

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ

УДК 621.316.72

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.082>**ВПЛИВ ФОРМИ СТРУМУ ІНДУКТОРІВ ТА МАГНІТНОГО ПОТОКУ ЕЛЕКТРО-МАГНІТУ НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНУ СИЛУ, ЩО ДІЄ НА РОЗПЛАВЛЕНИЙ МЕТАЛ В АКТИВНІЙ ЗОНІ МАГНІТОДИНАМІЧНОГО НАСОСА****А.А. Щерба***, чл.-кор. НАН України, **М.О. Ломко****, канд. техн. наукІнститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: nlomko@gmail.com

Досліджено процеси створення електромагнітної сили, що діє на розплавлений метал в активній зоні магнітодинамічного насоса залежно від спектрального складу вищих гармонічних складових струму в каналі та індукції магнітного потоку, що наводиться електромагнітом. Визначено особливості регулювання величини й напрямку результуючого вектору цієї сили, сприятливі умови вібраційної дії на розплавлений метал в активній зоні. Бібл. 8, рис. 4, табл. 3.

Ключові слова: індуктор, електромагніт, активна зона, фазове управління, спектральний аналіз, електромагнітна сила.

Сучасні галузі промисловості, а нині насамперед військова промисловість, потребують високоякісних металів та сплавів. Здебільшого це стосується літакобудування та виготовлення сучасних безпілотних апаратів. Різноманіття індукційних установок, у яких виготовляються метали і сплави, дають змогу керувати якістю розплавленого металу завдяки оптимізації режимів їхньої роботи та вдосконаленню алгоритму електромагнітної дії на розплавлений метал під час його приготування.

Магнітодинамічні насоси (МДН) широко використовуються як дозатори розплавленого металу, що забезпечують під електромагнітним тиском примусове заповнення металом ливарної форми машини лиття в технологіях автоматичного виготовлення деталей. Але режими роботи МДН дають змогу застосовувати їх також як пристрої, що значно впливають на якість розплавленого металу. Окрім можливості приготування розплавленого металу необхідної якості в спеціальних плавильних печах з індукційними одиницями типу МДН (індукційна канална піч МДП-1 [1]), сама установка МДН може бути використана для отримання якісного розплавленого металу.

На початковому етапі експлуатації МДН користувалися виключно як дозатором. Основними характеристиками його продуктивності були величини електромагнітного тиску та точності дозування. Тому якості напруги, якою живилися електромагнітні системи МДН, приділялася значна увага. Тобто бажано було, щоб живляча напруга була близькою до гармонічної і синусоїдальної та містила в собі якнайменше вищих гармонік.

У процесі використання МДН для приготування розплавленого металу необхідної якості режими його роботи обумовлені як необхідністю інтенсивного перемішування розплавленого металу [2, 3], так і вібраційною дією на нього. Такі режими можуть бути забезпечені за допомогою частотного регулювання, а також живленням електромагнітних систем МДН різними за формою напругами. Для них наявність вищих гармонік не є критичною.

На рис. 1 а показана спрощена схема магнітодинамічного насоса. Тигель 1 сполучений з Ш-образним каналом, який складається з бокових каналів 2,3 та центрального 4. Бокові канали охоплюються магнітопроводами індукторів 5. Місце з'єднання бокових каналів і цен-



тального (активна зона) знаходиться між полюсами магнітопроводу електромагніту 6. Більш детально активна зона показана на рис. 1 б.

Для оцінювання впливу форми струму в каналі МДН та магнітної індукції в зазорі магнітопроводу електромагніту достатньо розрахувати силу, що діє на елемент струму довжиною $d\vec{l}$ зі струмом i в каналі, розташованому в зовнішньому магнітному полі з індукцією \vec{B} :

