

УДК 621.3

**В.В. Чумак**, канд. техн. наук, доц. **ORCID** 0000-0001-8401-7931

**М.А. Коваленко**, канд. техн. наук, доц. **ORCID** 0000-0002-5602-2001

**І.В. Ткачук**, магістр. **ORCID** 0000-0002-5717-2458

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені  
Ігоря Сікорського»

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА ДЛЯ СЕПАРАТОРА ЛОМУ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ**

*Сепарація лому кольорових та чорних металів в наші часи стає все більш актуальною проблемою. Існують традиційні методи сепарації відходів чорних та кольорових металів. Для автоматизації цього процесу необхідно використовувати механізовані системи на основі лінійних асинхронних двигунів. Дослідженню такого об'єкта присвячена дана робота. В рамках роботи розроблено польові математичні моделі, що реалізується методом скінчених елементів в програмному пакеті Comsol Multiphysics. В якості об'єкта дослідження використовується лінійний трифазний асинхронний двигун, що призначений для сепарації лому кольорових металів. За допомогою розробленої математичної моделі розраховані основні параметри та характеристики лінійного двигуна та визначено оптимальні межі його*  
© В.В. Чумак, М.А. Коваленко, І.В. Ткачук, 2019

роботи та необхідна мінімальна конфігурація лому для надійної її сепарації. Проведена серія розрахунків, що дозволяє визначити оптимальні режими роботи лінійного сепаратора та сформульовано рекомендації щодо практичної реалізації експериментального зразка.

**Ключові слова:** лом; сепаратор; лінійний трифазний асинхронний двигун; математичне моделювання; відходи промисловості; кольорові метали; технічні заходи.

**Вступ.** На протязі всього часу людства метали та їх сплави розвивалися разом. На честь окремих металів названі цілі епохи – бронзовий (мідні сплави) та залізний вік. Всі найбільші науково-технічні і промислові революції завжди супроводжувалися розвитком матеріалів і, в першу чергу, металів.

Сучасні тенденції в області збереження навколишнього середовища диктують необхідність обов'язкової

утилізації відходів виробництва та відходів споживання (лому). У той же час досягнення науки й техніки у цій сфері сильно ускладнюють процеси переробки відходів. На жаль, світові побажання, які зобов'язують виробників матеріалів і установок (машин) передбачати їх способи утилізації, залишаються в більшості випадків добрими намірами. Тому призначення вторинної кольорової металургії полягає в забезпеченні збору, заготівлі, первинної обробки, виробництва сплавів і напівфабрикатів з використанням лому та відходів кольорових металів. В даний час заготовлюються лом і відходи майже всіх кольорових металів. Якщо врахувати обмежену кількість запасів руди, лом і відходи кольорових металів набувають все більшого значення в задоволенні потреб промисловості в алюмінії, міді, свинцю, цинку та інших металів. На практиці відходи таких кольорових металів називають побічними продуктами але всі відходи мають потенційну споживчу вартість тому їх потрібно залучати до промислового обороту шляхом проведення необхідних організаційних і технічних заходів. Лом і відходи – це так зване сміття промисловості, використання яких вигідне за відповідних обставин [1, с. 5-6].

З фізичної і хімічної точки зору метал з руди та метал з відходів не має ніяких відмінностей. Проте для отримання металу з руди енергетичні затрати на порядок більші, ніж при отримання металу з відходів. У зв'язку з цим отримання кольорових металів з відходів виробництва та споживання вже доволі давно стало конкурентним і ефективним способом [1, с. 21].

Для України спосіб отримання кольорових металів з лому та відходів їх виробництва став надзвичайно актуальним після 1991 р. Тому, що в Україні відсутня промислова здобич руд алюмінію, міді, цинку, свинцю й низки інших кольорових металів. На даний момент з кольорових металів з власної рудної бази в Україні виробляються тільки титан, ртуть, цирконій, кремній, гафній і уран.

Саме тому можна зробити певні висновки:

- одним з основних джерел кольорових металів на ринку України має бути лом і відходи промисловості;
- лом і відходи кольорових металів економічно доцільно переробляти на великих спеціалізованих підприємствах, які мають у своєму розпорядженні сучасні технології та устаткування для обробки, сортування, підготовки й переробки вторинної сировини.

**Мета роботи** полягає у створенні математичної моделі для розрахунку трифазного лінійного асинхронного двигуна, який буде встановлений на сепаратор кольорових металів.

**Матеріали досліджень.** Аналіз літературних джерел показав, що на сьогоднішній день існує два основних пристрої що дозволяються виконувати сепарацію кольорових металів: на основі лінійного асинхронного двигуна та на основі магнітного ротору. Принципові схеми вищезгаданих конструкцій показано на рисунку 1.

