питаются от вторичных обмоток трансформатора с одинаковой фазой напряжений.

Здесь возникает противоречие между компенсацией высших и субгармонических составляющих входного тока, поскольку компенсация высших гармоник эффективна при междуфазовой компенсации со сдвигом напряжений (18ти- фазная схема). При несимметрии загрузки АИН разных уровней при амплитудном регулировании единственным решением является использование междуфазовой компенсации со сдвигом напряжений для подавления высших гармоник и в некоторой степени субгармоник [3].

Наиболее просто решается проблема при симметрии загрузки АИН и использовании междуфазовой компенсации без сдвига напряжений для субгармоник и внутрифазовой компенсации для высших.

Единственным вариантом управления, при котором обеспечивается идентичная загрузка всех выпря-

мителей, является мультиплексорная ШИМ [1]. При этом все АИН в фазе МПЧ формируют одинаковые по фазе и амплитуде первой гармоники импульсы напряжения, которые сдвинуты по несущей частоте. Напряжение фазы МПЧ равно сумме напряжений АИН. Таким образом, наряду с основной гармоникой суммируются и высшие 5-я и 7-я гармоники. Это означает, что для обеспечения удовлетворительного гармонического состава следует использовать ШИМ с достаточно высокой частотой, что обуславливает значительные потери на переключение ключей АИН и необходимость применения соответствующей системы их охлаждения.

Рассмотрим компромиссный вариант избирательного формирования напряжения АИН со сдвигом по основной гармонике напряжений инверторов в фазе каскадного МПЧ.

Минимальное количество переключений достигается при амплитудном регулировании, когда полуволна выходного напряжения формируется в виде 1 импульса. При этом обеспечивается достаточно неплохой гармонический состав - при относительной длительности импульса 5/6: 5-я гармоника составляет - 5.36%, 7-я - 3.87%, 11-я - 9.09%, 13-я - 7.69%. Из условия симметрии следующим шагом является введение двух дополнительных импульсов (рис. 4), положение которых характеризуется углами $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$. При использовании однополярной модуляции добавляется только одно переключение ключей (на рис. 4 - K_1 и K_2 – коммутационные функции ключей двух плеч АИН).

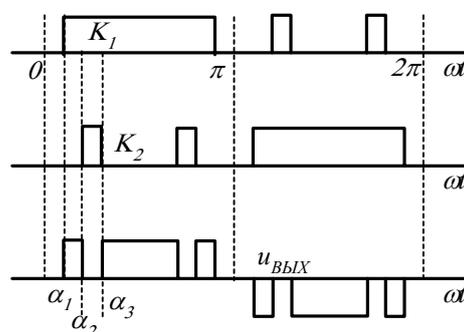


Рис. 4. Коммутационные функции ключей и напряжение АИН

При этом амплитуда k -ой гармоники напряжения:

$$U_{m(k)} = \frac{4}{\pi k} (\cos k\alpha_1 - \cos k\alpha_2 + \cos k\alpha_3),$$

где: $k = 6l \pm 1 (l = 1, 2, 3, \dots)$.

Расчеты подтверждают возможность эффективного подавления 5-ой и 7-ой гармоник практически во всем диапазоне регулирования первой гармоники, для 11-ой и 13-ой только в узком диапазоне регулирования (0.9-1). На рис. 5 приведены значения углов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ при регулировании первой гармоники и поддержании 5ой- и 7ой гармоник ($u_5 = U_{m(5)}/U_{m(1)}, u_7 = U_{m(7)}/U_{m(1)}$) в диапазоне значений $\pm 0.5\%$.

Вариант зависимостей по результатам выборки значений $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ приведен на рис. 6. На рис. 7 приведены относительные значения гармоник при этом.

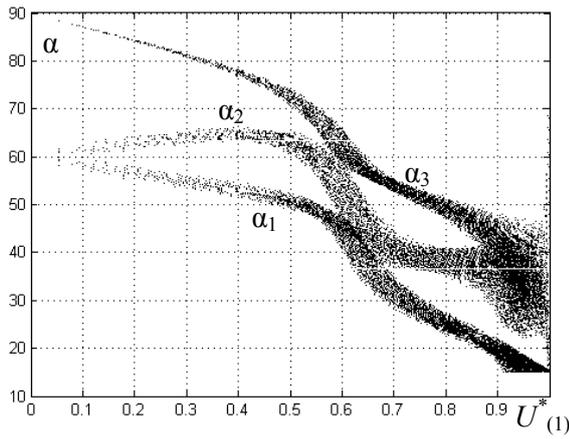


Рис. 5. Диапазон значений $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$

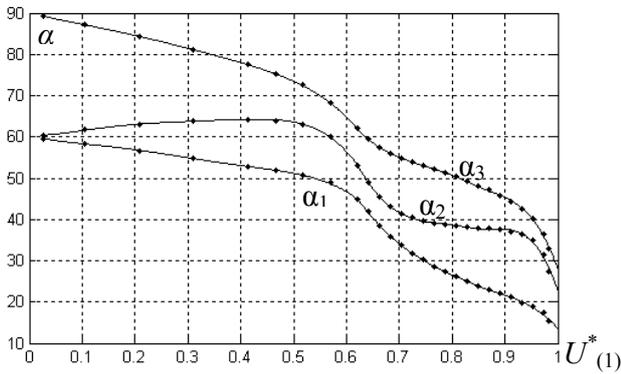


Рис. 6. Зависимости для выбора значений $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$

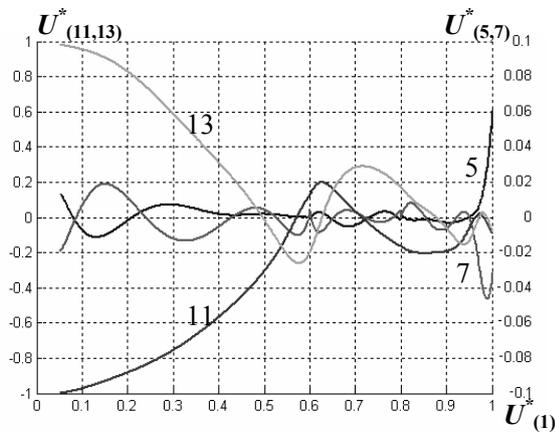


Рис. 7. Гармонический состав напряжения АИН

Для подавления гармоник более высокого порядка (11-ой и выше) целесообразно осуществлять формирование напряжений АИН со сдвигом на угол γ по основной гармонике. Принцип формирования иллюстрирует рис. 8. При этом напряжение i -го из n АИН:

$$u_i = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} [\cos k \alpha_1 - \cos k \alpha_2 + \cos k \alpha_3] \cos k [\theta - (i-1)\gamma],$$

где: $\theta = \omega t$.

Результирующее (суммарное) значение амплитуды k -ой гармоники:

$$U_{Cm(k)} = U_{m(k)} \sum_{i=1}^n (\cos k [\theta - (i-1)\gamma]).$$

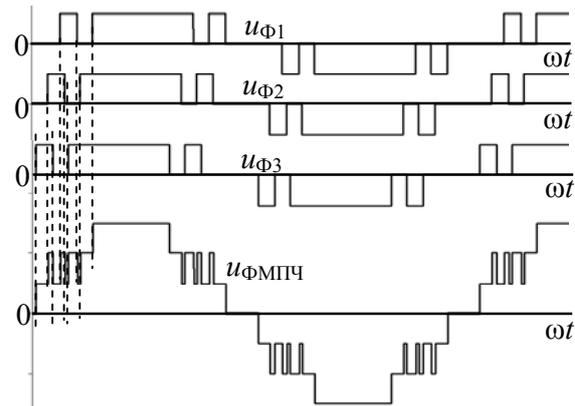


Рис. 8. Формирование напряжения со сдвигом по основной гармонике

Результирующая амплитуда k -ой гармоники при отсутствии сдвига по основной гармонике:

$$U_{Cm(k)}^1 = n U_{m(k)}.$$

Коэффициент ослабления k -ой гармоники:

$$K_{O(k)} = \frac{U_{Cm(k)}^1}{U_{Cm(k)}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (\cos k [\theta - (i-1)\gamma])}.$$

После преобразования получаем:

$$K_{O(k)} = \frac{n}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n \cos(k(i-1)\gamma)]^2 + [\sum_{i=1}^n \sin(k(i-1)\gamma)]^2}}.$$

Зависимость коэффициента ослабления $K_{O(k)}$ от угла γ приведена на рис. 9 при $n=3$ для $k=11, 13, 17, 19$.

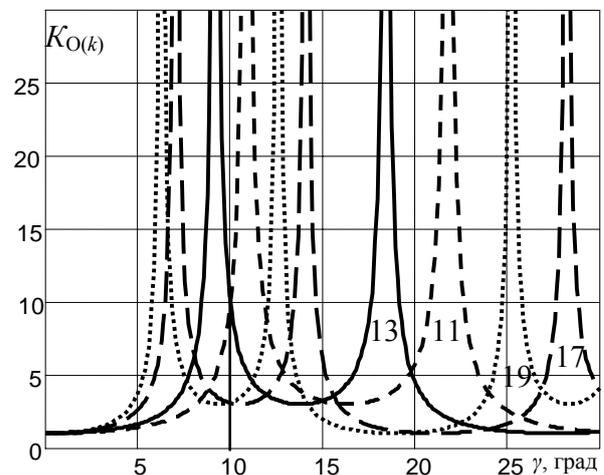


Рис. 9. Зависимость $K_{O(k)}$ от угла γ при $n=3$

Нетрудно заметить, что при определенных γ значение $K_{O(k)} \rightarrow \infty$ и достигается полное подавление k -ой гармоники. Значение соответствующего угла:

$$\gamma_k = \frac{2\pi}{kn} i \quad (i=1, 2, 3, \dots).$$

Очевидно, что следует выбирать промежуточное значение γ из условия одновременного максимального подавления 11-ой 13-ой гармоник. Анализ показывает, что такое условие достигается при $\gamma = \pi/6n$ (на

рис. 9 $\gamma=10^\circ$). Соответствующие значения $K_{O(k)}$ при этом приведены в табл. 1.

Наличие сдвига по основной гармонике обуславливает некоторое снижение основной гармоники – значения $K_{O(1)}$ приведены в табл. 1. Однако это снижение не существенно. При этом следует учитывать, что предельное значение первой гармоники напряжения отдельного АИН при $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\pi/12$ соответствует второму уровню пространственного вектора напряжения и составляет в относительных единицах (при единичной амплитуде $U_m=1$) $U_{m(1)}^* = \frac{4}{\pi} \cos \frac{\pi}{12} = 1.23$, что превышает предельное значение при векторной ШИМ ($U_{m(1)}^*=1.15$).

Таблица 1

Коэффициент ослабления гармоник					
n	2	3	4	5	6
$K_{O(1)}$	1.009	1.010	1.011	1.011	1.011
$K_{O(5)}$	1.260	1.313	1.331	1.34	1.344
$K_{O(7)}$	1.643	1.781	1.832	1.855	1.868
$K_{O(11)}$	7.661	9.495	10.19	10.52	10.704
$K_{O(13)}$	7.661	10.51	11.62	12.158	12.456
$K_{O(17)}$	1.6437	3.094	3.714	4.023	4.196
$K_{O(19)}$	1.261	3.094	3.921	4.341	4.58

Принцип подавления можно объяснить исходя из следующих соображений: 11-я и 13-я гармоники являются боковыми для 12 гармоники. В периоде выходной частоты укладывается 12 периодов гармоники, соответственно, ее период составит $2\pi/12$. Полное подавление гармоники достигается при $n=2$, если гармоники напряжений АИН, которые суммируются будут в противофазе, что соответствует $\gamma=\pi/12$. Для $n=3$ сдвиг $\gamma=\pi/18$ соответствует сдвигу 12-ой гармоники напряжений АИН на треть периода, когда они образуют симметричную трехфазную систему и их сумма равна 0.

Осциллограммы напряжений фазы МПЧ u_ϕ и фазы нагрузки $u_{\phi H}$ при избирательном управлении со сдвигом $\gamma=10^\circ$ при $n=3$ и $\mu=0.8$ приведены на рис. 10.

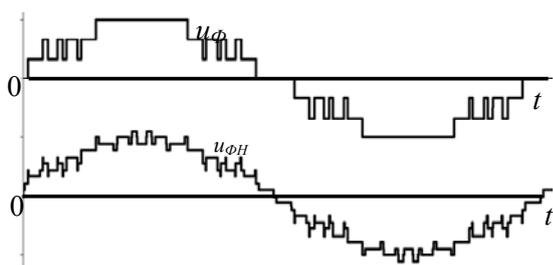


Рис. 10. Осциллограммы напряжений при избирательном управлении со сдвигом $\gamma=10^\circ$ при $n=3$ и $\mu=0,8$

Важным моментом является то, что практически во всем диапазоне регулирования выходного напряжения обеспечивается одинаковая нагрузка АИН. Это способствует подавлению гармоник входного тока МПЧ. Вместе с тем, рассмотренный принцип формирования напряжения отдельного АИН при эффективном подавлении 5-ой и 7-ой гармоник имеет ограниченный диапазон регулирования. Это обусловлено существенным возрастанием доли 11-ой и 13-ой гар-

моник в процессе регулирования (рис. 7). Поэтому чтобы ограничить значение этих гармоник на уровне 5-10% с учетом значения K_O диапазон регулирования первой гармоники напряжения АИН должен не превышать $U_{m(1)}^*=0.2-1$.

Это предполагает особый алгоритм работы и структуру звена постоянного тока с внутрифазовой компенсацией высших гармоник за счет использования многофазных схем выпрямления. Выпрямители АИН в разных фазах МПЧ питаются от обмоток с одинаковым сдвигом по фазе, что обеспечивает полную междуфазовую компенсацию субгармоник.

Рассмотрим вариант для $n=5$. При этом в каждой фазе МПЧ выпрямители 3 АИН образуют 18ти-фазную схему, два других 12ти-фазную. Регулирование осуществляется в двух зонах: при относительном значении результирующего напряжения $\mu \geq 0.4$ используются все 5 АИН в фазе при $U_{m(1)}^* \geq 0.4$, при $\mu < 0.4$ используются только 2 АИН, выпрямители которых образуют 12ти- фазную схему выпрямления при регулировании $U_{m(1)}^* < 1$. Это достигается соответствующей перестройкой канала задания и позволяет осуществить регулирование напряжения при относительно высоком относительном значении $U_{m(1)}^*$ и, соответственно, при наилучшем гармоническом составе выходного напряжения. При той же структуре возможен другой вариант: при $\mu \geq 0.4$ работают все 5 АИН, при $0.4 \geq \mu \geq 0.24$ работают 3 АИН с 18ти- фазной схемой выпрямления в звене постоянного тока, при $0.24 \geq \mu$ работают 2 АИН с 12ти-фазной схемой выпрямления. Таким образом, за счет одинаковой загрузки всех 5 или 3 или 2 АИН в процессе регулирования выходного напряжения обеспечивается эффективное подавление гармоник входного тока.

ВЫВОДЫ

Предложенный принцип избирательного управления со сдвигом напряжений АИН в фазе каскадного МПЧ по основной гармонике позволяет обеспечить высокое качество выходного напряжения и входного тока преобразователя при минимуме коммутаций ключей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Перетворювальна техніка.. Навчальний посібник / О.О. Шавьолкін, О.М. Наливайко. – Краматорськ, ДДМА, 2008.- 326 с.
- [2] Li Li, Dariusz Czarkowski, Yaguang Liu, Pragasen Pillay. Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM Technique in Series-Connected Voltage Inverters. IEEE Transactions on Industrial Applications, VOL. 36, № 1, January/February 2000.
- [3] Шавьолкін А.А. Особенности формирования входного тока каскадного многоуровневого преобразователя частоты//Технічна електродинаміка. Тем. випуск. Силова електроніка і енергоефективність. - Київ, 2007, Ч5 С. 29-32.
- [4] Шавьолкін О.О., Уланов Р.В. Особливості розрахунку характеристик випрямляча при роботі на активно – емнісне навантаження//Наук. праці ДонНТУ. Серія: "Електротехніка і енергетика", випуск 7(128).- Донецьк: ДВНЗ "ДонНТУ", 2007. - С. 85-90.

Поступила 20.06.2008

СТРУКТУРНАЯ ИЗОМЕРИЯ И ЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ГЕНЕТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Шинкаренко В.Ф., д.т.н., проф., Августинович А.А., магистр, Лысак В.В., Вахновецкая М.А.
Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"
Украина, 03056, Киев – 56, пр-т Перемоги, 37, НТУУ "КПИ", корп. 20, кафедра электромеханики
тел./факс (044) 241-76-38; E-mail: ntuukafem @ ua.fm

Дасться визначення структурної ізомерії. Обґрунтовано взаємозв'язок структурної ізомерії з генетичним принципом реплікації електромагнітних хромосом. Розроблено метод синтезу структурних ізомерів на основі послідовного застосування генетичних і геометричних перетворень.

Дано определение структурной изомерии. Обоснована взаємозв'язок структурной изомерии с генетическим принципом репликации электромагнитных хромосом. Разработан метод синтеза структурных изомеров на основе последовательного применения генетических и геометрических преобразований.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие электромеханики как науки, непосредственно связано с созданием и расширением практического использования электромеханических преобразователей энергии. Одна из ключевых задач современной фундаментальной науки заключается в научном объяснении закономерностей прогрессирующего разнообразия объектов электромеханики и выявления источников их структурного разнообразия, знания о которых открывают возможность к систематизации накопленной информации и реализации стратегии предвидения новых классов и разновидностей электромеханических систем (ЭМ-систем).

Указанные проблемы впервые нашли свое теоретическое обобщение в рамках теории генетической эволюции электромеханических систем (ЭМ-систем) [1]. Теоретической основой новой теории явилось открытие периодической системы электромагнитных элементов (первичных источников поля), наделенных генетическими свойствами. В рамках новой теории обоснована взаимосвязь фундаментальных принципов сохранения симметрии, универсального принципа генетического кодирования и свойства структурной периодичности источников электромагнитного поля. Впервые научно доказана генетическая природа Вида ЭМ-системы и разработана теория эволюции Видов ЭМ-систем. Нашли научное объяснение такие системные свойства как изотопия, принцип парности и гомология электромеханических структур.

Развитие новых теорий, связано не только с кардинальным пересмотром существующих представлений в конкретной области знаний, но и с возможностью решения принципиально новых задач, постановка которых ранее была проблематичной, или полностью невозможной.

К таким новым направлениям относится задача научного объяснения свойства изомерии, которое широко проявляется в электромагнитных и электромеханических системах. В данной статье впервые обобщены результаты системного анализа изомерии в электромагнитных структурах и подход к ее моделированию в задачах генетического синте-

за сложных электромеханических структур (ЭМ-структур).

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА СТРУКТУРНОЙ ИЗОМЕРИИ

Как было показано в предыдущих работах [2, 3], структурное разнообразие произвольного Вида ЭМ-систем, на хромосомном уровне, определяется ограниченным набором электромагнитных хромосом, совокупность которых обобщается понятием генома Вида. Методологию генетического синтеза структуры генома определяют генетические принципы структурообразования (скрещивания, репликации, инверсии, кроссинговера и мутации), которые реализует Природа при создании своих сложных систем.

Одним из наиболее продуктивных генетических принципов, является репликация (от лат. *replicatio* – повторение), отвечающая за количественный состав структурных композиций \mathbf{K} , образованных из k однотипных элементов типа s_0 :

$$f_R(s_0) \rightarrow k_r s_0 \in \mathbf{K}, \quad (1)$$

где: s_0 – электромагнитная хромосома-репликатор; k_R – коэффициент репликации.

Примерами структурных вариантов ЭМ-систем, геном которых определяется принципом репликации, являются многосекционные, многообмоточные, многополюсные, многоиндукторные, многороторные, и т.д. структуры, которые широко встречаются на различных уровнях структурной организации функциональных классов электрических машин. Идея генетической репликации лежит также в основе модульного принципа проектирования различных технических систем.

При коэффициенте репликации $k_R \geq 2$, составная ЭМ-структура допускает различные варианты пространственных компоновок (композиций, перестановок), количество которых возрастает с увеличением значения k_R . Это свойство носит системный характер, так как проявляется на любом уровне структурной организации многоэлементных ЭМ-структур. Свойство, связанное с наличием множества вариантов пространственного размещения из одинакового количества однотипных элементов, будем называть *структурной изомерией* (в отличие от *изомерии вещества*), а множества их пространственных композиций – *структурными изомерами*.

Структурная изомерия широко проявляется в многоэлементных электромагнитных и электромеханических системах. Исходя из приведенного выше определения, к классу структурных изомеров относятся: множества пространственных схем соединения параллельных ветвей в якорных обмотках; варианты пространственного размещения полюсов на активных поверхностях; схемы укладки лобовых частей секций многофазных обмоток; компоновочные схемы многоиндукторных ЭМ-систем и т.д.

Структурные изомеры как целостные объекты, могут приобретать новые функциональные свойства, отсутствующие в исходных структурных модулях (свойство эмерджентности). Такие структуры обладают большим эвристическим потенциалом и представляют основу для разработки оригинальных технических решений.

Таким образом, в концепции генетического видообразования ЭМ-систем, структурная изомерия представляет собой неотъемлемое свойство генетического принципа репликации и является

одним из важных источников структурного разнообразия ЭМ-систем.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ СТРУКТУР - ИЗОМЕРОВ

Роль теоретического базиса в методологии генетического синтеза ЭМ-структур выполняют принцип сохранения генетической информации и генетические модели видообразования, относящиеся к классу высокоинтеллектуальных информационных моделей, наделенных явно выраженной прогностической функцией [1, 3]. Такие модели позволили впервые раскрыть внутреннюю структуру Видов и нашли применение в технологии генетического предвидения и направленного синтеза их популяционной структуры, независимо от уровня развития Вида (включая неявные Виды, еще отсутствующие на текущее время структурной эволюции).

Исходная генетическая информация о структурных изомерах содержится в реплицированных электромагнитных хромосомах $(k, S_0) \in S$ (где S – исследуемый Вид ЭМ-системы), отображаемых генетическими моделями видообразования (рис. 1).

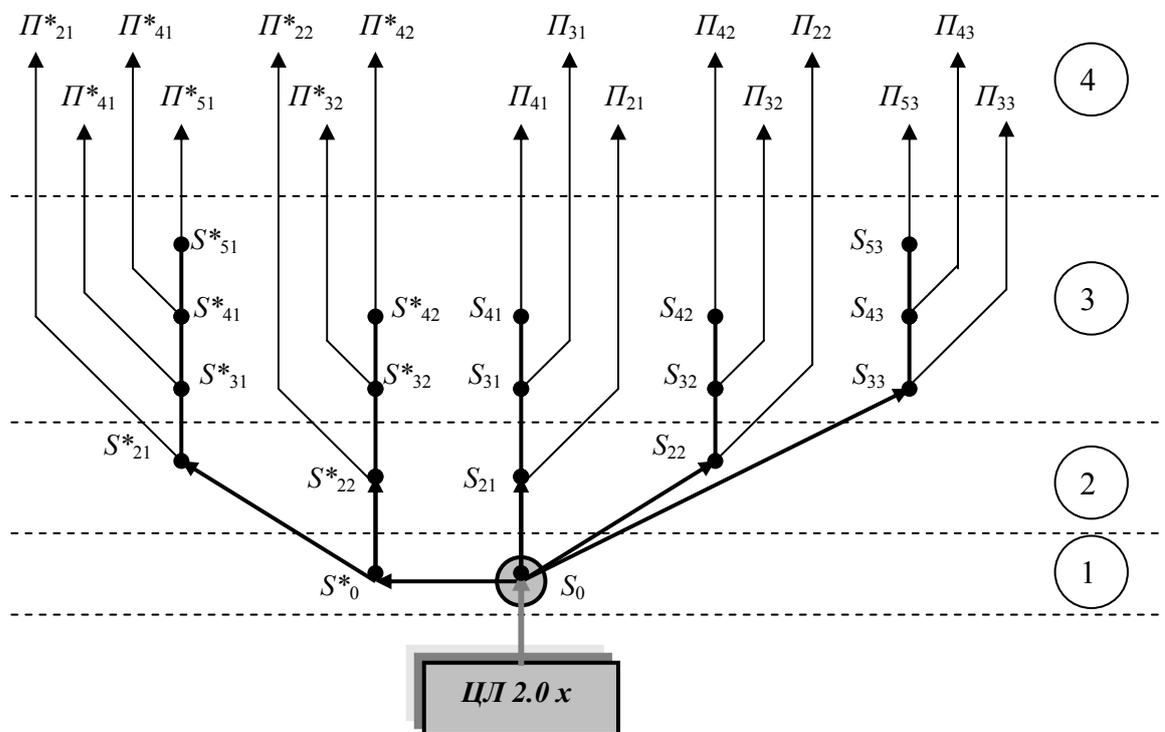


Рис. 1. Генетическая модель популяционной структуры цилиндрических электрических машин поступательного движения (базовый вид ЦЛ 2.0x): ЦЛ 2.0x – родительская хромосома; 1 – порождающая пара хромосом 1-го поколения (S_0 – парная хромосома (нормальная); S_0^1 – инверсная); 2 – хромосомный набор 2-го поколения; 3 – хромосомный набор $2 + n$ ($n = 1, 2, \dots$) поколений; 4 – структура популяций

Электромагнитные хромосомы такого типа обладают следующими свойствами:

- они наделены генетической информацией (генетическим кодом);
- содержат набор однотипных, структурно, электромагнитно и информационно совместимых структурных элементов (модулей);
- обладают функциональной целостностью

$$k, S_0 = (S_1, S_2, \dots, S_k) \in \Pi_i, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где, Π_i – популяция, порождаемая s_0 ; N – число по-

пуляций Вида S .

Все потенциально возможные варианты пространственных композиций K из n элементов, в общем случае, являются геометрическими объектами трехмерного пространства R^3 . Поэтому синтез множества возможных пространственных компоновок можно осуществить, применяя известный аппарат геометрического моделирования [4].

В соответствии с принципом сохранения генетической информации, хромосома-репликатор s_0 содержит

генетическую $\{g\}$ и количественную информацию. Если эту информацию дополнить метрическими характеристиками и правилами взаимной ориентации элементарных структур, то такая информация будет достаточной для отображения множества возможных композиций K

$$(S_0) = (\{g\}, \{m\}, \{p\}) \quad (3)$$

где: $\{g\}$ – генетическая информация о пространственной форме, топологических признаках и электромагнитной симметрии; $\{m\}$ – метрические характеристики и соотношения; $\{p\}$ – совокупность параметров, определяющих взаимную ориентацию форм S_0 в R^3 .

Генерация возможных вариантов пространственных композиций осуществляется путем последовательного применения геометрических преобразований по отношению к s_0 :

- параллельных переносов S_0 вдоль соответствующих осей координат;
- поворотов исходной структуры относительно осей симметрии порядка n ;
- масштабирования в R^2 или R^3 .

В результате генерации, при заданных ограничениях, получаем конечное множество пространственных композиций из элементов типа s_0

$$\sum_{i=1}^N f_i(S_0) \rightarrow (K_1, K_2, \dots, K_N) \subset S, \quad (4)$$

где $f_i(S_0)$ - i -я функция геометрического преобразования.

Представленные в (4) композиции отображают структуру искомым изомеров. Условия однозначности преобразования определяются исходной ориентацией структуры s_0 относительно осей координат и правилами их применения, которые устанавливают новые пространственные координаты исходного примитива относительно заданных геометрических инвариантов.

В генетической модели видообразования результаты синтеза структурных изомеров отображаются соответствующими узлами ветвления, с указанием структурных кодов изомеров и порождаемых ими популяций (рис. 2).

В общем случае, мощность синтезируемого множества структур-изомеров определяется начальными условиями и допущениями, которые отображают особенности соответствующего функ-

ционального класса ЭМ-систем и накладывают требуемые ограничения на область синтеза. Применительно к классу электрических машин, к такой информации могут относиться:

- требуемые варианты пространственного движения подвижных частей (включая инверсные);
- допустимые режимы функционирования;
- другие требования (ограничения).