$$d\vec{f} = i[d\vec{l} \cdot \vec{B}]. \quad (1)$$

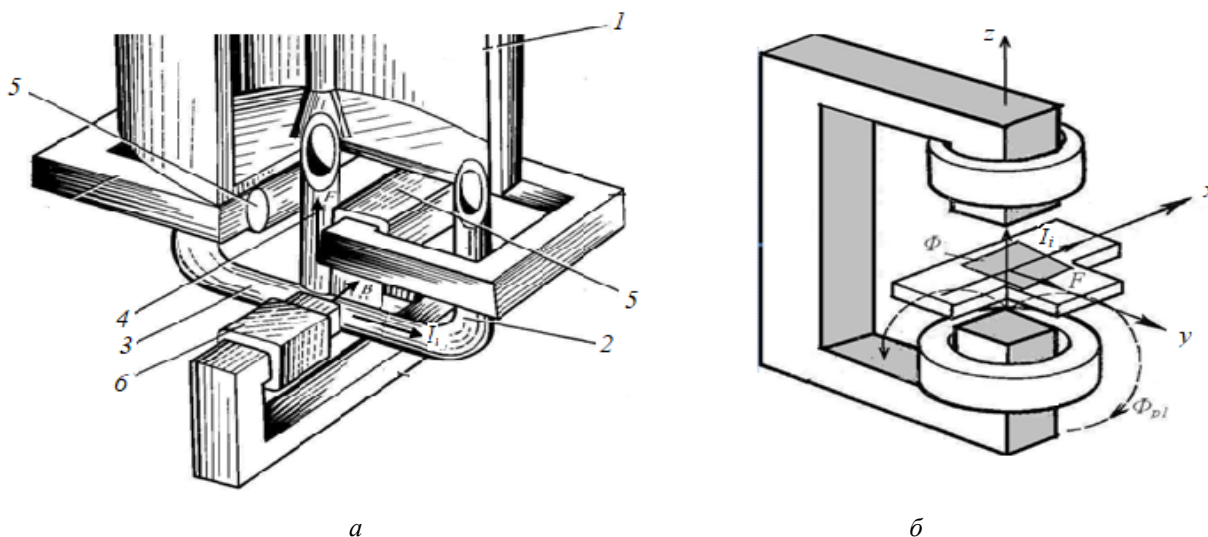


Рис. 1

Оскільки конструктивно в МДН канал зі струмом розташований перпендикулярно полюсам електромагніта (активна зона), то можна вважати $d\vec{l}$ і \vec{B} взаємно перпендикулярними. Модуль миттєвого значення елементарної сили буде дорівнювати:

$$df = iBdl. \quad (2)$$

Електромагнітна сила dF , що діє на розплавлений метал, є середнім значенням за період проходження струму миттєвої електромагнітної сили f . Викликає інтерес величина dF , якщо:

- струм та магнітна індукція змінюються за синусоїдним законом однакової частоти;
- струм синусоїдний, а магнітна індукція змінюється з частотою, однаковою з частотою струму за періодичним несинусоїдним законом;
- струм та магнітна індукція є періодичними несинусоїдними функціями однакової частоти.

У першому випадку маємо:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i), \quad B = B_m \sin(\omega t + \varphi_B). \quad (3)$$

$$\begin{aligned} df &= I_m B_m dl \sin(\omega t + \varphi_i) \sin(\omega t + \varphi_B) = \\ &= \frac{1}{2} I_m B_m dl \cos(\varphi_i - \varphi_B) - \frac{1}{2} I_m B_m dl \cos(2\omega t + \varphi_i + \varphi_B), \end{aligned} \quad (4)$$

де φ_i і φ_B – фазові кути струму в каналі i та магнітної індукції в зазорі електромагніту B .

Перша складова електромагнітної сили в рівнянні (4) є постійною в часі, залежить від різності фазових кутів струму в каналі та магнітної індукції в зазорі електромагніту і створює в розплавленому металі градієнт тиску. Ця складова електромагнітної сили використовується в МДН для переміщення металу та керування швидкістю його руху.

Друга складова електромагнітної сили в рівнянні (4) змінюється за синусоїдним законом із подвійною частотою живильної напруги. Завдяки їй в розплавленому металі виникають коливальні процеси.

Середнє значення миттєвої електромагнітної сили, що створює тиск у розплавленому металі, за період проходження струму дорівнює:

$$dF = \frac{1}{T} \int_0^T iB dl dt = \frac{1}{2} I_m B_m dl \cos(\varphi_i - \varphi_B) = I B_m dl \cos(\varphi_i - \varphi_B), \quad (5)$$

де I і B_m – діючі значення струму в каналі та магнітної індукції в зазорі електромагніту.

У другому випадку маємо:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i), \quad B = B_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_{m_k} \sin(k\omega t + \varphi_{B_k}), \quad (6)$$

де B_0 – постійна складова індукції B .

За аналогією до рівняння (5) маємо:

$$dF = i B_m dl \cos(\varphi_i - \varphi_{B_1}), \quad (7)$$

тобто середнє значення миттєвої сили, що створює тиск у розплавленому металі за період проходження струму, визначається лише величиною першої гармоніки магнітної індукції та кутом зсуву фаз між індукцією цієї гармоніки та струмом у каналі.

При несинусоїдних струмі та магнітній індукції, що не містять постійних складових та змінюються з однаковою частотою:

$$i = \sum_{k=1}^{\infty} I_{m_k} \sin(k\omega t + \varphi_{i_k}), \quad B = \sum_{k=1}^{\infty} B_{m_k} \sin(k\omega t + \varphi_{B_k}). \quad (8)$$

Середнє значення миттєвої електромагнітної сили буде дорівнювати:

$$dF = \sum_{k=1}^{\infty} I_k B_{m_k} dl \cos(\varphi_{i_k} - \varphi_{B_k}). \quad (9)$$

З виразу (9) маємо, що при несинусоїдних напругах, які живлять електромагнітні системи МДН (індуктори та електромагніт), результуюча електромагнітна сила, що діє на розплавлений метал в активній зоні визначається алгебраїчною сумою добутків складових, викликаних дією кожної гармоніки струму та магнітної індукції окремо. Кожна з цих складових є середнім значенням електромагнітної сили відповідної гармоніки. Ці складові можуть бути направлені в різні сторони, що значно впливає на результуючу електромагнітну силу та викликає вібрацію розплавленого металу в активній зоні.