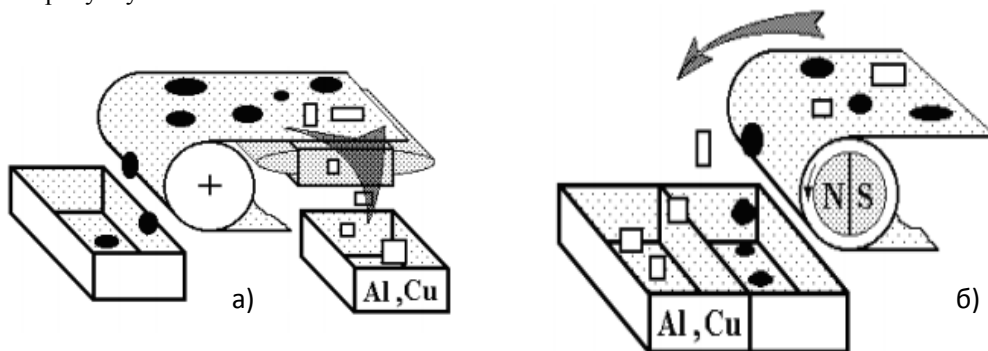


Рис.1 Електродинамічний сепаратор на основі лінійного двигуна (а) та на основі магнітного ротору (б) [2, с. 13]

Сепаратор на основі магнітного ротору працює за наступним принципом: за допомоги обертання з великою швидкістю магнітної системи в робочій зоні сепаратору створюється змінне магнітне поле. В

тілах немагнітних струмопровідних металічних предметів, які попали в зону змінного магнітного поля, збуджуються вихрові струми, які, в свою чергу формуються навколо себе своє локальне магнітне поле. Взаємодія магнітних полів вихрових струмів зі знакозмінним магнітним полем сепаратора призводить до осьових зусиль, які змінюють траєкторію руху електропровідних матеріалів [3, с. 22].

Дана система має такі переваги: відсутні втрати активної та реактивної потужності на збудження основного електромагнітного поля, відносна простота конструкції, відсутність джерел активних втрат в робочому органі.

Недоліки: всі недоліки вищезгаданої системи викликані наявністю постійних магнітів та мінливістю їхніх характеристик в залежності від температури навколишнього середовища, перепадів температур, чутливістю до ударів та вібрацій природнім розмагнічуванням. Інша група недоліків пов'язана з виготовленням магнітного барабану, а саме з надійним кріпленням постійних магнітів у зв'язку з підвищеним діаметром і великою швидкістю обертання, а отже великим значенням відцентрових сил. Необхідно підбирати величину постійних магнітів так, щоб були відсутні паразитні динамічні моменти при його обертанні. Система повинна мати необхідну механічну міцність, оскільки надмірна осьова довжина постійних магнітів може призвести до їх пошкодження. Також в даній системі існують обертові частини, які в свою чергу знижують надійність установки в цілому, оскільки необхідно встановлювати дорогі радіальні підшипники, які потребують регулярного технічного огляду та контролю повітряного проміжку між барабаном і конвеєрною стрічкою. Це в свою чергу призводить до додаткових експлуатаційних затрат та удорожчання системи в цілому. Також в даній конфігурації розміщення контейнерів для електропровідних феромагнітних та немагнітних матеріалів розташовані поруч в кінці конвеєрної стрічки. Тому існує ймовірність похибки при роботі такої системи. А саме перемішування між собою продуктів сепарації. Процесом сепарації металів в даному випадку можна регулювати лише за рахунок зміни швидкості обертання барабану з магнітами та регулюванням повітряного проміжку між барабаном і рухомою конвеєрною стрічкою. Що також збільшує вартість та ускладнює систему наявністю частотного перетворювача для зміни швидкості конвеєрної стрічки та рухомого вала барабана з магнітами.

Сепаратор на основі лінійного асинхронного трифазного двигуна працює за принципом збудження біжучого електромагнітного поля за рахунок збудження трифазним електричним струмом, яким живиться трифазна розподілена обмотка. В даній системі відсутні рухомі частини робочого механізму. Тобто основним рушійним вузлом є трифазний лінійний асинхронний двигун.

Даний сепаратор має такі переваги над попереднім варіантом: відсутні рухомі елементи в системі, що збуджують основне електромагнітне поле; відсутні втрати на тертя; відсутні елементи в конструкції з високою вартістю та низькою механічною міцністю, що підвищує надійність системи в цілому; широкі можливості для регулювання параметрів сепарації:

-ефективність сепарації може регулюватись за рахунок зміни частоти живлення лінійного асинхронного двигуна;

-за рахунок зміни кута атаки лінійного двигуна відносно рухомої стрічки;

-за рахунок зміни повітряного проміжку між об'єктом сепарації та лінійним двигуном;

-за рахунок зміни магнітного потоку в широких межах ( застосування диференційованого закону керування з одночасною зміною напруги і частоти);

Можливість реалізації системи з двома індукторами із зустрічно направленими магнітними полями за рахунок відбувається сепарація металів з різною електропровідністю (алюміній, мідь, і т.д.), що в свою чергу підвищує ефективність сепарації лому в цілому. Так як контейнери для електропровідних магнітних і немагнітних матеріалів розміщені відокремлено відпадає можливість змішування елементів сепарації між собою.

До недоліків даної системи можна віднести: споживання реактивної та активної потужності з мережі для створення основного електромагнітного поля; присутні високі температурні втрати за рахунок підвищених електромагнітних навантажень, що в свою чергу потребує встановлення додаткової системи охолодження; у випадку реалізації системи з частотним перетворювачем значно збільшує вартість системи в цілому.

На основі проведеного порівняльного аналізу для реалізації та в якості прототипу для математичного моделювання обрано варіант з системою виконаної на основі лінійного асинхронного трифазного двигуна. Ескіз запропонованої системи виконаної в системі САПР SolidWorks показана на рисунку 2.

На рисунку 2 зображено:

- 1) контейнер для лому електропровідних немагнітних матеріалів;
- 2) контейнер для інших відходів виробництва, що сепарується;
- 3) конвеєр та конвеєрна стрічка;
- 4) лінійний асинхронний трифазний двигун;
- 5) лінія для подачі лому.

