

**ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**На правах рукопису**

**Усатюк Володимир Михайлович**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ ПІДВІСНИХ СЕПАРАТОРІВ  
ДЛЯ ВТОРИННОЇ ПЕРЕРОБКИ МЕТАЛІВ**

**Спеціальність 05.09.06 - електричні апарати**

**Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Харків - 1996**



AB 35.043

Робота виконана у Східноукраїнському державному університеті.

Науковий керівник - кандидат технічних наук, професор  
Загірняк Михайло Васильович.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент  
Клименко Борис Володимирович;

кандидат технічних наук  
Спілка Віктор Карпович.

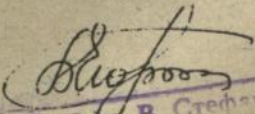
Провідна установа - Державний проектно-конструкторський  
інститут збагачувального устаткування  
(м.Луганськ).

Захист відбудеться **20 червня 1996 р.** у **14 годин 30 хвилин** на  
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.09.15 Харківського державного  
політехнічного університету за адресою: 310002, м.Харків-2, МСП, вул.  
Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці університету.

Автореферат розісланий "17" травня 1996 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

  
Сгоров Б.О.  
ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН УРСР

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність і ступінь дослідженості тематики роботи.** Інтенсифікація виробництва, його широка електрофікація та автоматизація є основою для застосування великої кількості електротехнічних пристроїв та механізмів, які базуються на різноманітних електромагнітних системах.

Окрема група спеціальних електромагнітних систем, яка відрізняється своїм призначенням й конструктивним виконанням, є основою підвісних електромагнітних сепараторів, за допомогою яких здійснюється відокремлення механічно не пов'язаних і відмінних один від одного своїми магнітними якостями матеріалів. Вони широко застосовуються при очистці сипких матеріалів, в які по тим чи іншим технологічним причинам можливе попадання небажаного металу (наприклад, видобуток металу з горілої формовочної землі при її регенерації), при захисті технологічного обладнання, яке транспортує та переробляє сипкі матеріали, від попадання сторонніх металевих предметів (наприклад, трактів топливоподачі теплових електростанцій від попадання випадкового металу з вугіллям), а також в останній час і при побудові мало- та безотходних виробництв, в технологіях, пов'язаних з більш повним застосуванням сировинних ресурсів й вторинною переробкою матеріалів (наприклад, розподіл металевого брухту і стружки на кольорову та чорну фракції, вилучення гуми та металокорду при переробці автопокришок).

Різнманітність областей та умов застосування підвісних електромагнітних сепараторів визначила різноманітність технічних рішень, що використовуються при їхньому проектуванні та промислового використанні. При цьому слід зауважити, що в нашій країні і СНД серійно не виготовляється обладнання спеціально призначене для сепарації при вторинній переробці металів, а сепаратори, що застосовуються для цього, створені на базі модернізації залізодокремлювачів (апаратів для захисту технологічного обладнання), неефективні і не відповідають технологічним умовам процесу вторинної переробки. Наряду з цим, використання для розрахунку та проектування підвісних електромагнітних сепараторів достатньо ефективних методик, розроблених для електричних апаратів автоматики з подібними конструкціями магнітних систем, у значній мірі ускладнюється, по-перше, необхідністю враховувати реальні особливості експлуатації магнітних сепараторів, визначення яких потребує встановлення впливу на процес сепарації й розвантаження багатьох параметрів; по-друге, відносно великими розмірами підвісних електромагнітних сепараторів для вторинної переробки металів (ширина робочої зони до 1,6 м), що вимагає суттєвого корегування результатів і рекомендацій, одержаних з досвіту проектування традиційних

електричних апаратів; по-третє, пов'язаною з математичними труднощами та великими витратами часу необхідністю модифікації зазначених методик для їхнього застосування до розглядаємих пристроїв.

Таким чином, відсутність спеціалізованих методик розрахунку та проектування електромагнітних систем підвісних сепараторів для вторинної переробки металів, заснованих на достовірному описі фізичних процесів, що відбуваються при сепаруванні, й орієнтованих на сучасні комп'ютери, сильно стримує створення, подальше удосконалення і розширення області застосування цих апаратів для вирішення задач ресурсозбереження та вирішення екологічних проблем, що набуло особливої актуальності у зв'язку з різким подорожанням матеріалів у останні роки та загальним екологічним станом у країні.

Це обумовило актуальність тематики дисертації та її **головну мету** - створення методики проектування (методів розрахунку головних параметрів і характеристик) електромагнітних систем підвісних сепараторів для вторинної переробки металів.

**Основні завдання дослідження** визначились його метою.

1. Системний аналіз конструкцій і головних задач, що розв'язуються при проектуванні підвісних електромагнітних сепараторів для вторинної переробки металів.

2. Розробка ефективних узагальнених методів проектування електромагнітних систем підвісних сепараторів для вторинної переробки металів, які містять методи розрахунку їхніх основних параметрів, а саме:

- раціональної конфігурації профілю робочої області полюсних наконечників;
- нагрівання та охолодження масивних обмоток намагнічування підвісних електромагнітних сепараторів;
- розподілу магнітних потоків у Ш-образних електромагнітних системах.

3. Розробка ефективних алгоритмів і програм, які забезпечуватимуть та реалізовуватимуть зазначені методи на сучасних ЕОМ.

4. Розробка удосконаленої конструкції підвісного електромагнітного сепаратора для вторинної переробки металів.