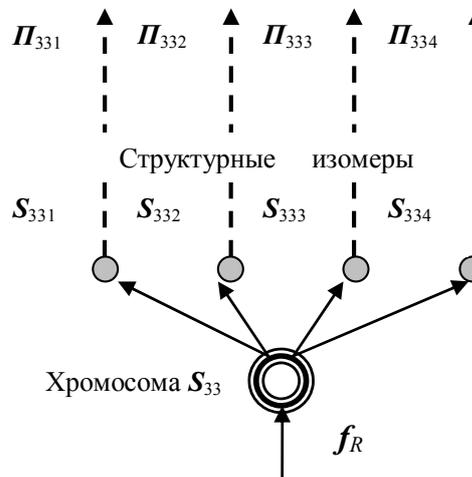


Рис. 2. Графическое представление узла ветвления структур – изомеров в генетической модели

Синтезированные композиции изомеров дополняют и уточняют структуру генома Вида, поэтому их генетическая и приобретенная информация будет сохраняться во всех структурных представителях электромеханических объектов, входящих в структурную популяцию.

Проверка достоверности результатов моделирования осуществлялась на примере задачи синтеза структурных изомеров для многоиндукторных ЭМ-систем Вида ЦЛ 2.0х (рис. 1). В качестве порождающей структуры выбрана реплицированная хромосома третьего поколения S_{33} . В структуре генома указанного Вида хромосома S_{33} отвечает за наследственные признаки многоиндукторных цилиндрических линейных двигателей (ЦЛАД).

В табл. 1 приведены результаты синтеза структурных изомеров для случая трехиндукторных ($k_R=3$), а на рис. 3 – эквивалентные пространственные схемы цилиндрических линейных асинхронных двигателей (ЦЛАД) возвратно-поступательного движения.

Таблица 1

Результаты синтеза структурных изомеров подвида многоиндукторных цилиндрических асинхронных двигателей возвратно-поступательного движения ($k_R=3$)

Структурный код изомера	Геометрическое преобразование* s_r	Пространственная структура изомера	Пространственная композиции ЦЛАД
S_{331}	Перенос вдоль оси OX	Осевая последовательная	Трехиндукторная с общим вторичным элементом
S_{332}	Перенос вдоль оси OY	Плоско-параллельная	Трехиндукторная с тремя механически связанными вторичными элементами
S_{333}	Поворот относительно оси OX ($\alpha = 2\pi/3$)	Поворотной-симметричная	Трехиндукторная с тремя механически связанными вторичными элементами
S_{334}	Поворот относительно оси OZ ($\beta = 2\pi/3$)	Радиально-лучевая	Трехиндукторная с тремя синхронизированными по направлению движения вторичными элементами

* В исходной системе координат ось симметрии хромосомы S_{33} - параллельна оси OX .

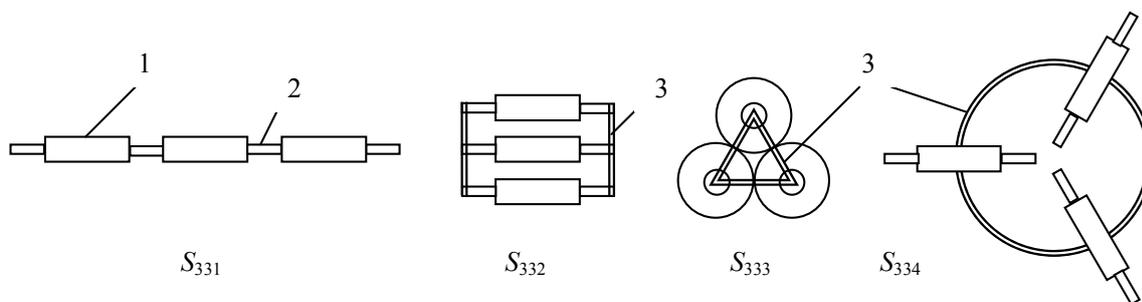


Рис. 3. Пространственные схемы трехиндукторных ЦЛАД (потомство структур-изомеров, синтезированных на основе электромагнитной хромосомы S_{33}): 1 – индуктор; 2 – вторичный элемент; 3 – механическая связь

Из четырех синтезированных структур-изомеров (табл. 1), структурные представители двух из них (S_{331} и S_{333}) были выявлены по результатам информационно-патентного поиска, что подтверждает достоверность методики синтеза.

Структурные изомеры S_{332} и S_{334} составляют прогностическую составляющую результатов синтеза. Они определяют наследственную информацию неявных популяций и составляют основу для решения задач направленного синтеза оригинальных технических решений.

Генетическая природа изомерии обуславливает возникновение неизбежных параллелизмов в структурообразовании ЭМ-систем, относящихся к различным Видам. Множества таких генетически подобных структур, относящихся к гомологически родственным Видам, образуют гомологичные ряды структур-изомеров.

Наличие указанной закономерности открывает возможность синтеза гомологичных изомеров, основанного на использовании закона гомологических рядов ЭМ-систем. [5].

ВЫВОДЫ

Результаты исследования можно обобщить следующими положениями:

1. Изомерия представляет собой общесистемное свойство генетически организованных развивающихся систем и выступает одним из источников их структурного разнообразия.

2. Впервые дано определение понятия "структурная изомерия" применительно к объектам электромеханики и определены условия ее проявления. Показано, что структурная изомерия возникает на хромосомном уровне организации многоэлементных структур ЭМ-систем, как неотъемлемое свойство генетического принципа репликации (при условии $k_R \geq 2$ в R^3).

3. Электромагнитные структуры - изомеры обладают генетической информацией и выполняют функцию порождающих структур по отношению к объектам и системам более высокого уровня сложности.

4. Предложен метод синтеза структурных изомеров, основанный на последовательном применении генетического оператора репликации и группы геометрических преобразований (переносов, вращений, масштабирования).

Предложенные уточненные генетические модели, учитывающие структурную изомерию, целесообразно применять: в технологии генетического предвидения новых Видов ЭМ-систем; при проведении геномных исследований, в задачах внутривидовой геносистематики; при создании генетических банков инноваций; в генетическом проектировании многоэлементных электрических машин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шинкаренко В.Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 285 с.
- [2] Шинкаренко В.Ф. На пути к расшифровке генома электромеханических преобразователей энергии. // Технічна електродинаміка. Темат. вип.: "Проблеми сучасної електротехніки". Ч.3. - 2004. – С. 40 – 47.
- [3] Шинкаренко В.Ф., Августинович А.А., Нестыкайло О.С. Генетическое моделирование внутривидовой структуры электромеханических преобразователей энергии // Електротехніка і електромеханіка, 2006. - № 4. – С. 42 – 46.
- [4] Михайленко В.Е. и др. Геометрическое моделирование и машинная графика в САПР. – К.: Выща школа, 1991. – 374 с.
- [5] Шинкаренко В.Ф., Белинский В.С. Конические электрические машины: структурно-системный анализ класса // Електромашинобудування та електрообладнання, 2005, № 64. – С. 54 – 61.

Поступила 30.08.2008

УТОЧНЕННАЯ МОДЕЛЬ ТИРИСТОРА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В MATLAB 7

Жемеров Г.Г., д.т.н., проф., Колесник В.Ю.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника"
тел. (057) 7076609, (057) 7076312, E-mail: zhemerov@online.kharkiv.net

У статті розглянута уточнена модель одноопераційного тиристора для пакету Matlab 7.0. Запропонована модель, на відміну від наявної в бібліотеці Simulink, враховує наявність заряду зворотного відновлення тиристора. На прикладі моделі шестипульсного керуваного випрямляча показаний вплив заряду зворотного відновлення на величину перенапруги, що повторюється, на тиристорі. Приведений алгоритм розрахунку ланцюгів захисту від перенапруження, що повторюється.

В статье рассмотрена уточненная модель однооперационного тиристора для пакета Matlab 7.0. Предложенная модель, в отличие от имеющейся в библиотеке Simulink, учитывает наличие заряда обратного восстановления тиристора. На примере модели шестипульсного управляемого выпрямителя показано влияние заряда обратного восстановления на величину повторяющихся перенапряжений на тиристоре. Приведен алгоритм расчета цепей защиты от повторяющегося перенапряжения.

ВВЕДЕНИЕ

В библиотеке Simulink 7.0 и более поздних версий для пакета Matlab 7 отсутствует модель однооперационного тиристора, учитывающая заряд обратного восстановления и, соответственно, обратный ток тиристора при выключении. Имеющаяся модель "Detailed thyristor" отличается от модели "Thyristor" наличием параметра Turn-off time (T_q), который становится доступным, если задать индуктивность тиристора (Inductance L_{on}) отличной от нуля и открыть окно с параметрами тиристора повторно [1].

В справке указано следующее:

The thyristor device turns off when the current flowing in the device becomes 0 ($I_{ak} = 0$) and a negative voltage appears across the anode and cathode for at least a period of time equal to the turnoff time T_q . If the voltage across the device becomes positive within a period of time less than T_q , the device turns on automatically even if the gate signal is low ($g = 0$) and the anode current is less than the latching current. Furthermore, if during turn-on, the device current amplitude stays below the latching current level specified in the dialog box, the device turns off after the gate signal level becomes low ($g = 0$).

Таким образом, под временем выключения подразумевается интервал времени, в течение которого тиристор при подаче прямого напряжения останется открытым. Однако проводимость тиристор при этом не сохраняет.

Для полноценного анализа электромагнитных процессов в компьютерных моделях вентильных преобразователей с тиристорами в пакете Matlab необходимо ввести уточненную модель тиристора, учитывающую величину заряда обратного восстановления.

В статье рассматривается уточненная модель тиристора.

МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ БЕЗ УЧЕТА ЗАРЯДА ОБРАТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТИРИСТОРОВ

Для исследования модели Matlab-тиристора составлена модель шестипульсного мостового управляемого выпрямителя, нагруженного на активно-индуктивную нагрузку с противоЭДС. Параметры модели следующие:

- действующее значение линейного напряжения сети $U = 710$ В;
- номинальный ток нагрузки – $I_{дн} = 1000$ А;
- напряжение короткого замыкания фазы сети –

$$e_k = 0,06.$$

Ток нагрузки поддерживается постоянным с помощью ПИ-регулятора.

На рис. 1 приведены осциллограммы, характеризующие электромагнитные процессы в УВ. Показаны напряжения и ток на тиристоре анодной вентильной группы фазы А. На осциллограммах а) показаны ток тиристора и напряжение на тиристоре на интервале четырех периодов напряжения сети в установившемся режиме. На осциллограммах б) показан процесс выключения тиристора (напряжение и ток) в увеличенном масштабе по оси времени.

Видно, что обратное напряжение на тиристоре начинает нарастать сразу после перехода тока через ноль. Обратный ток, который виден на осциллограмме, представляет собой ток заряда конденсатора снабберной RC-цепочки, защищающей тиристор от перенапряжения. Таким образом, подтверждается приведенная в справке информация, что учет времени закрывания сводится к возможности открытия тиристора при подаче прямого напряжения и никак не влияет на токи и напряжения в силовой схеме, если напряжение на тиристоре останется отрицательным.

РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ОБРАТНОГО ТОКА

Физически причиной протекания обратного тока тиристора является наличие заряда обратного восстановления Q_{rr} в структуре, который рассасывается под действием обратного тока, при этом прибор остается открытым и падение напряжения на нем близко к нулю. Когда обратный ток достигает некоторого максимального значения I_0 , заряд обратного восстановления полностью рассасывается и тиристор закрывается [2].

Величина обратного тока, в общем случае зависит от заряда обратного восстановления Q_{rr} и скорости изменения тока:

$$I_0 = \sqrt{2Q_{rr} \frac{di}{dt}}. \quad (1)$$

Для управляемого выпрямителя выражение (1) имеет вид:

$$I_0 = \sqrt{2Q_{rr} \frac{e_a}{2L_{\phi}}}. \quad (2)$$

где e_a – мгновенное значение анодного напряжения тиристора.

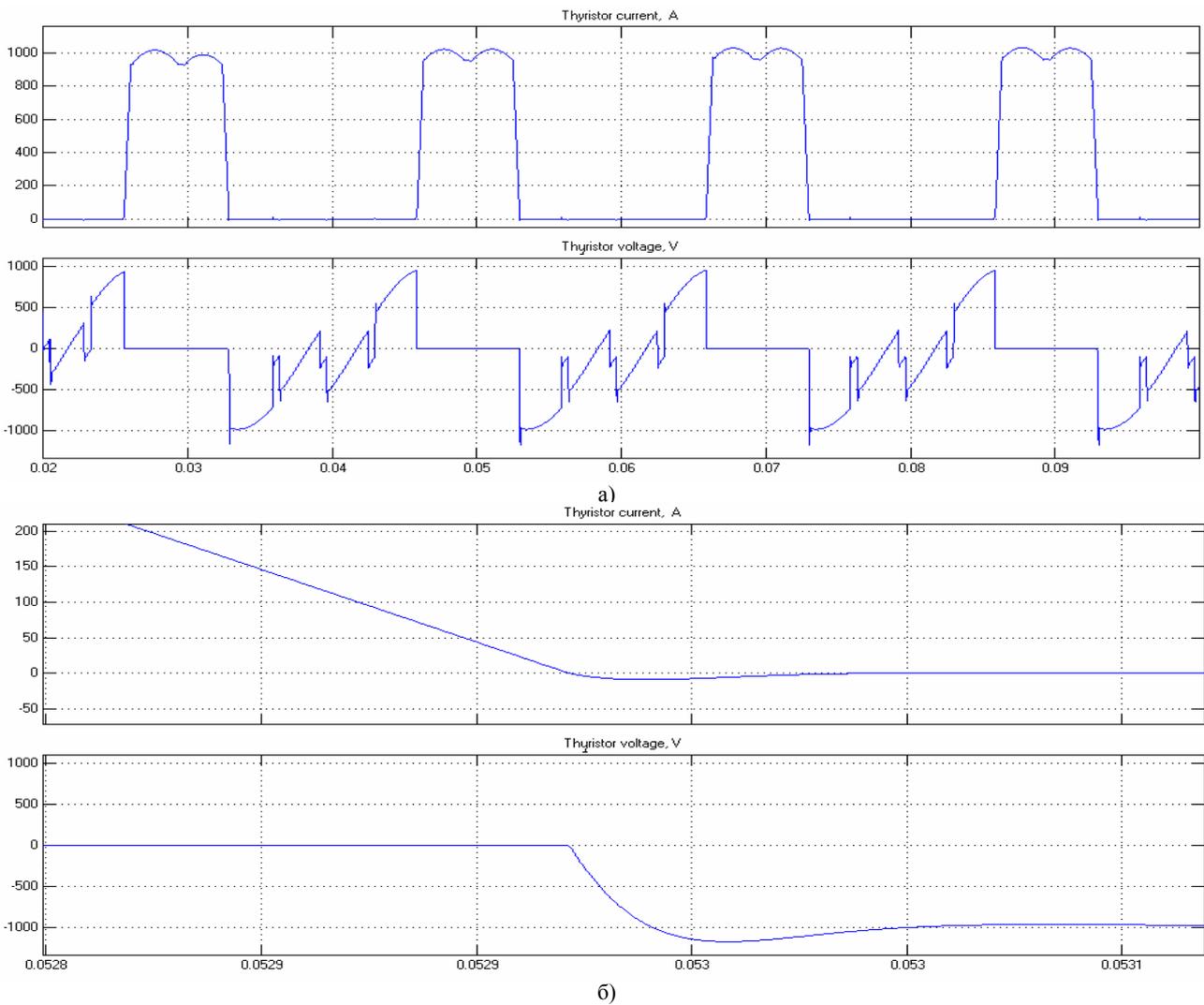


Рис. 1. Ток через тиристор и напряжение на тиристоре без учета заряда обратного восстановления

В соотношении (2) Q_{rr} – величина заряда обратного восстановления. Это справочная величина для конкретного прибора, зависящая от скорости изменения тока при коммутации и величины тока перед началом коммутации $Q_{rr} = f\left(I_m, \frac{di}{dt}\right)$.

Для рассматриваемого примера модели выбираем тиристор фирмы Semikron типа SKT551, рекомендованный для шестипульсового УВ с номинальным выходным током 1000 А [3].

Зависимость $Q_{rr} = f\left(I_m, \frac{di}{dt}\right)$ для этого прибора приведена на рис. 2.

Рассчитаем максимальную скорость изменения тока:

$$\left.\frac{di}{dt}\right|_{\max} = \frac{E_{am}}{2L_{\phi}} \quad (4)$$

$$\left.\frac{di}{dt}\right|_{\max} = \frac{710 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot 2.4 \cdot 10^{-4}} = 2.1 \text{ A}/\mu\text{s}.$$

Как видно из рис. 2 для возможных в схеме скоростей изменения тока зависимость $Q_{rr} = f\left(\frac{di}{dt}\right)$ линейна. При токах в диапазоне 10-1000 А и скорости

изменения тока менее $3 \text{ A}/\mu\text{s}$ зависимость величины заряда обратного восстановления от тока можно аппроксимировать следующим выражением:

$$Q_{rr} = Q_{rr0} \lg I, \quad (5)$$

где Q_{rr0} – заряд обратного восстановления при токе 10 А и скорости изменения тока $1 \text{ A}/\mu\text{s}$.

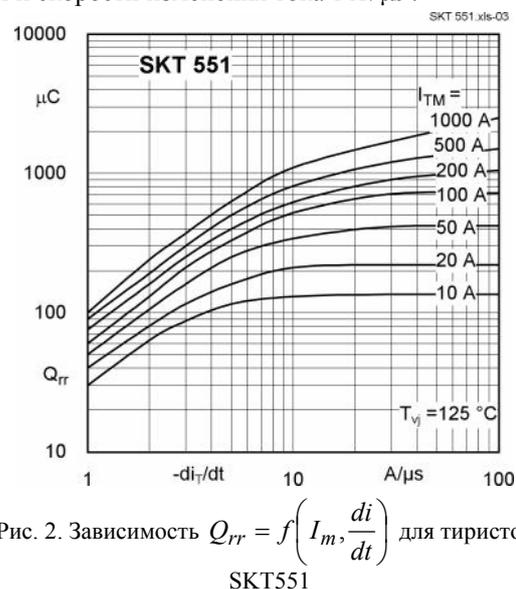


Рис. 2. Зависимость $Q_{rr} = f\left(I_m, \frac{di}{dt}\right)$ для тиристора SKT551

Зависимость величины заряда обратного восстановления от скорости изменения тока $Q_{rr} = f\left(\frac{di}{dt}\right)$ практически линейна при скорости изменения тока менее $3 \text{ A}/\mu\text{s}$.

Таким образом, для моделирования можно использовать следующее выражение:

$$Q_{rr} = Q_{rr0} \lg I \frac{di}{dt} \cdot 1 \cdot 10^{-6}. \quad (6)$$

Величина скорости изменения тока в (6) в $\text{A}/\mu\text{s}$. Для тиристора SKT551 $Q_{rr0} = 30 \text{ } \mu\text{C}$, поэтому выражение (6) упрощается:

$$Q_{rr} \approx 3 \cdot 10^{-11} \lg I \frac{di}{dt}.$$

При токе 1000 A $Q_{rr} \approx 1 \cdot 10^{-10} \frac{di}{dt}$. Максимально-

му значению скорости изменения тока $\left.\frac{di}{dt}\right|_{\max}$ соответствует максимальное значение заряда обратного восстановления $Q_{rr \max} = 0,21 \text{ mC}$; L_Φ – индуктивность фазы сети. Выразим ее через известные значения амплитуды фазного напряжения E_{am} , напряжения короткого замыкания сети e_k и тока нагрузки I_{dn} :

$$L_\Phi = \frac{E_{am} e_k}{\sqrt{\frac{2}{3}} I_{dn} 100\pi}. \quad (7)$$

$$L_\Phi = \frac{1004 \cdot 0,06}{\sqrt{\frac{2}{3}} 866 \cdot 100\pi} = 0,24 \text{ mH}.$$

Тогда максимальная величина обратного тока составит:

$$I_{0 \max} = \sqrt{2 \cdot 0,21 \cdot 10^{-3} \frac{710 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot 0,24 \cdot 10^{-3}}} = 30 \text{ A}.$$

Рассчитанное значение соответствует максимальному значению обратного напряжения ($\alpha = 90$ эл. град.).

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ СНАББЕРНОЙ ЦЕПочки

Когда величина обратного тока тиристора достигает значения I_0 , тиристор закрывается, и индуктивный ток в контуре коммутации вызывает перенапряжения которые могут привести к пробоем пибора. Поэтому тиристор шунтируют снабберной RC-цепочки, защищающей от повторяющихся коммутационных перенапряжений.

Приведем расчет элементов снабберной цепочки, согласно методике, описанной в [4].

Зададимся значением величины падения напряжения на резисторе в первый момент времени, после закрывания тиристора $(I_0 R)_* = 1,2$ и определим величину эквивалентного сопротивления R_3 :

$$R_3 = (I_0 R)_* \frac{E_{am}}{I_0}, \quad (8)$$

$$R_3 = 1,2 \frac{1004}{30} = 40 \text{ } \Omega.$$

Выбираем величину $\beta T = 1$ [4].

Определяем емкость эквивалентного конденса-

тора C_3 :

$$C_3 = \frac{8L_\Phi}{(1 + (\beta T)^2) R_3^2}, \quad (9)$$

$$C_3 = \frac{8 \cdot 0,24 \cdot 10^{-3}}{(1 + 1^2) 40,8^2} = 0,57 \text{ } \mu\text{F}.$$

Для шестипульсной мостовой схемы УВ реальные значения элементов снабберной цепи определяются по следующим соотношениям:

$$R = \frac{5}{3} R_3; \quad C = \frac{3}{5} C_3, \quad (10)$$

$$R = \frac{5}{3} 40 = 66,7 \text{ } \Omega; \quad C = \frac{3}{5} 0,57 \cdot 10^{-6} = 0,34 \text{ } \mu\text{F}.$$

Выбираем близкие стандартные значения: $R = 68 \text{ } \Omega$, $C = 0,33 \text{ } \mu\text{F}$.

Находим уточненные значения эквивалентного сопротивления и емкости

$$R_{\text{эkv}} = \frac{3}{5} R = \frac{3}{5} 68 = 40,8 \text{ } \Omega,$$

$$C_{\text{эkv}} = \frac{5}{3} C = \frac{5}{3} 0,33 \cdot 10^{-6} = 0,55 \text{ } \mu\text{F}.$$

Уточняем значение βT

$$\beta T = \sqrt{\frac{8L_\Phi}{R_3^2 C_3} - 1}, \quad (11)$$

$$\beta T = \sqrt{\frac{8L_\Phi}{R_3^2 C_3} - 1} = \sqrt{\frac{8 \cdot 0,24 \cdot 10^{-3}}{40,8^2 \cdot 0,55 \cdot 10^{-6}} - 1} = 1,05.$$

Уточняем величину $(I_0 R)_*$:

$$(I_0 R)_* = \frac{I_0 R_3}{E_{am}}, \quad (12)$$

$$(I_0 R)_* = \frac{30 \cdot 40,8}{1004} = 1,22.$$

По полученным значениям определяем величину перенапряжения на тиристоре $\Delta U_T = 0,45$.

Максимальная мощность, рассеиваемая в резисторе снабберной цепи составит: [4]

$$P_{R \max} = 3,5 f_0 C U_L^2, \quad (13)$$

$$P_{R \max} = 3,5 \cdot 50 \cdot 0,33 \cdot 10^{-6} \cdot 710^2 = 30 \text{ W}.$$

А суммарная мощность потерь в снабберах:

$$P_{\Sigma R \max} = 6 P_{R \max}, \quad (14)$$

$$P_{\Sigma R \max} = 6 \cdot 30 = 180 \text{ W}.$$

Это составляет приблизительно 0,02% от номинальной мощности преобразователя.

УТОЧНЕННАЯ МОДЕЛЬ ТИРИСТОРА

Структура блока, заменяющего матлабовский тиристор и учитывающего наличие заряд обратного восстановления приведена на рис. 3.

Схема содержит собственно стандартный Simulink блок "Detailed thyristor" VS, у которого емкость (Snubber capacitance C_s) и сопротивление (Snubber resistance R_s) снабберной цепи равны inf (бесконечность) и $100000 \text{ } \Omega$ соответственно. Снабберная цепь выполнена как и в реальном преобразователе из отдельных элементов $C_{\text{демф}}$ и $R_{\text{демф}}$ равных $0,33 \text{ } \mu\text{F}$ и $68 \text{ } \Omega$ соответственно, согласно приведенному выше расчету.

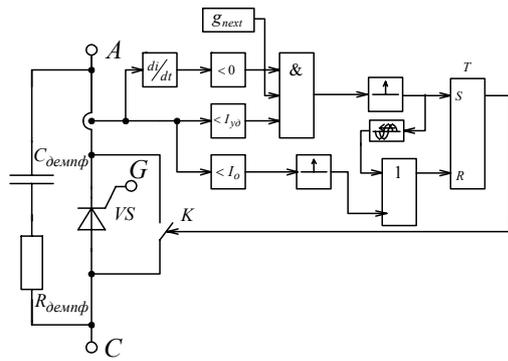


Рис. 3. Схема уточненной модели тиристора

Для имитации проводимости тиристора в процессе рассасывания заряда обратного восстановления Q_{rr} необходимо шунтировать его идеальным ключом К. Управляет этим ключом RS-триггер Т. Короткий импульс, устанавливающий триггер в единичное состояние по входу S, формируется при одновременном соблюдении трех условий, однозначно определяющих переход тока через ноль при выключении тиристора:

- 1) скорость изменения тока тиристора меньше нуля;
- 2) ток тиристора меньше тока удержания;
- 3) действует импульс, открывающий следующий (по алгоритму переключения) тиристор (g_{next}).

На практике сигнал производной тока необходимо пропустить через ФНЧ второго порядка с частотой среза несколько кГц, сглаживающий броски при коммутациях.

Короткий импульс, устанавливающий триггер в нулевое состояние, формируется при достижении об-

ратным током величины I_0 , которая рассчитывается в модели согласно выражению (2). Отметим, что в модели выпрямителя необходимо использовать трехфазный блок источника напряжения "Three-Phase Source" с небольшими величинами сопротивлений и индуктивностей для исключения влияния искажений напряжения сети при коммутациях на расчет величины обратного тока. В данной модели УВ сопротивление фазы сети ("Source resistance") равно $0,01\text{ м}\Omega$, индуктивность фазы ("Source inductance") – $2,4\text{ }\mu\text{H}$ Основная индуктивность $240\text{ }\mu\text{H}$ вынесена отдельным блоком. Вольтметры, измеряющие напряжения для расчета скорости изменения тока при коммутации подключены непосредственно к сети, поскольку напряжение там не искажено.

Для защиты от помех формируется дополнительный сбрасывающий импульс через $200\text{ }\mu\text{s}$ после импульса установки триггера в единицу. Это реализует элемент, выполняющий операцию логического сложения сигнала сброса триггера в состояние логического 0 с сигналом установки триггера в состояние логической 1, сдвинутым на $200\text{ }\mu\text{s}$.

МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С УЧЕТОМ ЗАРЯДА ОБРАТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТИРИСТОРОВ

На рис. 4 показаны осциллограммы полученные с использованием уточненной модели тиристора, иллюстрирующие процессы при коммутации – ток через тиристор и напряжение на тиристоре в увеличенном масштабе при токе нагрузки 1000 A и величине угла управления $\alpha = 90\text{ эл. град.}$, а на рис. 5 осциллограммы, полученные при $\alpha = 10\text{ эл. град.}$

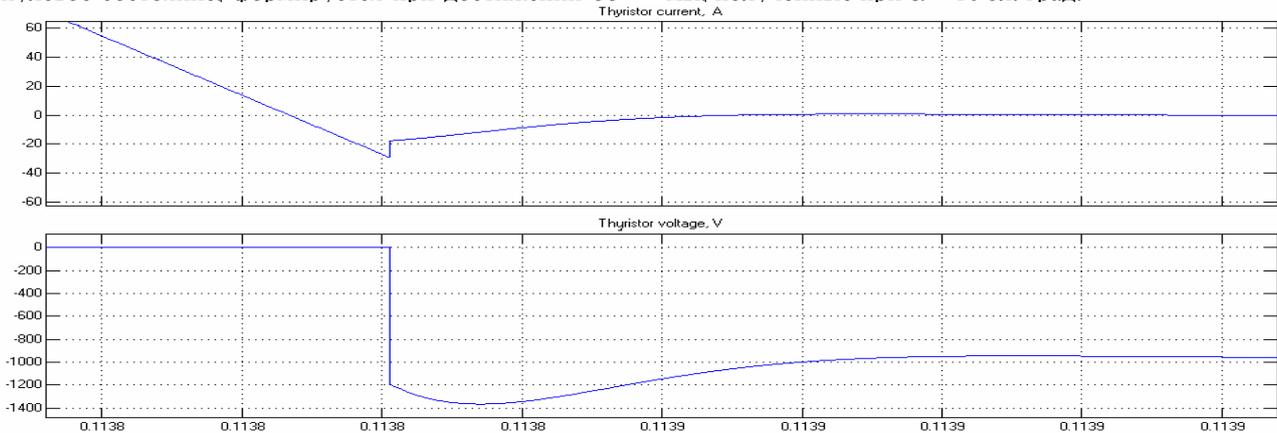


Рис. 4. Ток через тиристор и напряжение на тиристоре с учетом заряда обратного восстановления при $\alpha = 90\text{ эл. град.}$ и $I_d = 1000\text{ A}$

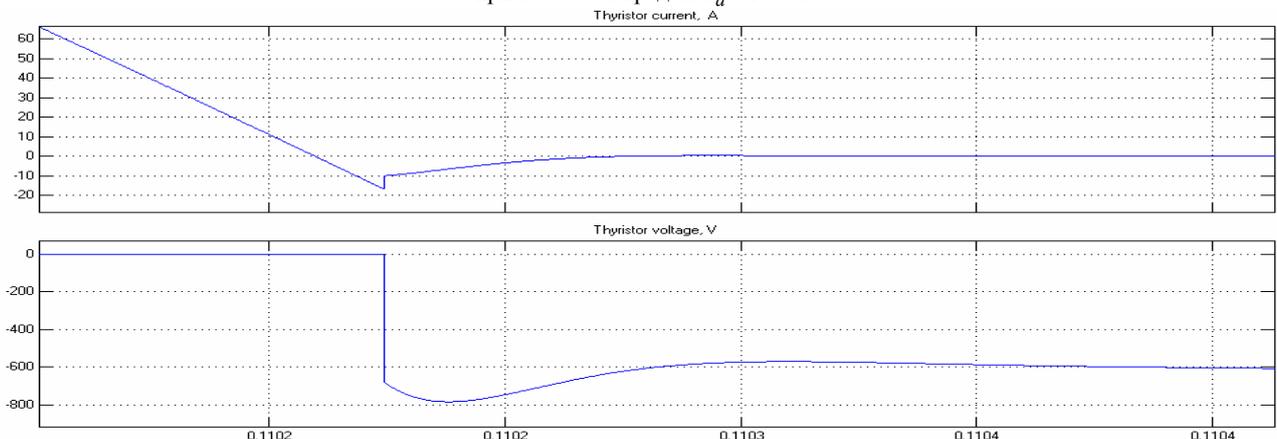


Рис. 5. Ток через тиристор и напряжение на тиристоре с учетом заряда обратного восстановления при $\alpha = 10\text{ эл. град.}$ и $I_d = 1000\text{ A}$

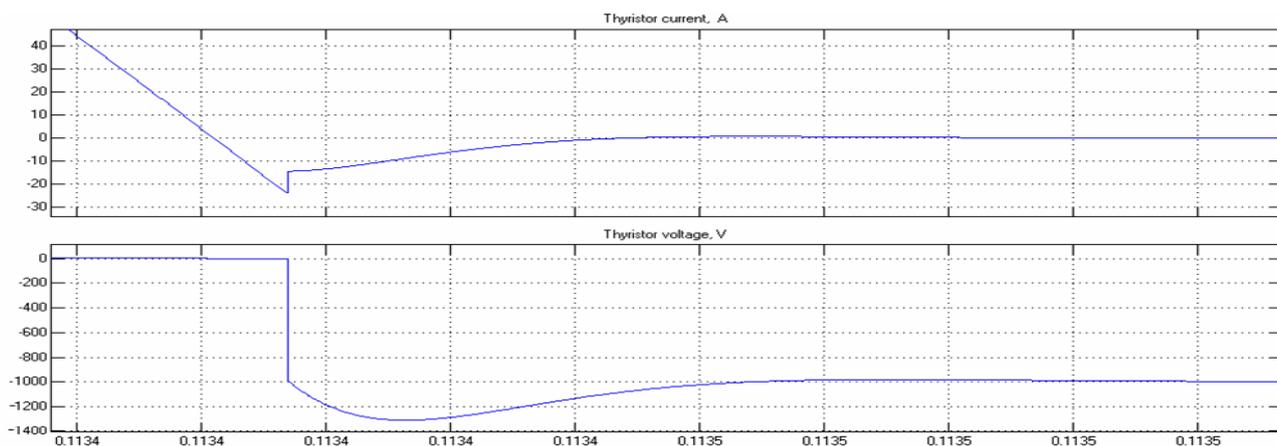


Рис. 6. Ток через тиристор и напряжение на тиристоре с учетом заряда обратного восстановления при $\alpha = 90$ эл. град. и $I_d = 100$ А

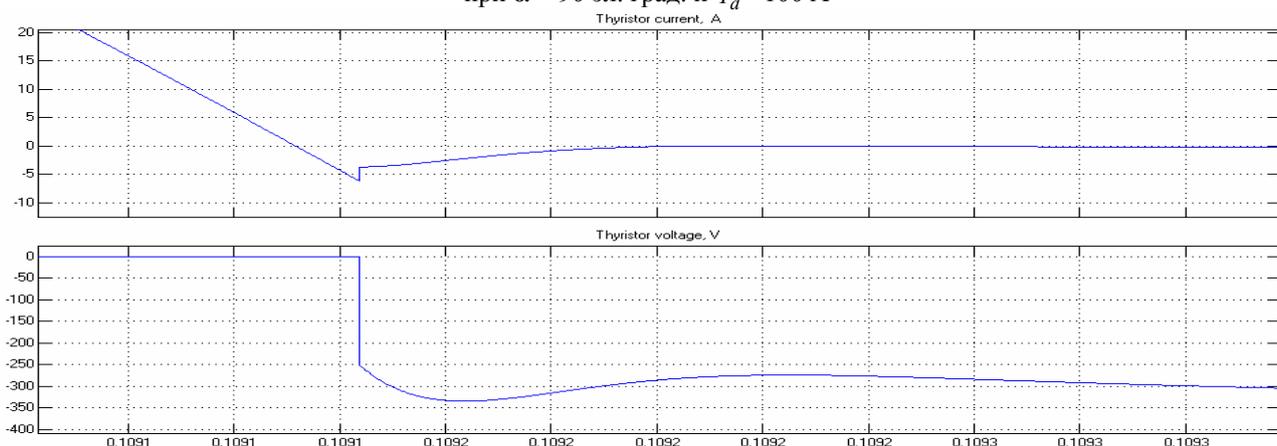


Рис. 7. Ток через тиристор и напряжение на тиристоре с учетом заряда обратного восстановления при $\alpha = 10$ эл. град. и $I_d = 100$ А

На рис. 6 также показаны осциллограммы тока и напряжения при коммутации в увеличенном масштабе при токе нагрузки 100А и при $\alpha = 90$ эл. град., а на рис. 7 – при $\alpha = 10$ эл. град.

Как видно из осциллограмм сохранен физический смысл заряда обратного восстановления, то есть ток линейно уменьшается до значения (максимальное значение обратного тока $I_0 \approx 30$ А соответствует углу управления $\alpha = 90$ эл. град. и току нагрузки 1000 А - см. рис. 4), а напряжение на ключе на этом интервале равно нулю.

Максимальное относительное напряжение в первый момент времени после запираания тиристора составляет 1,2 (рис. 4), а амплитуда повторяющегося перенапряжения составляет примерно 1,4 при $\alpha = 90$ эл. град. и токе нагрузки 1000 А. При $\alpha = 10$ эл. град. он позволяет получить минимальные потери в снабберных цепях при обеспечении максимального перенапряжения на тиристорах 1,5 от амплитуды анодного напряжения.

Процесс заряда конденсатора легкий колебательный – амплитуда третьей полуволны меньше амплитуды первой полуволны на два порядка. Такой характер процесса наиболее целесообразен, поскольку он позволяет получить минимальные потери в снабберных цепях при обеспечении максимального перенапряжения на тиристорах 1,5 от амплитуды анодного напряжения.

ВЫВОДЫ

1. Предложена уточненная модель однофазного тиристора, предназначенная для замены стандартной модели "Detailed thyristor". Предложенная модель тиристора позволяет учитывать наличие заряда обратного восстановления. Причем при моделировании величины заряда учитывается ее зависимость от скорости изменения тока.

2. Проведен расчет цепей защиты тиристора от перенапряжений обусловленных зарядом обратного восстановления.

3. На примере трехфазного мостового управляемого выпрямителя с типовыми параметрами показано влияние заряда обратного восстановления тиристорных на величину обратного тока и повторяющегося перенапряжения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. Питер, 2008 г, 288 с.
- [2] Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применения. – М.: Издательский дом Додэка-XXI, - 2001, 384 с.
- [3] SEMIKRON INTERNATIONAL. DR. Fritz Martin GmbH & Co. KG & SEMIKRON ELEKTRONIK GmbH Sigmondstrabe 2000, D-90431 Nurnberg/Germany.
- [4] Жемеров Г.Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. М., "Энергия", 1977. – С. 200-209.

Поступила 05.10.2008

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ: ИСТОРИЯ, ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Баранов М.И., д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"
тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Приведено коротку історію виникнення і розвитку в Україні та за кордоном таких основних імпульсних технологій обробки твердих, рідких і газоподібних матеріалів як вибухова, електрогидравлічна, магнітно-імпульсна, електроерозійна, комплексна високовольтна електромагнітна, ширококутова електромагнітна терапевтична, кавітаційна і коронно-озонна. Відбито фізичні основи, специфіка і технічні можливості кожної з зазначених прогресивних технологій.

Приведена краткая история возникновения и развития в Украине и за рубежом таких основных импульсных технологий обработки твердых, жидких и газообразных материалов как взрывная, электрогидравлическая, магнитно-импульсная, электроэрозионная, комплексная высоковольтная электромагнитная, широкополосная электромагнитная терапевтическая, кавитационная и коронно-озонная. Отражены физические основы, специфика и технические возможности каждой из указанных прогрессивных технологий.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальным вопросом прогрессивных технологий обработки различных твердых, жидких и газообразных материалов как раньше, так и сейчас во всем мире уделяется повышенное внимание. Связано это, прежде всего, с производственными и экологическими запросами нашего развивающегося общества. Так, дальнейший прогресс в области машиностроения, авиационной и ракетно-космической техники требует обработки крупногабаритных деталей из труднодеформируемых материалов (например, титановых сплавов и специальных сталей) [1]. С другой стороны, проблемы экологии настоятельно требуют от разработчиков новой техники минимизации твердых, жидких и газообразных производственных отходов и вредных выбросов в окружающую человека среду [2]. В связи с все более нарастающим в мире объемом производства (до 2 раз за каждые 15 лет) перед жителями нашей планеты все более отчетливо и во весь "рост" встает проблема экологической защиты окружающей среды от производственной деятельности человека. Не менее важной проблемой для землян остается проблема энерго- и ресурсосбережения. Все это вместе стимулирует развитие новых прогрессивных импульсных способов обработки различных материалов, удовлетворяющих жестким современным требованиям производства различных машин, аппаратов, устройств, бытовых товаров и иных материальных благ нашей цивилизации.

1. ВЗРЫВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Использование химических взрывчатых веществ (ВВ) в военных целях наглядно демонстрировало человечеству разрушительные возможности химической энергии, выделяющейся при протекании на молекулярном уровне цепных химических реакций в веществе. Напомним, что при подрыве химических ВВ (например, широко известного тринитротолуола [3]) высвобождающаяся удельная энергия достигает значений порядка 10^{10} Дж/м³ [4]. Результаты импульсного воздействия (за тысячные доли секунды) снарядов с ВВ и сверхпрочными сердечниками на военную технику (например, на броневые листы бронетанковой техники) свидетельствовали о протекании в зоне воздействия на ее броню ударной волны от подрыва ВВ или действия броневоего сердечника интенсивной пла-

стической деформации металла. Можно ли использовать разрушительную силу ВВ для полезных производственных целей при формообразовании труднодеформируемых металлических заготовок? Если да, то как? Вот такие вопросы и возникли в конце 40-х годов прошлого и совсем недалекого нам XX века перед нашим известным соотечественником, научным сотрудником и педагогом Харьковского авиационного института (ХАИ, ныне он называется Национальный аэрокосмический университет "ХАИ") Ростиславом Вячеславовичем Пихтовниковым, 100-летие со дня рождения которого в октябре 2007 года отмечало украинское научное сообщество ученых (рис.1) [5]. Молодой изобретатель решил "перековать мечи на орала" согласно одноименной скульптуре известного Вучетича и превратить "взрыв разрушающий" во "взрыв созидающий". Эта масштабная, полная тайнами и опасностями научно-техническая цель и определила на многие годы его основную творческую жизнь.



Рис. 1. Основоположник технологии обработки металлов взрывом ВВ д.т.н., проф. Пихтовников Р.В. (1907-1972 гг.)

В начале своего трудного творческого пути по разработке в ХАИ новой взрывной импульсной технологии обработки материалов известный харьковский ученый и изобретатель Р.В. Пихтовников для исследования поведения металлических конструкций под действием высокоскоростных давлений в десятки тысяч атмосфер приспособил артиллерийскую пушку, выстреливающую за счет заряда с ВВ металлической "болванкой" в испытываемую металлоконструкцию

[5, 6]. Эти исследования подтвердили принципиальную возможность технологического применения энергии ВВ для высокоскоростной обработки металлов. По результатам выполненных исследований в области взрывной импульсной технологии штамповки металлов им были успешно защищены кандидатская и докторская диссертации. В 1954 году он стал доктором технических наук, а в 1955 году – профессором (заметим, что с этого времени и по 1972 год он был заведующим кафедрой технологии металлов и материаловедения ХАИ). Данная технология в 60-е годы ушедшего столетия была успешно внедрена на предприятиях Минобщемаша и Минсудпрома бывшего СССР при изготовлении крупногабаритных бесшовных изделий из титановых и ряда жаростойких сплавов для объектов специального назначения [6]. При этом толщина стенки обрабатываемых изделий из титановых сплавов составляла до 16 мм, их диаметр – до 1300 мм, а длина – до 4000 мм. Главными особенностями импульсной технологии обработки металлов взрывом ВВ являются [4,6]: во-первых, высокие скорости деформации деталей (до тысяч метров в секунду); во-вторых, сверхвысокие давления (до 10^5 атмосфер) на обрабатываемые поверхности деталей большой протяженности; в-третьих, возможность получения высоких значений коэффициента использования для деформации металла выделяемой ВВ химической энергии (порядка 70% и более); в-четвертых, возможности деформации толстостенных крупногабаритных деталей из труднодеформируемых металлов (титана и различных нержавеющих сталей), обусловленные большими запасами энергии (порядка 10 МДж) во ВВ сравнительно малого объема (порядка $0,001 \text{ м}^3$).

Новый внедренческий "виток" разработанная Пихтовниковым Р.В. и его учениками взрывная импульсная технология деформирования металлов повышенной прочности получила в начале 70-х годов с появлением такого дискретного источника импульсной химической энергии как бризантный (происходит от французского слова "brisant" – "дробящий" [7]) ВВ. На рис. 2 показан один из вариантов возможного использования бризантных ВВ при высокоскоростном деформировании листового металла в матрицу.

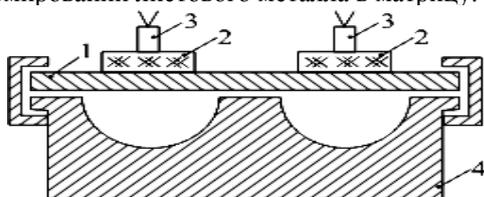


Рис. 2. Схема возможного применения бризантных ВВ при взрывном деформировании листовых металлов (1-обрабатываемая заготовка; 2-бризантное ВВ; 3-электродетонатор; 4-металлическая матрица)

Созданные в бывшем СССР промышленные участки и цеха по импульсной обработке высокопрочных металлов на основе взрывной технологии дали возможность получить на оборонных предприятиях советской страны экономический эффект порядка 1 миллиарда рублей [5]. На рис. 3 представлен сравнительно небольшой перечень металлических деталей, изготовленных с помощью взрывной импульсной технологии. На базе данной технологии только в ХАИ в советское время было защищено около 200 кандидатских и 30 докторских диссертаций [6]. В ХАИ бы-

ла создана известная научная школа по импульсной обработке металлов взрывом [8]. В 1986 году за разработку взрывной импульсной технологии обработки металлов профессору Р.В. Пихтовникову в составе авторского коллектива ученых и производственников советской страны была присуждена высокая государственная награда – премия СМ СССР (посмертно).

Несмотря на прошедший в Украине апогей первоначального этапа развития технологии обработки материалов взрывом и подстерегающие при этом обслуживающий соответствующее оборудование персонал опасности, обусловленные спецификой работы с ВВ, сейчас этот вид импульсной штамповки используется в промышленных условиях на ОАО "МоторСич" (г. Запорожье) при изготовлении деталей сложной конфигурации (диаметром до 1400 мм и толщиной до 3 мм) из жаропрочных, титановых и алюминиевых сплавов [9]. При этом в качестве ВВ используется порошкообразный аммонит №6ЖВ, детонирующий шнур ДШ и высоковольтные электродетонаторы типа ЭДВ-М. Кроме того, на ГП "КБ "Южное" им. М.К. Янгеля" (г. Днепропетровск) вот уже многие годы успешно функционирует экспериментально-промышленный комплекс по сварке взрывом многослойных композиционных металлических материалов, позволяющей создавать крупногабаритные конструкции для ракетно-космических комплексов с уникальными свойствами [10]. При этом толщина металлических композиций, получаемых при помощи взрывной импульсной технологии, может изменяться от 1 до 100 мм, а их диаметр до 1800 мм.

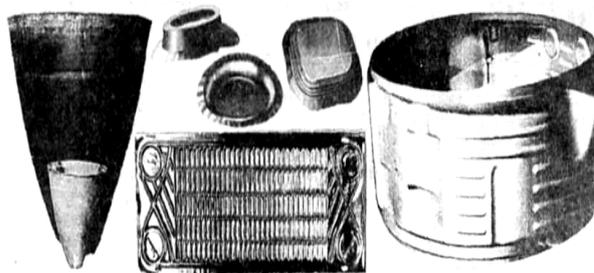


Рис. 3. Общий вид ряда металлических деталей, изготовленных как в лаборатории ХАИ, так и в промышленных условиях при помощи взрывной импульсной технологии

В настоящее время технология штамповки металлов энергией взрыва ВВ находит практическое исследовательское и промышленное применение в некоторых высокоразвитых странах мира (например, в США, России, Англии и Германии [11]). Необходимо обратить внимание читателя и на то, что серьезным препятствием для процесса широкого внедрения взрывной технологии обработки металлов является низкая степень автоматизации соответствующих технологических линий и участков, а также наличие на них большой доли ручного и весьма опасного труда.

2. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Первые исследования в области импульсной обработки металлов давлением, связанные с заменой энергии ВВ на энергию электрического взрыва (ЭВ) в жидкости или газе, были проведены в конце 50-х годов прошлого века такими советскими учеными как: Л.А. Юткиным, С.М. Поляком, А.П. Сорочинским, Ю.Е. Шамариным и др. [12]. Результаты этих техно-

логических исследований показали возможность использования электрогидравлического эффекта (ЭГЭ), возникающего в жидкости при ЭВ в ней инициирующих металлических проводников или при ее высоковольтном электрическом пробое, в условиях мелкосерийного производства деталей из листовых металлов.

В Украине работы по созданию и внедрению импульсной технологии обработки металлов на базе ЭВ и ЭГЭ были сконцентрированы с 60-х годов XX столетия в проектно-конструкторском бюро электрогидравлики (ПКБЭ) АН УССР (г. Николаев). Здесь с применением этой электроимпульсной обработки материалов первоначально были разработаны научные основы технологии запрессовки металлических труб в трубных решетках для теплообменных аппаратов (например, парогенератора типа ПГВ-1000 для атомных электростанций). Поисками оптимальных параметров этого электровзрывного технологического процесса занимались [12, 13]: А.И. Луковкин, В.Г. Степанов, А.П. Сорочинский, Б.Я. Мазуровский и др. Для ЭВ-запрессовки труб здесь были созданы специальные ЭВ-патроны и электротехнологические установки (например, типа Т0223, Т0226Б и др.). В дальнейшем благодаря использованию энергии ЭВ проводников были достигнуты определенные успехи в электроимпульсной сварке труб $\varnothing 16$ мм и толщиной 2,5 мм из нержавеющей стали (например, типа 10ГН2МФА или 10Х2М) с решетками из такой же стали указанных теплоэнергетических аппаратов. Данные работы позволили получать надежные сварные соединения труб с трубными решетками и обеспечивать в них герметичность до давлений пара в 300 атм. и более [12]. Благодаря научно-техническим работам в ПКБЭ АН УССР в этот период были созданы первые советские электрогидравлические установки (ЭГУ) для импульсной штамповки металлов ЭВ (например, типа Т1220, Т1226А и др.) [14]. На рис. 4 приведена принципиальная электрическая схема построения ЭГУ. Из данных рис.4 видно, что основное оборудование, входящее в состав ЭГУ, состоит из: генератора импульсных токов (ГИТ) 1, разрядной камеры 2 и электродной системы 3. В ЭГУ мощный ГИТ обычно строится на базе параллельно включенных высоковольтных малоиндуктивных конденсаторов. После заряда высоким постоянным напряжением U_3 положительной (отрицательной) полярности от повысительно-выпрямительного устройства (ПВУ) данные конденсаторы разряжаются через управляемый силовоточный коммутатор (УСК) на разрядный промежуток (РП) электродной системы 3, размещенной в жидкости 4 (обычно технической воде с электропроводимостью около 10^{-2} См/м [12]) разрядной камеры 2.

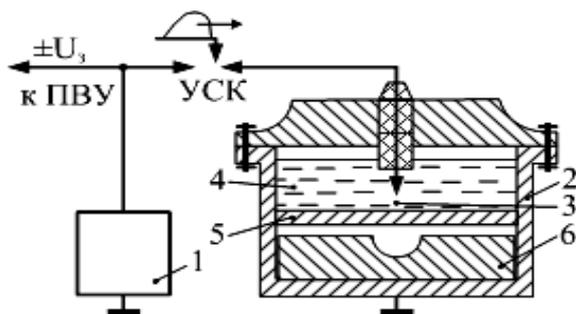


Рис. 4. Упрощенная схема ЭГУ для электровзрывной импульсной технологии штамповки листовых металлов

При инициировании разряда в электродной системе 3 за счет ЭВ металлических проводников или высоковольтного электрического пробоя указанного РП в электродной системе 3 происходит преобразование электрической энергии, запасенной в ГИТ, в энергию ударных волн, распространяющихся в жидкости разрядной камеры 2 во все стороны от РП. Импульсное воздействие данных волн (за время, измеряемое десятками микросекунд) приводит к формообразованию заготовки 5, расположенной в зоне действия ударных гидравлических нагрузок вблизи матрицы 6. Отметим, что на практике в ЭГУ используются электрические разряды с запасаемой в ГИТ электрической энергией от нескольких сот джоулей до сотен килоджоулей [12]. Основные электрофизические закономерности формирования токопроводящего канала в РП электродной системы 3 ЭГУ были исследованы в работах [15-18]. В [12] был сделан важный вывод о том, что в проводящих жидкостях, используемых при электрогидравлической импульсной обработке металлов, имеет место тепловое развитие их электрического пробоя. При этом скорость ввода энергии в жидкость вблизи заостренного потенциального электрода РП электродной системы 3 достигает значений порядка 10^{10} Вт/кг, обеспечивающих ее взрывное вскипание [12]. Следует заметить, что при рассматриваемой импульсной технологии обработки материалов давление на деформируемую деталь в зоне ЭВ достигает максимальных значений порядка 10^4 атмосфер, а максимальная температура в канале силовоточного подводного искрового разряда – значений порядка 10^5 К [12].

Электрогидравлическая или иначе называемая электровзрывная импульсная штамповка металлов охватывает практически все виды технологических операций, осуществляемых в области холодной обработки металлических заготовок давлением. Она наибольшее распространение получила при вытяжке, раздаче, калибровке и рельефной формовке металлических труднообрабатываемых деталей. Иногда этот вид импульсной обработки металлов может использоваться при вырубке, отбортовке и пробивке отверстий сложной формы в листовых заготовках. Вид выполняемой операции, форма и размеры изделия диктуют необходимые для его формообразования основные параметры импульсного электрофизического процесса в цепи ЭГУ: запасаемую в ГИТ электрическую энергию, которая определяет необходимое в жидкости деформирующее давление, и количество разрядных токовых импульсов от ГИТ, проходящих через РП в разрядной камере 2 (см. рис. 4) с жидкостью 4 и определяемых требуемой работой деформации для обрабатываемых изделий 5. Эффективность применения электровзрывной штамповки металлов определяется, главным образом, сокращением затрат на изготовление технологической оснастки и сроков подготовки производства к освоению выпуска новой номенклатуры деталей из металла [12].

Большой вклад в становление и развитие в Украине электровзрывной технологии обработки металлов был внесен доктором технических наук, профессором Гулым Григорием Афанасьевичем (рис. 5).

Профессор Гулый Г.А. долгое время возглавлял ПКБЭ АН УССР (в настоящее время данная научная организация носит название Института импульсных

процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины, директором которого является известный ученый в области высоковольтной импульсной техники и электротехнологий д.т.н., проф. Вовченко А.И.). Именно с его непосредственным участием в украинских академических организациях ПКБЭ и ИИПТ был разработан типоразмерный ряд ЭГУ для обработки металлов импульсным давлением [12, 19]. Данный ряд ЭГУ включал такие типы ЭВ-прессов как: Т1220, Т1223 и Т1226 на запаасаемую электрическую энергию в 10, 20, 40, 80 и 160 кДж. На рис. 6 приведена часть номенклатуры деталей из труднодеформируемых металлов и сплавов (например, нержавеющей стали), полученных на данных ЭВ-прессах при помощи ЭГЭ [12].



Рис. 5. Один из основоположников в СССР импульсной электротехнологии обработки металлов ударными нагрузками от ЭВ и ЭГЭ д.т.н., проф. Гулый Г.А. (1932-2000 гг.)

Мощные ЭГУ были использованы при штамповке и калибровке крупногабаритных деталей сложной формы из труднодеформируемых материалов при единичном и мелкосерийном производстве. При этом диаметр обрабатываемых в жидкости ударными волнами за счет ЭГЭ крупногабаритных оболочек толщиной до 3 мм достигал до 900 мм, а их длина – до 2400 мм [12, 19]. Применение ЭГУ в литейном производстве страны позволило осуществить технологические процессы очистки металлических отливок от формовочных смесей и выбивки из них формовочных стержней, что способствовало повышению уровня автоматизации и механизации на финишных операциях данного тяжелого с социально-гигиенических и экологических позиций промышленного производства. Этот способ очистки отливок от сопутствующих неметаллических материалов нашел широкое применение и в ряде зарубежных стран мира (например, в Японии, Российской Федерации и Китае) [12].



