

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА ДЛЯ СЕПАРАТОРА ЛОМУ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ

Ткачук І.В., магістрант, Коваленко М.А., к.т.н., доц., Чумак В.В., к.т.н., доц.

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки*

**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].

Сортування відходів виробництва – це розділення всієї сировини на метали, сплави, за розмірами та величиною засміченості. Використовують наступні види сортування. Видове візуальне сортування, при якому сортувальник, використовуючи свій досвід, розділяє всю сировину на метали або сплави. Різновидом видового сортування є приладове сортування, при якому використовуються переносні (мобільні) прилади. При операції сортування використовуються технологічні лінії – так звані сепаратори.

**Мета роботи.** Дослідження параметрів і характеристик лінійного асинхронного двигуна для сепарації лому кольорових металів..

Для вирішення поставленої мети поставлені наступні завдання:

- Аналітичний огляд та літературний аналіз;
- Аналіз методів та засобів математичного моделювання електромагнітних сепараторів та вибір методу моделювання;
- Розробка тривимірних польових математичних моделей електромагнітного сепаратору на базі лінійного асинхронного двигуна у середовищі SolidWorks та COMSOL Multiphysics для подальших розрахунків;
- Аналіз результатів математичного моделювання, визначення параметрів та характеристик досліджуваного двигуна.

**Матеріали і результати 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.

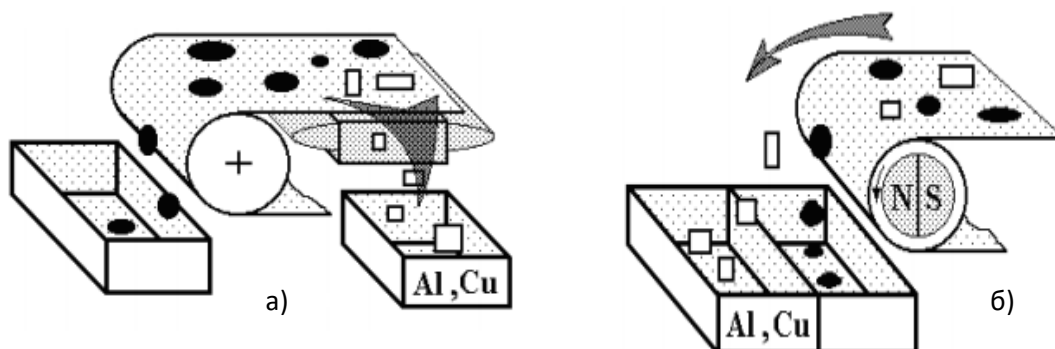


Рисунок 1 – Електродинамічний сепаратор на основі лінійного двигуна (а) та на основі магнітного ротору (б)

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.

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).

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.

