

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-282-2-50-57>

УДК 621.318

2D-МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ БАГАТОВАРІАНТНИХ РОЗРАХУНКАХ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ В МАТРИЦЯХ ПОЛІГРАДІЄНТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СЕПАРАТОРІВ

Романченко Ю.А.

2D MODELING OF MAGNETIC INDUCTION IN MULTIVARIATE CALCULATIONS OF MATRICES OF POLY GRADIENT ELECTROMAGNETIC SEPARATORS

Romanchenko J.A.

У статті обґрунтовано застосування 2D-моделювання при багатоваріантних розрахунках магнітної індукції в матрицях поліградієнтних електромагнітних сепараторів. Показано, що використання двовимірних моделей базується на певних припущеннях щодо граничних умов та характеру розподілу магнітного поля в робочих проміжках, не потребуючи значних обчислювальних ресурсів та часу розрахунку. Представлено комбінований підхід до проведення багатоваріантних розрахунків магнітної індукції в робочій зоні електромагнітного сепаратора, заснований на використанні переваг скінченно-елементного аналізу як у двовимірній, так й у тривимірній постановці. Для визначення векторного магнітного потенціалу на границях двовимірних розрахункових областей проведені дослідження просторового розподілу магнітного поля в робочих проміжках матриці сепаратора. Для цього шляхом випадкової вибірки обрано три варіанти сепаратора, які відрізняються геометричними параметрами поліградієнтних матриць. Для моделей з вибірки повітряний проміжок змінюється в достатньо широкому діапазоні. Інші вихідні дані при моделюванні для трьох варіантів лишались незмінними. Побудовані тривимірні комп'ютерні моделі та отримані числові значення векторного магнітного потенціалу на границях розрахункових областей. Здійснено 2D-моделювання розрахункових моделей трьох варіантів з прийнятими граничними умовами. Порівняно результати розрахунку значень магнітної індукції, що отримані, відповідно, при 2D-та 3D-моделюванні, результати порівняння представлено у вигляді таблиць та графіків. Знайдено відносну похибку розрахунку магнітного поля для трьох варіантів. Показано, що отримані при 3D-моделюванні значення векторного

магнітного потенціалу для прийнятих трьох варіантів електромагнітних систем, можуть бути використані для аналізу, обробки та обчислень магнітної індукції при 2D-моделюванні.

Верифіковано обчислення магнітної індукції при 2D-моделюванні, що дозволило зменшити часові витрати, пов'язані з 3D-моделюванням, та підвищити, таким чином, обчислювальну ефективність розрахунків в цілому.

Ключові слова: магнітна сепарація, феромагнітні домішки, поліградієнтний електромагнітний сепаратор, магнітне поле, магнітна індукція, 2D-та 3D-моделювання.

Вступ. Сепаратори різних видів використовують безліч різноманітних способів сепарації, заснованих на різниці в якісних характеристиках компонентів у суміші: у розмірах твердих частинок, у їх масах, у формі, щільності, коефіцієнтах тертя, міцності, пружності, змочуваності поверхні, магнітної сприйнятливості, електропровідності, радіоактивності та інших. Сепарація входить та є невід'ємною частиною первинних процесів оброблення (харчової, гірничої, газовидобувної, сільськогосподарської та легкої промисловості).

Найбільш ефективною технологією для вилучення із різних матеріалів феромагнітних частинок є поліградієнтна магнітна сепарація. Більшість існуючих пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації призначена для очищення рідинних середовищ (пульпи) або запиленних газів [1]. У той самий час у зв'язку зі зростанням вимог до якості продукції проблема

вилучення дрібнодисперсних феромагнітних включень, які виникають в процесі зносу обладнання, є актуальною й для сипких матеріалів.

В сучасних умовах для очищення сипких матеріалів знайшли застосування переважно відкриті багатополюсні магнітні системи, які є недостатньо ефективними при видаленні феромагнітних домішок розміром до 1 мм. Найявніші в робочих зонах існуючих пристроїв для поліградієнтної сепарації невеликих за розмірами повітряних проміжків, де саме й відбувається сепарація матеріалів, ускладнює їх застосування для очищення сипких речовин. Тому важливим науковим завданням є дослідження впливу геометричних розмірів робочих повітряних проміжків на величину та характер просторового розподілу магнітного потоку в матриці поліградієнтного сепаратора [2].

Ця процедура є багатоваріантною. Зазвичай для її вирішення застосовують чисельні методи розрахунку магнітних полів та спеціалізовані програмні продукти дво- або тривимірного моделювання.