Рис. 6. Образцы металлических деталей, изготовленных с использованием электровзрывной импульсной технологии

В настоящее время электровзрывная импульсная технология нашла свое новое применение при обработке жидкого расплава или кристаллизующегося металла [20, 21]. Электровзрывное воздействие на расплав металла заключается в генерировании в нем путем ЭГЭ периодических акустических волн давления сравнительно низкой частоты, улучшающих гидродинамику перемешивания жидкого металла, а также процесс его кристаллизации и повышающих тем самым качество литого металла в разливочных ковшах и соответственно металлических слитков. При таком способе импульсной обработки расплавленного металла электроразрядными генераторами, содержащими мощные ГИТ, обеспечивается высокая пиковая мощность в воздействующем на металл электрическом импульсе (до 10^{10} Вт) и весьма широкий спектр частот в генерируемом через волновод импульсе волны давления на металл (от десятка герц до 3 кГц) [22].

В последние годы в ИИПТ НАН Украины были созданы специальные ЭГУ (типа "Скиф 4М"), предназначенные для интенсификации добычи нефти и природного газа [23, 24]. Следует отметить, что такому компактному высоковольтному электрогидравлическому погружному оборудованию приходится работать в неблагоприятных внешних условиях: давление в нефте- и газоносных пластах достигает до 500 атм., а температура – до 373 К [25]. Кроме того, чрезвычайно стесненные условия размещения в агрессивных средах глубинных ЭГУ (диаметр промышленных скважин не превышает 147 мм [12]) диктуют особые решения возникающих перед специалистами электротехнических задач (например, в области высоковольтной изоляции ГИТ при его длине до 5000 мм и элементов разрядного контура установки). Особенностью погружных ЭГУ с коаксиальной силовой электрической цепью разряда является то, что их высоковольтный импульсный конденсатор, газонаполненный высоковольтный коммутатор и разрядная электродная система помещаются в стальной трубчатый корпус малого диаметра (порядка 140 мм), опускаемый на высоковольтном кабеле в стальную обсадную трубу скважины на глубину в несколько сотен метров. Амплитуда разрядного тока в таких ЭГУ достигает до 15 кА при длительности первой полуволны около 15 мкс [24]. В настоящее время подобные погружные ЭГУ (типа "Скиф 140") нашли применение при электроимпульсной обработке водозаборных скважин с целью очистки призабойных зон и повышении производительности водных источников (их дебита) [26].

ЭГЭ нашел определенное применение и при полимеризации мономерных жидкостей в химическом производстве [27]. В СССР первыми в мире заменили компрессорный метод создания в химических автоклавах с полимеризуемым мономером высокого давления (до 100 атм. и выше) на электрогидравлический удар с импульсным давлением в десятки тысяч атмосфер, который за десятки микросекунд производит полимеризацию всей массы мономерной жидкости.

Следует указать и то, что сейчас электрогидравлическая импульсная технология достаточно активно внедряется и применяется при получении в мелкосерийном производстве фруктовых смесей [28], обеззараживании сокоотружечных смесей, соков [29] и инактивации микроорганизмов в жидких средах [30].

3. МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Метод магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) основан на технологическом использовании энергии сильных импульсных магнитных полей (СИМП). Возможности МИОМ были впервые продемонстрированы специалистами США в 1958 году с помощью опытной магнитно-импульсной установки (МИУ) типа "Magneform" на II-ой международной конференции по мирному использованию атомной энергии (г. Женева, Швейцария) [31]. Первая в мире промышленная МИУ типа "Magneform-1" была изготовлена в 1962 году известной американской фирмой *General Dynamics Corporation* [32]. В бывшем СССР работы по исследованию и разработке технологического оборудования для обработки металлов давлением СИМП были начаты в 1962 году в Научно-исследовательской лаборатории техники высоких напряжений и преобразователей тока (НИЛ ТВН и ПТ) Харьковского политехнического института (ХПИ, ныне он называется Национальный технический университет "ХПИ") под научным руководством известных электротехников (электрофизиков) Белого Игоря Васильевича (1927 г.р.) и Фертика Саула Марковича (1901-1986 гг.) (рис. 7). Первая отечественная опытно-промышленная установка типа МИУ-20/1 была изготовлена в 1964 году в НИЛ ТВН и ПТ ХПИ (сейчас данная научная организация Министерства образования и науки Украины носит название Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института "Молния", возглавляемого известным ученым в области электромагнитной совместимости и стойкости д.т.н., профессором Кравченко В.И.) [33]. На рис. 8 показана принципиальная электрическая схема разрядной цепи МИУ, используемой при импульсной обработке интенсивным магнитным давлением металлов различной геометрической формы.

Разрядный электрический контур любой МИУ согласно данным рис. 8 содержит мощный ГИТ 1, реализованный на основе высоковольтных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), который через УСК 2 разряжается на рабочий инструмент при МИОМ – индуктор 3 того или иного конструктивного исполнения в зависимости от выполняемой на МИУ технологической операции (например, обжима, раздачи и др.).



Рис. 7. Основоположники МИОМ в СССР: к.т.н., доц. Фертик С.М. (слева) и к.т.н., проф. Белый И.В. (справа) за опытным изготовлением алюминиевых деталей на первой установке типа МИУ-20/1 с запасаемой энергией в 20 кДж

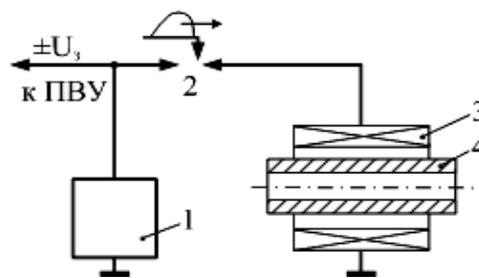


Рис. 8. Упрощенная электрическая схема разрядного контура МИУ при выполнении технологической операции обжима металлической детали энергией СИМП

В соответствии с рис. 8 рядом с индуктором 3 (через изоляционный зазор порядка одного миллиметра) расположена обрабатываемая деталь 4. Индуктор 3 представляет собой жестко закрепленную массивную электромагнитную катушку цилиндрической или плоской дисковой конфигурации. Электрический импульсный ток, протекающий по виткам индуктора 3, создает вне его витков СИМП, которое согласно закону электромагнитной индукции М. Фарадея [34] вызывает появление индуцированного импульсного тока в обрабатываемой проводящей детали 4, направление протекания которого определяется правилом Э. Ленца [35]. Электродинамическое взаимодействие токов неподвижного индуктора 3 и детали 4 приводит к появлению больших ударных электромеханических усилий (до сотен тонн), воздействующих на стенку деформируемого изделия. Уровни импульсного давления, действующего при МИОМ на изоляционные и металлические элементы конструкции индуктора и внутреннюю структуру металлической детали, достигают значений порядка $5 \cdot 10^3$ атмосфер, превышающих предел текучести многих изоляционных материалов и металлов. Поэтому самым электрически и механически нагруженным элементом разрядной цепи МИУ является ее рабочий инструмент – индуктор. Именно электродинамическая стойкость индуктора и определяет, в основном, при МИОМ рабочий ресурс электротехнологического оборудования, его эксплуатационные характеристики и соответственно производственные возможности данного вида импульсной технологии обработки тонкостенных металлов.

Начиная с 70-х годов прошлого века, к проблеме МИОМ в ХПИ активно подключился один из ведущих разработчиков МИУ и индукторных систем к.т.н. Хименко Лев Тимофеевич (1930-2004 гг.), защитивший в 1986 году докторскую диссертацию в рамках работ по данной технологии и многие годы возглавлявший в ХПИ известную в Украине и за ее пределами научно-исследовательскую лабораторию МИОМ (рис. 9). Именно на этот период научно-технической деятельности д.т.н., проф. Л.Т. Хименко в области МИОМ и пришелся апогей развития в ХПИ и на Украине этого вида импульсной электротехнологии [36].

На рис. 10 представлена основная номенклатура металлических деталей, полученных в ХПИ и на предприятиях страны при помощи импульсной технологии МИОМ, базирующейся на разработках харьковских ученых. Заметим, что при данной технологии амплитуды импульсных экспоненциально затухающих синусоидальных токов с частотой колебаний до 120 кГц в разрядной цепи МИУ (при запасаемой энергии в ЕНЭ до 240 кДж) и обрабатываемой детали составляют до 150 кА, а уровни СИМП – до 200 кЭ [37].



Рис. 9. Новаторы, изобретатели и друзья-электрофизики: д.т.н., проф. Хименко Л.Т. (слева) и к.т.н., проф. Белый И.В. (справа) за обсуждением нового технического решения в области МИОМ



Рис. 10. Номенклатура деталей, изготавливаемых харьковскими политехниками с использованием энергии СИМП

За большие достижения в разработке и внедрении в производство магнитно-импульсной технологии обработки металлов в 1982 году сотрудникам ХПИ доц. Белому И.В. и к.т.н. Хименко Л.Т. была присуждена высокая и престижная в научно-технических кругах государственная награда страны – премия СМ СССР. Практика использования технологии МИОМ показала, что наиболее рациональными областями использования в производстве энергии СИМП и соответственно МИУ являются сборочные операции путем наружного обжима деталей, внутренней раздачи обечаек и плоской листовой штамповки изделий [36].

Благодаря, прежде всего, усилиям вышеназванных основоположников и активных продолжателей в Украине дела МИОМ, а также научно-техническим разработкам в ХПИ их учеников и многих других ученых в области магнитно-импульсной технологии штамповки электропроводящих материалов (например, д.т.н., проф. Михайлова В.М., д.т.н., проф. Батыгина Ю.В., д.т.н., с.н.с. Баранова М.И., д.т.н., проф. Рудакова В.В., д.т.н., проф. Лавинского В.И., к.т.н., доц. Хвороста В.Ю., к.т.н. Горкина Л.Д., к.т.н., доц. Бондиной Н.Н., к.т.н., доц. Бондаренко А.Ю., к.т.н., доц. Леденева В.В. и др.) в НТУ "ХПИ" была создана научная школа по обработке металлов давлением СИМП [38-43]. В данной школе было успешно защищено около 20 кандидатских и 6 докторских диссертаций. В настоящее время в НТУ "ХПИ" для дальнейшего развития технологии МИОМ активно проводятся работы по деформированию энергией СИМП тонкостенных металлических деталей, толщина стенки которых соизмерима или меньше размеров токового скин-слоя в них (например, медных печатных плат толщиной до 50 мкм) [42, 44], а также исследования, связанные не с традиционным отталкиваем от индуктора на металлическую или диэлектрическую матрицу

деформируемой металлической детали, а с ее притяжением к рабочему инструменту-индуктору [45-48].

Отметим, что за рубежом в настоящее время технология обработки металлов давлением СИМП также находит определенное применение (например, в авиационной промышленности). Так, сейчас в России успешно функционирует Центр разработки и исследования магнитно-импульсных технологий (г. Самара), возглавляемый д.т.н., проф. В.А. Глушченковым [49]. На рис. 11 показана сравнительно небольшая часть деталей из алюминиевых сплавов толщиной до 3 мм, выполненных в указанном научно-техническом Центре МИОМ путем технологического применения высоких плотностей энергии импульсного магнитного поля в производственных интересах российских предприятий, занимающихся самолетостроением.



Рис. 11. Номенклатура алюминиевых деталей, изготавливаемых сейчас в российском Центре МИОМ (г. Самара)

4. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Электроискровое диспергирование (от латинского слова *"dispergere"* – "измельчение" [7]) сплавов, металлов и их соединений, базирующееся на электроэрозионных явлениях [50], нашло свое практическое применение в конце XX века при лабораторном и промышленном получении искроэрозионных порошков с микронными и наноструктурными частицами [51]. А начиналось все для этого электроимпульсного метода обработки металлических материалов с работ известных советских ученых Лазаренко Б.Р. и Лазаренко Н.И. в 60-е годы прошлого столетия [52]. Этими научно-исследовательскими работами было положено начало размерной искровой электрической эрозии металлических деталей и ее использованию в научно-технических и технологических целях. Как известно, при размерной искровой эрозии используется только один разрядный промежуток между верхним металлическим электродом, подключенным к источнику импульсного напряжения (ИИН), и обрабатываемой деталью (нижним электродом) [52]. Электрическое напряжение U_p , подаваемое от ИИН на разрядный промежуток между верхним электродом и металлической деталью, составляет при этом примерно 50 В. Смещение (миграция) искрового плазменного канала по поверхности эрозируемой детали происходит при таком методе импульсной обработки лишь в сравнительно небольшой локальной области, соизмеримой с размерами эрозионных лунок (кратеров) на обрабатываемой поверхности детали. Результаты исследований, полученные для размерной искровой эрозии, свидетельствовали о том, что длительное импульсное электроискровое воздействие на практически одну и ту же приэлектродную область детали не способствует получению мелкодисперсных эрозионных частиц металла обрабатываемой детали, поступающих в разрядный промежуток с слабопроводящей жидкостью. Кроме того, наличие в промежутке одного искрового

плазменного канала (пусть даже сильноточного) не обеспечивает требуемой производительности процесса получения металлического порошка [53].

Далее последовали работы по линейной искровой эрозии [54], где металлические детали (гранулы) выстраиваются в одну цепочку, образуя последовательную цепь множества разрядных промежутков между гранулами вдоль направления протекания импульсов тока от ИИН к непотенциальному (нижнему) электроду разрядной технологической камеры. В этом случае уровень напряжения U_p между верхними и нижними эрозируемыми гранулами составляет уже порядка 10 кВ. Число электроискровых контактов при линейной искровой эрозии металлических гранул может достигать нескольких сотен, а удельная объемная электрическая энергия, выделяющаяся при этом в единичном искрящем контакте, оказывается меньшей, чем для размерной искровой эрозии [53]. Что касается миграции искровых плазменных каналов по поверхностям обрабатываемых гранул за пределами образуемых на них эрозионных лунок, то и для данного метода электроискрового диспергирования она весьма затруднена и соответственно незначительна.

Данное обстоятельство заставило многих исследователей в разных странах мира обратиться к объемной искровой эрозии металлических гранул и соответственно к их объемному электроискровому диспергированию в жидкости (например, воде, спирте и др.) [55, 56]. Суть такого диспергирования заключается в формировании многоканальных быстросмещающихся искровых разрядов в слоях металлических гранул, расположенных в диэлектрической жидкости разрядной камеры между ее металлическими электродами. Следует отметить, что в плазменных каналах таких электрических микроразрядов температура принимает значения порядка 10^4 К, а давление – не менее 3000 атм. [53,56]. Значительный вклад в Украине в изучение и практическую реализацию этого метода импульсной электроискровой обработки токопроводящих материалов и получения на его основе субмикронных и наноструктурных частиц (порошков) внесли такие известные ученые из Института электродинамики (ИЭД) НАН Украины как: д.т.н., проф., чл.-корр. НАНУ Щерба А.А., д.т.н., проф., чл.-корр. НАНУ Волков И.В., д.т.н., проф., чл.-корр. НАНУ Резцов В.Ф., д.т.н., проф., акад. НАНУ Шидловский А.К., д.т.н., с.н.с. Подольцев А.Д. и др. [55-58]. Данный метод предполагает одновременное существование электроискровых плазменных каналов в слоях обрабатываемых металлических гранул, состоящих из множества последовательно-параллельно включенных цепочек из этих токопроводящих гранул диаметром до нескольких миллиметров при подаче на них от ИИН электрических импульсов напряжением до 1 кВ [59]. Несмотря на то, что в этом методе импульсной электротехнологии объемная плотность электрической энергии в приконтактных зонах имеет достаточно низкие значения (меньшие, чем при размерной и линейной искровой эрозии), однако миграция плазменных каналов здесь благодаря большому количеству вероятностных искровых контактов для гранул оказывается наибольшей. Динамика и особенности протекания электроискровых процессов при объемном диспергировании токопроводящих материалов (при импульсных токах в разрядной камере с грану-

лами до 10 кА) позволяют получать субмикронные токопроводящие порошки с размером частиц порядка 50 мкм. На рис.12 приведена принципиальная электрическая схема установки для объемного электроискрового диспергирования токопроводящих гранул.

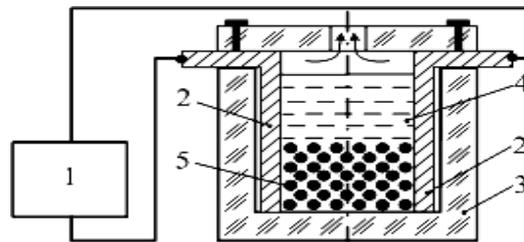


Рис. 12. Упрощенная электрическая схема установки объемного электроискрового диспергирования в жидкости электропроводящих гранул (1 - генератор разрядных токовых импульсов; 2 - электроды разрядной камеры; 3 - изоляционный корпус разрядной камеры; 4 - диэлектрическая жидкость; 5 - металлические гранулы)

На рис. 13 показан внешний вид лабораторного оборудования ИЭД НАНУ (г. Киев) для исследования технологических режимов объемного электроискрового диспергирования в диэлектрической жидкости токопроводящих гранул из различных материалов. Данное оборудование в настоящее время при получении мелкодисперсных порошков (с размерами частиц меньше 50 мкм) позволяет достигать производительности до 10 кг/ч [51, 55, 58]. С помощью таких импульсных электрофизических систем сейчас как лабораторными, так и промышленными способами специалисты получают токопроводящие порошки из сплавов с мартенситным преобразованием [60], дисперсно-упрочненных платиновых сплавов [61], оксида алюминия [55, 62] и сверхтвердых сплавов типа *W-Co* [63]. Удельные затраты электроэнергии при объемном электроискровом диспергировании указанных сплавов лежат в пределе от 2 до 15 кВт·ч/кг [53].



Рис. 13. Общий вид лабораторной установки ИЭД НАНУ для объемного электроискрового диспергирования сплавов

5. КОМПЛЕКСНАЯ ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Возможности технологического использования высоковольтной импульсной техники (ВИТ), как показано в [64], могут быть достаточно широки и велики. Одной из новых импульсных электротехнологий на основе ВИТ, разработанной в последнее время в Украине сотрудниками НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ", стала технология обработки различных твердых, сыпучих и жидких материалов на основе ком-

плекса высоковольтных импульсных воздействий (КВИВ–технология) [65–68]. Для данной технологии здесь были созданы специальные электрофизические установки (ЭФУ) на рабочем импульсном напряжении порядка 100 кВ (рис.14).



Рис. 14. Внешний вид электрофизической установки НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" для КВИВ-обработки сыпучих и жидких материалов

Данные ЭФУ содержат следующие основные элементы [68]: малогабаритные компактные генераторы высоких импульсных напряжений на основе импульсного повышающего трансформатора; высоко-точные многоззорные искровые разрядники; рабочие камеры (РК) с испытываемыми материалами. Генераторы ЭФУ обеспечивают подачу высоковольтных коротких импульсов напряжения (с длительностью фронта около 20 нс, частотами на фронте порядка 10^7 Гц и полной длительностью не более 1 мкс) на РК (камера выполняется заодно с системой полеобразования и энерговыделения) с амплитудой до 150 кВ и частотой следования до 500 Гц [67, 68]. В этих ЭФУ с рабочим ресурсом до 10^{11} электрических включений благодаря применению обостряющих систем, содержащих специальные высоковольтные емкости и разрядники, обеспечивается достижение в РК с испытываемым материалом сильных импульсных электрических полей (СИЭП) с уровнем напряженности до 10^7 В/м [68]. Проведенные в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" многолетние исследования научной группой, возглавляемой д.т.н., с.н.с. Бойко Н.И., показали, что такие уровни импульсов СИЭП с приведенными выше значениями длительностей фронта и спада в РК для КВИВ–технологии способны обеспечить микробиологическую обеззараживающую и инактивирующую обработку различных текучих продуктов в потоке, в том числе и пищевых продуктов [65–68].

Следует подчеркнуть, что основным воздействием на обрабатываемый материал фактором в КВИВ–технологии является СИЭП с указанными выше амплитудно-временными параметрами (АВП). Кроме того, в данной технологии в комплексном синхронном единении используются и иные воздействующие факторы: СИМП, импульсные токи проводимости и смещения в материале, различные формы электрических разрядов в обрабатываемом продукте (например, импульсный искровой и импульсный коронный разряды), а также быстро нарастающие температура и импульсное давление в РК с испытываемыми

материалами. Отметим и то, что, несмотря на комплексность, сложность и недостаточную изученность механизмов действия на обрабатываемый материал в КВИВ–технологии, к настоящему времени однозначно установлено следующее [68]: механизм поражающего (повреждающего) воздействия СИЭП на микроорганизмы связан с тем или иным силовым действием поля на мембраны их клеток, вызывающим в них достижение порогового уровня трансмембранного электрического потенциала до 1 В. Поэтому разработанная упомянутой научной группой концепция рационального воздействия указанных СИЭП при КВИВ–обеззараживающей и КВИВ–инактивирующей технологии заключается в многократном воздействии на обрабатываемый материал высоковольтными короткими и короткими импульсами напряжения с приведенными АВП и частотами их следования. Сейчас разработанное и созданное в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" высоковольтное электрофизическое оборудование для относительно "молодой" КВИВ–технологии, используемое в лабораторных и производственных условиях, способно обеспечить обработку текучих в потоке продуктов с производительностью до $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ [67, 68]. Заметим, что данное оборудование защищено рядом отечественных и зарубежных патентов на изобретения [69, 70].

6. ШИРОКОПОЛОСНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕРАПЕВТИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

В НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" на основе терапевтического приложения КВИВ–технологии и определенного медико-биологического подхода сравнительно недавно была разработана широкополосная электромагнитная технология импульсной терапии (ШЭМИТ–технология) [71, 72]. В отличие от широко известных технологий терапевтической направленности в ШЭМИТ–технологии, использующей искровой метод воздействия от соответствующего электрофизического устройства (аппарата) на поверхность биологического объекта (например, человека), обеспечивается точечное действие основанием одной искры (с характерным поперечным диаметром ее токового канала около 10 мкм [68]) или рядом искр при многоканальном электрическом разряде от аппарата на различные акупунктурные точки пациента. При прохождении с помощью такой терапевтической технологии лечебной процедуры основание электрической искры от аппарата может за счет перемещения его аппликатора легко и плавно перемещаться по телу пациента. Для клинической апробации оздоравливающей ШЭМИТ–технологии в указанной ранее научной группе под руководством д.т.н., с.н.с. Бойко Н.И. был разработан и создан соответствующий аппарат, названный харьковскими разработчиками "АШЭМИТ" (аппарат широкополосной электромагнитной импульсной терапии) [71]. Согласно [68, 71] данный аппарат (рис. 15) состоит из двух основных блоков: управляющего электронного и формирующего электромагнитного.

На выходе этого аппарата (в ТЕМ-рупорной антенне-аппликаторе) вырабатываются упорядоченные низкоэнергетические электромагнитные импульсы. Эти импульсы могут представлять собой импульсы электромагнитного поля, напряжения, тока, а также комбинированные импульсы в виде слаботочных ис-

кровых разрядов на тело пациента с коротким фронтом [68]. Каждый такой импульс может содержать широкий спектр частот (от 0 до примерно 10 ГГц). Одной из характерных особенностей импульсов, получаемых "АШЭМИТ", является высокая для них импульсная пиковая мощность (до 10^5 Вт) при их сравнительно низкой средней мощности (около 1 Вт). На рис. 16 приведена упрощенная схема искрового слабotoчного терапевтического воздействия электрической искры от "АШЭМИТ" на биологический объект (например, тело пациента [68]).



Рис. 15. Внешний вид терапевтического аппарата "АШЭМИТ" харьковских политехников

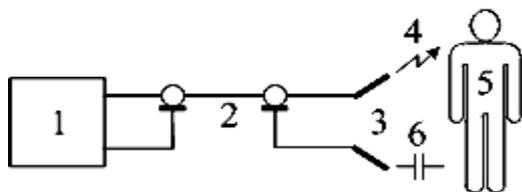


Рис. 16. Схематическое изображение искрового терапевтического воздействия от "АШЭМИТ"

(1- терапевтический аппарат, формирующий лечебные электрические импульсы; 2- передающий электрические импульсы коаксиальный кабель; 3- аппликатор в виде ТЕМ-рупорной антенны; 4- электрическая искра между потенциальным электродом аппликатора и телом пациента; 5- тело пациента; 6- электрическая емкость между низковольтным электродом аппликатора и телом пациента)

Клиническая апробация созданного харьковскими специалистами "АШЭМИТ" показала, что длительность лечебной процедуры с использованием открытого слабotoчного искрового разряда от указанного терапевтического аппарата на пациента может не превышать 5 мин [72]. При этом было установлено, что воздействующие от "АШЭМИТ" на человеческий организм низкоэнергетическое импульсное электромагнитное поле, низкотемпературная плазма от искрового электрического разряда, слабоэнергетическое электромагнитное излучение от искрового разряда, аэроионы и озон в гомеопатических дозах дают хорошие результаты при лечении пациентов, страдающих весьма распространенными заболеваниями: гипертонической болезнью, вертебральным остеохондрозом и деформирующим остеоартрозом [72]. Апробация рассматриваемого аппарата достоверно продемонстрировала, что терапевтическая и сравнительно "молодая" ШЭМИТ-технология, кроме того, позволяет снимать болевые синдромы (резкие боли у пациента могут прекращаться после нескольких процедур в режиме лечения – одна процедура в сутки [68]).

7. КАВИТАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Согласно [7] термин "кавитация" происходит от латинского слова "cavitas", означающего "полость" или "пузырь". Поэтому физическое явление кавитации можно трактовать как быстропотекающие процессы образования пузырьков в движущейся жидкости или в покоящейся жидкости под действием ультразвука, сопровождающиеся их лопанием. Это явление основано на бурном выделении из жидкости растворенных в ней газов в случае, когда в жидкости давление падает до величины давления насыщенных паров соответствующих газов. При этом в выделяющихся из жидкости газах одновременно протекают и процессы интенсивного парообразования. Поэтому, например, холодная вода при таких процессах просто закипает. А, как известно, процесс кипения жидкости сопровождается образованием множества газовых пузырьков [73]. При движении жидкости или газовых пузырьков в область повышенного давления имеет место обратный процесс: конденсация паров газа и исчезновение пузырьков. Эти газовые пузырьки при этом начнут лопаться. Смыкание при таких условиях за миллисекунды стенок пузырьков вызывает локальные скачки давления в жидкости. Эти скачки давления в жидкости (например, воде) могут достигать до сотен тысяч атмосфер [27, 73]. Каждый газовый пузырек исчезает, будучи оставив за собой своеобразный "след" – точечный импульсный гидравлический удар. Данные скачки давления и соответственно динамические импульсные гидравлические удары в жидкости будут происходить локально (точно) в зоне конденсации газовых паров. Поэтому для металлической конструкции, например, подводного крыла пловущего с относительно большой скоростью (100 км/ч и более) надводного корабля, эти точечные гидравлические удары-уколы будут подобны действию мощных "иголок". Причем, для металлоконструкции, оказавшейся в зоне действия указанных быстро лопающихся газовых пузырьков, таких импульсных микрогидравлических "уколов" будут мириады. Именно эти точечные гидравлические микроудары-уколы и начнут разрушать и "съедать" поверхность металлоконструкции. На ее стенке вначале появятся локальные гидроэрозионные кратеры, потом раковины, а затем и сквозные дыры. Вот так вкратце происходит весьма распространенное в гидравлической технике и на водном транспорте гидродинамическое явление кавитации и ее пагубное техническое проявление. Оно происходит в технике всюду, где изменение профиля обтекаемого жидкостью тела из любого материала вызывает местное возрастание ее скорости, а значит, и местное падение давления в жидкости. Кавитация – первейший "враг" гидравлической техники, приводящий к ее быстрому износу. Особенно это касается гидронасосов, рабочих колес гидротурбин, металлических корпусов и винтов морских и речных судов.