Розглянуті вище три випадки одержання результуючої електромагнітної сили dF можна забезпечити регульованими зустрічно-паралельними напівпровідниковими комутаторами з фазовим управлінням [4], а також напівпровідниковими перетворювачами з проміжною ланкою накопичення енергії [5]. Напівпровідникові комутатори з фазовим управлінням включаються та виключаються синхронно зі змінною напругою джерела живлення та підключають до нього навантаження на визначену регульовану частину кожного періоду. Для активно-індуктивного навантаження з параметрами R_n та L_n (а такими є індуктори та електромагніт МДН) регулювання напруги й струму можливе за зміни кута вмикання напівпровідникового комутатора α в діапазоні $\varphi = \alpha_{кр} \leq \alpha \leq \pi$ де $\varphi = \arctg(\omega L_n / R_n)$. У процесі регулювання до навантаження прикладена несинусоїдна напруга, і тече переривчастий струм [4]. Їхній гармонічний склад залежить від величин α та φ . Тому середнє значення електромагнітної сили кожної гармоніки буде визначатися відповідним значенням гармонічної складової струму в каналі та гармонічної складової магнітної індукції в зазорі електромагніту, яка пропорційна гармонічній складовій струму електромагніту.

За останні роки моделюванню режимів роботи пристроїв на основі МДН приділяється значна увага [6-8]. У цій роботі представлено результати досліджень, отриманих за допомогою пакету прикладних програм для розрахунку електричних кіл Matlab. Було проведено макетування та розрахунок режимів роботи МДН у разі регулювання напруги на його електромагнітних системах (індукторах та електромагніті) за допомогою регульованих напівпровідникових комутаторів (рис. 2). На моделі індуктори МДН зображені у вигляді трансформаторів, навантаженнями яких є короткозамкнені витки розплавленого металу, які представлені двома контурами, що мають спільну ділянку (центральний канал). Електромагніт також являє собою трансформатор з навантаженням, вхідні параметри якого відповідають параметрам реального електромагніта. Активний опір та індуктивність розсіювання обмоток індукторів та електромагніту згідно з умовами моделювання в моделі представлені в умовних одиницях. У роботі не ставилася задача розробки нової Simulink-моделі МДН, а була використана

на раніше розроблена модель [4]. Вона лише доповнилася системою живлення й управління, що забезпечує індуктори та електромагніт періодичними несинусоїдними напругами заданої форми. Вхідні параметри моделі відповідають параметрам діючої установки МДН-6 для приготування та дозування алюмінієвих сплавів, а саме: параметри індукторів – кількість витків обмотки індуктора $w_1 = w_2 = 30$; переріз магнітопроводу індуктора $S_{in} = 80 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; активний опір обмотки індуктора $r_{in1} = r_{in2} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ (у.о.)}$; індуктивність розсіювання обмотки індуктора $L_{sin1} = L_{sin2} = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ (у.о.)}$, параметри електромагніта – кількість витків обмотки електромагніту $w_3 = 36$; переріз магнітопроводу електромагніту $S_{em} = 56 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; активний опір обмотки електромагніту $r_{em} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ (у.о.)}$; індуктивність розсіювання обмотки електромагніту $L_{sem} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ (у.о.)}$, довжина активної зони – 0,08 м.

Кожен напівпровідниковий комутатор представлений двома зустрічно-паралельно підключеними тиристорами, що керуються від автономної системи управління. На відміну від досліджень, які були проведені в [4], у цій роботі значна увага приділялась режимам, які забезпечують силову вібраційну дію на розплавлений метал в активній зоні МДН. Частота вібрацій металу залежить від того, яка гармонічна складова результуючої електромагнітної сили, що діє на розплавлений метал в активній зоні, має перевагу. Дослідження проводились за умови, що коефіцієнт потужності індукторів не перевищує $\cos \varphi_{in} \leq 0,8$, а коефіцієнт потужності електромагніту $\cos \varphi_{em} \leq 0,1$. Це означає, що на індукторах регулювання напруги починається з кута вмикання $\varphi_{in} = \alpha_{кр in} = 37^\circ$, а на електромагніті – з $\varphi_{em} = \alpha_{кр em} = 84^\circ$.

Для розширення діапазону вібраційної дії на розплавлений метал в активній зоні МДН було досліджено режими роботи за відсутності та наявності струму в центральному каналі, що характерно для паралельного-узгодженого та паралельного-зустрічного підключення індукторів. Цей фактор значно впливає на величини вертикальної та горизонтальної складових електромагнітної сили, що діє на розплавлений метал.