Перевагами тривимірних моделей є врахування реальних геометричних розмірів магнітних систем та можливість дослідження впливу геометрії на потекорозподіл в будь-якому елементі магнітопроводу. У той самий час визначення просторового розподілу поля в складних тривимірних моделях електромагнітних сепараторів є достатньо трудомістким та тривалим у часі процесом [3, 4].

Використання двовимірних моделей базується на певних припущеннях щодо граничних умов та характеру розподілу магнітного поля в робочих проміжках, не потребуючи значних обчислювальних ресурсів та часу розрахунку [5].

Це обумовлює актуальність розробки нових підходів до проведення багатоваріантних розрахунків магнітних полів в поліградієнтних матрицях електромагнітних сепараторів заснованих на використанні двовимірних моделей, здатних забезпечити необхідну обчислювальну ефективність та точність.

Мета статті. Обґрунтування застосування 2D-моделювання при багатоваріантних розрахунках магнітної індукції в матрицях поліградієнтних електромагнітних сепараторів.

Результати дослідження. Геометрична модель пластинчастої матриці сепаратора із зазначенням основних геометричних розмірів робочої зони представлена на рис. 1 [6].

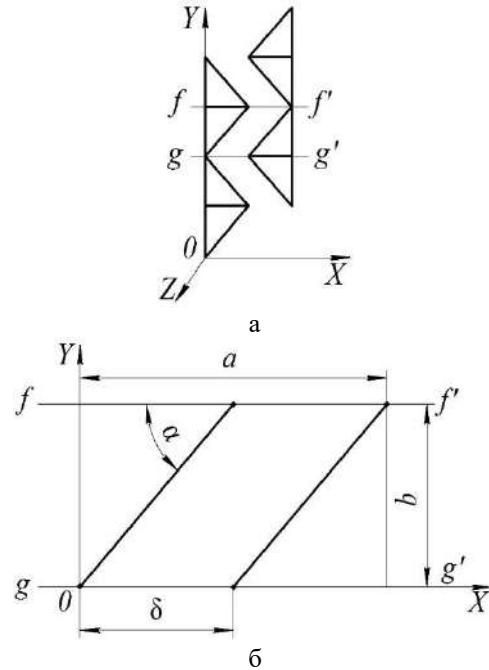


Рис. 1. Раціональний структурний варіант пластинчастої матриці:

a – геометрична модель;
 b – основні геометричні розміри робочої зони

Основні геометричні розміри робочої зони (рис. 1): δ – міжполюсний робочий проміжок; α – кут при вершині виступу полюса; a – робоча ширина матриці; b – основа виступу полюса. Задавалися наступні геометричні критерії подібності для досліджуваних областей: $X_1=b/a$ та $X_2=\alpha$. Діапазони варіювання геометричних критеріїв подібності X_1 та X_2 , які мають практичний інтерес, склали: $X_1=b/a=0,15\dots0,42$, $X_2=\alpha=0,11\pi\dots0,18\pi$. Товщина t пластин матриці (на рис.1 не показана) в напрямку осі Oz приймалася $t=6$ мм. З врахуванням прийнятих діапазонів варіювання геометричних критеріїв подібності отримано 55 варіантів поліградієнтної матриці та побудовані 2D-моделі їх робочих проміжків (рис. 2), для яких потребували уточнення граничні умови. Зокрема, потрібно було визначитися із значеннями векторного магнітного потенціалу вздовж границь ch і de на рис. 2, які співпадають з силовими лініями розрахункової області. При цьому, якщо для векторного магнітного потенціалу вздовж однієї з границь (наприклад, для границі ch) може бути прийняте нульове значення $A_{ch}=0$, то векторний магнітний потенціал A_{de} вздовж другої границі має бути визначеним.

Різниця значень векторного магнітного потенціалу $|\overline{A_{de}} - \overline{A_{ch}}| = |\overline{A_{de}}|$ дорівнює середньому

поток вектору магнітної індукції Φ у робочому повітряному проміжку, який припадає на одиницю товщини t полюсу у напрямку осі Oz (рис. 1, а; $t=6$ мм). Тобто визначається співвідношенням $|\overline{A_{de}}|=\Phi/t$. Тому для визначення величини потенціалу A_{de} необхідно розрахувати магнітний потік Φ . Ця задача може бути вирішена тільки з застосуванням тривимірних комп'ютерних моделей.