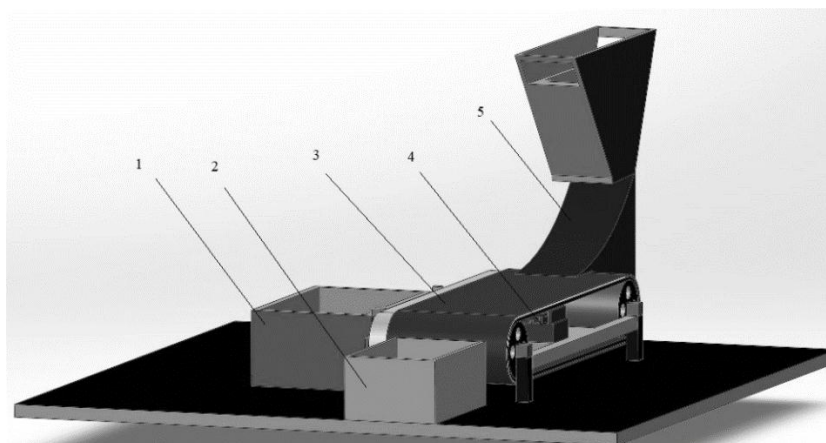


Рис.2 Загальний вид сепаратору з лінійним двигуном

На рисунку 3 показано зовнішній вигляд досліджуваного лінійного асинхронного трифазного двигуна.

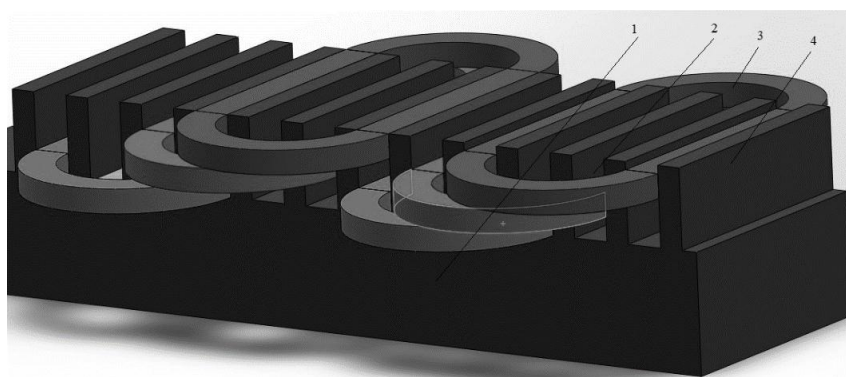


Рис.3 Загальний вид лінійного трифазного асинхронного двигуна

На рисунку 3 зображено:

- 1) магнітне осердя;
- 2) паз магнітопроводу;
- 3) трифазна обмотка;
- 4) зубець магнітопроводу.

#### Опис математичної моделі

У сучасному світі чисельне моделювання лягає в основу розробки практично будь-яких продуктів і дозволяє зменшити час і вартість виведення кінцевого продукту на ринок.

Пакет COMSOL Multiphysics вдає із себе потужний інструмент, що дозволяє моделювати фізичні процеси з різних областей, в т.ч. спільно: електромагнетизм, гідродинаміка і теплопередача, механіка і акустика, а також хімія. Унікальні можливості моделювання, пропонувані COMSOL Multiphysics, дозволяють оптимізувати характеристики, скоротити час і знизити витрати на розробку кінцевого продукту.

Ефективне чисельне проектування і моделювання обертових електричних механізмів дозволяє, при мінімальних втратах, аналізувати і оптимізувати їх робочі характеристики і режими роботи.

Рівняння Максвелла встановлюють взаємозв'язок між векторними польовими функціями, характеристиками джерел поля та фізичними параметрами матеріальних середовищ. У сучасній формі запису ці рівняння мають наступний вигляд:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (1)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (2)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} + \partial \vec{D} / \partial t + \gamma (\vec{v} \times \vec{B}) + \gamma \vec{E}_{\text{стоп}} + \rho v_p + \text{rot}(\vec{D} \times \vec{v}) \quad (6)$$

У наведеній системі позначено: польові функції – вектори напруженості магнітного  $\vec{H}$  та електричного  $\vec{E}$  полів, вектор магнітної індукції  $\vec{B}$  і вектор електричного зміщення  $\vec{D}$ ; коефіцієнти, які характеризують фізичні властивості матеріальних середовищ – магнітна проникність  $\mu$ , електропровідність  $\gamma$ , діелектрична провідність  $\epsilon$ ; щільність електричних зарядів  $\rho$ . Вираз (3.1) дозволяє знайти густину струмів  $\vec{J}$ , обумовлену сумою доданків різної фізичної природи. Доданок  $\gamma\vec{E}$  обумовлює індуковану щільність струму в електропровідному середовищі; доданок  $\partial\vec{D}/\partial t$  – щільність струму діелектричного зміщення; доданок  $\gamma(\vec{v} \times \vec{B})$  визначає "конвективну складову" густини струму, яка обумовлена рухом електропровідного середовища зі швидкістю  $\vec{v}$  відносно магнітного поля з індукцією  $\vec{B}$  [4, с.351].

Доданок  $\vec{J}_{\text{стор}} = \gamma\vec{E}_{\text{стор}}$  стор визначає щільність струму, яка викликана сторонніми ЕРС; доданок  $\rho v_p$  характеризує щільність струмів переміщення вільних зарядів, а доданок  $\text{rot}(\vec{D} \times \vec{v})$  – "конвективну складову" густини струму, яка обумовлена рухом поляризованого діелектрика.