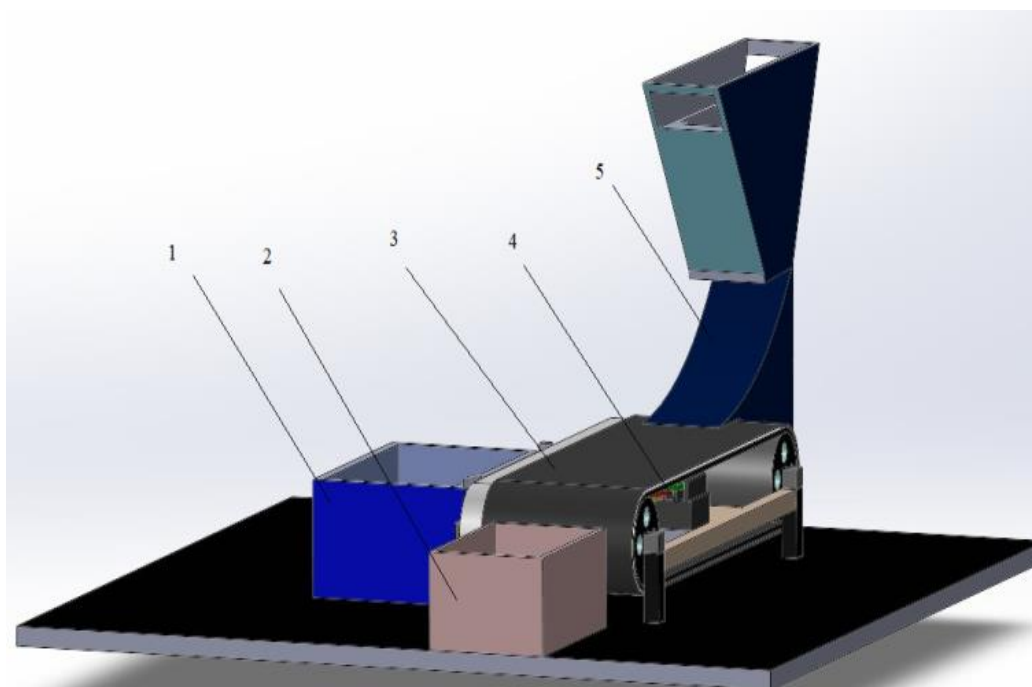


Рисунок 2 – Загальний вид сепаратору з лінійним двигуном

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

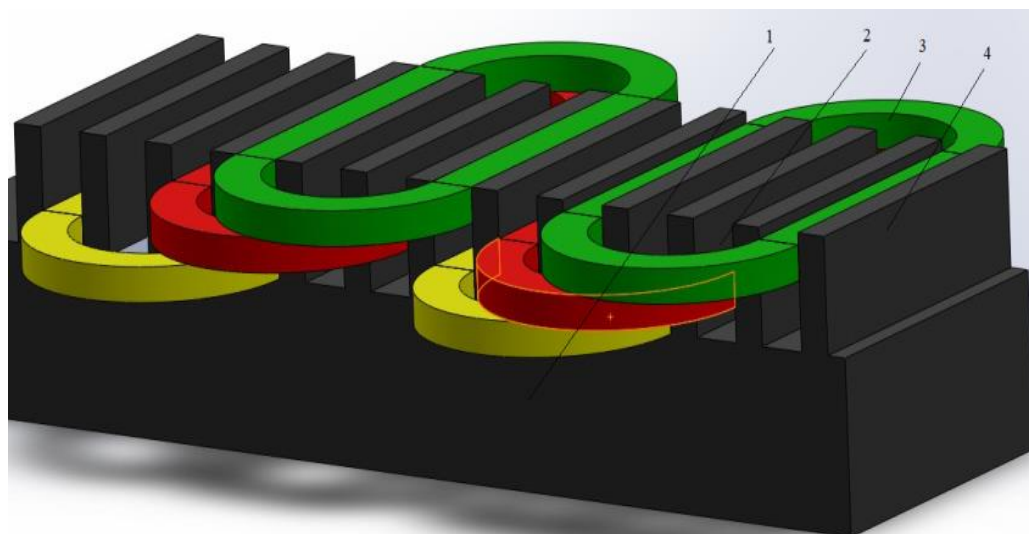


Рисунок 3 – Загальний вид лінійного трифазного асинхронного двигуна

В основу програмного пакету COMSOL Multiphysics, на базі якого проводиться моделювання, покладено метод скінчених елементів (МСЕ) [2].

При моделюванні тривимірної моделі лінійного асинхронного трифазного двигуна була побудована сітка скінчених елементів, яка зображена на рисунку 4 [3].