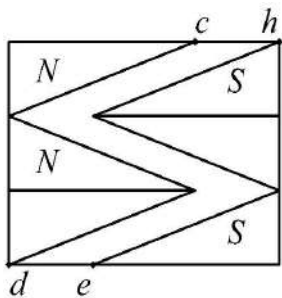


Рис. 2. 2D-модель робочої зони

Для подальшого аналізу шляхом випадкової вибірки обрані три варіанти пластинчастої матриці електромагнітного сепаратора з наступними параметрами [7]:

– варіант 1: відстань між сусідніми виступами пластин $b=32,4$ мм ($X_1=b/a=0,18$), кут при вершині виступу полюсу $2\alpha=54^\circ$ ($X_2=\alpha=0,15\pi$), робочий міжполюсний проміжок $\delta=53$ мм;

– варіант 2: відстань між сусідніми виступами пластин $b=72$ мм ($X_1=b/a=0,4$), кут при вершині виступу полюсу $2\alpha=66^\circ$ ($X_2=\alpha=0,18\pi$), робочий міжполюсний проміжок $\delta=37$ мм;

– варіант 3: відстань між сусідніми виступами пластин $b=50$ мм ($X_1=b/a=0,28$), кут при вершині виступу полюсу $2\alpha=40^\circ$ ($X_2=\alpha=0,11\pi$), робочий міжполюсний проміжок $\delta=13,6$ мм. Ці параметри відповідають базовій конструкції електромагнітного сепаратора.

Слід зазначити, що для моделей з вибірки повітряний проміжок δ змінюється в достатньо широкому діапазоні: від $\delta=13,6$ мм (для базової моделі сепаратора, варіант 3) до $\delta=53$ мм (для варіанту 1).

При моделюванні прийняті наступні вихідні дані: сила струму в обмотках – 3,2 А; матеріал магнітопроводу, пластин матриці, стінок матриці, які паралельні полюсам магнітопроводу – сталь марки Ст. 3; двох інших стінок – алюміній.

На рис. 3, а наведено геометричну тривимірну модель для варіанту 1 ($\delta=53$ мм)

електромагнітного сепаратора, побудовану у програмі КОМПАС-3D. Картина магнітного поля, отримана у програмному середовищі Infolytica [8] показана на рис. 3, б.

Побудова графіка магнітної індукції була здійснена для внутрішньої пластини матриці (пластина 2 на рис. 4, а). Визначалися розрахункові значення магнітної індукції у повітряному проміжку всередині площадки S , показаної на рис. 4, б. Розрахункове значення магнітного потоку Φ через площадку S (рис. 4, б) склало 0,0000126111 Вб. Відповідно, розрахункове значення магнітного потоку Φ , що приходить на одиницю товщини полюса t , склало $\Phi/t=0,0000126111/0,006=0,00210185$ Вб/м.

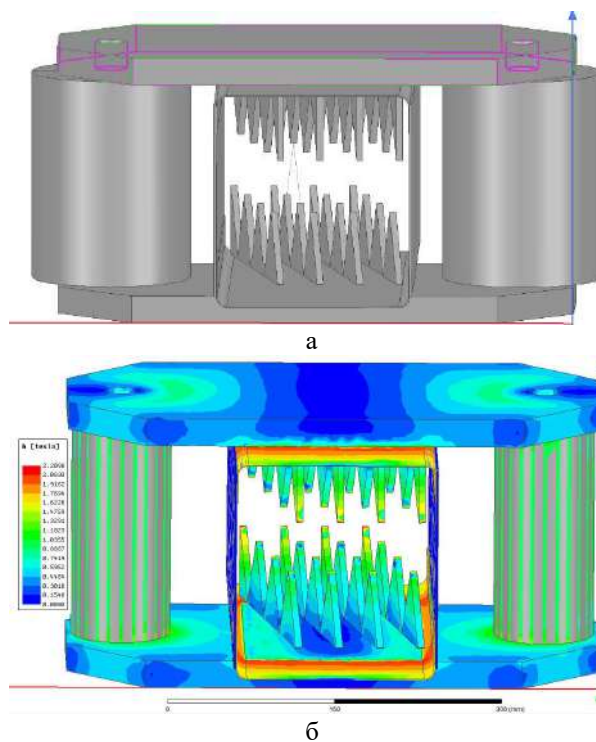


Рис. 3. Тривимірне моделювання електромагнітного сепаратора (варіант 1):

а – геометрична модель сепаратора;
б – картина магнітного поля

Цей результат може бути використаний для визначення граничної умови A_{de} на ділянці de (рис. 2) розрахункової двовимірної області (2D-моделі), яка відповідає варіанту 1.

Враховуючи, що у розрахунковій двовимірній області (рис. 2) розташовані три зубця та, відповідно, три ідентичних повітряних проміжки, то сумарне розрахункове значення магнітного потоку Φ , що приходить на одиницю товщини полюса t , та, відповідно, гранична умова A_{de} розраховувалась наступним

чином: $A_{de} = 3\Phi/t = 3 \cdot 0,00210185 = 0,00630554$ Вб/м.