Перетворення (3.2) шляхом підстановки туди (3.3) і (3.1) приводить до співвідношення:

$$\text{div}(\sigma\vec{E}) + \frac{\partial(\text{div}\vec{D})}{\partial t} = 0. \quad (7)$$

Відносно потенціала  $U$  рівняння виглядає наступним чином:

$$\text{div}(-\sigma \cdot \text{grad}U) + \frac{\partial}{\partial t} \text{div}(-\epsilon \cdot \text{grad}U) = 0 \quad (8)$$

Формулювання задачі складається з рівняння Пуассона, що описує електростатичне поле:

$$\nabla \cdot \epsilon \vec{E} = \rho, \quad (9)$$

Та рівнянні розтікання струмів у провідному середовищі

$$\nabla \cdot \vec{j} = -i\omega\rho, \quad (10)$$

Включаючи до уваги закон Ома,

$$\vec{j} = g\vec{E}. \quad (11)$$

Тоді рівняння потенціалу  $U$  набуває належного кінцевого вигляду:

$$\nabla \cdot \left( \left[ \epsilon - \frac{ig}{\omega} \right] \nabla U \right) = 0 \quad (12)$$

Електропровідність  $g$ , компоненти тензора діелектричної проникності  $\epsilon_y$  ( $\epsilon_z$  и  $\epsilon_r$ ) постійні всередині кожного блоку моделі.

Кінцева мета математичного моделювання – визначити кількісні співвідношення між параметрами оригіналу за допомогою вивчення тих функціональних залежностей, які містяться в математичній моделі.

У загальному випадку будь-яка польова функція є векторної функцією, і кожна її складова залежить від чотирьох незалежних змінних – трьох просторових координат точки і часу.

При розрахунку магнітного поля використовувалося нестационарне нелінійне диференціальне рівняння для векторного магнітного потенціалу ( $\vec{A}$ ) в рухомому електропровідному середовищі:

$$\vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \times \vec{A}) - \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \gamma \vec{V} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = -\vec{J}_{\text{стор}}, \quad (13)$$

де:  $\mu$ ,  $\sigma$  – магнітна проникність та електропровідність;

$\vec{V}$ ,  $\vec{J}_{\text{стор}}$  – вектори швидкості руху середовища та сторонньої густини струму;  $\vec{\nabla}$  – диференціальний Набла-оператор.

Для розрахунку електромагнітного поля в квазістатичному режимі рівняння (3.18) набуває наступного вигляду:

$$\vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \times \vec{A}) - \gamma j \omega + \gamma \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = -\vec{J}_{\text{стор}} \quad (14)$$

Рівняння, які описують матеріали, що використовувались при моделюванні:  
Для сталі:

$$H = f(|B|) \frac{B}{(|B|)} \quad (15)$$

Для обмотки:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (16)$$

Сили і моменти розраховані з використанням тензору напружень Максвелла доступні в фізиці електростатики, електричного струму, магнітних полів і магнітних та електричних полів. В фізиці електростатики і електричних струмів, сила розраховується шляхом інтеграції виразу на поверхні об'єкта, на який діє сила. .

В обох виразах,  $E$  – електричне поле,  $D$  електричний зсув,  $H$  магнітне поле,  $B$  індукція потоку, а  $n$  – нормаль до об'єкта.

Метод сили Лоренца.

Сила Лоренца визначається як  $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ . Даний метод є дуже точним для електромагнітних розрахунків сил електропровідних доменів.

В найбільш поширених областях досліджень, наведені вище формули можуть бути використані для обчислення миттєвих значень сили і крутного моменту. Але часто потрібно обчислити середні значення цих величин протягом циклу, чи наприклад пари електромагнітних сили в іншій галузі фізики.

Чисельна реалізація тривимірної моделі здійснюється за допомогою методу скінченних елементів, що являє собою числову техніку знаходження розв'язків інтегральних та часткових диференціальних рівнянь (ЧДР). Процес розв'язання побудований або на повному усуненні диференціального рівняння для стаціонарних задач, або на розкладі ЧДР в апроксимуючу систему звичайних диференціальних рівнянь, які потім розв'язуються використанням якої-небудь стандартної техніки. Однією з них є метод скінченних елементів (МСЕ).

Основна ідея МСЕ полягає в тому, що будь-яку неперервну функцію, таку, як векторний або скалярний магнітний потенціал, індукцію та температуру, можна апроксимувати дискретною моделлю, яка будується на безлічі частково-неперервних функцій, визначених на кінцевому числі підобластей. Рішення рівнянь поля в МСЕ визначається виходячи з умови мінімуму енергетичного функціоналу.

В основу програмного пакету COMSOL Multiphysics, на базі якого проводиться моделювання, покладено метод скінчених елементів (МСЕ) [4, с. 352].

При моделюванні тривимірної моделі лінійного асинхронного трифазного двигуна була побудована сітка скінчених елементів, яка зображена на рисунку 4.