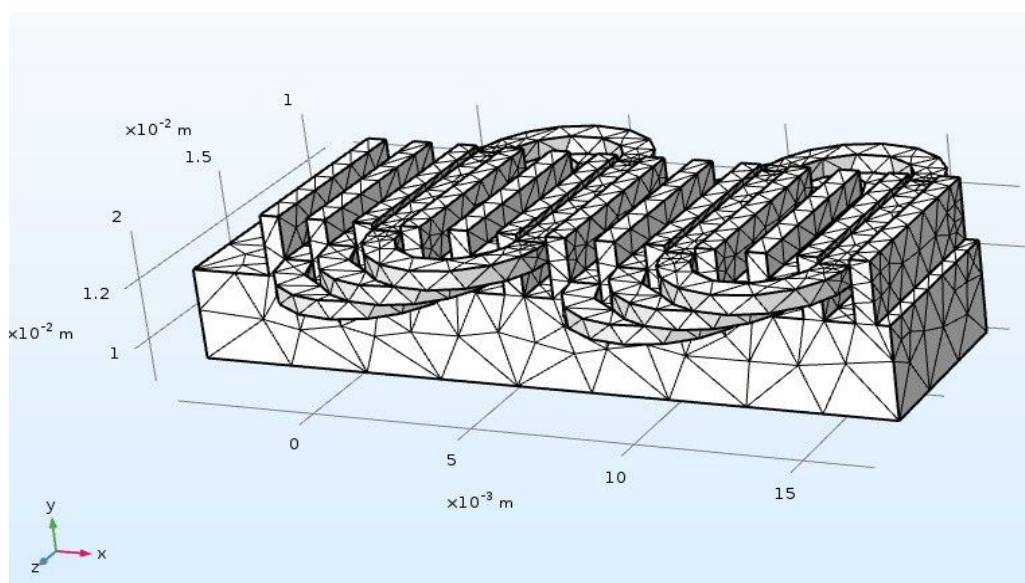


Рисунок 4 – Сітка скінчених елементів досліджуваного лінійного трифазного асинхронного двигуна

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

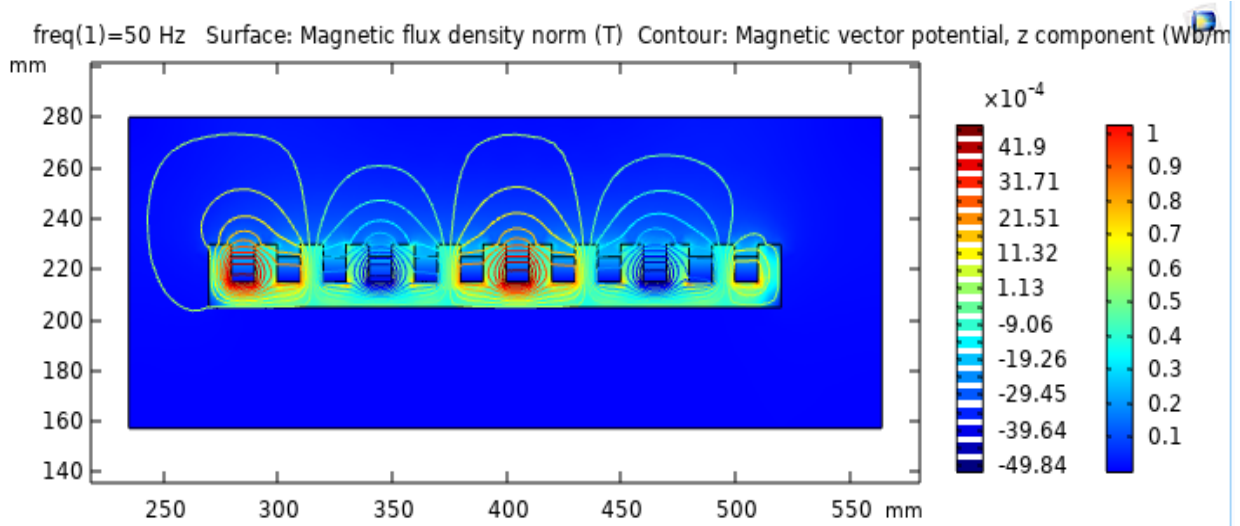


Рисунок 5 – Розподіл електромагнітного поля

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.