прийнятою граничною умовою $A_{de} = 0,00630554$ Вб/м (рис. 5).

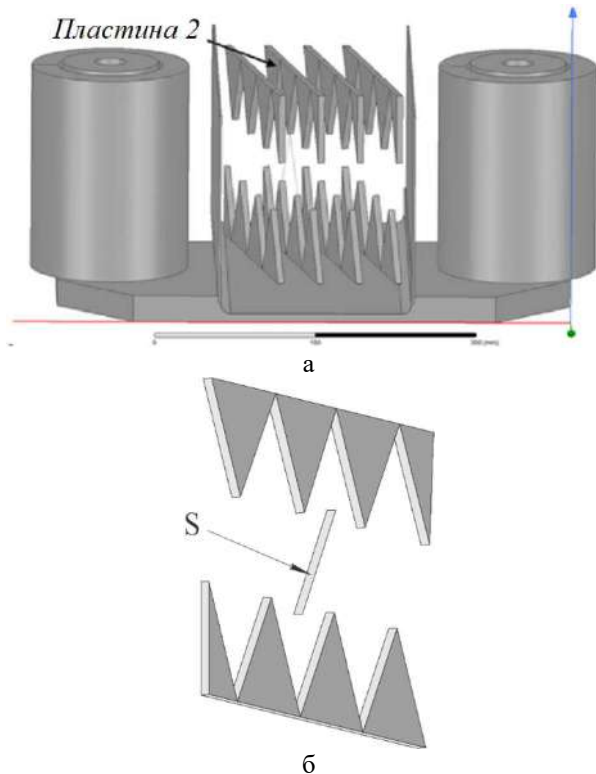


Рис. 4. Робоча зона електромагнітного сепаратора: а – пластина матриці, обрана для розрахунку магнітної індукції; б – площадка у повітряному проміжку для визначення розрахункового значення магнітного потоку Φ

Далі було здійснено 2D-моделювання розрахункової моделі для варіанту 1 з

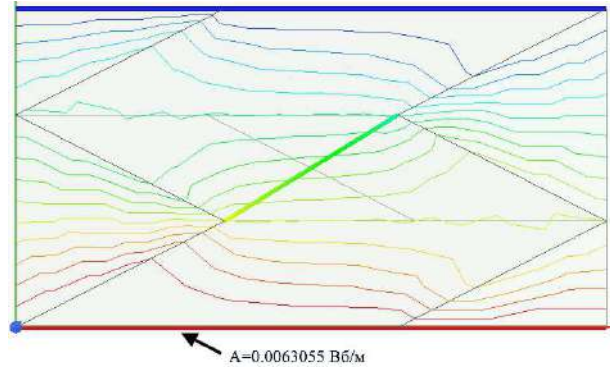


Рис. 5. Картина магнітного поля, отримана при 2D-моделюванні для варіанту 1

Порівняння результатів розрахунку магнітної індукції, отриманих, відповідно, при 2D- та 3D-моделюванні для варіанту 1 та представлених у таблиці 1 та на рис.6, свідчить про їх достатньо високу узгодженість. Відносна похибка розрахунку магнітного поля не перевищує 10,6 %.

Таким чином, для двовимірної моделі з параметрами $X_1 = b/a = 0,18$ та $X_2 = \alpha = 0,15\pi$ для границі de (рис. 2) може бути прийнята наступна гранична умова $A_{de} = 0,00630554$ Вб/м.

На рис. 7 наведено геометричну тривимірну модель та картину магнітного поля для *варіанту 2* ($\delta = 37$ мм) електромагнітного сепаратора. Дослідження тривимірної моделі для варіанту 2 проводилося у тому ж порядку, що і для варіанту 1.

Таблиця 1

Розрахункові значення магнітної індукції для 3D- та 2D-моделей (варіант 1)

№ точки	Відстань, мм	B, мТл		№ точки	Відстань, мм	B, мТл	
		3D	2D			3D	2D
1	0,00	46,41	41,98	11	37,56	64,19	64,95
2	3,76	49,94	46,99	12	41,32	64,08	64,84
3	7,51	53,32	52,01	13	45,07	63,26	64,40
4	11,27	55,56	54,95	14	48,83	61,88	63,62
5	15,02	58,22	57,84	15	52,59	60,18	61,19
6	18,78	60,99	60,74	16	56,34	58,02	58,43
7	22,54	62,18	63,12	17	60,10	55,65	55,46
8	26,29	63,15	63,94	18	63,85	53,21	52,31
9	30,05	63,98	64,50	19	67,61	49,72	47,40
10	33,81	64,10	64,79	20	71,37	46,46	42,19