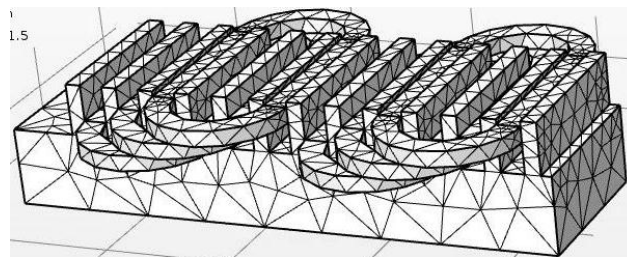


Рис.4 Сітка скінчених елементів досліджуваного лінійного трифазного асинхронного двигуна

В середньому час розрахунку однієї поставленої задачі складає 1 год. 20 хв на ПЕОМ із наступними параметрами:

- Процесор Intel core 2 duo E8400 3.0 GHz;
- Оперативна пам'ять 4 Gb, DDR2;
- Відеокарта Nvidia Geforce GT 440 1 Gb.

Що є прийнятним для виконання серії польових математичних розрахунків та аналізу отриманих результатів.

#### Результати моделювання

Розподіл електромагнітного поля та векторного магнітного потенціалу досліджуваного лінійного асинхронного двигуна в режимі неробочого ходу показана на рисунку 5.

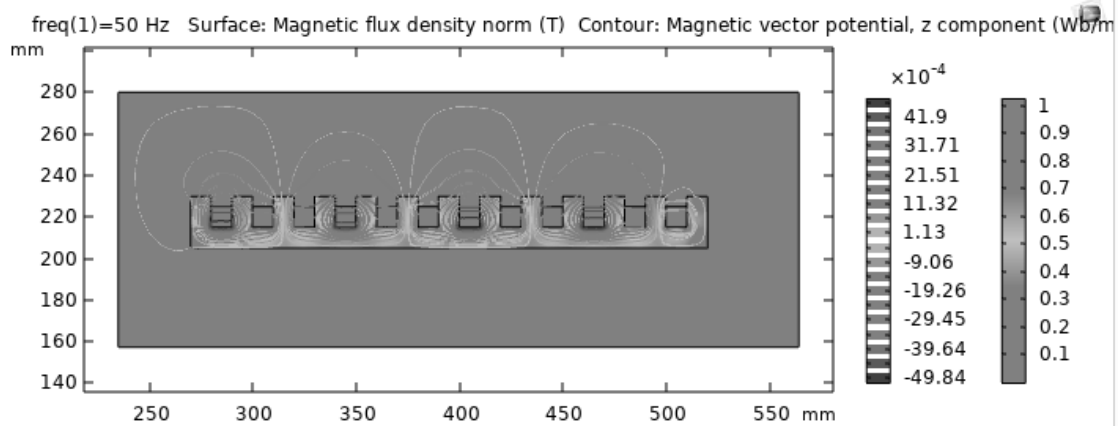


Рис.5 Розподіл електромагнітного поля

Як видно з рисунку 5, що середня величина магнітної індукції в ярмі статора складає 0.45 Тл., в зубці 0.51Тл., на висоті 1 мм від поверхні індуктора в повітряному проміжку складає 0.13 Тл.

Розподіл середнього значення магнітної індукції в повітряному проміжку на висоті 5 мм над індуктором лінійного двигуна показана на рисунку 6.

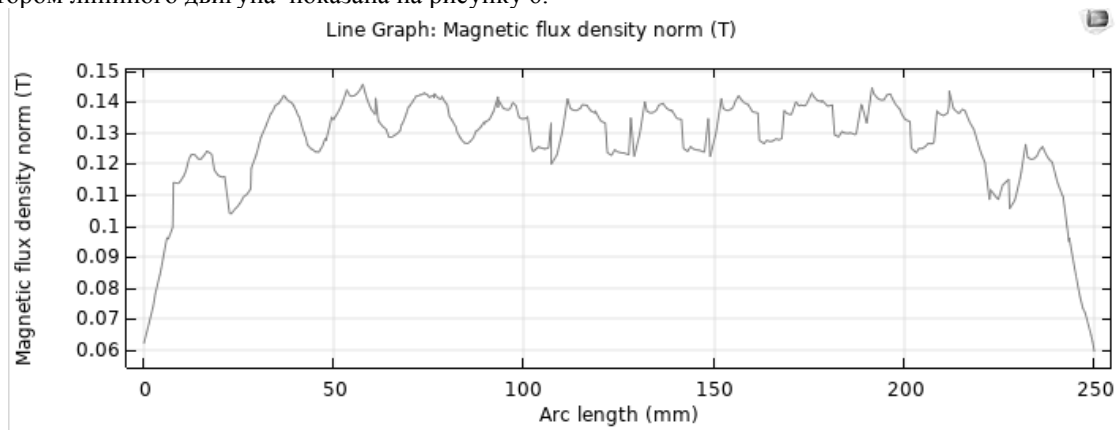


Рис.6 Розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку на висоті 5 мм

На наступному етапі математичного моделювання проведено ряд чисельних електромагнітних розрахунків для випадку коли в повітряному проміжку розташовується заготовка певної конфігурації. Таким чином вивчалась залежність електромагнітної сили, що буде діяти на заготовку в залежності від її конфігурації, електропровідності (типу матеріалу), частоти живлення та висоти над поверхневою лінією індуктора. Результати дослідження наведено нижче.

Розподіл електромагнітного поля та векторного магнітного потенціалу лінійного асинхронного двигуна при появі в повітряному проміжку заготовки показано на рисунку 7.