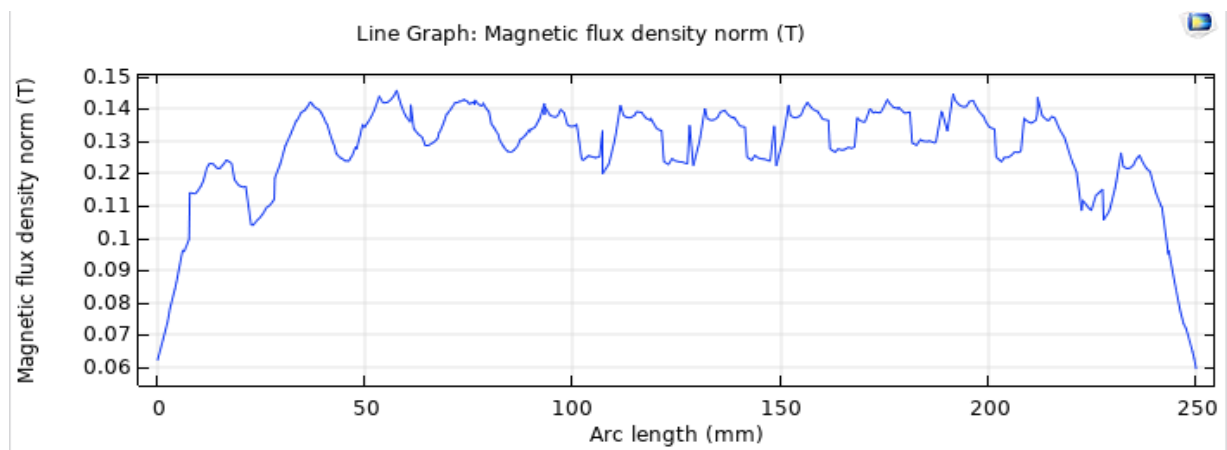


Рисунок 6 – Розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку на висоті 5 мм

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.

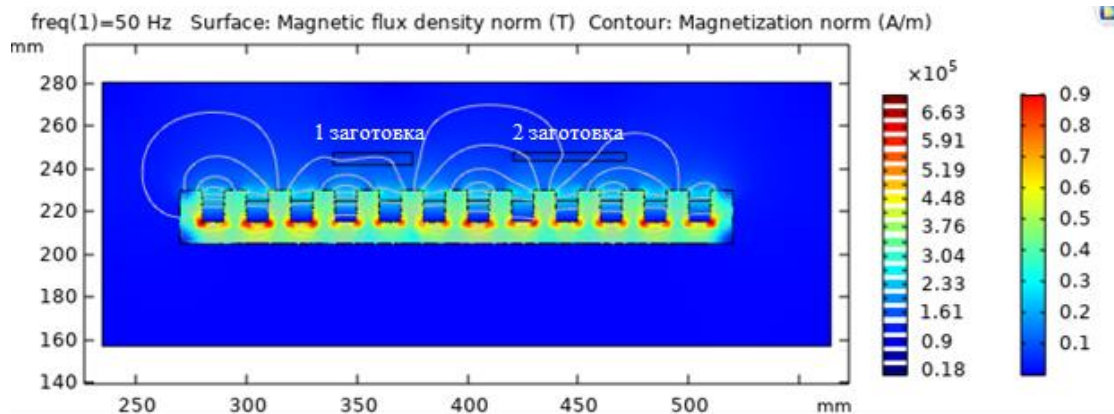


Рисунок 7 – Розподіл електромагнітного поля при наявності заготовок

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.

**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 ефективною 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.

#### Перелік посилань

1. МЕТАЛУРГІЯ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ / Бредихін В.М., Смирнов В.О., Пожувєв В.І та ін.]. – Запоріжжя: Запорізька державна інженерна академія, 2009. – 452 с.
2. Математичне моделювання електричних машин з постійними магнітами/ КОВАЛЕНКО М.А., ВАСЬКОВСЬКИЙ Ю.М., ГАЙДЕНКО Ю.А.. // National Technical University of Ukraine. – 2017. – С. 193.
3. Matematychnе modelyuvannya elektrychnykh mashyn z postyynymy mahnitamy (Mathematical modeling of electric machines with constant magnet ) / KOVALENKO M.A., VAS'KOV'S'KYU YU.M., HAYDENKO YU.A.. // National Technical University of Ukraine. – 2017. – p. 193.