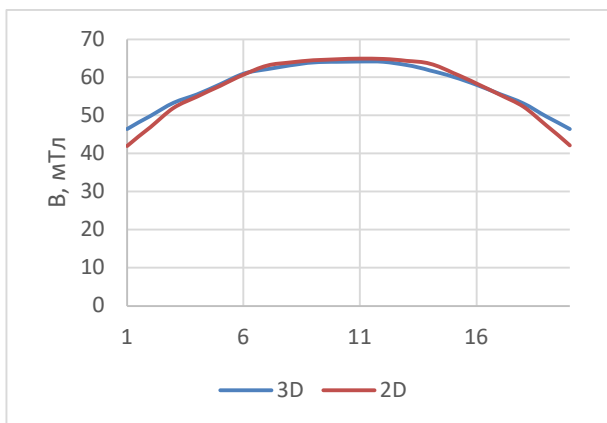


Рис. 6. Порівняння результатів розрахунку магнітної індукції при 2D- та 3D-моделюванні для варіанту 1

Побудова графіка магнітної індукції також була здійснена для внутрішньої пластини матриці (пластина 2 на рис. 7, а). Визначалися розрахункові значення магнітної індукції у повітряному проміжку всередині площадки S .

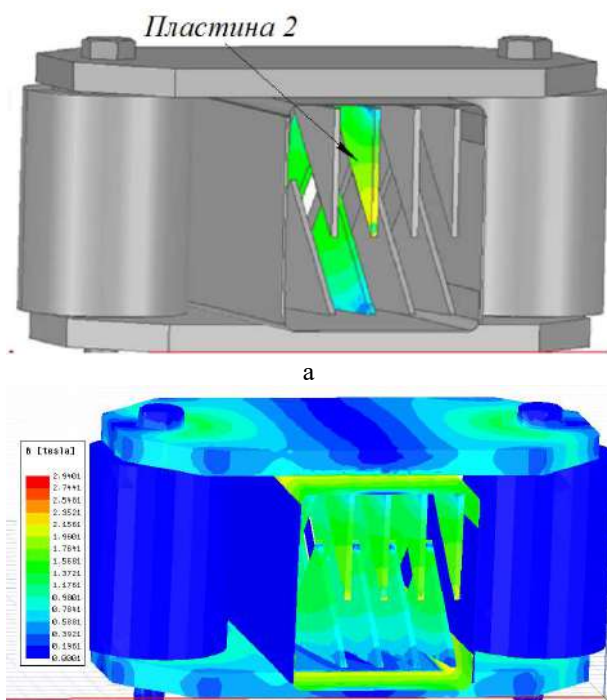


Рис. 7. Тривимірне моделювання електромагнітного сепаратора (варіант 2):
а – геометрична модель сепаратора;
б – картина магнітного поля

Розрахункове значення магнітного потоку Φ через площадку S склало $0,0000558067$ Вб. Відповідно, розрахункове значення магнітного потоку Φ , що приходить на одиницю товщини полюса t , склало

$\Phi/t=0,0000558067/0,006=0,00930111$ Вб/м. Цей результат використаний для визначення граничної умови A_{de} на ділянці de (рис. 2) розрахункової двовимірної області (2D-моделі), яка відповідає варіанту 2: $A_{de}=3\Phi/t=3\cdot 0,00930111=0,027903332$ Вб/м. Далі було здійснено 2D-моделювання розрахункової моделі для варіанту 2 з прийнятою граничною умовою $A_{de}=0,027903332$ Вб/м (рис. 8).

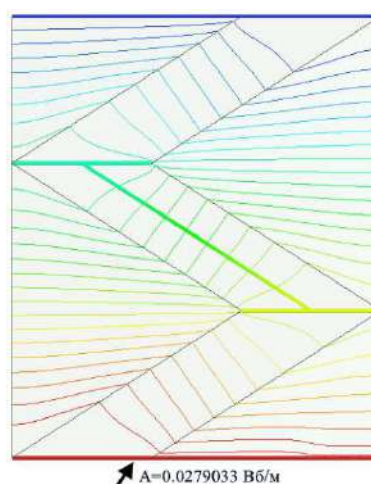


Рис. 8. Картина магнітного поля, отримана при 2D-моделюванні для варіанту 2

Порівняння результатів розрахунку магнітної індукції, отриманих, відповідно, при 2D- та 3D-моделюванні для варіанту 2 та представлених у таблиці 2 та на рис. 9, свідчить про їх високу узгодженість. Відносна похибка розрахунку магнітного поля не перевищує $14,6\%$.