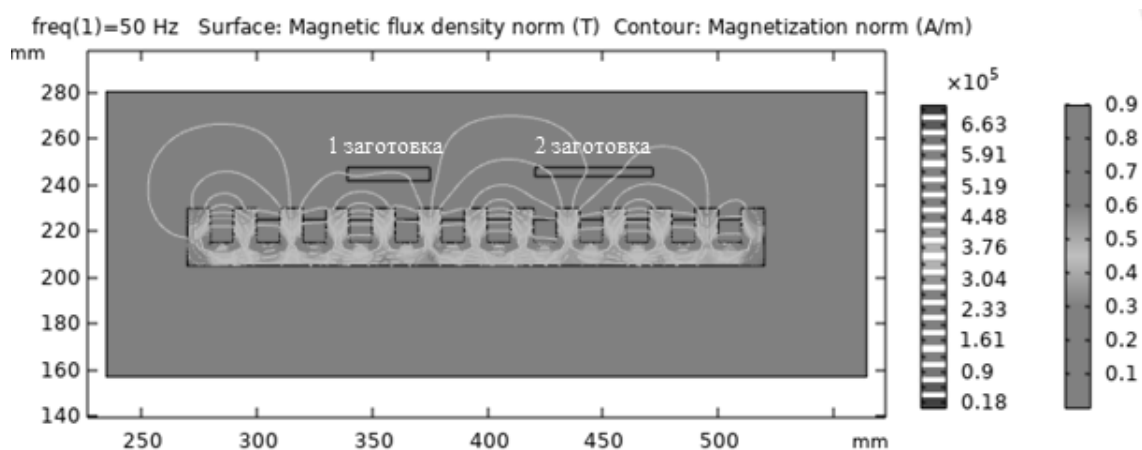


Рис.7 Розподіл електромагнітного поля при наявності заготовок

Як видно з рисунку 7, що середня величина магнітної індукції в ярмі статора складає 0.48 Тл., в зубці 0.41Тл., на висоті 1 мм від поверхні індуктора в повітряному проміжку складає 0.11 Тл. Як видно на холостому ході індукції були дещо вищими, це пояснюється дією реакції якоря.

Наступним кроком моделювання була зміна положення заготовки відносно нерухомого індуктора з подальшим розрахунком електромагнітних зусиль.

Результати розрахунків приведені в таблиці 1.

Табл. 1 Зміна електромагнітної сили [Н\*м] при різних проміжках (15 мм та 7,5 мм)

15 мм	Тип металу		
	Al	Cu	St
1 заготовка	7,52	10,4	43,2
2 заготовка	26,40	28,48	36,8

7,5 мм	Тип металу		
	Al	Cu	St
1 заготовка	11,84	17,76	59,04
2 заготовка	43,2	42,56	69,44

Очевидно, що чим вище знаходиться заготовка відносно горизонтальної площини індуктора тим менша буде величина зусилля, що на неї діє. Це пояснюється тим, що середня величина магнітної індукції зменшується при збільшенні повітряного проміжку. Тому необхідно визначити оптимальну величину зазору між індуктором магнітопроводу лінійного двигуна та заготовкою.

Далі наведено результати розрахунку електродинамічних зусиль при зміні провідності заготовок. Дані розрахунків приведені в таблиці 2. Також за даними таблиці 2 було побудовано криву, яка представлена на рисунку 8.

Табл.2 Зміна електродинамічних зусиль [Н\*м] в залежності від провідності

№ заготовки	Електрична провідність						
	0	1	2	3	4	5	6
1	0	6,08	8,32	10,24	12,48	15,04	17,76
2	0	17,44	32,16	40,32	43,52	43,84	42,56

Як видно з графіку, що зображені на рисунку 8 величина електромагнітного зусилля суттєво залежить від електропровідності матеріалу. Чи вище значення електропровідності тим вище величина електромагнітного зусилля. Це пояснюється тим, що при збільшенні електропровідності заготовки зростає величина наведених вихрових струмів в ній. З іншого боку, як показують розрахунку величина електромагнітного зусилля залежить від конфігурації заготовки. Чим більшу активну площину заготовка має тим вище відповідне значення електромагнітного зусилля що діє на неї.

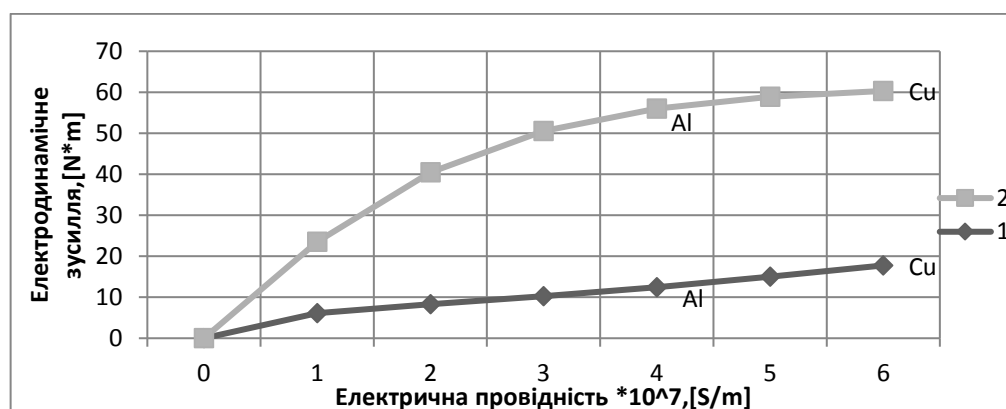


Рис.8 Зміна електродинамічного зусилля від електричної провідності

Наступним кроком моделювання була зміна частоти живлення при двох варіантах заготовок, а саме заготовки із міді та алюмінію. Дані розрахунків наведені в таблиці 3 та таблиці 4. За цими даними було побудовано дві залежності, які приведені на рисунку 9 та рисунку 10.