Можно ли использовать мощные импульсные гидроудары микроскопических водяных пузырьков для технологических позитивных целей при обработке материалов? Оказалось, что можно. Разрушительная способность кавитации была использована инженерно-техническими специалистами при очистке (например, от окалина, загрязнений и заусенцев) наружных поверхностей металлических деталей и обработке от формовочных материалов металлических изделий,

получаемых в литейном производстве. На рис. 17 приведена упрощенная схема кавитационной установки (КУ), предназначенной для обработки с высокой чистотой в производственных условиях деталей из металла. Согласно схеме на рис. 17 высокочастотный электрический ток, протекающий от генератора токовых импульсов 6 по соленоиду 4, создает ультразвуковые колебания сердечника 5, изготовленного из магнитострикционного материала. Эти колебания сердечника 5 вызывают в ванне 1 с жидкостью 3 (в указанную ванну обычно заливается техническая вода) кавитационные процессы и соответственно появление кавитационных пузырьков в жидкости 3. Обрабатываемые детали 2, расположенные на дне ванны 1, будут подвергаться сильным микрогидроударам от лопающихся кавитационных пузырьков.

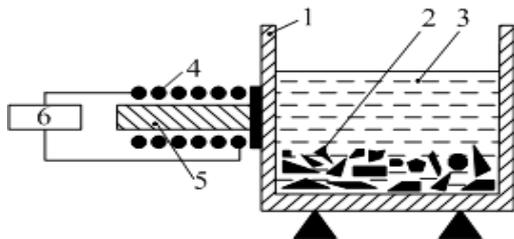


Рис. 17. Принципиальная схема КУ для импульсной обработки металлических изделий (1- ванна; 2- обрабатываемые детали; 3- жидкость; 4- соленоид; 5- магнитострикционный сердечник; 6- импульсный источник питания)

Оказалось, что при этом механическая обработка поверхностей металла осуществляется с такой чистотой, достичь которой другими известными способами практически невозможно [27]. Кавитационный способ импульсной обработки материалов оказался способным достигать зеркальной поверхности на обрабатываемых металлических изделиях. Можно ожидать, что в ближайшем будущем кавитационная технология обработки материалов станет конкурентноспособной и широко используемой при достижении наиболее чистовой обработки металлических поверхностей ответственных промышленных и бытовых изделий.

8. КОРОННО-ОЗОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Электрический коронный разряд, возникающий в высоковольтной цепи воздушного промежутка между металлическими электродами той или иной геометрической формы при постоянном, переменном и импульсном напряжении, находит уже не одно десятилетие практическое применение в электрофизических технологиях [64, 74, 75]. Известно, что любой коронный разряд с металлического электрода по существу является незавершенным электрическим разрядом, не переходящим в дальнейшую стадию искрового и дугового разрядов [76]. Основным технологическим направлением при использовании классического импульсного коронного разряда (ИКР) стало получение озона из атмосферного воздуха в электродных системах (ЭС) с резконеоднородным электрическим полем. Следует отметить одно важное обстоятельство, характерное для этого известного и весьма хорошо изученного явления в области плазменных технологий, вызываемого импульсами напряжения от ИИН, лежащими в микро- и наносекундном временных диапазонах: зона ионизации такого импульсного коронного разряда занимает незначительную часть разрядного

промежутка в ЭС [68]. Поэтому известные импульсные электротехнологии получения озона, базирующиеся на классическом коронном разряде (включая барьерный вид этого разряда [75]), обладают существенным недостатком – низкой эффективностью и соответственно недостаточной производительностью.

В НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" д.т.н., с.н.с. Бойко Н.И. и коллегами-единомышленниками его научной группы недавно был исследован и предложен для практического использования в коронно-озонных (плазменных) импульсных электротехнологиях новый вид ИКР – коронный разряд в воздухе с расширенной зоной ионизации и характерным сиренево-синим цветом свечения [77]. Данный вид ИКР с электрофизических позиций существенно отличается от известных коронных разрядов [67, 76]: во-первых, увеличенной скоростью нарастания импульсов напряжения (с амплитудой до 100 кВ) и напряженности электрического поля в ЭС (при наносекундных длительностях фронтов и полных длительностях их импульсов до 30 мкс); во-вторых, резко увеличенными размерами "чехла" короны в воздушном промежутке коаксиальной ЭС (50 мм и более). В [68, 77] были предложены апробированные в лабораторных условиях электрические схемы и конструкции специальных генераторов высоковольтных импульсов напряжения и коаксиальных многодисковых ЭС, применяемых для получения ИКР с расширенной зоной ионизации. Результаты экспериментальных исследований согласно [68, 77] по генерированию озона в воздушной среде атмосферного давления с помощью ИКР с расширенной зоной ионизации свидетельствуют о том, что при предложенном харьковскими учеными-политехниками виде мощного ИКР (рис. 18) можно получать устойчивое "горение" микроканалов коронного разряда с амплитудой суммарного импульсного тока до 800 А (в обычном импульсном коронном разряде ток не превышает 20 мА [78]). В ЭС при этом времени нарастания импульсов напряжения и тока, подаваемых на ее коаксиальные металлические электроды с частотой до 2 кГц, составляют около 7 нс [68, 77].

Благодаря использованию ИКР с расширенной зоной ионизации в примененной согласно рис. 18 коаксиальной системе металлических электродов (внутренний диаметр внешнего электрода – 150 мм, наружный диаметр внутренних и расположенных с шагом 8 мм дисковых коронирующих электродов – 50 мм) длиной 3200 мм в ЭС была достигнута концентрация озона до 10 г/м³ без предварительной подготовки используемого в ней атмосферного воздуха. Отсутствие в разработанных НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" генераторах озона нового поколения диэлектрического барьера, обязательного в традиционных озонаторах [80], большие по длине и ширине ЭС размеры зоны коронирования и указанные выше высокие показатели достигнутой концентрации озона в рабочем атмосферном воздухе позволяет достаточно обоснованно сделать вывод о перспективности таких плазменных озонаторов, базирующихся на применении ИКР с расширенной зоной ионизации. Отметим, что приоритет в этой научно-технической области создания харьковскими специалистами озонаторов, работающих на новых электрофизических принципах, подтвержден соответствующими отечественными и зарубежными патентами на изобретения [81, 82].

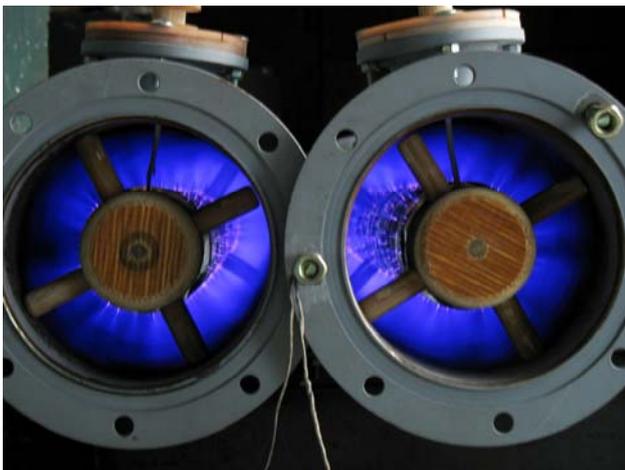


Рис. 18. Внешний вид ИКР с расширенной зоной ионизации одновременно в двух высоковольтных коаксиальных электродных системах – электрофизических реакторах

Накопленный опыт в области КВИВ-технологии и импульсной электротехнологии производства озона позволил создать в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" в 2006 году высоковольтное электрофизическое оборудование, предназначенное для конверсии (этот термин происходит от латинского слова "*conversion*" – "*превращение*" или "*изменение*" [7]) токсичных газообразных отходов при помощи ИКР с расширенной зоной ионизации [83]. Основные технические характеристики этого высоковольтного оборудования были приведены авторами данной разработки (сотрудниками научной группы д.т.н., с.н.с. Бойко Н.И.) в [83]: номинальная мощность – 0,5 кВт; амплитуда рабочего импульсного напряжения на коаксиальной коронирующей ЭС (трубчатом реакторе) – до 70 кВ; частота следования электрических импульсов на ЭС – до 2500 имп/с; производительность – до 50 м³/ч; удельные затраты электроэнергии – до 0,01 кВт·ч/м³. Важно отметить, что электрофизическая установка харьковских политехников была в 2007 году встроена в уже имеющуюся на производственном специализированном предприятии "ЭЛГА" (г. Шостка, Сумской обл.) технологическую цепочку конверсии газов химическими методами. Длительная и безотказная работа указанной установки в промышленных условиях дала прекрасные результаты: заводские замеры концентрации вредных веществ на выходе трубчатых металлических реакторов, использующих ИКР с расширенной зоной ионизации, показали, что в выбрасываемых в атмосферу после электрофизической очистки токсичных газообразных отходов газах отсутствуют такие не удаляемые ранее химическим путем соединения как сернистый ангидрид и окись углерода [83].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Потребности производства, науки и техники объективно стимулируют в передовых странах мира развитие новых и дальнейшее усовершенствование существующих технологий энергосилового обработки металлических и иных материалов. Прежде всего, это касается прогрессивных импульсных технологий, обеспечивающих решение сложных задач пластического деформирования труднообрабатываемых тонко- и толстостенных металлов, получения новых композиционных материалов, энерго- и ресурсосбережения и улучшения экологии окружающей среды.

2. Представленный впервые в отечественной и зарубежной научной публицистике в форме комплексного обзора научно-технический материал по импульсным методам обработки вещества различного агрегатного состояния свидетельствует о том, что украинские ученые и специалисты стояли у истоков основных импульсных технологий обработки металлических материалов (взрывной, электрогидравлической и магнитно-импульсной) и успешно продолжают дальнейшее развитие такой сравнительно "старой" импульсной электротехнологии обработки металлов как электроэрозионная и таких относительно "молодых" импульсных электротехнологий обработки твердых, жидких и газообразных материалов как КВИВ-технология, ШЭМИТ-технология и коронно-озонная.

3. Научно-исследовательские организации Украины, несмотря на свои ограниченные финансовые ресурсы, а также на их недостаток в наукоемких отраслях нашего промышленного производства, в настоящее время по-прежнему обладают наиболее значительными в мире научно-техническими и производственно-практическими потенциалами в области разработки и применения импульсных электротехнологий обработки различных материалов для научных и промышленных целей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Горбулин В.П., Довгопольный А.С. и др. Оборонно-промышленный комплекс Украины – современное состояние и реконструкция // Технологические системы. - 2001. - №2(8). - С. 5-20.
- [2] Баранов М.И. Ноосфера природы и новая концепция развития науки в человеческом обществе // Электротехника і електромеханіка.- 2005.- №3.- С. 91-92.
- [3] Химическая энциклопедия: В 5 т., т. 3 // Под ред. И.Л. Кнунянца. - М.: Большая Российская энциклопедия, 1992. - 639 с.
- [4] Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии / Под ред. В.Н. Карнюшина. Минск: Наука и техника, 1983. - 151 с.
- [5] Зеленина Е. Взрыв созиданий// Харьковская газета "Время", №186 (15895) от 17.10.2007 г.
- [6] Кривцов В.С., Борисевич В.К. Состояние и перспективы применения импульсных источников энергии для технологических процессов обработки материалов // Авиационно-космическая техника и технология.-2007.-№11(47).-С.10-17.
- [7] Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. - М.: Русские словари, 2004.- 957с.
- [8] Пихтовников Р.В., Завьялова В.И. Штамповка листового металла взрывом.- М.: Машиностроение, 1965.-175с.
- [9] Богуслаев В.А., Гавриш О.И., Стадник С.А. Штамповка листовых деталей взрывом на ОАО "Мотор-Сич" // Авиационно-космическая техника и технология. - 2007. - №11(47). - С. 192-195.
- [10] Резниченко В.И., Пахомов С.Н., Мостипан С.Е. Экспериментально-промышленный комплекс сварки взрывом государственного предприятия "Конструкторское бюро "Южное" им. М.К. Янгеля" // Авиационно-космическая техника и технология.- 2007.- №11(47).- С. 102-108.
- [11] Сигало В.Г., Рябовол А.А. Ресурсосберегающие технологии в машиностроении// Технологические системы.-2001.- №1 (7). - С. 12-17.
- [12] Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий.- Киев: Наукова думка, 1990.-208с.
- [13] Мазуровский Б.Я. Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов.- Киев: Наукова думка, 1980.-172с.
- [14] Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта/ Под ред. Г.А. Гу-

- лого.- М.: Машиностроение, 1977.-320с.
- [15] Комельков В.С. Развитие импульсного разряда в жидкости // Журнал технической физики.-1961.-Том 31.- Вып.8.- С. 948-960.
- [16] Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей.- Томск: ТГУ, 1975.-356 с.
- [17] Швец И.С. К определению удельной электропроводности плазмы подводного искрового разряда // Теплофизика высоких температур.-1980.-Том 18.-№1.-С. 1-8.
- [18] Вовченко А.И., Посохов А.А. Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах.- Киев: Наукова думка, 1992.-168 с.
- [19] Мазуровский Б.Я., Сизев А.Н. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке.- Киев: Наукова думка, 1983.- 192 с.
- [20] А.с. №519899 СССР, МКИ В22D27/08. Способ виброимпульсного воздействия на расплав // В.А. Корытов, П.П. Малошевский, Г.А. Гульи и др.- Оpubл. 1979.- Бюл. №35.
- [21] Малошевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии.- Киев: Наукова думка, 1983.-272с.
- [22] Поздеев В.А., Царенко П.И., Малошевский П.П. и др. Электроразрядные генераторы упругих колебаний.- Киев: Наукова думка, 1988. - 198с.
- [23] Макусов Р.А., Сизоненко О.Н., Малошевский П.П. и др. Использование электровзрывного воздействия на призабойную зону// Нефтяное хозяйство.- 1985.- №1.- С.34-35.
- [24] Дубовенко К.В., Курашко Ю.И., Климанский Н.Н. и др. Исследование процессов, влияющих на электромагнитную совместимость оборудования ГИТ погружных установок для обработки призабойных зон скважин// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка.- Харків: НТУ "ХПІ".- 2004.- №4.- С. 49-53.
- [25] Хвоцан О.В., Сизоненко О.Н., Курашко Ю.И. и др. К выбору параметров генератора импульсных токов установок погружного типа // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг.- Харків: НТУ "ХПІ".- 2005.- №49.- С.111-119.
- [26] Жекул В.Г., Барабашова Г.А., Дубовенко К.В., и др. Электрические и гидродинамические характеристики разряда при импульсной обработке водяных скважин // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка.- Харків: НТУ "ХПІ".- 2004.- №35.- С. 197-203.
- [27] Фрадкин Б.З. Белые пятна безбрежного океана.- М.: Недра, 1976.-104 с.
- [28] Попова И.В., Маринин А.И., Украинец А.И. и др. Получение фруктово-олигосахаридных смесей с помощью электроимпульсных технологий // Электронная обработка материалов.- 2007.- №2.- С. 60-66.
- [29] Слива Ю.В., Хомичак Л.М., Логвин В.М. и др. Обеззараживание сокоостружечной смеси электрогидравлическими разрядами // Сахар.- 2007.- №4.- С. 19-22.
- [30] Патент №17173 Україна. Спосіб інактивації мікроорганізмів// Ю.В. Слива, А.І. Маринін, В.М. Логвин та інші.- Оpubл. 15.09.2006.- Бюл. №9.
- [31] Langlois A.P. What magnetic forming can do // American machinist.-1961.-Vol. 105.-№7.-p. 99.
- [32] Furth H.P., Waniek R.W. New ideas on magnetic forming// Metalworking production.-1962.-Vol. 106.-№13.- p. 73.
- [33] Фертик С.М., Белый И.В. Установка для обработки металлов давлением импульсного магнитного поля типа МИУ-20/1-ХПИ и ее применение.- Киев: Изд-во ИТИ СМ УССР, 1966.- 34 с.
- [34] Боев В.М. К 175-летию опубликования первой серии "Экспериментальных исследований по электричеству" Майкла Фарадея // Електротехніка і електромеханіка.-2004.- №3.- С. 5-7.
- [35] Баранов М.И. Эмилий Христианович Ленц – один из основоположников науки об электромагнетизме // Електротехніка і електромеханіка.-2006.- №3.- С. 5-11.
- [36] Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов.- Харьков: Вища школа, 1977.- 168 с.
- [37] Баранов М.И. Ретроспектива, современное состояние и перспективы развития исследований в области создания электроустановок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии // Електротехніка і електромеханіка.- 2007.- №5.- С. 48-60.
- [38] Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля. - Харьков: Вища школа, 1979.- 140 с.
- [39] А.с. №544200 СССР, МКИ В21D26/14. Установка для магнитно-импульсной обработки металлических заготовок // Баранов М.И., Белый И.В., Хименко Л.Т. -Заявлено 15.07.1975. Заявка №2156316. Зарегистр. 28.09.1976.
- [40] Баранов М.И. Моделирование краевого эффекта при деформации металлической оболочки давлением сильного импульсного магнитного поля// Технічна електродинаміка.-1998.-№3.- С.14-19.
- [41] Баранов М.И. Поверхностный эффект в полем проводящем цилиндре с аксиальным импульсным магнитным полем // Технічна електродинаміка.-1999.-№2.- С. 3-6.
- [42] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов.- Харьков: МОСТ-Торнадо, 2002.- 288 с.
- [43] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий.- Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003.- 288 с.
- [44] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Электромагнитные процессы в индукторных системах для штамповки магнитным полем печатных плат//Електричество.-2001.-№12.-С.44-48.
- [45] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов // Електротехніка і електромеханіка.- 2004.- №2.- С. 80-84.
- [46] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Чаплыгин Е.А. Особенности токов, индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах // Електротехніка і електромеханіка.- 2006.- №6.- С. 71-74.
- [47] Бондина Н.Н., Крамчанин Е.Г., Лютенко Л.А., Михайлов В.М. Электродинамические усилия, действующие на цилиндрическую оболочку при колебательном разряде магнитно-импульсной установки // Електротехніка і електромеханіка.- 2007.- №5.- С. 66-70.
- [48] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бондаренко А.Ю. Инструмент для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // Авиационно-космическая техника и технология.- 2007.- №11(47).- С. 44-51.
- [49] Глушечков В.А., Бурмистров А.Е., Овчинников Ю.М. Использование магнитно-импульсной технологии для изготовления биметаллических заземлителей / Труды международной научн.-техн. конференции МИОМ-2007 (Россия, г. Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007г.).- С. 76-83.
- [50] Намитоков К.К. Электроэрозионные явления.- М.: Энергия, 1978.- 456 с.
- [51] Щерба А.А. Установка электроэрозионного диспергирования токопроводящих материалов // Технічна електродинаміка. - 1990.-№3.- С. 88-92.
- [52] А.с. №70000 СССР, МКИ В22Г9/14. Способ получения порошков и устройство для его осуществления // Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко.- Оpubл. 1964.- Бюл. №22.
- [53] Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / Под ред. В.П. Смоленцева.- М.: Высшая школа, 1983.-Т.1.- 247 с.
- [54] Ichibashi W. Funtai oyobi funmatsuyakin // Journal Japan Society Powder. Metall.- 1977.- Vol. 24.- p. 107.
- [55] Казекин В.И., Карвовский В.Б., Щерба А.А. Установка для электроэрозионного диспергирования алюминия в воде // Опыт внедрения и промышленная эксплуатация тепломасообменных аппаратов и реакторов.-1980.- С. 129-131.

- [56] Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Трехмерное моделирование электротепловых процессов в технологическом аппарате объемного электроискрового диспергирования электропроводящих металлов // Технічна електродинаміка. Спец. вип. "Силовая электроника и энергоэффективность".-1998.-Т.1.- С. 241-245.
- [57] Шидловский А.К., Щерба А.А., Захарченко С.Н. и др. Метод комплексной обработки воды объемным электроискровым диспергированием в ней коагулянтобразующих металлов // Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки".-2000.-Ч.2.- С. 68-71.
- [58] Щерба А.А., Захарченко С.Н. Интенсификация осаждения неоднородным электрическим полем искроэрозионных микро- и наночастиц в диэлектрических жидкостях // Технічна електродинаміка.-2004.-№1.- С. 73-80.
- [59] Щерба А.А., Штомпель И.В. Анализ электрических параметров и динамики искровых разрядов в слое токопроводящих гранул // Стабилизация параметров электрической энергии.- Киев: Институт электродинамики НАН Украины.- 1991.- С.65-73.
- [60] Монастирський Г.Е., Шпак А.П., Коломийцев В.І., Щерба А.А. та інші. Дослідження стану порошків, отриманих електроискровим методом із сплавів з мартенситним перетворенням // Металофізика і новітні технології.-2003.-Т.25.-№6.- С. 803-816.
- [61] А.с. №149952 СССР. Способ получения дисперсно-упрочненных материалов на основе платины // Д.С. Тькочинский, А.А. Щерба и др. - Оpubл. 1987.- Бюл. №53.
- [62] Фоминский Л.П., Ровенская Т.В. Особенности порошка, получаемого электроэрозионным диспергированием алюминия в воде// Порошковая металлургия.-1984.-№10.- С. 7.
- [63] Захарченко С.Н. Регулирование параметров систем объемного электроискрового диспергирования тугоплавких сплавов // Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Системи керування та контролю напівпровідникових перетворювачів". - 1999.- С. 115-118.
- [64] Аношин О.А., Белоглавский А.А., Верещагин И.П. и др. Высоковольтные электротехнологии / Под ред. И.П. Верещагина.- М.: Изд-во МЭИ, 2000.-204 с.
- [65] Бойко Н.И., Тур А.Н., Евдошенко Л.С. и др. Высоковольтный генератор импульсов со средней мощностью до 50 кВт для обработки пищевых продуктов // Приборы и техника эксперимента.-1998.-№2.- С. 120-126.
- [66] Бойко Н.И. Высоковольтные аппараты и технологии на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".- Харків: НТУ "ХПІ". - 2001.- №16.- С. 11-16.
- [67] Бойко Н.И., Тур А.Н., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др. Установка для обработки текучих продуктов при помощи комплекса импульсных воздействий и результаты исследований // Технічна електродинаміка.-2001.-№4.- С. 59-63.
- [68] Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Высоковольтные установки и технологии на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика та перетворююча техніка.- Харків: НТУ "ХПІ".-2004.-№35.-С. 54-63.
- [69] Патент №32453 Україна, МПК А23L3/32. Пристрій для електрообробки рідких та текучих продуктів // М.І. Бойко, А.М. Тур, Л.С. Євдошенко, В.М. Іванов та ін. – Оpubл. 2000. – Бюл. №7.
- [70] Патент №2157649 РФ, МКИ А23L3/32. Устройство для электрообработки жидких и текучих продуктов// Н.И. Бойко, А.Н. Тур, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов и др.- Оpubл. 2000.- Бюл. №29.
- [71] Бойко Н.И., Сафронов И.А., Тондий Л.Д. АШЭМИТ-аппарат для широкополосной электромагнитной импульсной терапии // Приборы и техника эксперимента.-2000.-№5.- С. 101-108.
- [72] Тондий Л.Д., Бойко Н.И. О возможностях лечебного использования терапевтического аппарата "АШЭМИТ" // Вестник физиотерапии и курортологии.-2001.-Т.7.-№1.- С. 96-99.
- [73] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: Наука, 1990.- 624 с.
- [74] Амиров Р.Х., Асиновский Э.Н. и др. Синтез озона, инициируемый наносекундной короной в воздухе // Химия высоких энергий.-1992.-Т.26.-№1.- С. 76-81.
- [75] Гибалов В.И. Синтез озона в барьерном разряде // Журнал физической химии.-1994.-Т.68.-№6.- С. 1136-1141.
- [76] Бржезицький В.О., Ісакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навчальний посібник/ За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова.- Харків: НТУ "ХПІ".- Торнадо, 2005.- 930 с.
- [77] Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др. Импульсный коронный разряд с расширенной зоной ионизации: физические основы получения и перспективные области применения // Електротехніка і електромеханіка.- 2004.- №3.- С. 98-104.
- [78] Райзер Ю.П. Физика газового разряда.-М.:Наука,1987.-592с.
- [79] Коробцев С.В., Медведев Д.Д., Ширяевский В.Л. Генераторы озона в импульсном коронном разряде / Материалы конференции "Генераторы озона и озонные технологии".- М.: 1977.- Вып. 7(1).- С. 35-44.
- [80] Данилин В.В., Кокуркин М.П., Пашин М.М. и др. Высоко-частотные озонаторы нового поколения // Електротехніка.-2001.-№9.- С. 39-41.
- [81] Патент №2211800 РФ, МКИ С01В13/11. Способ генерирования озона и устройство для его осуществления// Н.И. Бойко.- Оpubл. 2003.- Бюл. №25.
- [82] Патент №71940 Україна, МПК С01В13/11. Спосіб генерування озону та пристрій для його здійснення // Н.І. Бойко.- Оpubл. 2005.- Бюл. №1.
- [83] Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др. Использование импульсного коронного разряда с расширенной зоной ионизации для конверсии токсичных газообразных отходов // Електротехніка і електромеханіка.- 2007.- №4.- С. 64-65.

Поступила 04.06.2008

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОММУТАТОРОВ В СИЛЬНОТОЧНЫХ ЦЕПЯХ МОЩНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Баранов М.И., д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"
тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Виконано огляд основних сучасних закордонних досліджень в області розробки і створення нового покоління потужних комутаторів, що використовуються у сильнострумних розрядних колах високовольтних електрофізичних установок з ємнісними нагронадживачами енергії для наукових і технологічних цілей.

Виполнен обзор основных современных зарубежных исследований в области разработки и создания нового поколения мощных коммутаторов, используемых в сильнотоочных разрядных цепях высоковольтных электрофизических установок с емкостными накопителями энергии для научных и технологических целей.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в энергетической сфере экономики промышленно развитых государств (соответственно и в сфере человеческой деятельности) более явно обозначилось такое новое понятие и направление ее дальнейшего развития как импульсная энергетика (ИЭ) [1, 2]. Составляющей частью этого понятия (направления) является тот близкий профессиональным интересам электрофизиков сектор ИЭ, который связан с созданием и применением в научных и промышленных целях мощного импульсного электроэнергетического оборудования: прежде всего, это касается высоковольтных электрофизических установок (ВЭФУ), запасующих в своих мощных накопителях электрическую или магнитную энергию, которая в дальнейшем может выделяться в той или иной электрической нагрузке [3]. В этой связи следует отметить то, что в передовых странах мира сейчас активно ведутся поисковые научные исследования, направленные на изучение возможности искусственного создания новых долговременных источников энергии. Одним из таких направлений, вписывающимся в стратегию развития ИЭ, являются работы по импульсному термоядерному синтезу, использующему мощные лазерные системы (ЛС) [3, 4]. В таких ЛС как раз и используются специальные мощные ВЭФУ, обеспечивающие импульсную световую накачку их активных элементов-резонаторов сверхвысокочастотного электромагнитного поля с твердым (газообразным) веществом, в котором при определенных условиях наступает интенсивное индуцированное излучение в оптической области спектра [5]. Поэтому дальнейшее развитие ИЭ напрямую связано с техническим прогрессом в области электрофизических приборов, осуществляющих надежную и долговременную коммутацию сильнотоочных электрических цепей ВЭФУ. От наличия таких сравнительно дешевых и надежно работающих в условиях воздействия высоких импульсных напряжений (ВИН) и больших импульсных токов (БИТ) электрофизических приборов-коммутаторов в определяющей мере зависит процесс успешного внедрения электротехнологий ИЭ в нашу реальную энергетическую практику. Кроме того, указанные коммутаторы необходимы и для решения ряда других важ-

ных научно-технических задач в области электротехнологического применения мощных ВЭФУ [6-10].