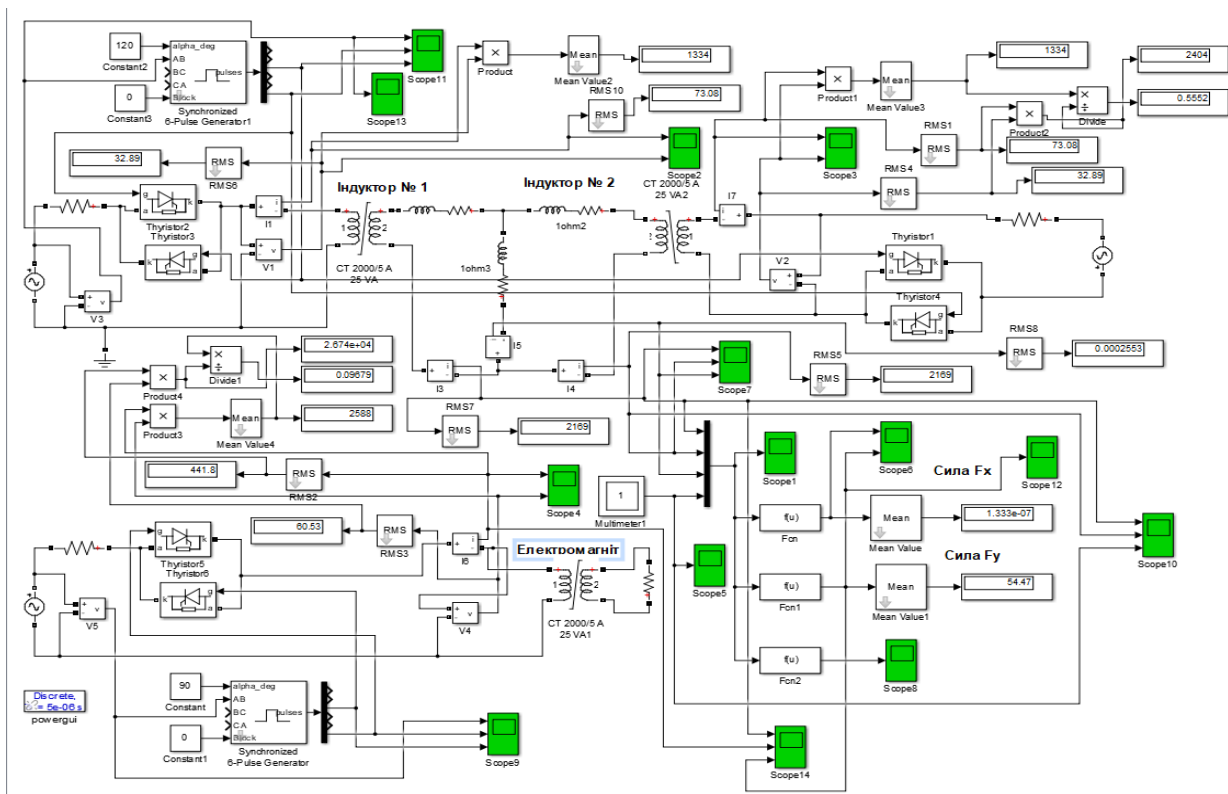


Рис. 2

Розглянемо традиційний для МДН як дозатора режим, коли індуктори підключені паралельно-узгоджено (струм у центральному каналі відсутній). Водночас електромагніт підключений таким чином, щоб наведений ним магнітний потік (магнітна індукція), що діє на розплавлений метал зі струмом індукторів, співпадали з ним у часі. При підведенні до індук-

торів та електромагніту номінальної напруги, осцилограми струму, наведеного в каналі індукторами, магнітної індукції електромагніта та електромагнітної сили, що діє в вертикальному напрямку на розплавлений метал (провідник зі струмом) в активній зоні, представлені на рис. 3 а. На рис. 3 б показано спектральний склад електромагнітної сили, тобто крім постійної складової для змінної складової характерна подвійна частота живильної напруги і відсутність складових інших гармонік.

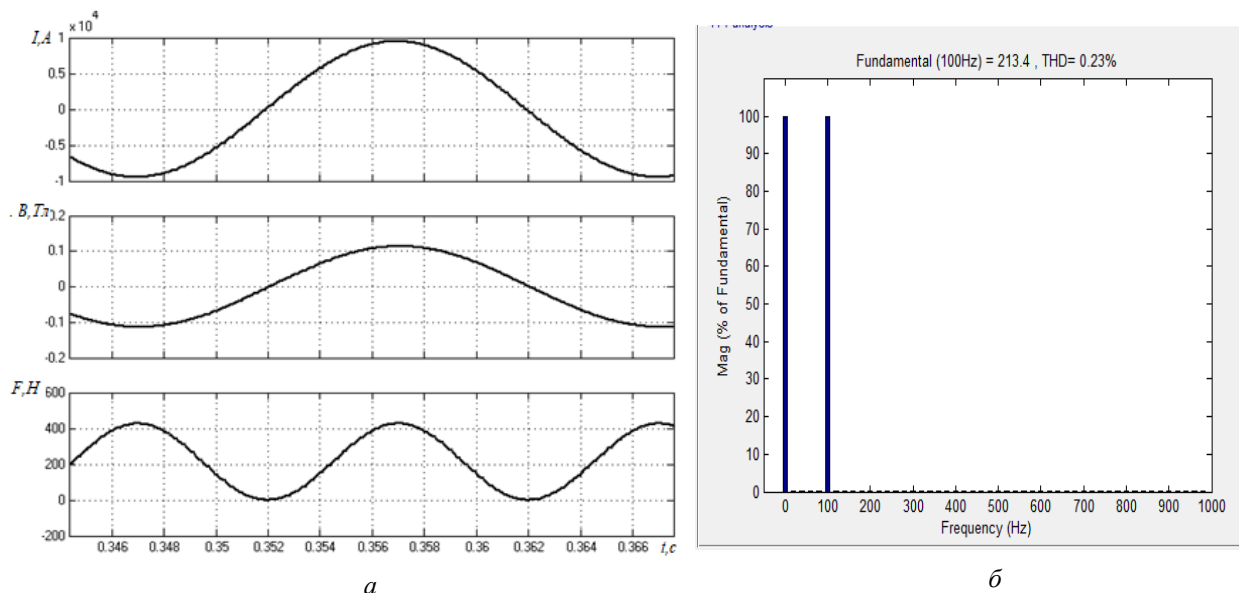


Рис. 3

У разі регулювання напруги на індукторах та електромагніті за допомогою напівпровідникових комутаторів з фазовим управлінням при $\alpha_{ин} = \alpha_{ем} = 90^\circ$ форма струму, наведеного в каналі індукторами, магнітної індукції електромагніту та електромагнітної сили, що діє на розплавлений метал, відрізняється від синусоїдної (рис. 4 а).