Табл. 3 Зміна частоти живлення для алюмінію

№ заготовки	Зміна частоти живлення заготовки з алюмінію							
	5 Гц	10 Гц	20 Гц	30 Гц	40 Гц	50 Гц	75 Гц	100 Гц
1	2,88	5,12	7,52	8,8	10,24	11,84	16,8	21,28
2	6,4	13,12	25,6	34,88	40,48	43,2	43,04	39,36

Табл. 4 Зміна частоти живлення для міді

№ заготовки	Зміна частоти живлення заготовки з міді							
	5 Гц	10 Гц	20 Гц	30 Гц	40 Гц	50 Гц	75 Гц	100 Гц
1	4,32	6,72	9,12	11,52	14,56	17,76	23,84	26,88
2	10,4	20,8	36,16	42,72	44	42,56	35,84	29,12

Як видно з результатів розрахунку, що зображені на рисунку 9 та 10 величина електромагнітного зусилля суттєво залежить від частоти живлення лінійного трифазного асинхронного двигуна. З одного боку величина магнітного потоку прямо пропорційна частоті, з іншого боку величина індукованих вихрових струмів у вторинному елементі (заготовці) теж прямо пропорційна частоті зміні магнітного потоку і характер залежності зусилля від частоти повинен бути лінійною залежністю. Однак у векторній формі електромагнітне зусилля являє собою добуток вектора магнітної індукції на вектор густини струму, які прямо пропорційно залежать від частоти.

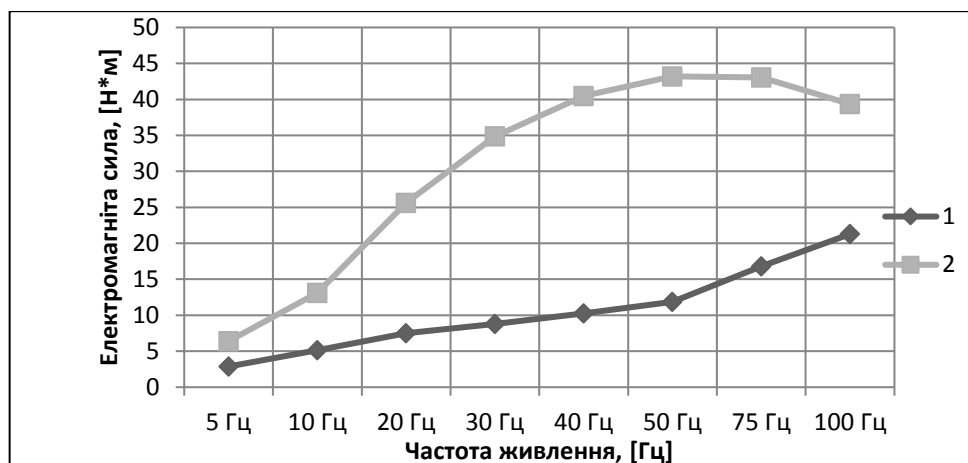


Рис.9 Зміна частоти живлення для алюмінію

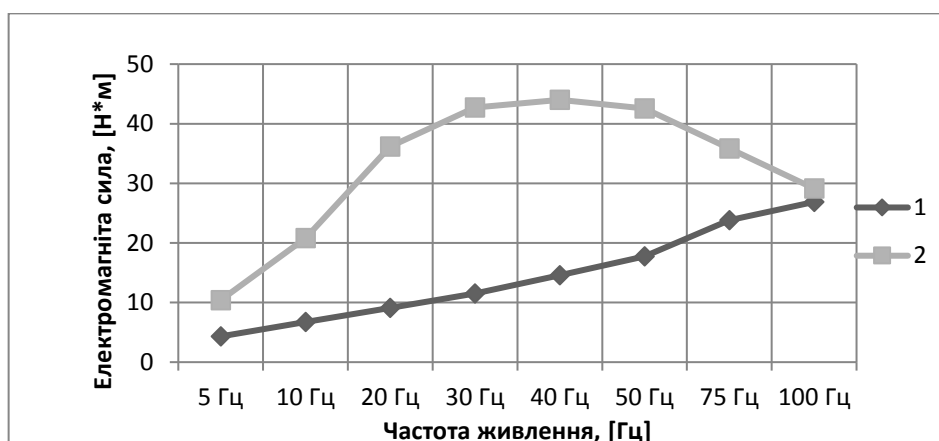


Рис.10 Зміна частоти живлення для міді

З іншого боку, при зміні частоти змінюється глибина проникнення струмів в електропровідне середовище вторинного елемента і при збільшенні частоти підсилюється ефект витіснення струму, що

означає збільшення ефективного омичного опору заготовки. А отже сумарний вихровий струм в них з ростом частоти буде зменшуватись, відповідно буде зменшуватись величина зусилля. Тобто як показують розрахунки, для певного матеріалу і для певної конфігурації вторинного елемента є оптимальне співвідношення частоти і напруги живлення, при яких досягається максимальне значення електромагнітного зусилля. Це добре видно на рисунках 9 та 10.

#### **Практична реалізація**

На основі проведених електромагнітних розрахунків уточнено геометричні розміри, що взяті в основу для виготовлення прототипу системи сепарації кольорових металів на основі лінійного асинхронного трифазного двигуна. Фотографія процесу виготовлення лінійного асинхронного трифазного двигуна, що буде лежати в основі системи сепарації кольорових металів зображено на рисунку 11.