Известно, что в силовых электрических цепях, характеризующихся наличием ВИН и БИТ, в качестве традиционных мощных высоковольтных коммутаторов могут использоваться [6-13]: игнитроны, тиратроны, искровые вакуумные и газовые разрядники различных конструкций. Эти типы коммутаторов объединяет то, что все они относятся к газоразрядным физическим приборам. В настоящее время из-за вопросов экологической безопасности разработчики ВЭФУ стараются не применять в их сильнотоочных разрядных цепях игнитроны, содержащие ртуть и ее пары. На определенном этапе развития высоковольтной импульсной техники искровые газовые (вакуумные) разрядники выполнили (да и сейчас продолжают пока успешно выполнять) отведенную им "роль" быстрых высоковольтных ключей, коммутирующих электрические цепи ВЭФУ [6-14]. Новый XXI век в области электрофизической науки и техники принес новые научно-технические идеи по принципам построения и практического создания нового высоковольтного оборудования, предназначенного для более устойчивой и длительной коммутации электрической энергии высокой плотности, запасаемой, например, в мощных емкостных накопителях энергии (ЕНЭ) ВЭФУ [15-17]. Рассмотрим ниже по результатам ряда исследований, проводимых сейчас за рубежом (в частности, в Российской Федерации, США и Италии) [4, 15-17], новые поколения мощных газоразрядных и твердотельных полупроводниковых коммутаторов, предназначенных для работы с повышенной надежностью и долговечностью в сильнотоочных разрядных цепях мощных ВЭФУ с ЕНЭ и позволяющих решать возникающие на сегодня в передовой области ИЭ перед специалистами некоторых развитых стран мира (в том числе и Украины) важные электротехнические и электрофизические задачи практической направленности.

1. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ МОЩНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ КОММУТАТОРОВ

Новые тиратроны-коммутаторы. В Российской Федерации (РФ) данным типом мощных разрядников вот уже более 20 лет занимается ООО "Импульсные

технологии" (г. Рязань) [15]. Данной фирмой в свое время были разработаны и сейчас выпускаются ТДИ, ТПИ и ТГИ-типы тиратронов, нашедшие, особенно в последние несколько лет, достаточно широкое применение в схемах ВЭФУ. Прежде всего, это касается мощных исследовательских установок термоядерного синтеза с обращенным полем (FRC-установки, переводимые с английского как *Field Reversed Configuration*-установки с обращенной конфигурацией магнитного поля) [15]. Эти установки создаются ныне в США как альтернатива известным советским установкам термоядерного синтеза ТОКАМАК, использующим магнитные "ловушки" сверхвысокотемпературной плазмы замкнутого тороидального типа [18]. Экспериментальные исследования на магнитном модуле FRC-установки, совместно проведенные российскими и американскими специалистами на стенде *University Washington*, показали, что тиратроны типа ТДИ1-50к/45 в разрядной цепи ЕНЭ (емкостью $C=3,7$ мкФ) работают значительно надежней игнитронов при зарядных напряжениях U_p конденсаторов до 35 кВ и разрядных токах ВЭФУ амплитудой до $I_m=150$ кА [15]. В этих экспериментах однократно коммутируемый тиратронами заряд составлял $q_p=5$ Кл, а скорость нарастания импульсов тока при их частоте следования в 0,01 Гц была равна не менее $2 \cdot 10^{11}$ А/с. На рис. 1 как раз и показана использовавшаяся в этих опытах сборка из двух ТДИ-тиратронов с высоковольтным конденсатором, выдержавшая при испытаниях коммутацию около $9 \cdot 10^3$ токовых импульсов ($U_p=25$ кВ; $C=1,8$ мкФ; $I_m=120$ кА) и оставшаяся после такой наработки в рабочем состоянии [15].

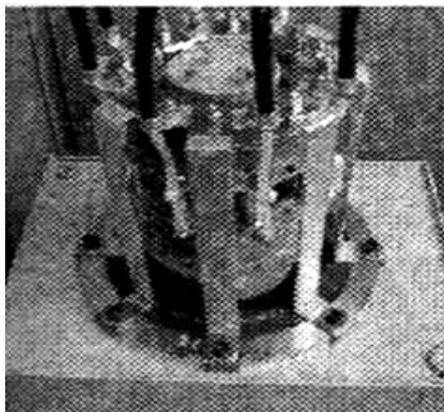


Рис. 1. Внешний вид сборки из двух ТДИ-тиратронов на рабочий импульсный ток до 200 кА, подключенных прямо на высоковольтный коаксиальный вывод конденсатора (например, серийного российского конденсатора типа ИК-50-3 с металлическим корпусом) [15]

Для определения перегрузочной способности тиратронов типа ТДИ1-50к/45 на их сборке, показанной на рис. 1, были проведены дополнительные более жесткие испытания при $U_p=25$ кВ, $C=17,5$ мкФ и переносимом токовым моноимпульсом заряде q_p до 10 Кл, коммутируемом ими с частотой следования импульсов тока 1/60 Гц. В этом случае указанные тиратроны-коммутаторы выдержали еще воздействие 10^3

импульсов тока с амплитудой $I_m=200$ кА. Из строя они вышли из-за термической перегрузки центральных частей катодов, обусловленной предельными значениями на них эмиссионной плотности импульсного тока [15]. Для увеличения рабочего ресурса этого типа тиратронов в ООО "Импульсные технологии" (РФ) недавно была создана усовершенствованная конструкция тиратрона ТДИ1-50к/45-1 на рабочее напряжение до 30 кВ и коммутируемые импульсные токи микросекундной длительности амплитудой до 300 кА, способного работать в полностью безнакальном режиме катода и имеющего мгновенную готовность к работе в силовых электрических цепях ВЭФУ для научных и технологических целей [15].

Новые газовые управляемые разрядники. В российском ЗАО "Русская Технологическая Группа 2" (г. Рязань) взамен устаревшим конструкциям высоковольтных газоразрядных коммутаторов в настоящее время разработано и создано новое поколение мощных газовых управляемых с керамическим корпусом разрядников типа РГУ, показанных на рис. 2 [16].



Рис. 2. Внешний вид газовых управляемых разрядников с керамическим корпусом типа РГУ на рабочие импульсные токи 20-100 кА и напряжения 10-100 кВ (при нумерации слева-направо: 1-РГУ1-15-100; 2-РГУ1-50-100; 3-РГУ1-100-100; 4-РГУ2-50-50; 5-РГУ2-10-50; 6-РГУ3-20-20) [16]

Газовые управляемые керамические разрядники РГУ имеют рабочее напряжение U_p от 1 до 100 кВ и рассчитаны на коммутируемые импульсные токи амплитудой I_m от 20 до 100 кА при их длительности до $\tau_{и}=100$ мкс [16]. При $\tau_{и}>100$ мкс значения I_m по току для РГУ снижаются. Данные разрядники внешне различаются диаметром d_k несущего керамического цилиндра, имеющим в зависимости от их предельного тока следующие значения: для РГУ1 на токи $I_m=100$ кА – $d_k=125$ мм, для РГУ2 на токи $I_m=50$ кА – $d_k=80$ мм и для РГУ3 на токи $I_m=20$ кА – $d_k=25$ мм. В таблице приведены основные технические характеристики газовых управляемых разрядников типа РГУ для давления рабочего газа в межэлектродном промежутке $1,013 \cdot 10^5$ Па и его температуры в 20 °С при $\tau_{и} \leq 100$ мкс. На рис. 3 показано типичное поперечное сечение газового управляемого керамического разрядника типа РГУ, имеющего два основных металлических электрода сложной формы и один центральный управляющий металлический электрод дисковой формы. Конструкция основных электродов допускает продольную продувку межэлектродного газового

промежутка в разрядниках серии РГУ. Разработчиком этих разрядников было установлено, что повышенный нагрев их основных и управляющего электродов приводит к снижению напряжения самопробоя, а отсутствие продувки в РГУ вызывает запыление внутренней стенки керамического цилиндра окислами металла электродов и соответственно приводит к снижению уровня предельно допустимого рабочего напряжения [16]. Отметим, что по данным [16] износ управляющего металлического дискового электрода в разрядниках типа РГУ составляет $1,1 \cdot 10^{-4}$ г/Кл, а для основных электродов – $4,4 \cdot 10^{-5}$ г/Кл. Ресурсные испытания изготовителя разрядников типа РГУ показали, что при $\tau_{и} = 700$ мкс (вместо рекомендуемых им $\tau_{и} \leq 100$ мкс для нормальной работы РГУ) и переносимом заряде за один токовый импульс в $q_p = 1,44$ Кл для разрядника РГУ1-30-100 ($U_p = 30$ кВ; $I_m = 100$ кА) рабочий ресурс не превышает $6,2 \cdot 10^3$ срабатываний [16].

Технические характеристики разрядников серии РГУ

Тип коммутатора	U_p кВ	I_m кА	q_p Кл	Ресурс	Масса, кг
РГУ1-10-100	10	100	5	$2 \cdot 10^5$	3
РГУ1-20-100	20	100	5	$2 \cdot 10^5$	5
РГУ1-30-100	30	100	5	$2 \cdot 10^5$	5
РГУ1-50-100	50	100	5	$2 \cdot 10^5$	5
РГУ1-75-100	75	100	5	$2 \cdot 10^5$	6
РГУ1-100-100	100	100	5	10^5	6
РГУ2-5-50	5	50	2,5	10^5	1
РГУ2-10-50	10	50	2,5	10^5	1
РГУ2-20-50	20	50	2,5	10^5	1,5
РГУ2-30-50	30	50	2,5	10^5	1,5
РГУ2-40-50	40	50	2,5	10^5	1,5
РГУ2-50-50	50	50	2,5	10^5	1,5
РГУ3-5-20	5	20	1	$5 \cdot 10^4$	0,3
РГУ3-10-20	10	20	1	$5 \cdot 10^4$	0,4
РГУ3-20-20	20	20	1	$5 \cdot 10^4$	0,5

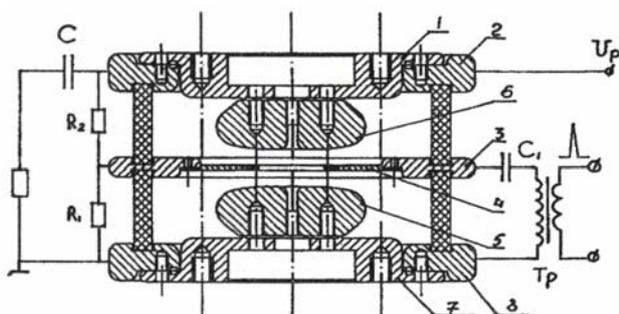


Рис. 3. Схематическое типичное изображение поперечного сечения газопроводящего керамического разрядника типа РГУ (1, 7-металлические фланцы потенциального и заземленного электродов; 2, 8 - технологические металлические фланцы; 3, 4-управляющий металлический дисковый электрод; 5, 6-основные металлические электроды) [16]

Согласно рис. 3 для включения разрядника РГУ в работу на его управляющий дисковый электрод 4 с острой внутренней круговой кромкой и наружным фланцем 3, находящийся под электрическим потенциалом $U_p/2$, известным путем [6, 13] через импульс-

ный повышающий трансформатор T_p с разделительным конденсатором C_1 в его вторичной обмотке от внешнего высоковольтного поджигающего генератора подается пусковой микросекундный импульс напряжения, пробивающий иницирующий газовый промежуток между управляющим 4 и заземленным 5 электродами разрядника. Электрический пробой последнего вызывает пробой газового промежутка между основными электродами 5 и 6 РГУ и соответственно разряд предварительно заряженной рабочей емкости C ЕНЭ ВЭФУ на омическую электрическую нагрузку. Автор работы [16] отмечает высокую стабильность работы газовых управляемых керамических разрядников серии РГУ, обусловленную постоянством напряжения их самопробоя и отсутствием заметного влияния искрового сильноточного разряда между их основными электродами на электрические характеристики несущего керамического цилиндра.

2. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ МОЩНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОММУТАТОРОВ

В настоящее время рядом российских организаций (РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров; ИПФ РАН, г. Новгород; НИЦ ОАО "Электровыпрямитель", г. Саранск) созданы и испытаны в реальной работе в составе сильноточных разрядных цепей ВЭФУ новые мощные твердотельные полупроводниковые коммутаторы на базе реверсивно-включаемых динисторов (РВД-коммутаторы) [17]. Каждый такой реверсивно-включаемый динистор (РВД) является двухэлектродным аналогом широко известной конструкции тиристора с обратной проводимостью и интегрированным в его полупроводниковую кремниевую структуру обратным диодом, который встречно-параллельно включен тиристорной части РВД [17]. Внешне каждый РВД представляет собой круглую конструкцию таблеточного типа, выполненную в металлокерамическом корпусе или без него с защитой периферийной области динистора от внешних воздействий (рис. 4).

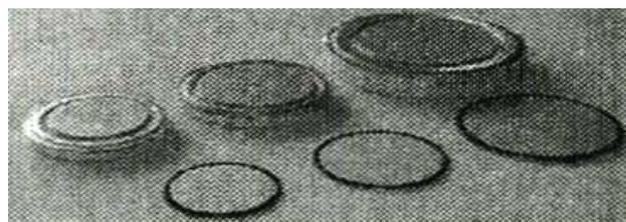


Рис. 4. Внешний вид отдельных реверсивно-включаемых динисторов-коммутаторов типа РВД на рабочие импульсные токи 250-500 кА (верхний ряд – динисторы с герметичным металлокерамическим корпусом; нижний ряд – динисторы бескорпусного исполнения с диаметром их полупроводниковых силовых элементов 63 мм- $I_m = 250$ кА, 76 мм- $I_m = 380$ кА и 100 мм- $I_m = 500$ кА) [17]

Проведенные исследования показали, что наиболее перспективной областью работы высоковольтных полупроводниковых ключей РВД-коммутаторов является коммутация БИТ в микросекундном и субмиллисекундном временных диапазонах [2, 17]. РВД могут образовывать последовательные сборки жестко включенных друг за другом динисторов на напряжения в

десятки киловольт (блокирующее напряжение каждого РВД составляет $\leq 2,4$ кВ). Число динисторов в последовательной сборке определяет рабочее напряжение РВД-коммутатора. Включение РВД производится коротким импульсом тока (амплитудой до 1,5 кА при $\tau_{и}$ до 2 мкс) от внешнего генератора управления при кратковременном приложении к нему обратного напряжения. Благодаря оригинальному способу включения и специальной конструкции кремниевой пластины динистора обеспечивается полное и однородное включение РВД по всей его активной площади и за очень короткий промежуток времени. Разработана специальная компьютерная программа подбора РВД для последовательной сборки динисторов, учитывающая их ВАХ, токи утечки, усилия и межконтактные материалы при стягивании сборки и многое другое [17]. На рис.5 показан РВД-коммутатор типа КРД-25-300 на 25 кВ, предназначенный для длительной работы в составе мощной лазерной установки "Искра-6" (создается в РФЯЦ-ВНИИЭФ с итальянским участием) в моноимпульсном режиме коммутации БИТ амплитудой $I_m = 300$ кА при их длительности до 0,5 мс [4, 17]. Данный твердотельный коммутатор содержит в своем изоляционном цилиндрическом корпусе последовательную сборку из 15 шт. РВД диаметром 76 мм с блокирующим напряжением 2,4 кВ.

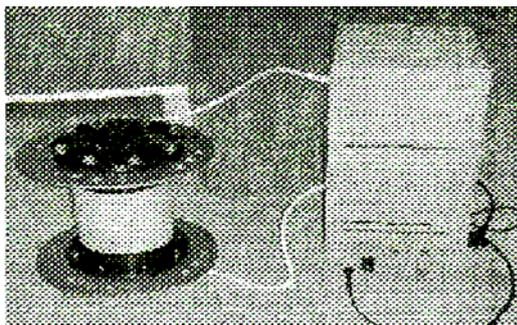


Рис. 5. Внешний вид РВД-коммутатора типа КРД-25-300 на рабочий импульсный ток 300 кА и напряжение 25 кВ (слева), подключенного к высоковольтному генератору запускающих микросекундных импульсов тока амплитудой до 1,5 кА (справа) [17]

Испытания РВД-коммутатора типа КРД-25-300 показали, что в нем достигается высокий показатель удельной коммутируемой мощности, приходящейся на единицу его объема, и составляющий $2,5 \cdot 10^6$ Вт/см³. Высоковольтные РВД-коммутаторы типа КРД-25-100 (с РВД \varnothing 63 мм) и КРД-25-170 (с РВД \varnothing 76 мм) были успешно испытаны в составе мощного ЕНЭ неодимового лазера установки "Луч" (РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров) в режиме коммутации одиночных токовых импульсов субмиллисекундного диапазона при $U_p = 24$ кВ, $I_m = 470$ кА и $q_p = 145$ Кл [17].

ЛИТЕРАТУРА

[1] Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника.- М.: Наука, 2004.- 704 с.
 [2] Тучкевич В.М., Грехов И.В. Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами.- Л.: Наука, 1988.- 220 с.

[3] Баранов М.И. Ретроспектива, современное состояние и перспективы развития исследований в области создания электроустановок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии // Электротехника і електромеханіка.- 2007.- №5.- С. 48-60.
 [4] Beznasyuk N.N., Galakhov I.V., Garanin S.G. et al. The four-channel laser facility LUCH- a module of the ISKRA-6 facility// Proceeding of XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM-2002), 2002.-p. 105-110.
 [5] Баранов М.И. Радиоэлектроника: краткая история ее становления в качестве основообразующей физико-технической области электричества и научно-технического прогресса человечества // Электротехника і електромеханіка.- 2008.- №4.- С. 5-12; №5.-С. 5-9.
 [6] Техника больших импульсных токов и магнитных полей/ Под ред. В.С. Комелькова.- М.: Атомиздат, 1970.- 472 с.
 [7] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.- М.: Мир, 1972.- 391 с.
 [8] Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов.- Харьков: Вища школа, 1977.- 168 с.
 [9] Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий.- Киев: Наукова думка, 1990.- 208 с.
 [10] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий.- Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003.- 288 с.
 [11] Бочков В.Д., Дягилев В.М., Королев Ю.Д. и др. Мощные коммутаторы тока с низким давлением газа // Приборы и техника эксперимента.-1998.-№5.-С. 91-95.
 [12] Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др. Высоковольтные искровые разрядники для технологических установок// Приборы и техника эксперимента.-2001.- №2.- С. 79-88.
 [13] Баранов М.И., Бочаров Ю.П., Зябло Ю.П. и др. Высоковольтные силовоточные искровые коммутаторы для генераторов импульсных напряжений и токов // Технічна електродинаміка.-2003.-№3.-С. 41-47.
 [14] Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента.-2008.-№3.- С. 81-85.
 [15] Бочков В.Д., Бочков Д.В., Гнедин И.Н. и др. Мощные псевдоискровые коммутаторы для импульсной энергетики // Труды международной научно-технической конференции МИОМ-2007 (Россия, г. Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007).- С. 23-27.
 [16] Ермилов И.В. Разработка комплекса высоковольтного силовоточного оборудования нового поколения для магнитно-импульсной обработки материалов// Труды международной научно-технической конференции МИОМ-2007 (Россия, г. Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007).- С.88-98.
 [17] Безуглов В.Г., Беляев С.А., Галахов И.В. и др. Новое поколение мощных полупроводниковых коммутаторов для применений импульсной энергетики // Труды международной научно-технической конференции МИОМ-2007 (Россия, г. Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007).- С. 28-34.
 [18] Юферов В.Б., Друй О.С., Скибенко Е.И. и др. Сверхпроводящие магнитные системы сложной формы и с высокой плотностью транспортного тока // Электротехніка і електромеханіка.- 2003.- №2.- С. 81-89.

Поступила 04.06.2008

ИНДУКЦИОННАЯ ИНДУКТОРНАЯ СИСТЕМА С ДВОЙНЫМ ВИТКОМ

Батыгин Ю.В., д.т.н. проф., Сериков Г.С.
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
Украина, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25,
тел. (057) 700-38-52

Бондаренко А.Ю., к.т.н., с.н.с.
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Инженерная электрофизика"
тел (057) 707-62-45, e-mail:baui@kharkov.ua

Наведено результати експериментального дослідження індукційних індукторних систем прямокутної геометрії. Показано, що на відміну від циліндричної індукційної індукторної системи, подвійний виток прямокутної форми дозволяє домогтися істотно більше високого ступеня гладкості просторового розподілу вихрових струмів і порушуваних сил електродинамічного притягання в робочій зоні.

Приведены результаты экспериментального исследования индукционных индукторных систем прямоугольной геометрии. Показано, что в отличие от цилиндрической индукционной индукторной системы, двойной виток прямоугольной формы позволяет добиться существенно более высокой степени гладкости пространственного распределения вихревых токов и возбуждаемых сил электродинамического притяжения в рабочей зоне.

ВВЕДЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные исследования цилиндрических индукционных индукторных систем достаточно полно осветили их достоинства и недостатки [1, 2].

Их основным преимуществом является простота технического исполнения и, соответственно, надёжность. Главный недостаток состоит в резко неоднородном радиальном распределении возбуждаемых сил электродинамического притяжения.

Индукционные индукторные системы с двойным прямоугольным витком, как показывают расчёты, позволяют значительно улучшить поперечное распределение индуцированных токов в листовой заготовке и вспомогательном экране, сделать это распределение более однородным и тем самым улучшить силовые характеристики инструмента данного типа и назначения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объект исследований – индукционная индукторная система с плоским двойным прямоугольным витком, расположенным между двумя идентичными листами из нержавеющей стали. Последние расположены компланарно и симметрично относительно плоскости витка индуктора. Аналогично предыдущему, в настоящих экспериментах использовались листы из нержавеющей стали с относительной магнитной проницаемостью $\mu_r \approx 1$, удельной электропроводностью – $\gamma \approx 0.4 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ (определялась экспериментально) и толщиной $d = 0.75$ мм.

Геометрия двойного витка, его расположение в исследуемой индукторной системе показаны на рис. 1: $G = 12.5$ мм, $L = g = l = 10$ мм, $h = 0.001$ мм.

Фотография на рис. 2 иллюстрирует собственно исследуемую конструкцию в сборе.

Источник мощности – экспериментальный стенд, описанный [3].

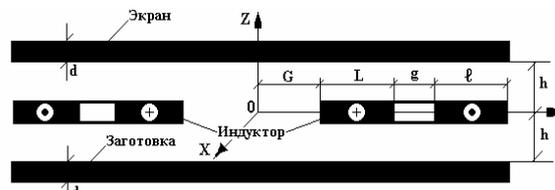


Рис. 1. Геометрия исследуемой системы

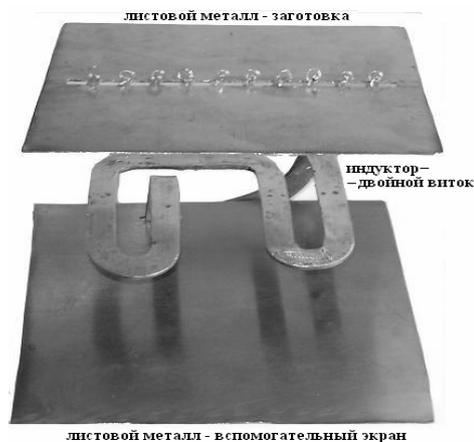


Рис. 2. Модельный вариант индукционной индукторной системы с двойным прямоугольным витком в сборе

Целью исследований являлось измерение основных характеристик процессов в инструментах магнитно-импульсного притяжения, принцип действия которых основан на силовом взаимодействии плоских проводников с одинаково направленными токами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И СРАВНЕНИЕ С РАСЧЕТНЫМИ ЗАВИСИМОСТЯМИ

Измерение компонент напряженности магнитного поля проводилось индукционными датчиками (рис. 3.). Измерения индуцированных токов для большей достоверности проводились двумя методами.

Первый из них – это использование поясов Роговского, второй – по методике "прямого" измерения индуцированных токов, когда снимаются сигналы с

отдельных перемычек. В листовой заготовке вдоль средней линии рабочей зоны выполнялись прямо-угольные сквозные прорезы. В эти прорезы пропускались пояса Роговского. Снимаемый сигнал подавался на вход осциллографа. Во втором способе ("прямое" измерение) измерялось напряжения с перемычек между прорезями, каждая из которых представляла собой активное сопротивление, по которому протекала часть индуцированного тока. Сигнал с электрических выводов на краях перемычки подавался на вход осциллографа (рис. 4). Отличительной позитивной особенностью данного подхода в измерениях являлась прямо пропорциональная зависимость между снимаемым напряжением и протекающим током.

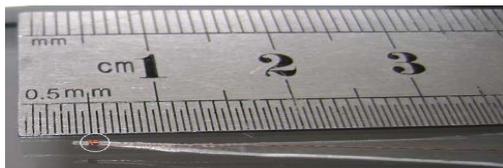


Рис. 3. Датчик для измерения тангенциальной компоненты напряжённости магнитного поля (собственно катушечный зонд обведен окружностью)

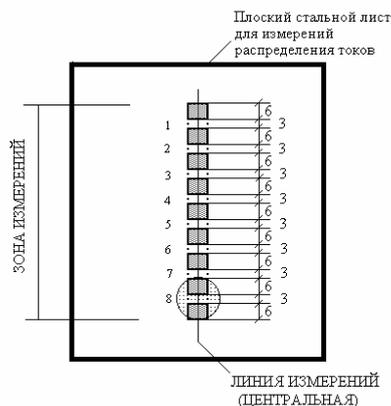


Рис. 4. Схема измерений характеристик электромагнитных процессов в исследованной индукторной системе

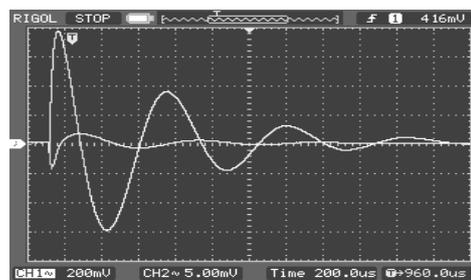
Сигналы в различных способах измерения, обрабатывались соответствующими методиками (пояс Роговского – интегрирование, "прямое" – деление на сопротивление перемычки). Их сравнение по амплитуде и разбросу временных параметров показало различия, не превышающие $\sim 10\div 15\%$.

Начнём с временных зависимостей.

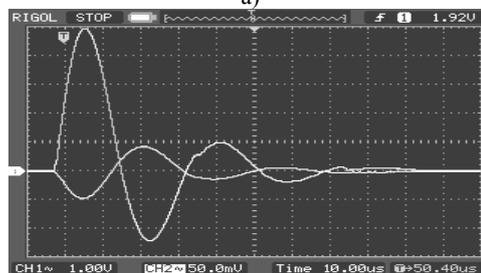
На рис. 5 приведены осциллограммы возбуждающего тока в индукторе (вверху) и индуцированных токов (внизу).

Как следует из измерений, вихревые токи, обеспечивающие силовое взаимодействие в системе, при низких значениях рабочих частот имеют обостренный фронт. Этот факт уже отмечался ранее.

Пространственные распределения индуцированных токов и компонент вектора напряжённости возбуждаемых магнитных полей приведены на рис. 6. Результаты измерений оттенены соответствующими расчётными зависимостями по формулам, полученным ранее для низкочастотного временного режима исследуемой системы.