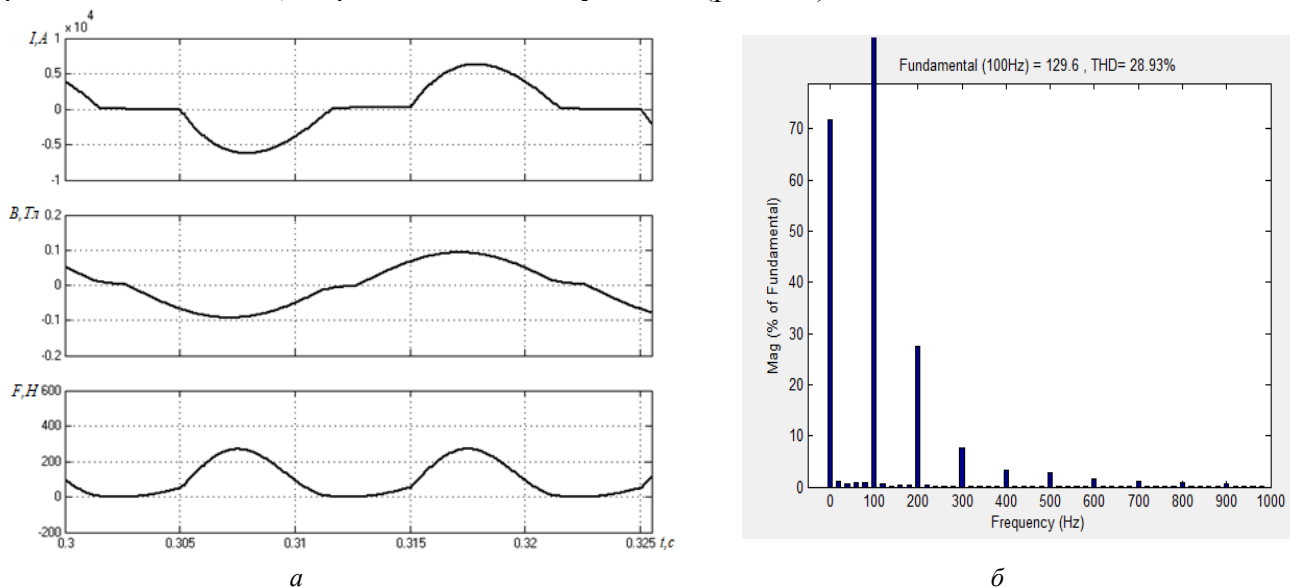


Рис. 4

На рис. 4 б показана діаграма, що характеризує гармонічний склад електромагнітної сили. Основні параметри процесу за різних кутів управління наведено в табл. 1.

У випадку паралельного-зустрічного підключення індукторів (струм у центральному каналі рівний подвійному струму бокового каналу) магнітний потік електромагніту під час взаємодії з цим струмом створює електромагнітну силу, що діє на розплавлений метал в ак-

тивній зоні МДН у горизонтальному напрямку. Параметри цього процесу за різних кутів управління наведено в табл. 2.

Таблиця 1

№ п/п	$\alpha_{\text{ін}}$, град.	$\alpha_{\text{ем}}$, град.	$F_{100\text{реас}}$, Н	DC_{comp} , Н	THD, %	$F_{0(\text{DC})}$, %	F_{200} , %	F_{300} , %	F_{400} , %	F_{500} , %
1	90	90	129,6	92,98	28,93	71,72	27,47	7,58	3,28	2,69
2	100	90	106,9	72,3	37,86	67,65	36,24	7,97	5,68	3,27
3	110	90	83,73	53,87	47,31	64,34	45,07	10,26	7,9	3,73
4	120	90	60,78	37,39	58,15	61,52	54,31	16,62	9,01	5,85
5	90	100	106,8	74,69	31,44	69,91	30,41	6,17	3,61	2,53
6	100	100	87,74	58,08	40,37	66,19	39,01	6,98	6,18	2,73
7	110	100	68,33	43,15	49,94	63,14	47,64	11,16	7,79	3,97
8	120	100	49,16	29,76	60,97	60,53	56,56	19,15	8,31	6,49
9	90	110	84,95	57,7	35,07	67,92	34,43	4,14	4,32	1,75
10	100	110	69,48	44,9	43,86	64,62	42,65	6,81	6,34	2,44
11	110	110	57,73	33,23	53,55	61,85	50,93	13,39	6,98	4,86
12	120	110	38,22	22,73	64,81	59,47	59,41	22,86	7,51	6,86
13	90	120	63,41	41,64	40,43	65,67	39,93	3,32	4,87	0,67
14	100	120	51,65	32,49	48,82	62,9	47,39	9,3	5,46	3,35
15	110	120	39,6	23,94	58,55	60,46	55,11	17,64	5,04	5,76
16	120	120	27,74	16,19	70,1	58,35	62,94	28,06	8,3	6,16