Таким чином, для двовимірної моделі з параметрами $X_1=b/a=0,4$ та $X_2=\alpha=0,18\pi$ для границі de (рис. 2) може бути прийнята наступна гранична умова $A_{de}=0,027903332$ Вб/м.

Визначення граничної умови A_{de} на ділянці de (рис. 2) розрахункової двовимірної області (2D-моделі), яка відповідає варіанту 3 було здійснено в аналогічній послідовності.

Розрахункове значення магнітного потоку Φ через площадку S для варіанту склало $0,0000640057$ Вб. Визначено граничну умову A_{de} на ділянці de (рис. 2) розрахункової двовимірної області (2D-моделі), яка відповідає варіанту 3: $A_{de}=3\Phi/t=3\cdot 0,0000640057/0,006=0,032002859$ Вб/м.

Таблиця 2

Розрахункові значення магнітної індукції для 3D- та 2D-моделей (варіант 2)

№ точки	Відстань, мм	B, мТл		№ точки	Відстань, мм	B, мТл	
		3D	2D			3D	2D
1	0,00	35,28	30,79	11	70,08	96,62	92,74
2	7,01	44,30	41,35	12	77,08	96,16	92,63
3	14,02	55,49	53,86	13	84,09	95,19	92,23
4	21,02	67,75	67,44	14	91,10	92,64	91,00
5	28,03	79,34	79,64	15	98,11	89,45	87,52
6	35,04	88,23	87,52	16	105,12	80,30	79,64
7	42,05	92,43	91,00	17	112,12	67,67	67,44
8	49,05	95,30	92,24	18	119,13	55,05	53,86
9	56,06	96,80	92,63	19	126,14	44,23	41,34
10	63,07	97,05	92,74	20	133,15	34,99	30,79

Таблиця 3

Розрахункові значення магнітної індукції для 3D- та 2D-моделей (варіант 3)

№ точки	Відстань, мм	B, мТл		№ точки	Відстань, мм	B, мТл	
		3D	2D			3D	2D
1	0,00	12,23	10,97	11	76,94	90,74	91,08
2	7,69	24,71	24,80	12	84,64	92,50	91,08
3	15,39	59,05	55,72	13	92,33	92,30	91,07
4	23,08	89,03	86,20	14	100,02	94,02	91,06
5	30,78	94,43	90,83	15	107,72	93,28	91,04
6	38,47	93,09	91,04	16	115,41	94,36	90,83
7	46,17	91,99	91,06	17	123,11	89,44	86,20
8	53,86	91,96	91,07	18	130,80	57,53	55,74
9	61,55	91,82	91,08	19	138,50	23,19	24,81
10	69,25	90,05	91,08	20	146,19	10,26	10,96

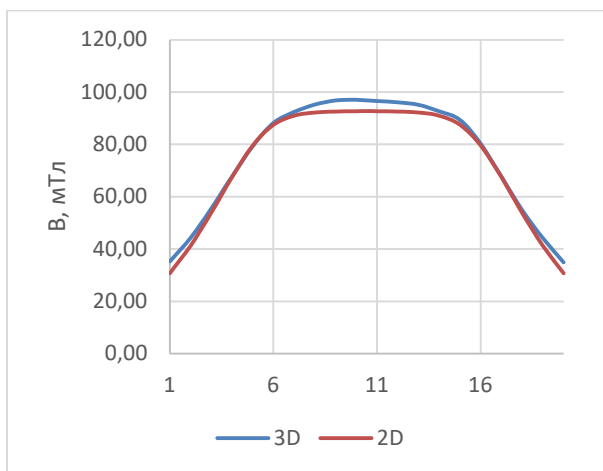


Рис. 9. Порівняння результатів розрахунку магнітної індукції при 2D- та 3D-моделюванні для варіанту 2

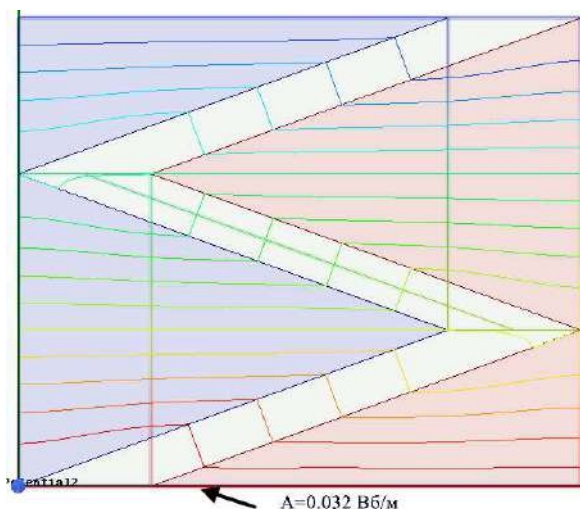


Рис. 10. Картина магнітного поля, отримана при 2D-моделюванні для варіанту 3

Картина магнітного поля наведена на рис. 10.