Рис.11 Прототип лінійного двигуна

На рисунку 11 показано процес виготовлення обмотки статора лінійного асинхронного трифазного двигуна, а саме другої котушкової групи.

#### **Висновки**

За результатами проведеної роботи зроблені наступні висновки:

- 1) проведено літературно патентний аналіз показав, що існує 2 основних типи сепараторів кольорових металів. В якості прототипу обрано сепаратор лінійного типу на базі лінійного асинхронного трифазного двигуна;
- 2) розроблено тривимірну польову математичну модель, що реалізована методом скінчених елементів для аналізу основних параметрів та характеристик досліджуваного лінійного сепаратора кольорових металів;
- 3) для забезпечення максимально ефективної сепарації необхідно забезпечувати мінімально можливий технологічний проміжок між горизонтальною площиною лінійного двигуна та вторинного елемента. Це повинно забезпечуватись за рахунок якості та відповідної культури технології виробництва таких сепараторів;
- 4) величина електромагнітного зусилля залежить від конфігурації вторинного елемента та його електропровідності. Це явище можна використовувати для вибіркової сепарації різних металів. Крім того необхідно забезпечувати таку величину магнітної індукції в повітряному проміжку, щоб величина зусилля була достатня для сепарації вторинних елементів різної конфігурації, габаритів та ваги;
- 5) як показали результати моделювання сепаратор на основі лінійного асинхронного двигуна має широкі можливості для регулювання величини зусилля. Це в першу чергу реалізується за рахунок зміни частоти напруги живлення. Існує оптимальне співвідношення частоти та напруги живлення, при якому досягається максимальне зусилля, що буде діяти на вторинний елемент;
- 6) за результатами електромагнітних розрахунків розроблено ескіз прототипу для практичної реалізації системи сепарації кольорових металів на основі лінійного двигуна.

#### **Список використаної літератури**

1. МЕТАЛУРГІЯ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ / Бредихін В.М., Смирнов В.О., Пожуєв В.І та ін.]. – Запоріжжя: Запорізька державна інженерна академія, 2009. – 452 с.
2. INDUCTION MACHINES FOR ELECTRODYNAMIC SEPARATION OF NON-FERROUS METALS / A.Yu.Konyayev, S.L.Nazarov. // Faculty of Electrical Engineering, Ural Federal University. – 2016. – С. 13–14.
3. Математичне моделювання електричних машин з постійними магнітами/ КОВАЛЕНКО М.А., ВАСЬКОВСЬКИЙ Ю.М., ГАЙДЕНКО Ю.А. // National Technical University of Ukraine. – 2017. – С. 193.
4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МУФТ / МА Коваленко, ИВ Маляр. // Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики". – 2017. – С. 351–352.

V. Chumack, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. ORCID 0000-0001-8401-7931

M. Kovalenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. ORCID 0000-0002-5602-2001

I. Tkachuk, Msc. ORCID 0000-0002-5717-2458

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## MATHEMATICAL SIMULATION OF A LINEAR INDUCTION MOTOR FOR COLOR METALS SEPARATION

*Non-ferrous and metal scrap separation nowadays is becoming more and more actual problem. There are several traditional methods of separating ferrous and non-ferrous metal waste. To automate this process, it is necessary to use mechanized systems based on linear induction motors. This paper is presented to the study of such type object. In this paper several field mathematical models have been developed, which are implemented by the finite element method in Comsol Multiphysics software package. The object of the study is a linear three-phase induction motor which is constructed for the non-ferrous metal scrap separation. With the help of the developed mathematical model the basic parameters and characteristics of a linear motor are calculated and the optimal limits of its operation are determined and the minimum configuration of the scrap is required for its reliable separation. A series of calculations was performed to determine the optimal operating modes of the linear separator and to formulate recommendations for the practical implementation of the experimental one. In this paper relation between electrical conductivity and force was calculated. It was performed due to optimal practical recommendations, which are used in real life operation.*

**Keywords:** scrap, separator, linear three-phase induction motor, mathematical modeling, industry waste, non-ferrous metals, technical measures.

### References

1. METALURHIYA KOL'OROVYKH METALIV (METALLURGY OF COLOR METALS) / Bredykhin V.M., Smyrnov V.O., Poruchiy V.I, etc.]. - Zaporizhzhya: Zaporiz'ka derzhavna inzhenerna akademiya, 2009. - 452 p.
2. INDUCTION MACHINES FOR ELECTRODYNAMIC SEPARATION OF NON-FERROUS METALS / A.Yu. Konyayev, S.L.Nazarov. // Faculty of Electrical Engineering, Ural Federal University. – 2016. – p. 13–14.
3. Matematychnye modelyuvannya elektrychnykh mashyn z postynnymy mahnitamy (Mathematical modeling of electric machines with constant magnet) / KOVALENKO M.A., VAS'KOVSKYY YU.M., HAYDENKO YU.A.. // National Technical University of Ukraine. – 2017. – p. 193.
4. MATEMATYCHESKOE MODEL'YOVANYE ÉLEKTROMAGNITNYKH MUFT (MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC COUPLANG) / MA Kovalenko, YV Malyar. // Mizhnarodnyy naukovo-tekhnichnyy zhurnal " Suchasni problemy elektroenerhotekhniki ta avtomatyky". – 2017. – p. 351–352.

Надійшла 23.08.2019

Received 23.08.2019