Таблиця 2

№ п/п	$\alpha_{\text{ін}}$, град.	$\alpha_{\text{ем}}$, град.	$F_{100\text{реас}}$, Н	DC_{comp} , Н	THD, %	$F_{0(\text{DC})}$, %	F_{200} , %	F_{300} , %	F_{400} , %	F_{500} , %
1	90	90	54,16	44,66	28,93	82,47	11,65	4,32	1,79	0,63
2	100	90	45,99	35,52	37,86	77,24	17,76	5,76	1,75	0,85
3	110	90	37,11	26,75	47,31	72,08	25,9	6,23	1,99	2,19
4	120	90	26,53	17,67	58,15	66,62	37,38	5,03	5,31	2,61
5	90	100	45,66	36,18	31,44	79,24	15,47	4,63	1,23	0,14
6	100	100	38,62	28,97	40,37	75,01	20,92	5,26	0,91	1,01
7	110	100	31,09	21,94	49,94	70,57	28,42	5,05	2,18	2,11
8	120	100	23,35	15,46	60,97	66,21	37,95	4,34	5,09	2,33
9	90	110	36,72	27,61	35,07	75,19	21,25	4,57	0,02	0,9
10	100	110	30,92	22,33	43,86	72,22	25,71	4,14	0,07	1,29
11	110	110	24,82	17,04	53,55	68,65	32,25	3,13	2,84	1,67
12	120	110	18,62	12,09	64,81	64,92	40,87	3,98	5,2	1,66
13	90	120	27,73	19,52	40,43	70,4	29,59	2,91	2,36	1,49
14	100	120	23,25	15,99	48,82	68,79	32,7	1,46	2,83	1,08
15	110	120	18,63	12,35	58,55	66,32	37,79	1,25	3,79	0,52
16	120	120	13,96	8,84	70,1	63,33	45,15	6,09	4,88	1,57

Слід зауважити, що в табл. 1, 2 та надалі: $F_{100\text{реас}}$ відповідає амплітудному значенню першої гармоніки електромагнітної сили в ньютонх; DC_{comp} – постійна складова; THD, % – коефіцієнт нелінійних спотворень, $F_{200} - F_{500}$, % – наявність вищих гармонічних складових електромагнітної сили відносно першої гармоніки в процентах.

Аналіз цих таблиць показує, що в разі використання напівпровідникових комутаторів із фазовим управлінням у діапазоні кута вмикання $90^{\circ} \leq \alpha \leq 120^{\circ}$, амплітудне значення вертикальної електромагнітної сили згідно з табл. 1 можна змінювати з 129,6 Н до 27,74 Н, а горизонтальної електромагнітної сили згідно з табл. 2 – з 54,16 Н до 13,96 Н. Коефіцієнт нелінійних спотворень знаходиться в діапазоні 28,93...70,1 %. Щодо гармонічних складових для ве-

ртикальної електромагнітної сили, то друга гармоніка змінюється в діапазоні 27,47...62,94 %, третя – 3,32...28,06 %, четверта – 3,28...9,01 %, п'ята не перевищує 2,61 %. Для горизонтальної електромагнітної сили (табл. 2) найбільш дієвою є друга гармоніка, яка змінюється в діапазоні 11,65...45,15 %. Третя не перевищує 6,23 %, четверта – 5,09 %, п'ята – 2,61 %.

Для приготування металу необхідної якості найбільш актуальним є силова вібраційна дія на розплавлений метал в активній зоні в різних напрямках. Для МДН такі режими роботи можливі в разі живлення індукторів різними за фазою напругами. У табл. 3 наведено результати досліджень за умови зміни кута $\varphi_{U_{12}}$, на який напруга на індукторі 2 випереджає напругу на індукторі 1. Водночас кут вмикання на індукторах $\alpha_{in}=120^0$, а кут вмикання на електромагніті – $\alpha_{em}=90^0$.

У табл. 3 наведено результати окремо для горизонтальної та вертикальної складових сили F , тобто $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$. На рис. 5 а показана динаміка зміни складу гармонічних складових для горизонтальної складової сили F , а на рис. 5 б – для вертикальної складової сили F в активній зоні магнітодинамічної установки типу МДН. Залежно від величин складових цієї сили для кожної гармоніки результуюча сила має відповідне значення та зорієнтована в просторі відповідним чином.

Як за зміни кута між напругами індукторів, так і за зміни кутів вмикання на індукторах та електромагніті є можливість керувати гармонічними складовими електромагнітної сили, що спричиняють вібраційну дію на розплавлений метал.