Порівняння результатів розрахунку магнітної індукції, отриманих, відповідно, при 2D- та 3D-моделюванні для варіанту 3 та представлених у таблиці 3 та на рис. 11, свідчить про їх високу узгодженість. Відносна похибка розрахунку магнітного поля не перевищує 10,3 %.

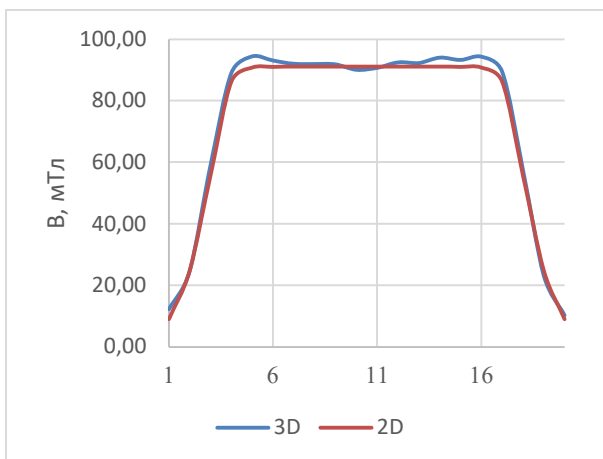


Рис. 11. Порівняння результатів розрахунку магнітної індукції при 2D- та 3D-моделюванні для варіанту 3

Таким чином, отримані при 3D-моделюванні значення векторного магнітного потенціалу A_{de} для прийнятих трьох варіантів електромагнітних систем, можуть бути використані для аналізу, обробки та обчислень магнітної індукції при 2D-моделюванні. Це значно скоротить обчислювальні ресурси та часу розрахунку.

Висновки. Безсумнівною перевагою 3D-моделювання є можливість розрахунку магнітного поля в будь-якому елементі конструкції електромагнітного сепаратора та наближення результатів розрахунків до реальних процесів. У той самий час аналіз розподілу поля для великої кількості комп'ютерних 3D-моделей електромагнітного сепаратора, які відрізняються геометричними розмірами елементів матриці, вимагає значного часу обчислень.

З огляду на це був прийнятий комбінований підхід до розрахунків, заснований на використанні переваг скінченно-елементного аналізу як у двовимірній, так й у тривимірній постановці. Це дозволило верифікувати обчислення магнітної індукції при 2D-моделюванні та зменшити часові витрати, пов'язані з 3D-моделюванням, та підвищити,

таким чином, обчислювальну ефективність розрахунків в цілому.

При порівнянні результатів розрахунку магнітної індукції для всіх обраних варіантів, отриманих, відповідно, при 2D- та 3D-моделюванні, відносна похибка розрахунків магнітного поля не перевищила 14,6 %, що свідчить про високу узгодженість отриманих даних. Отже, знайдені при 3D-моделюванні граничні умови, можуть бути використані при дослідженні розподілу магнітного поля в розрахункових 2D-моделях робочих зон матриці. Це дозволить значно скоротити обчислювальні ресурси та час розрахунку та визначити раціональні геометричні параметри пластин матриці електромагнітного сепаратора.

Література

- Soloshych, I., Shvedchykova, I. Development of systematics ranked structure of environmental protecting equipment for cleaning of gas emissions wastewater and solid waste. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016. 6/10, 17-23. doi: 10.15587/1729-4061.2016.86462
- Загирняк М.В. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: [монография] / М.В. Загирняк, Ю.А.Бранспиз, И.А. Шведчикова; под ред. М.В.Загирняка. К.: Техніка, 2011. 224 с.
- Zeng, J., Tong, X., Yi, F., Chen, L. Selective capture of magnetic wires to particles in high gradient magnetic separation. *Minerals*, 2019. 9(509), 1-12. doi: 10.3390/min9090509
- Haitao, C., Chen, H., Bockenfeld, D., Rempfer, D., Kaminski, M., Liu, X., Rosengart, A. Preliminary 3-D analysis of a high gradient magnetic separator for biomedical applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008. 320, 279-284. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.06.001
- Shvedchykova, I., Romanchenko, J., Nikitchenko, I. Comparative analysis of inhomogeneity degree of magnetic field of polygradient magnetic separators for purification of bulk materials. *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2018. 144-147. doi: 10.1109/MEES.2017.8248873 (Scopus)
- Gerlici, J., Shvedchykova, I., Romanchenko, J., Nikitchenko, I. Determination of the rational geometrical parameters of plate type elements of magnetic matrix of the polygradient separator. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018. 4, 58-62. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.4.10>
- Jasim, J.M.J., Shvedchykova, I., Panasiuk, I., Romanchenko, J., Melkonova, I. Increasing the efficiency of multi-variant calculations of electromagnetic field distribution in matrix of a polygradient separator. *EUREKA, Physics and Engineering* this link is disabled, 2021(5), 69–79.