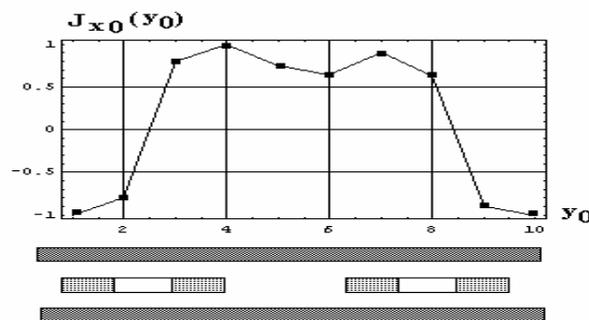


а)

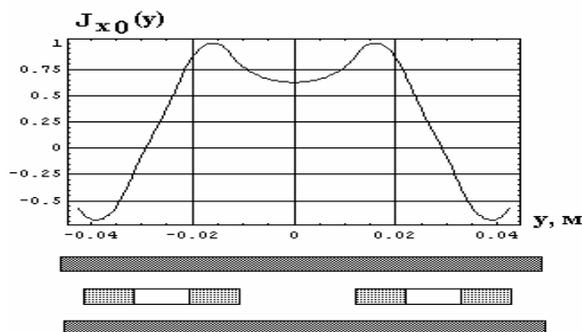


б)

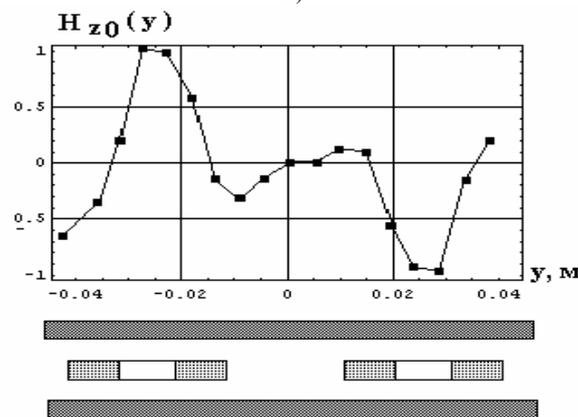
Рис. 5. Осциллограммы тока в индукторе (вверху) и вихревого тока в листовых металлах (внизу): а) – при рабочей частоте 1.33 кГц, б) – при рабочей частоте 33 кГц



а)



б)



в)

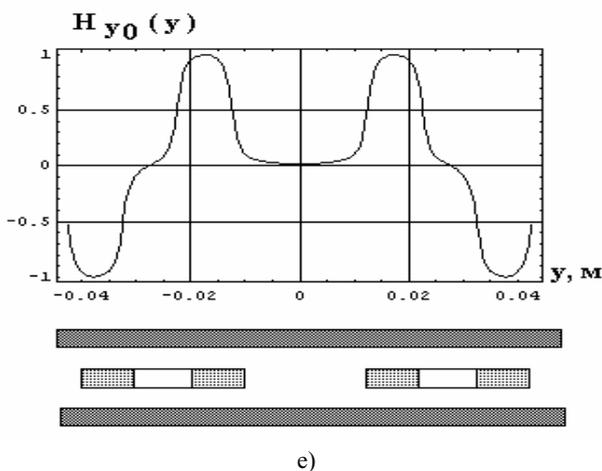
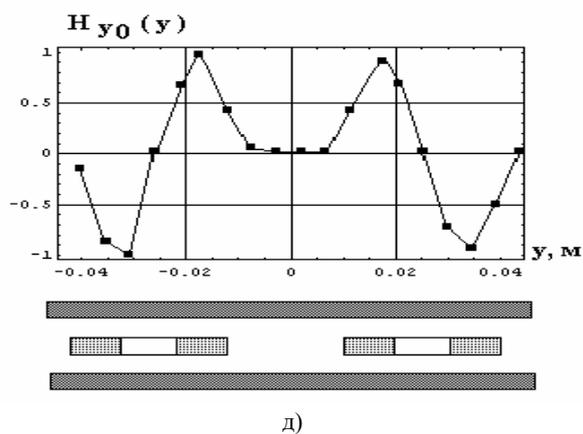
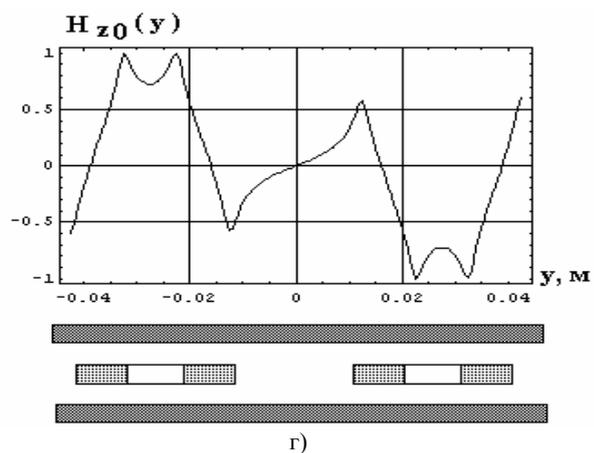


Рис. 6. Экспериментальные поперечные распределения основных характеристик электромагнитных процессов в исследуемой индукторной системе с двойным прямоугольным витком при рабочей частоте ~ 1.33 кГц, - индуцированные токи, а) – измерения, б) – расчёт, - касательная компонента напряжённости магнитного поля, в) – измерения, г) – расчёт, - нормальная компонента напряжённости магнитного поля, д) – измерения, е) – расчёт

Примечание. Отношение амплитуд токов в индукторе и листовом металле составляет ~ 13 .

Кривые рис. 6а, 6б иллюстрируют пространственное распределение индуцированных токов. Учитывая, что силы притяжения проводников с параллельными токами пропорциональны их произведению (в данном случае это индуцированные токи!), с помощью графика на рис. 6а можно построить качественную экспериментальную картину пространственного распределения этих сил в исследованной индукторной системе. Профиль этой зависимости в рабочей зоне между внутренними токопроводами двойного витка приведен на рис. 7.

венную экспериментальную картину пространственного распределения этих сил в исследованной индукторной системе. Профиль этой зависимости в рабочей зоне между внутренними токопроводами двойного витка приведен на рис. 7.

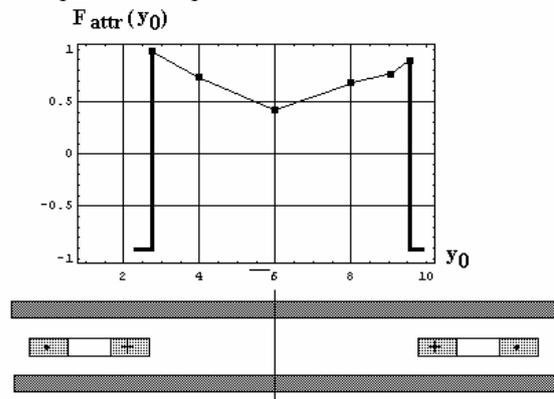


Рис. 7. Пространственное распределение сил притяжения в центральной части рабочей зоны индукторной системы

ВЫВОДЫ

Основным результатом проведенных экспериментов является следующий вывод.

В отличие от цилиндрической индукционной индукторной системы, как это хорошо видно из зависимостей на рис. 6а, 6б, двойной виток прямоугольной формы позволяет добиться существенно более высокой степени гладкости пространственного распределения вихревых токов, а следовательно, и достаточной гладкости пространственного распределения возбуждаемых сил электродинамического притяжения, (см. рис. 7).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чаплыгин Е. А. Магнитное поле в тонкостенной листовой заготовке при низких значениях рабочих частот. // Электротехника і електромеханіка. – 2006. - №6. - С.71-73.
- [2] Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Чаплыгин Е.А. Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2007. - №. - С.109-117.
- [3] Бондаренко А. Ю., Сериков Г. С., Чаплыгин Е.А. Низковольтный генератор импульсов тока широкого частотного диапазона для физического моделирования. // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. - №6. - С. 66-69.

Поступила 21.08.2008

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАРАСТАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ИМПУЛЬСА ТОКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Петков А.А., к.т.н., с.н.с.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко 47, НИПКИ "Молния"
тел./факс (057) 707-62-80, E-mail: alexp@kpi.kharkov.ua

У роботі запропоновані співвідношення для визначення математичного очікування й дисперсії часу наростання значень випробувального імпульсу струму. Показано їх використання для оцінки ймовірності безвідмовної роботи випробувального пристрою.

В работе предложены соотношения для определения математического ожидания и дисперсии времени нарастания значений испытательного импульса тока. Показано их использование для оценки вероятности безотказной работы испытательного устройства.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. Одним из основных мероприятий, обеспечивающим безотказную работу оборудования, применяемого в системах энергогенерирования и электропередачи, является проведение испытаний на устойчивость к воздействию импульсных электромагнитных факторов, сопровождающих его эксплуатацию. В общем случае процесс испытаний оборудования, тип используемых испытательных устройств и требования к параметрам испытательных импульсов регламентируются международными, государственными, отраслевыми и другими нормативными документами. Требования к значениям параметров импульсов в нормативных документах формулируются путем задания их номинального значения и допустимого интервала значений, определяемого допустимыми отклонениями. В связи с этим, при проектировании и сооружении испытательных установок должны выполняться мероприятия, обеспечивающие надежное формирование испытательных импульсов с параметрами, не выходящими за допустимый интервал изменения значений.

Анализ публикаций. Надежность эксплуатации высоковольтных импульсных испытательных устройств (ВИИУ) является комплексной категорией, включающей в качестве компоненты их параметрическую надежность [1, 2], которая отражает свойство формировать испытательные импульсы с требуемыми параметрами. В [3] показано, что рассмотрение вопросов параметрической надежности является высшим уровнем иерархической структуры синтеза разрядных цепей ВИИУ. Основные положения расчета параметрической надежности ВИИУ рассмотрены в [4], где показано, что расчет может быть проведен с использованием числовых характеристик распределения параметров испытательного импульса. Одним из параметров испытательных импульсов, существенно влияющим на работоспособность оборудования, является время нарастания значений импульсных воздействий. В [4] для разрядной RLC -цепи генератора импульсов тока (ГИТ) приведены соотношения, которые определяют числовых характеристик распределения

длительности нарастания значений импульса тока от уровня 0,1 до уровня 0,9 от максимального значения (математического ожидания и дисперсии). При этом предполагалось, что значения времени нарастания

распределены нормально и $R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \geq 60$. Однако, указанное соотношение параметров разрядной цепи является только частью области возможных соотношений параметров, а нормальность распределения времени нарастания значений испытательного импульса тока не всегда очевидна.

Учитывая ограниченность имеющихся результатов, представляется целесообразным продолжение исследований в данном направлении.

Целью настоящей работы является вывод соотношений для определения величин, характеризующих распределение значений времени нарастания и оценки вероятности безотказной работы испытательного устройства.

МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из материалов, приведенных в [5] следует, что для схемы ГИТ, представляемой последовательной RLC -цепью, имеет место следующая зависимость для времени нарастания значений импульса тока:

$$T_{H(0,1;0,9)} = \sqrt{L \cdot C} \cdot f(r), \quad (1)$$

где $T_{H(0,1;0,9)}$ – время нарастания значений импульса от уровня 0,1 до уровня 0,9 от максимального значения

тока; $r = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$ – безразмерный аналог сопротивления разрядной цепи; R, L, C – активное сопротивление, индуктивность и емкость разрядной цепи; $f(r)$ – некоторая функция переменной r .

Можно показать, что для $r > 0$ функция $f(r)$ является монотонно убывающей функцией, которая всегда с заданной точностью представима в некотором интервале $[r_{\min}, r_{\max}]$ степенной функцией вида:

$$f(r) = A \cdot r^B, \quad (2)$$

где коэффициенты функции имеют следующие огра-

ничения: $A > 0, B < 0$.

Тогда, подставляя выражение (2) в (1), получим:

$$T_{H(0,1;0,9)} = A \cdot R^B \cdot L^{0,5 \cdot (1-B)} \cdot C^{0,5 \cdot (1+B)}. \quad (3)$$

Применяя к (3) операции нахождения математического ожидания и дисперсии [6] в предположении независимости R, L и C параметров разрядной цепи и близости их распределения к нормальному распределению, можем получить следующие соотношения для вычисления числовых характеристик распределения времени нарастания импульса тока:

– математическое ожидание

$$M[T_{H(0,1;0,9)}] = A \cdot M[R]^B \cdot M[L]^{0,5 \cdot (1-B)} \times \\ \times M[C]^{0,5 \cdot (1+B)} \cdot \left\{ 1 + \frac{B \cdot (B-1)}{2} \cdot V[R]^2 - \right. \\ \left. - \frac{1-B^2}{8} \cdot V[L]^2 - \frac{1-B^2}{8} \cdot V[C]^2 \right\}; \quad (4)$$

– дисперсия

$$D[T_{H(0,1;0,9)}] = A^2 \cdot M[R]^{2 \cdot B} \cdot M[L]^{(1-B)} \times \\ \times M[C]^{(1+B)} \cdot \left\{ B^2 \cdot V[R]^2 + \frac{(1-B)^2}{4} \cdot V[L]^2 + \right. \\ + \frac{(1+B)^2}{4} \cdot V[C]^2 + \frac{B^2 \cdot (B-1)^2}{4} \cdot V[R]^4 + \\ + \frac{(1-B^2)^2}{32} \cdot V[L]^4 + \frac{(1-B^2)^2}{32} \cdot V[C]^4 + \\ + \frac{B^2 \cdot (1-B)^2}{4} \cdot V[R]^2 \cdot V[L]^2 + \\ + \frac{B^2 \cdot (1+B)^2}{4} \cdot V[R]^2 \cdot V[C]^2 + \\ \left. + \frac{(1-B^2)^2}{16} \cdot V[L]^2 \cdot V[C]^2 \right\}, \quad (5)$$

где $V[x]^2 = \frac{D[x]}{M[x]^2}$ – квадрат коэффициента вариации случайной переменной x .

В нормативных документах, регламентирующих испытания технических объектов (например [7]) время нарастания задается номинальным значением и допускаемыми отклонениями $T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} \pm \Delta T$. ГИТ считается работоспособным устройством по параметру $T_{H(0,1;0,9)}$, если формируемый импульс имеет время нарастания, которое находится в интервале $[T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} - \Delta T, T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} + \Delta T]$. Оценить вероятность нахождения ГИТ в работоспособном состоянии можно с использованием числовых характеристик распределения времени нарастания, вычисляемых по (4) и (5) [4].

При выводе соотношений (4) и (5) предполагалось, что распределение значений R, L и C параметров разрядной цепи описывается нормальным законом. Однако, как в начале, так и особенно при длительной эксплуатации ГИТ может иметь место отклонение закона распределения параметров разрядной цепи от

нормального [2]. Таким образом, возникает проблема допустимости использования соотношений (4) и (5) при распределении значений R, L и C параметров разрядной цепи по закону, отличному от нормального закона. Для проверки допустимости использования (4) и (5) было проведено имитационное моделирование распределения $T_{H(0,1;0,9)}$ и определены числовые характеристики распределения времени нарастания при равномерном распределении значений R, L и C параметров разрядной цепи. Выбор вида распределения определился его существенным отклонением от нормального распределения.

Можно показать, что для интервала $2 \leq r \leq 30$ при коэффициентах $A = 1,06; B = -0,77$ погрешность вычислений по (3) не превышает 10%.

При имитационном моделировании допустимые относительные отклонения R, L и C параметров – $\delta R, \delta L$ и δC изменялись от 0 до 0,2. Соответственно интервалы равномерного распределения параметров составляли: $[R_{\text{ном}} \cdot (1 - \delta R), R_{\text{ном}} \cdot (1 + \delta R)]$, $[L_{\text{ном}} \cdot (1 - \delta L), L_{\text{ном}} \cdot (1 + \delta L)]$, $[C_{\text{ном}} \cdot (1 - \delta C), C_{\text{ном}} \cdot (1 + \delta C)]$, где $R_{\text{ном}}, L_{\text{ном}}, C_{\text{ном}}$ – номинальные значения параметров разрядной цепи.

Как показали результаты обработки данных имитационного моделирования, при доверительной вероятности 0,9 [6] математическое ожидание времени нарастания практически не отличается от рассчитанного по формуле (4), а дисперсия отличается от рассчитанной по формуле (5) не более чем на 5%, что приемлемо для технических расчетов.

Таким образом, соотношения (4) и (5) применимы для определения математического ожидания и дисперсии времени нарастания импульса тока при распределении параметров разрядной цепи существенно отличном от нормального распределения.

Для оценки вероятности нахождения ГИТ в работоспособном состоянии значимым является вид распределения времени нарастания. При известной функции распределения вероятность безотказной работы определяется как вероятность попадания времени нарастания в интервал $[T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} - \Delta T, T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} + \Delta T]$ и рассчитывается по выражению

$$P_{\text{бр}} = F(T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} + \Delta T) - F(T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} - \Delta T), \quad (6)$$

где $F(\bullet)$ – функция распределения времени нарастания.

В частности, при нормальном законе распределения времени нарастания значений испытательного импульса тока, вероятность безотказной работы определяется достаточно просто с использованием математического ожидания и дисперсии по формуле [6]:

$$P_{\text{бр}} = N \left\{ \frac{[T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} + \Delta T] - M[T_{H(0,1;0,9)}]}{\sqrt{2 \cdot D[T_{H(0,1;0,9)}]}} \right\} - \\ - N \left\{ \frac{[T_{H(0,1;0,9) \text{ ном}} - \Delta T] - M[T_{H(0,1;0,9)}]}{\sqrt{2 \cdot D[T_{H(0,1;0,9)}]}} \right\}, \quad (7)$$

где $N(\bullet)$ – функция нормального распределения.

Если закон распределения времени нарастания неизвестен, то для расчета вероятности безотказной

работы целесообразно воспользоваться оценкой, основанной на неравенстве Чебышева [4]

$$P_{\text{бр}} \geq 1 - \frac{D[T_{\text{H}(0,1;0,9)}]}{2} \times \left\{ \frac{1}{\left([T_{\text{H}(0,1;0,9)}]_{\text{ном}} + \Delta T \right) - M[T_{\text{H}(0,1;0,9)}]} \right\}^2 + \left\{ \frac{1}{\left([T_{\text{H}(0,1;0,9)}]_{\text{ном}} - \Delta T \right) - M[T_{\text{H}(0,1;0,9)}]} \right\}^2 \right\}. \quad (8)$$

Данные имитационного моделирования показывают, что при равномерном распределении параметров цепи распределение времени нарастания отличается от нормального (рис. 1).

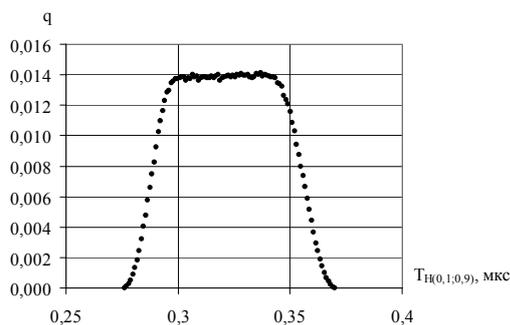


Рис. 1. Характерный график плотности распределения времени нарастания значений импульса.

$$R = 20 \text{ Ом}, L = 3,5 \text{ мкГн}, C = 0,9 \text{ мкФ}, \delta R = 0,02, \delta L = 0,12, \delta C = 0,22$$

При этом оценка вероятности безотказной работы, производимая по соотношению (8) дает сильно заниженное значение. Например, для данных моделирования, представленных на рис. 1 при $\delta(T_{\text{H}(0,1;0,9)}) = 0,07$ оценка по (8) дает значение вероятности безотказной работы $P_{\text{бр}} \geq 0,17$; по результатам имитационного моделирования $P_{\text{бр}} = 0,666$. Формальная оценка по (7) дает завышенное, но более близкое значение $P_{\text{бр}} = 0,728$. Такое соотношение между значениями оценок позволяет предположить возможность использования соотношения (7) для оценки вероятности безотказной работы и при неизвестном законе распределения времени нарастания.

Как показали проведенные расчеты, при изменении относительного отклонения параметров цепи δR , δL , и δC в интервале [0 до 0,2], и допуском относительном отклонении времени нарастания $\delta(T_{\text{H}(0,1;0,9)}) > 0,125$ для оценки вероятности безотказной работы можно воспользоваться соотношением (7). При этом погрешность определения вероятности безотказной работы с доверительной вероятностью 0,9 не превышает 10%. Учитывая, что допускаемые отклонения времени нарастания в нормативных документах задаются в пределах 0,1 – 0,3 от номинального значения, использование выражения (7) для расчетов можно считать приемлемым.

ВЫВОДЫ

1. Выведены аналитические соотношения для определения математического ожидания и дисперсии времени нарастания значений испытательного импульса тока. Показано, что данные соотношения могут быть использованы при распределении значений параметров элементов схемы резко отличных от нормального распределения.

2. Приведены соотношения, позволяющие определять вероятность безотказной работы генератора импульсов тока по параметру – время нарастания импульса.

Материалы статьи могут быть использованы для исследования статистических характеристик других параметров, характеризующих испытательный импульс тока.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Надежность технических систем / Е.С. Переверзев, А.П. Алпатов, Ю.Ф. Даниев, П. Новак. — Д.: Пороги, 2002. — 397 с.
- [2] Петков А.А. Усовершенствование разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с учетом критериев их надежности: Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.13. — Харьков, 2004. — 205 с.
- [3] Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтных импульсных испытательных устройств // Труды 12-й международной научно-технической конференции "Физические и компьютерные технологии" (7-8 июня 2006 года г. Харьков). — Харьков: ХНПК "ФЭД", 2006. — С. 224 – 226.
- [4] Петков А.А. Расчет параметрической надежности генератора импульсов тока // Электротехника. — 1993. - №5. — С. 69 – 71.
- [5] Петков А.А. Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы апериодической формы // Электротехника та електроенергетика. - 2005. - №1. — С. 65 - 69.
- [6] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Высш.шк., 2002. - 575 с.
- [7] ГОСТ Р 50932-96 Устойчивость оборудования проводной связи к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 1996. — 15 с.

Поступила 26.06.2008

БАРАНОВ МИХАИЛ ИВАНОВИЧ

(К 60-летию со дня рождения)

Михаил Иванович Баранов родился 29 января 1949 года в г. Мглине Брянской области (Российская Федерация). В 1966 году поступил на учебу в Харьковский политехнический институт (ХПИ) на инженерно-физический факультет, который в 1972 году окончил по специальности "Инженерная электрофизика". С марта 1972 года и по сей день он работает в Научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте (НИПКИ) "Молния" Национального технического университета (НТУ) "ХПИ". Прошел трудовой путь от инженера-электрофизика до заведующего отделом электромагнитных испытаний. С 1974 по 1977 годы учился в очной аспирантуре ХПИ по специальности "Техника высоких напряжений". В 1977 году за активное участие в научно-практической работе стал лауреатом премии Всесоюзного общества изобретателей и рационализаторов СССР. С 1972 по 1978 годы



активно занимался исследованием, разработкой и созданием высоковольтных устройств для прогрессивной импульсной обработки металлов давлением сильного магнитного поля. В 1978 году М.И. Баранов защитил кандидатскую диссертацию на прикладную тему "Электромагнитные и электродинамические процессы в аппаратуре для магнитно-импульсной обработки металлов". За цикл научных работ по обработке металлов магнитным давлением в 1979 году он был награжден Грамотой Президиума Академии наук УССР. С 1979 года Михаил Иванович начал работать в области разработки и создания высоковольтной импульсной техники (ВИТ) специального назначения. Со временем в область научно-технических интересов М.И. Баранова вошли актуальные вопросы обеспечения электромагнитной, электро-термической и электродинамической стойкости технических объектов ВИТ, электроэнергетических и аэрокосмических систем к воздействию больших импульсных токов, мощных электромагнитных помех естественного и искусственного происхождения. В 1980 году был награжден дипломом Министерства высшего и среднего специального образования СССР за научное руководство работой, удостоенной медали "За лучшую научную студенческую работу". В 1981 году М.И. Баранову было присуждено ученое звание старшего научного сотрудника. С 1996 по 1999 годы он учился в докторантуре НТУ "ХПИ". В декабре 1999 года Михаил Иванович защитил докторскую диссертацию на тему "Переходные процессы при воздействии больших импульсных токов и сильных импульсных магнитных полей на проводящие объекты". В 2004 году Министерством образования и науки Украины он был награжден знаком "Отличник образования Украины".

В 2006 году М.И. Баранов в составе авторского коллектива ученых НТУ "ХПИ" за разработку и соз-

дание новых уникальных образцов современной ВИТ был удостоен высокой награды – присуждения Государственной премии Украины в области науки и техники. Немало творческих усилий М.И. Баранов

приложил для разработки научно-технических основ ВИТ и развития высоковольтного испытательного полигона НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ", заслуженно ставшего в 1999 году объектом Национального достояния Украины. В последние годы Михаил Иванович плодотворно трудится над решением важных научных задач в области ВИТ на основе аппарата квантовой физики, а также занимается изучением таких природных феноменов как линейная и шаровая молния. Здесь ему на базе волн де Бройля удалось теоретически обосновать и экспериментально с помощью мощного электрооборудования ВИТ подтвердить новый квантовый эффект, связанный с возникновением пе-

риодической электронной и тепловой макроскопической структуры в проводниках с импульсным током. Нельзя не отметить его нынешнее интересное для нас творческое увлечение, направленное на историко-публицистическое описание научной деятельности выдающихся ученых-физиков в области электричества и электротехнологий. С 2007 года М.И. Баранов включился в учебно-педагогическую работу по совместительству в качестве профессора по кафедре "Инженерная электрофизика" НТУ "ХПИ". Не забывает Михаил Иванович и о общественной работе в профсоюзном движении университета. С 2002 года он активно сотрудничает с редакцией нашего журнала как автор разноплановых статей и член редколлегии. Он подготовил одного кандидата технических наук, в настоящее время руководит подготовкой диссертаций еще двух соискателей. В 2008 году в издательском центре НТУ "ХПИ" вышел из печати 1 том его двухтомника "Избранные вопросы электрофизики" (2 том готовится к изданию в 2009 году). На высокий научно-технический уровень этого ученого указывает то, что он входит в состав трех специализированных советов (Д64.050.08, Д64.050.09 и К64.050.06) по присуждению научных степеней доктора и кандидата технических наук. М.И. Баранов является автором 75 изобретений и более 150 научных статей в ведущих отечественных и зарубежных журналах и сборниках.

Ректорат НТУ "ХПИ", профком, деканат физико-технического факультета, сотрудники НИПКИ "Молния" и кафедры "Инженерная электрофизика" университета желают Михаилу Ивановичу крепкого здоровья, дальнейших творческих успехов в педагогической работе, науке и технике на благо нашей державы.

Редакционная коллегия журнала "Электротехника і електромеханіка" присоединяется к этим пожеланиям.