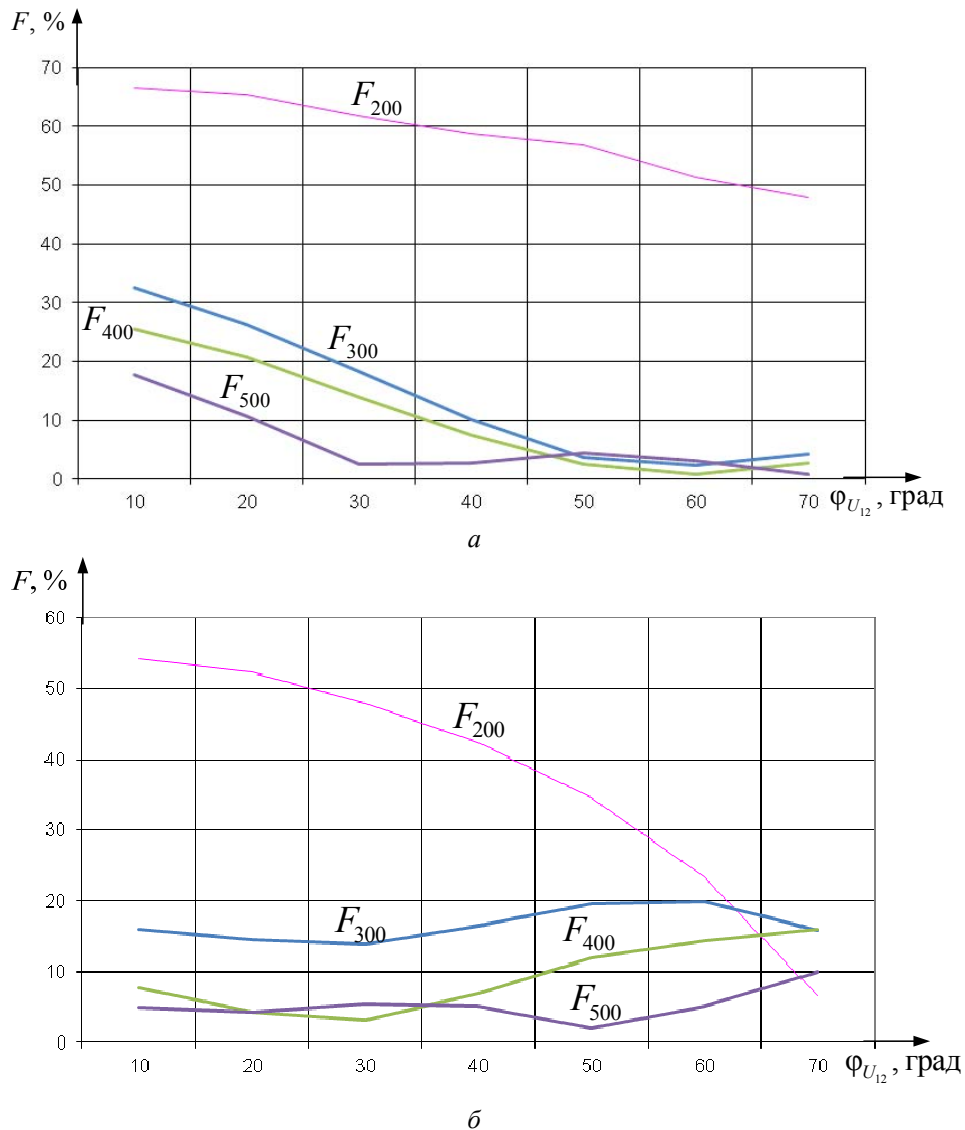


Рис. 5

Таблиця 3

$\alpha_{\text{ин}}$, град.	$\alpha_{\text{ем}}$, град.	F	$F_{100\text{реас}}$, Н	DC_{comp} , Н	THD, %	$F_{0(DC)}$, %	F_{200} , %	F_{300} , %	F_{400} , %	F_{500} , %	
10	120	90	F_X	5,13	2,84	83,85	55,37	66,48	32,58	25,52	17,73
			F_Y	57,57	35,34	57,43	61,38	54,2	16,03	7,67	4,97
20	120	90	F_X	9,64	5,17	75,04	53,6	65,41	26,24	20,67	10,62
			F_Y	53,28	33,04	54,9	62,01	52,34	14,56	4,29	4,35
30	120	90	F_X	14,03	7,23	66,2	51,54	61,83	18,31	13,87	2,6
			F_Y	50,78	32,47	50,53	63,94	47,87	13,83	3,21	5,5
40	120	90	F_X	17,24	8,3	60,22	48,12	58,66	10,2	7,44	2,79
			F_Y	44,55	29,8	46,66	66,9	42,41	16,53	6,94	5,02
50	120	90	F_X	18,79	7,93	57,28	42,22	56,83	3,67	2,51	4,46
			F_Y	35,51	25,38	42,00	71,48	34,56	19,58	11,92	1,95
60	120	90	F_X	21,49	7,62	51,56	35,49	51,34	2,28	0,75	3,12
			F_Y	30,74	24,37	34,82	79,26	23,39	19,98	14,32	5,06
70	120	90	F_X	22,83	5,77	48,15	25,26	47,81	4,29	2,76	0,84
			F_Y	23,7	21,76	26,41	91,81	6,64	15,91	15,98	10,1

Висновки. 1. Розроблена модель дає змогу дослідити режими роботи амплітудофазозалежних установок, якими є МДН, за різних форм струму індукторів та магнітного потоку електромагніту. У результаті маємо гармонічний склад електромагнітної сили, що діє на розплавлений метал зі струмом в активній зоні МДН.