8. Infolytica is now part of Mentor, a Siemens Business. –<https://www.mentor.com/products/mechanical/infolytica>.

References

1. Soloshych, I., Shvedchykova, I. Development of systematized ranked structure of environmental protecting equipment for cleaning of gas emissions wastewater and solid waste. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016. 6/10, 17-23. doi: 10.15587/1729-4061.2016.86462
2. Zagirnyak M.V. Magnitnyye separatory. Problemy pro-yektirovaniya: [monografiya] / M.V. Zagirnyak, YU.A. Brans-piz, I.A. Shvedchikova; pod red. M.V. Zagirnyaka. K.: Tekhnika, 2011. 224 s.
3. Zeng, J., Tong, X., Yi, F., Chen, L. Selective capture of magnetic wires to particles in high gradient magnetic separation. Minerals, 2019. 9(509), 1-12. doi: 10.3390/min9090509
4. Haitao, C. Chen, H., Bockenfeld, D., Rempfer, D., Kaminski, M., Liu, X., Rosengart. A. Preliminary 3-D analysis of a high gradient magnetic separator for biomedical applications. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008. 320, 279-284. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.06.001
5. Shvedchykova, I., Romanchenko, J., Nikitchenko, I. Comparative analysis of inhomogeneity degree of magnetic field of polygradient magnetic separators for purification of bulk materials. Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2018. 144-147. doi: 10.1109/MEES.2017.8248873 (Scopus)
6. Gerlici, J., Shvedchykova, I., Romanchenko, J., Nikitchenko, I. Determination of the rational geometrical parameters of plate type elements of magnetic matrix of the polygradient separator. Electrical Engineering & Electromechanics, 2018. 4, 58-62. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.4.10>
7. Jasim, J.M.J., Shvedchykova, I., Panasiuk, I., Romanchenko, J., Melkonova, I. Increasing the efficiency of multy-variant calculations of electromagnetic field distribution in matrix of a polygradient separator. EUREKA, Physics and Engineering this link is disabled, 2021(5), 69–79.
8. Infolytica is now part of Mentor, a Siemens Business. –<https://www.mentor.com/products/mechanical/infolytica>.

Romanchenko J.A. 2D modeling of magnetic induction in multivariate calculations of matrices of poly gradient electromagnetic separators.

The article substantiates the use of 2D modeling of magnetic induction in multivariate calculations of polygradient matrices of electromagnetic separators. It is shown that the use of two-dimensional models is based on certain assumptions regarding the boundary conditions and the nature of magnetic field distribution in the working gaps, without requiring significant computational resources and calculation time. A combined approach to carrying out multivariate calculations of magnetic induction in the working area of an electromagnetic separator, based on using the advantages of finite element analysis in both two-dimensional and three-dimensional formulations is presented. For determination of the vector magnetic potential at the boundaries of two-dimensional computational domains, studies by magnetic field spatial distribution in the working spaces of the separator matrix were carried out. For this purpose, three separator options were selected by random sampling, differing in the geometric parameters of the polygradient matrices. For sampled models, the air gap varies over a fairly wide range. Other initial data during modeling for the three options remained unchanged. Three-dimensional computer models were constructed and numerical values of the vector magnetic potential at the computational domains boundaries were obtained. 2D modeling of calculated models of three options with accepted limit conditions was carried out. Comparatively, The calculating results of magnetic induction values are compared, that obtained respectively from 2D and 3D modeling. The comparison results are presented in the form of tables and graphs. The relative error in calculating of the magnetic field for three options was found. It is shown that the vector magnetic potential values that obtained from 3D modeling for the adopted three options of electromagnetic systems can be used for analysis, processing and calculations of magnetic induction in 2D modeling. The calculation of magnetic induction in 2D modeling was verified, which made it possible to reduce the time costs associated with 3D modeling and thus increase the computational efficiency of calculations in general.

Key words: magnetic separation, ferromagnetic impurities, polygradient electromagnetic separator, magnetic field, magnetic induction, 2D and 3D modeling.

Романченко Юлія Андріївна – к.т.н., доц., доцент кафедри електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), romanchenko_ja@snu.edu.ua

Стаття подана 29.02.2024.