Список авторів

А		Л	
Августинович Анна Анатольевна	33	Лысак Виктория Владимировна	33
Б		Лущик В'ячеслав Данилович	17
Баранов Михаил Иванович	42, 55	Лупанов Андрій Вікторович	9
Батыгин Юрий Викторович	59	М	
Бондаренко Александр Юрьевич	59	Милых Владимир Иванович	20
В		П	
Вахновецкая Мария Александровна	33	Павленко Татьяна Павловна	25
Г		Петков Александр Александрович	62
Гаврилюк Роман Богданович	5	С	
Гречко Николай Владимирович	20	Сериков Георгий Сергеевич	59
Ж		Ф	
Жемеров Георгий.Георгиевич	37	Филатов Максим Анатолійович	9
З		Финкельштейн Владимир Борисович	13
Заблодский Микола Миколайович	9	Ш	
Зинченко Елена Евгеньевна	13	Шавелкин Александр Алексеевич	28
И		Шинкаренко Василий Федорович	33
<u>Иваненко Виталий Никитович</u>	20		
К			
Квасов Віктор Олексійович	9		
Кириянов Володимир Валерійович	17		
Колесник Виктор Юрьевич	37		

Abstracts

Electrical Mashines and Apparatus

- Gavrilyuk R.B.*
Conservation of excitation harmonics in symmetric polyphase winding circuits.
Relations between numbers of conductors in all the coils of a winding circuit, winding coefficients of excitation harmonics, slot leakage and differential scattering are analyzed.
Key words – **polyphase winding circuit, excitation harmonics, winding coefficients, relations.**
- Zablodskiy N.N. Filatov M.A., Kvasov V.A., Lupanov A.V.*
Experimental research into harmonic spectrum of a multifunctional submersible electromechanical energy converter.
Results of experimental research are given, voltage spectrograms are obtained under different operation conditions, the mechanism of higher harmonic generation in a multifunctional submersible electromechanical energy converter is revealed.
Key words – **electro- thermo- mechanical converter, voltage spectrograms, higher harmonic generation mechanism, experimental research.**
- Zinchenko E.E., Finkelshein V.B.*
A technique of magnetization curve approximation for switched reluctance motors.
The paper presents a technique of magnetization curves approximation for switched reluctance motors and determination of magnetic linkage versus current and rotation angle of the rotor on the basis of MathCAD-2001 spline approximation and spline interpolation. The dependence is used for mathematical formulation of processes in switched reluctance motors and calculation of their parameters and characteristics.
Key words – **switched reluctance motor, magnetization curves approximation, MathCAD-2001 based technique.**
- Luschik V.D., Kirjanov V.V.*
Induction motors for mine conveyors with advanced startability.
A new way of improving starting characteristics is described by the example of a mine conveyor motor.
Key words – **mine conveyor motor, starting characteristics, improvement.**
- 5 *Milykh V.I., Ivanenko V.N., Grechko N.V.* 20
Mathematical simulation of valve inductor generator operating conditions.
A mathematical model of a valve inductor generator with overlapped excitation and armature windings is considered, the generator operating under valve load of active type and with auxiliary diodes in the armature winding phases.
Key words – **valve-inductor generator, overlapped windings, mathematical model.**
- Pavlenko T.P.* 25
Physical processes on contact surface subject to plasma streams and thermionic material activity.
Physical processes on the effective contact area and in the interior of the whole composition have a significant effect on operation of the entire contact system. Analysis of the processes interaction adjusted for the contact composition properties has always been topical. The paper deals with a problem of plasma streams interaction subject to thermal emissivity of the contact material.
Key words – **contact area, physical processes, plasma streams, thermal emissivity.**
- Shavyolkin A.A.* 28
Improvement of cascade multilevel frequency converter characteristics.
A feasibility of providing high-quality output voltage and input current for cascade multilevel frequency converters under minimum inverter-unit switching losses is studied. A selective formation of inverter voltage under minimum inverter switching and inverter voltage fundamental harmonic shift in the converter phase is suggested.
Key words – **cascade multilevel frequency converter, minimum inverter switching losses, inverter voltage selective formation.**
- 13 *Shynkarenko V.F., Avgustynovych A.A., Lysak V.V., Vachnovetskaya M.A.* 33
Structural isomery and its modelling in problems of electromechanical structures genetic synthesis.
The definition of structural isomery is given. Relation between structural isomery and genetic principle of electromagnetic chromosomes replication is validated. A structural isomers synthesis method based on sequential genetic and geometrical transformations is developed.
Key words – **structural isomery, genetic principle of replication, electromagnetic chromosomes, prediction function of systematic.**
- 17

Zhemerov G.G., Kolesnik V.Ju.

A refined thyristor model for valve inverter simulation in Matlab 7.0.

In the article, a refined model of a gate-controlled thyristor is considered for Matlab 7.0. The introduced model, unlike the one presented in Simulink library, takes into account presence of the thyristor recovered charge. By the example of a

37 six-pulse controlled rectifier model, influence of the recovered charge on the magnitude of repetitive voltage surge on the thyristor is shown. A repetitive overvoltage protection circuit calculation algorithm is given.

Key words – **refined thyristor model, recovered charge, repetitive overvoltage protection, Matlab 7.0.**

High Electrical and Magnetic Field Engineering

Baranov M.I.

Breakthrough impulse material processing technologies: history, basic physics and technical feasibilities.

The paper touches on short history of origin and development, in Ukraine and abroad, of such basic impulse technologies of solid, liquid and gaseous materials processing as an explosive, electrohydraulic, magnetic-pulse, electroerosion, integrated high-voltage electromagnetic, wideband electromagnetic therapeutic, cavitation, and corona-ozone ones. The basic physics, specificity, and technical feasibilities of each of the above-mentioned breakthrough technologies are given.

Key words – **breakthrough impulse technologies, material processing, short history.**

Baranov M.I.

Application of new gas-discharge and solid-state semiconductor switchboards in high-current circuits of powerful high-voltage electrophysical installations.

The paper reviews the main recent foreign studies in the field of development and creation of a new generation of powerful switchboards used in high-current discharge circuits of high-voltage electrophysical installations with capacitive energy storage for scientific and technological applications.

Key words – **gas-discharge and solid-state semiconductor switchboards, high-voltage electrophysical installations, recent foreign studies review.**

42

Batygin Yu.V., Serikov G.S., Bondarenko A.Yu.

An induction inductor system of rectangular geometry.

Results of experimental research on induction inductor systems of rectangular geometry are presented. It is shown that, unlike a cylindrical induction system, a rectangular-shape double coil allows achieving essentially higher degree of evenness in spatial distribution of eddy currents and excited forces of electrodynamic attraction in the working zone.

Key words – **induction inductor system, rectangular-shape double coil, experimental research.**

Petkov A.A.

55

Statistical characteristics of current pulse rise time distribution in a high-voltage test device.

In the work, expressions for determination of expectation and dispersion of a current test pulse rise time are introduced. Their application to a test device reliability probability estimation is shown.

Key words – **current pulse, digit circuits, test device, rise time distribution, statistical characteristics.**

59

62

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ 2008 РОКУ

№1

Баранов М.И.	Лев Давидович Ландау – основоположник харьковской научной школы теоретической физики и квантовой физики конденсированного состояния материи	5
Выровец С.В., Чепелюк А.А.	Анализ влияния ферромагнитных шунтов в рабочем зазоре на тяговые усилия в электромагните с однопозиционной магнитной защелкой	15
Голенков Г.М., Пархоменко Д.І., Макогон С.А., Бондар Р.П., Богасенко М.В., Попков В.С.	Моделювання роботи коаксиально-лінійного синхронного вібратора з магнітним підвісом	18
Загирняк М.В., Бранспиз М.Ю.	Базовые уравнения задачи синтеза Ш-образного электромагнита	21
Лупиков В.С., Середа А.Г., Литвиненко В.В.	Быстродействующий автоматический выключатель постоянного тока высокого напряжения	25
Мишин В.И., Каплун В.В., Макаревич С.С.	Асинхронный электромеханический комплекс в автономной системе	30
Панченко В.І., Ципленков Д.В. Гребенюк А.М. Кириченко М.С.	Асинхронний двигун з явно вираженими зубцями та шестифазною обмоткою на статорі	36
Петрушин В.С., Якимец А.М., Каленик Б.В.	Влияние насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора на энергетические показатели регулируемых асинхронных двигателей	38
Радимов И.Н., Рымша В.В., Гулый М.В., Процина З.П., Чан Тхи Тху Хьонг	Разработка вентильных двигателей с постоянными магнитами на базе штампа статора реактивной машины	41
Ставинский А.А.	Особенности назначения и использования специальных электрических машин	44
Сосков А.Г., Рак Н.О., Соскова И.А.	Анализ методов расчёта температуры полупроводниковой структуры силовых полупроводниковых приборов в условиях их работы в коммутационных полупроводниковых аппаратах	49
Ткачук В.І., Каша Л.В.	Шляхи зменшення пульсацій електромагнітного моменту вентильного реактивного двигуна з буфером енергії	53
Чабан А.	Застосування штучних нейронних мереж для аналізу електромеханічних систем	57
Баранов М.И.	Аналитическая оценка смещения периодической структуры волнового электронного пакета в металлическом проводнике с переменным электрическим током проводимости	60
Борцов А.В.	Генератор для физического моделирования импульсных электромагнитных полей	63

№2

Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С.	Устройство защиты компьютерной информации от несанкционированного доступа на основе индукционно-динамического двигателя	5
Васьковский Ю.Н., Гайденок Ю.А.	Принцип относительности и выбор системы координат при анализе электромагнитного поля в электрических машинах	11

Гречко А.М., Бугайчук В.М.	Исследование и расчет размеров магнитопровода электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой	15
Дегтев В.Г., Бабушанов А.В.	Проектирование безконтактных совмещенных синхронных генераторов	21
Заблодский Н.Н., Филатов М.А., Квасов В.А., Гринь Г.М.	Переходные процессы полифункциональных электротепломеханических преобразователей технологического назначения	25
Красовский П.Ю., Цыпленков Д.В.	Устройство контроля хищений электроэнергии	29
Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А.	Разработка нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин	31
Лелюк Н.А., Луников В.С.	Исследование вибрации механических систем на основе аналогии с электрическими схемами замещения	35
Лущик В.Д.	Електричні машини постійного струму з новою системою електромагнітного збудження	39
Мишин В.И., Козырский В.В., Чуенко Р.Н.	Методика расчета характеристик компенсированного асинхронного двигателя	42
Мороз В.І., Харчишин Б.М.	Числово-аналітичний метод розрахунку електромеханічних систем	45
Пуйло Г.В., Кузьменко И.С., Тонгалюк В.В.	Современные тенденции совершенствования распределительных трансформаторов	48
Ставинский А.А., Ставинский Р.А.	Классификации структур и элементов электромагнитных систем электромеханических и индукционных статических преобразователей	53
Баранов М.И.	Полевая и цепная формулировки фундаментальной задачи о передаче электромагнитной энергии в системе "металлический провод – проводящая земля" с переменным электрическим током	59
Пентегов И.В., Рымар С.В., Красножон А.В.	Расчет удельных потерь в ферромагнитных материалах при повышенных частотах с учетом нелинейности магнитных характеристик среды	64
Петков А.А.	Учет характеристик коммутаторов при анализе и синтезе разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств	68
Клименко Б.В.	Стандарти "ДСТУ ІЕС" та україномовна електротехнічна термінологія: шляхи до гармонізації	73

№3

Безотосный В.Ф., Козлов В.В., Набокова О.В.	Современные подходы и перспективные направления разработки систем управления по силовому параметру	5
Волкова О.Г.	Влияние скорости размыкания на электроизнос дугогасящих контактов в аппаратах высокого напряжения	7
Жемеров Г.Г., Колесник В.Ю.	Пуск асинхронной машины от автономного инвертора напряжения с шим с синхронизацией напряжения инвертора и сети	10
Жорняк Л.Б., Осинская В.И., Райкова Е.Ю., Снигирев В.М.	Основные направления улучшения качества высоковольтных вводов оборудования энергосистем	17
Конохов Н.Н.	Эффективность и принципы проектирования симметричных систем охлаждения электрических машин	22

Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А.	Синтез нейроконтроллера с предсказанием для двухмассовой электромеханической системы	27
Кузьмин В.В., Шофул А.К., Шпатенко В.С.	Вибромеханика статоров мощных синхронных генераторов при кольцевом намагничивании	33
Ларин А.М., Гуедиди Фаузи Бен Килани	Экспериментальное определение параметров схем замещения синхронных машин при представлении обмотки возбуждения многоконтурной цепью	37
Бару Ю.А. Мельник А.К., Ткаченко С.В., Милых В.И.	Выбор типа и основных параметров линейного импульсного электродвигателя для невзрывных сейсмоисточников	41
Поляков М.А.	Управление охлаждением силового масляного трансформатора по критерию эффективности	45
Саблин О.И.	Мгновенные энергетические показатели электроподвижного состава постоянного тока	48
Шведчикова И.А.	Применение информационного подхода к анализу развития электромеханических систем	51
Горбачев М.Н., Милка А.Д.	Метод геометрического моделирования периодических негармонических энергетических процессов и его применение в радиотехнике	56
Реуцкий С.Ю., Ассуиров Д.А.	Об одном численном методе решения задачи Неймана в связи с решением проблемы управления внешним магнитным полем технических объектов в замкнутой системе	58
Баранов М.И.	Экспериментальное обнаружение и исследование "горячих" и "холодных" продольных участков в тонком металлическом проводе с импульсным током большой плотности	63
Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С.	Мощная высоковольтная электрофизическая установка для имитации полного тока молнии при натуральных испытаниях и проверке средств молниезащиты технических объектов	69

№4

Баранов М.И.	Радиоэлектроника: краткая история ее становления в качестве основообразующей физико-технической области электричества и научно-технического прогресса человечества	5
Гаврилюк Р.Б.	Схеми симетричних трифазних двошарових обмоток з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2 (кількість пазів $z = 48$)	13
Гапоненко Г.Н, Кобозев А.С., Омельченко В.В.	Повышение надёжности защиты сетей 0,4 кВ выключателями с микропроцессорными расцепителями за счет расширения перечня защит, повышения чувствительности к удалённым кз и реализации режима "дальнего резервирования"	19
Канов Л.Н.	Определение искажения фазного напряжения синхронного генератора при импульсном возбуждении с помощью схемного моделирования	24
Клименко Б.В., Кохановський В.О.	Особливості електричної ерозії контактів реле на основі срібла з добавками оксидів	28
Князев В.В., Сафнюк Г.Ю.	Оценка неопределенности результатов аттестации генератора микросекундных импульсных помех большой энергии	30
Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А.	Нейроуправление нелинейным динамическим объектом с использованием метода обобщенного управления с предсказанием	34
Невзлин Б.И., Загирняк М.В., Загирняк В.Е.	Уточнение значения коэффициента полезного действия асинхронных двигателей средней мощности	42

Нижевский И.В., Нижевский В.И.	Электрические характеристики двухуровневого эквипотенциального заземлителя из одиночных кольцевых электродов	44
Сосков А.Г., Рак Н.О.	Исследование токораспределения между главными контактами и шунтирующей цепью с полупроводниковым ключом при отключении тока гибридным контактором	48
Терешин В.Н., Богданова Л.Е.	Об одном направлении повышения стабильности уставки тока перегрузки автоматических выключателей	53
Шайда В.П., Дубинина О.Н.	Регрессионный анализ характеристики холостого хода двигателя постоянного тока	57
Баранов М.И.	Физическое ограничение применимости модели слабодиссемируемых свободных электронов в металлическом проводнике с электрическим током проводимости	60
Батыгин Ю.В., Воробьев Д.А.	Магнитное поле одновиткового индуктора с внутренним отверстием конического профиля	63
Золотарев В.В., Карпушенко В.П., Золотарев В.М., Науменко А.А.	Распределение стационарного электрического поля в цилиндрическом неидеальном диэлектрике	65
Кравченко В.И., Князев В.В., Лесной И.П., Немченко Ю.С., Гирка Ю.Н.	Экспериментальные исследования выходных характеристик эталона РЭМП	70
Кравченко Ю.В., Набока Б.Г., Рудаков В.В., Антонец Ю.А., Золотарев В.М., Карпушенко В.П.	Резонансная установка для испытания коротких отрезков высоковольтных кабелей	75

№5

Баранов М.И.	Радиоэлектроника: краткая история ее становления в качестве основообразующей физико-технической области электричества и научно-технического прогресса человечества	5
Бойко А.С., Завгородній В.Д.	Основи проектного розрахунку давачів обмеженого кута повороту з трансверсною магнітною системою	10
Зинченко Е.Е., Финкельштейн В.Б.	Раскрой листов магнитопровода вентильных индукторно-реактивных двигателей	16
Кузнецов Б.И., Василец Т.Е., Варфоломеев А.А.	Синтез и исследование динамических характеристик нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин при случайных возмущающих воздействиях	20
Лимонов Л.Г.	Компесация динамического момента асинхронного электропривода моталки полосы	24
Радимов И.Н., Рымша В.В., Чан Тхи Тху Хьонг, Процина З.П.	Геометрические соотношения в вентильном двигателе с постоянными магнитами	26
Фомин В.И.	Влияние кварцевого наполнителя на гашение дуги в плавких предохранителях	29
Шумилов Ю. А., Демидок Б. М., Штогрин А.В.	Результаты экспериментальных исследований вибраций турбогенератора ТВВ-1000-2УЗ энергоблока № 3 ЮУ АЭС	32
Байда Е.И.	Расчет переходных процессов в электромагнитном механизме на основании уравнений электромагнитного поля	39
Баранов М.И.	Исследование стохастического распределения электронных полувольт де бройля и волновых пакетов в проводнике с импульсным током проводимости большой плотности	44

Чабан В.	Коенергія електромагнетного поля	50
Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А.	Экспериментальное исследование процессов возбуждения вихревых токов в плоских листовых металлах	52
Беспрозванных А.В., Набока Б.Г.	Влияние диссипации энергии в приповерхностных слоях изоляции жил на диэлектрические потери в кабелях	55
Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М.	Компактный многомодульный генератор импульсов тока на 2 мА	60
Бондаренко А.Ю.	Разряд ёмкости на плоский одновитковый индуктор, расположенный над тонкостенной листовой заготовкой	65
Сериков Г.С.	Магнитное поле и давления, возбуждаемые индуктором с токопроводами конечной ширины, в угловых изгибах заготовки	70

№6

Баранов М.И.	Радиоэлектроника: краткая история ее становления в качестве основообразующей физико-технической области электричества и научно-технического прогресса человечества	5
Безотосный В.Ф., Власенко Э.В., Козлов В.В., Афанасьева И.О., Набокова О.В., Емельянов В.Л.	Деякі актуальні напрямки неруйнуючого контролю властивостей матеріалів електромагнітними методами	10
Гречко А.М.	Динамические характеристики электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой	14
Жемеров Г.Г., Колесник В.Ю.	Анализ процессов в активном управляемом выпрямителе – источнике тока в системе пуска асинхронных машин	19
Клименко Б.В.	Електричні та магнітні пристрої: термінологія міжнародного електротехнічного словника	26
Макогон С.А.	Моделювання сил одностороннього магнітного тяжіння в коаксіально-лінійному синхронному вібраторі при несиметричному розташуванні якоря	33
Милых В.И., Ткаченко С.В.	Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний	36
Радимов И.Н., Гуль М.В., Рымша В.В., Чан Тхи Тху Хыонг	Параметры вентильного двигателя с постоянными магнитами	40
Гетьман А.В.	Универсальные селективирующие контуры измерительной системы разнотипных пространственных гармоник магнитного поля	44
Канов Л.Н.	Построение и исследование характеристик феррорезонансной цепи на основе метода схемного моделирования	47
Баранов М.И.	Шаровая молния – мощный природный молекулярный накопитель атмосферного электричества. Новая гипотеза происхождения и теория электрофизического феномена	51
Батыгин Ю.В., Маджид Бижар, Сериков Г.С.	Исследования индукторной системы для формирования угловых изгибов в листовых заготовках	60
Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Черногор Т.Т.	Эксперименты с индукционными индукторными системами для магнитно-импульсного притяжения листовых металлов	64
Петков А.А.	Расчет допусков разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств	68

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У НАУКОВО-ПРАКТИЧНОМУ ЖУРНАЛІ "ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА"

Шумилов Ю.А., д.т.н., проф.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"
Україна, 03056, Київ, пр-т Перемоги, 37, НТУУ "КПІ", кафедра "Електромеханіка"
тел. (044) 241-76-38

Клименко Б.В., д.т.н., проф.

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"
Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ", кафедра "Електричні апарати"
тел. (057) 707-62-81, факс (057) 707-66-01, E-mail: eie@kpi.kharkov.ua

Текст анотацій українською мовою, до 5 рядків (для громадян України).

Текст анотацій на російській мові, до 5 рядків.

ВСТУП

У журналі публікуються результати досліджень і огляди у області електричних машин і апаратів, сильних магнітних полів і теоретичної електротехніки, що не публікувалися раніше, методичні матеріали по напрямках підготовки "Електротехніка" і "Електромеханіка", а також інформаційні матеріали за профілем журналу.

Пакет документів, що направляється в редакцію повинен містити:

1) у друкованому варіанті:

— стаття або інформаційний матеріал (1 екз.) виконаний на аркушах паперу формату А4 густиною 80 – 90 г/м², віддрукований на лазерному принтері з роздільною здатністю не менше 300 dpi;

— акт експертизи з печаткою (для громадян України). Офіційний лист з проханням опублікувати статтю (для громадян зарубіжних країн);

— рецензія (підписується доктором наук і засвідчується печаткою);

— копія документа про оплату за публікацію.

2) в електронному варіанті:

— стаття або інформаційний матеріал, виконаний у відповідності до даних вимог (без колонтитулів і нумерації сторінок);

— анотація англійською мовою (автори, назва статті, анотація, ключові слова);

— відомості про авторів (прізвище, ім'я, по-батькові повністю, дата народження, місце роботи, посада, основні напрями наукової діяльності).

Анотація і відомості про авторів виконуються у вигляді окремого документа Microsoft Word і з довільним форматуванням.

Оригінал статті або інформаційних матеріалів готується тільки з використанням редактора Microsoft Word однією з трьох мов: українською, російською або англійською.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТИ

Всі розділи документа повинні містити поля: зліва, справа, зверху – по 20 мм, знизу – 25 мм. Заповнення останньої сторінки повинне бути не менше 80%.

Заголовок статті містить:

— код УДК;

— назва статті (Times New Roman 12pt, жирний, розміщення по центру, заголовні букви, не допускаються перенесення);

— список авторів, вчений ступінь (при необхідності звання і посада), назва організації, поштова адреса, контактні телефони (факс, E-mail). Для авторів різних організацій список приводиться по даній вище формі; — анотації статті українською (обов'язково тільки для громадян України) і російською мовою, обсягом до 5 рядків кожна, оформляються шрифтом Times New Roman 9 pt, жирний, курсив.

Між елементами заголовку статті робиться інтервал в один рядок 10 pt.

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Текст розміщується у двох колонках, відстань між якими 5 мм. Абзацні відступи (червоний рядок) – 7,5 мм. Текст набирається шрифтом Times New Roman 10 pt з одиночним міжрядковим інтервалом. Допускається розділення тексту на розділи. Назва розділу оформляється заголовними буквами і центрується, нумерація – не обов'язкова (розділи ВСТУП, ВИСНОВОК і ЛІТЕРАТУРА, якщо такі є, не нумеруються). Перед назвою розділу вставляється один порожній рядок.

Рисунки і широкі таблиці допускається розміщувати в одну колонку. Назва виконується шрифтом розміром 9 pt. Допускається використання рисунків і таблиць без назви: Рис. 1, Табл. 1.

Таблиця 1

Розміри полів тексту статті

Поле зліва	20 мм
Поле справа	20 мм
Поле зверху	20 мм
Поле знизу	25 мм

Рисунки розташовуються у окремих абзацах, з вирівнюванням по центру і оформляються як окремі об'єкти, виконуються в редакторі рисунків Microsoft Word або вставляються в текст статті у форматі bmp або jpg.

Розташування рисунка поверх тексту і застосування альбомної орієнтації не допускається.

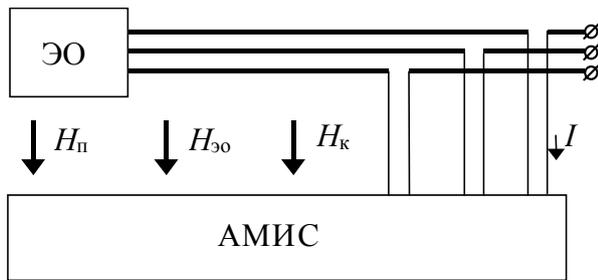


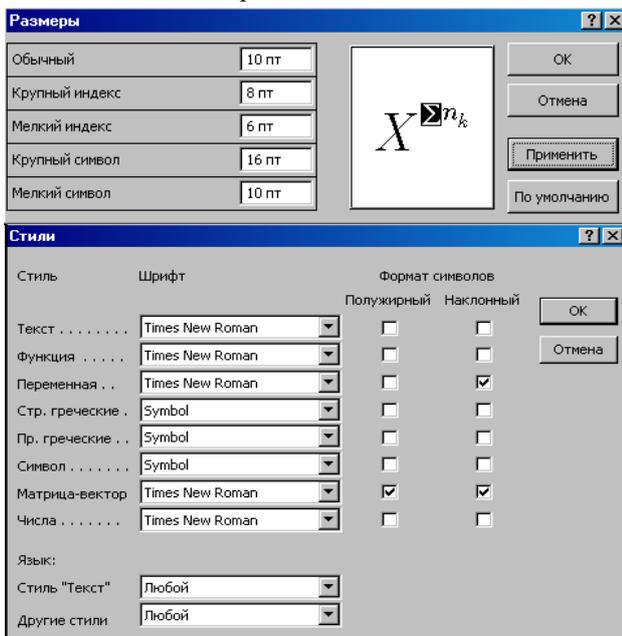
Рис.1. Функціональна схема пристрою

Математичні формули створюються у вигляді окремих об'єктів тільки в редакторі формул Microsoft Equation, розташовуються по центру і нумеруються в межах статті, номер притиснутий до правої сторони колонки. За формулою має слідувати розділовий знак, а якщо формула містить пояснення, то вони повинні починатися з нового абзаца із слова "де" без відступу

$$N = \frac{\tau_{u \max}}{T_k \text{ внутр}}, \quad (1)$$

де $\tau_{u \max}$ - ..., $T_k \text{ внутр}$ - ...

Настройки редактора формул для меню "Розмір" і "Стиль" символів представлені нижче:



Кириличні символи у формулах повинні бути виконані в стилі "Текст".

Щоб уникнути різного роду накладень символів у формулах не рекомендується застосовувати символ ділення /, букву ℓ , а також змінювати розмір об'єкту формули. Крім того, необхідно використовувати символ множення у вигляді крапки.

Великі вирази і рівняння необхідно записувати в декілька рядків

$$Y = \varphi_0(S_n) + \gamma_0 \cdot \int_{S=0}^{S_n} \varphi_0 \cdot \sin(S_n - S) \cdot dS + \gamma_0^2 \cdot \int_{S=0}^{S_n} P_0(S) \cdot \cos(S_n - S) \cdot dS. \quad (2)$$

Символи у формулах і в тексті статті повинні мати однакові зображення.

Перелік літератури розміщується в кінці тексту. Розмір шрифту - 9пт. Після відступу одного порожнього рядку (10пт) від основного тексту по центру колонки розташовують слово ЛІТЕРАТУРА. Нумерація джерел – у порядку посилань по тексту або в алфавітному порядку, номер поміщається у квадратних дужках з виступом.

ВИСНОВОК

Якщо Ви робите посилання на формули, рисунки, таблиці або літературу, необхідно використовувати наступні позначення: (1), (1) і (2), (1) – (4); рис. 1, рис. 1,а, рис. 1 і 2; табл. 1, табл. 1 і 2; [1], [1 – 3, 5].

ЛІТЕРАТУРА

- [1] P.V. Johns, "A symmetrical condensed node for the TLM method", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-35, Apr. 1997, pp. 370-377.
- [2] Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. – 272 с.
- [3] Лавров В.Я. Численно-аналитический метод расчета помехонесущих магнитных полей // *Техн. электродинамика*. – 1983. - № 61. - С. 18-21.
- [4] Пат. 14813 А Україна. МКИ G 01 R 33/24. Спосіб визначення залишкової та індукованої складових компонента магнітної індукції статичного зовнішнього магнітного поля феромагнітного виробу / А.В. Єрисов, В.С. Лупіков, В.Ю. Розов та ін.— №95125251; Заявлено 12.12.95; Опубл. 30.06.97. Бюл. №3. — 6 с.
- [5] Минкевич А.В. Физическое пространство — время и релятивистская космология // *Тез. докл. 10-й Росссийск. Гравитац. конф. "Теоретические и экспериментальные проблемы общей теории относительности и гравитации"* (г. Владимир, 20-27 июня 1999 г.). — М.: РГО, 1999. — с. 84.

В кінці статті, через інтервал в 1-2 рядки розміром 10пт, мовою оригіналу вказують дату надходження статті в редакцію журналу (розмір 9пт, курсив, розташування по правому краю). Наприклад:

Поступила 12.02.2009

або

Надійшла 12.02.2009

Матеріали приймаються за адресою:

Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна

Електронні варіанти матеріалів по E-mail: kbv@kpi.kharkov.ua eie@kpi.kharkov.ua

Довідки по телефонах: (057) 707-62-81 Клименко Борис Володимирович, Злунціна Наталя Ростиславівна