2. Вібраційні процеси в розплавленому металі виникають не тільки під впливом пульсуючої з частотою 100 Гц електромагнітної сили, а і значною мірою від наявності її вищих складових. Розроблена модель дає змогу дослідити, як змінення гармонічного складу електромагнітної сили впливає на величину, направлення та динаміку змінення електромагнітної сили, що діє на розплавлений метал в активній зоні МДН. Це дає можливість визначати оптимальні режими роботи МДН у процесах приготування якісного розплавленого металу.

Фінансується за держбюджетною темою "Розробка основ теорії і методів дослідження впливу несинусоїдних напруг і струмів та виникаючих електротермодинамічних процесів на надійність і ресурс сучасних кабельних ліній електропередачі та на енергоефективність електротехнічних установок резонансного типу" (Шифр "ЕЛРЕС"), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 03.08.2022 р. Протокол №8. Державний реєстраційний номер роботи 0123U100693.

1. Полищук В.П., Цин М.Р., Горн Р.К. и др. Магнитодинамические насосы для жидких металлов. АН УССР, Ин-т проблем лиття. Киев: Наук. думка, 1989. 256 с.
2. Бондар О.І., Глухенький О.І., Гориславец Ю.М., Западничук О.П. Чисельне моделювання теплового стану індукційної каналної печі. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 3. С. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.03.044>
3. Бондар О.І., Гориславец Ю.М., Жаркін А.Ф. Інтенсифікація тепло-масообміну в індукційних каналних печах. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 3. С. 49–55. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.044>
4. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Ломко Н.А. Энергоэффективные режимы работы магнитодинамических установок с использованием тиристорных регуляторов напряжения с фазовым управлением. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. № 48. С. 88–93.
5. Щерба А.А., Ломко Н.А. Супруновская Н.И. Энергетические процессы в магнитодинамических установках при питании их электромагнитов от тиристорных регуляторов напряжения с накопительными конденсаторами. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2014. № 39. С. 93–99.
6. Hashemi, S.P., Karafi, M.R., Sadeghi, M.H. et al. An electromagnetic arrayed pump to create arbitrary velocity profiles in fluid. *SN Appl. Sci.* 3, 859. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04841-9>.
7. Seo J-H et al (2020) Numerical investigations on magnetohydrodynamic pump based microchannel cooling system for heat dissipating element. *Symmetry* 12(10):1713. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym12101713>.
8. Kluber V, Buhler L, Mistrangelo C (2020) Numerical simulation of 3D magnetohydrodynamic liquid metal flow in a spatially varying solenoidal magnetic field. *Fusion Eng Des* 156:111659. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111659>.

THE INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE INDUCTOR CURRENT AND THE MAGNETIC FLUX OF THE ELECTROMAGNET ON THE ELECTROMAGNETIC FORCE ACTING ON THE MOLTEN METAL IN THE ACTIVE ZONE OF THE MAGNETODYNAMIC PUMP

A.A. Shcherba, M.O. Lomko

Institute of electrodynamics NAS of Ukraine,
Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: nlomko@gmail.com

The processes of creating an electromagnetic force acting on the molten metal in the active zone of a magnetodynamic pump are studied depending on the spectral composition of the higher harmonic components of the current in the channel and the induction of the magnetic flux induced by an electromagnet. The peculiarities of the regulation of the magnitude and direction of the resultant vector of this force, the favorable conditions of the vibrational action on the molten metal in the active zone are defined. Ref. 8, fig. 4, tables 3.

Key words: inductor, electromagnet, active zone, phase control, spectral analysis, electromagnetic force.

1. Polischuk V.P., Tsyn M.R., Horn R.K. et al. Magnetodynamic pumps for liquid metals. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Casting Problems. Kyiv: Nauk. Dumka, 1989. 256 p.
2. Bondar O.I., Glukhenko O.I., Goryslavets Yu.M., Zapadynchuk O.P. Numerical modelling of induction channel furnace thermal state. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No 3. Pp. 44–49. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.03.044>.
3. Bondar O.I., Goryslavets Yu.M., Zharkin A.F. Intensification of heat and mass transfer in induction channel furnaces. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 3. Pp. 49–55. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.049>.
4. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Lomko N.O. Energy efficient modes of magnetodynamic installations using thyristor voltage regulators with phase control. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2017. No 48. Pp. 88–93. (Rus)
5. Shcherba A.A., Lomko N.O., Suprunovskaya N.I. Energy processes in a magneto-dynamic installations at powering its electromagnets from thyristor voltage regulator with reservoir capacitors. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2014. No 39. Pp. 93–99. (Rus)
6. Hashemi S.P., Karafi M.R., Sadeghi M.H. et al. An electromagnetic arrayed pump to create arbitrary velocity profiles in fluid. *SN Appl. Sci*. 3, 859.2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04841-9>.
7. Seo J-H et al (2020) Numerical investigations on magnetohydrodynamic pump based microchannel cooling system for heat dissipating element. *Symmetry* 12(10):1713. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym12101713>.
8. Kluber V, Buhler L, Mistrangelo C (2020) Numerical simulation of 3D magnetohydrodynamic liquid metal flow in a spatially varying solenoidal magnetic field. *Fusion Eng Des* 156:111659. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111659>

Надійшла: 08.06.2023

Прийнята: 29.06.2023

Submitted: 08.06.2023

Accepted: 29.06.2023