**Наукова новизна роботи** полягає в тому, що:

класифіковані технічні рішення, що удосконалюють конструкції підвісних магнітних сепараторів;

розроблена методика розрахунку раціональної конфігурації профілю робочої області полюсних наконечників на базі застосування методу магніт-

них модулів й принципа суперпозиції та запропоновано метод визначення намагніченості модулів при гострій підв'язаній до полюсних наконечників магнітній напрузі;

розроблена методика розрахунку розподілу магнітних потоків у відкритих Ш-образних магнітних системах підвісних електромагнітних сепараторів по запропонованих схемах заміщення, а також запропоновано новий метод розрахунку магнітних кіл електромагнітних систем за відповідними схемами заміщення;

розроблена методика проектного розрахунку електромагнітних систем підвісних сепараторів для вторинної переробки металів, що включає розрахунок раціональної конфігурації профілю робочої області полюсних наконечників; розрахунок обмотки намагнічування з використанням визначених експериментально залежностей питомої потужності розсіяння обмоток підвісних сепараторів від геометричних параметрів котушок при різних значеннях усталеного перегріву; розрахунок магнітопроводу й потокорозподілу у ньому, яка дозволяє проводити багатокритеріальну оптимізацію розглядаємих магнітних систем;

запропоновано удосконалену конструкцію підвісного електромагнітного сепаратора для вторинної переробки металів.

#### **Практична цінність дослідження обґрунтована:**

розробкою науково обґрунтованої методики розрахунку підвісних електромагнітних сепараторів для вторинної переробки металів, що дозволяє достатньо просто вирішувати задачі розрахунку та проектування їхніх магнітних систем з необхідною для інженерних розрахунків точністю;

створенням ефективних алгоритмів і програм, які реалізують зазначені рішення на сучасних ЕОМ і забезпечують одержання оптимальних значень геометричних параметрів без висококоштовного створення натурних експериментальних зразків;

пропозицією нових, захищених авторськими свідоцтвами, конструкцій сепараторів і їх обмоток намагнічування.

**Характеристика методів дослідження.** Достовірність проведених у роботі досліджень підтверджується використанням сучасних наукових методів дослідження явищ і процесів, які відбуваються при сепарації сипких матеріалів підвісними електромагнітними сепараторами.

Наукові положення щодо розрахунку магнітних систем обґрунтовані результатами комплексних досліджень з використанням фізичного моделювання й результатами досліджень промислових зразків підвісних сепараторів; застосуванням сучасних чисельних методів розрахунку й оптимізації,

орієнтованих на можливості сучасних комп'ютерів.

Достовірність висновків підтверджується великою кількістю чисельних рішень, співпаданням результатів розрахунків з даними результатів експериментів в лабораторних та промислових умовах, а також результатами впровадження проектних методик й дослідно-промислового зразка сепаратора.

**Реалізація наукових розробок.** Результати дисертаційних досліджень реалізовані в 5 господарських договорах на проведення науко-дослідних робіт, виконаних у відповідності з Республіканською комплексною цільовою науково-технічною програмою РН.Ц.003 "Матеріаломісткість", за твердженням Постановою Ради Міністрів УРСР №250 від 11.07.85 р. (1988-90 рр.), науково-технічною програмою "Ресурсозбереження", затвердженою Постановою Державного Комітету України з питань науки і технологій №12 від 4.05.92 р. (1992-95 рр.), планами наукових досліджень, які проводяться у Східноукраїнському державному університеті.

З використанням результатів дисертації розроблено, виготовлено та впроваджено електромагнітний сепаратор на Новолипецькому металургійному комбінаті. Промислова експлуатація апарата дозволила отримати економічний ефект за рахунок збереження цінної вторинної сировини.

Результати роботи використовуються в інституті "Діпромашвуглезбачення" при розробці та проектуванні магнітних сепараторів, а також у навчальному процесі у Східноукраїнському державному університеті при підготовці інженерів-електромеханіків..

**Апробація роботи.** Результати проведених наукових досліджень та основні положення дисертаційної роботи були представлені й отримали схвалення на науково-технічних конференціях Східноукраїнського державного університету (1989-1995 рр.), Республіканських науково-технічних конференціях (м.Запоріжжя - 1989 р., м.Луганськ - 1990 р., м.Київ -1991 р.); Всесоюзних науково-технічних конференціях (м.Москва - 1990 р., м.Київ - 1991 р., м.Вінниця - 1991 р., м.Красногорськ, Московської обл. - 1992 р.); Міжнародному науково-технічному симпозіумі (м.Познань, Польща - 1994 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 27 робіт, серед яких 1 брошура, 3 статті, 9 авторських свідоцтв.

**Структура і об'єм дисертації.** Робота, що складається із вступу, чотирьох глав, загальних висновків, списку літератури (102 найменування) і

трьох додатків, містить в основному тексті 126 машинописних сторінок, 9 таблиць та 42 рисунка на 44 сторінках.

### **Наукові результати, що виносяться на захист.**

1. Узагальнені методи розрахунку та проектування електромагнітних систем підвісних сепараторів для вторинної переробки металів, які враховують взаємозв'язки електромагнітних, механічних і теплових процесів, а саме:

1.1. Методика розрахунку раціональної конфігурації профілю робочої області полюсних наконечників на базі застосування методу магнітних модулів й принципа суперпозиції, з визначенням намагніченості модулів при постійній підведеній до полюсних наконечників магнітній напрузі;

1.2. Методика розрахунку розподілу магнітних потоків у відкритих Ш-образних магнітних системах підвісних електромагнітних сепараторів по запропонованих схемах заміщення та новий метод розрахунку магнітних кіл електромагнітних систем за відповідними схемами заміщення.

1.3. Методика проектного розрахунку електромагнітних систем підвісних сепараторів для вторинної переробки металів, що включає розрахунок раціональної конфігурації профілю робочої області полюсних наконечників; розрахунок обмотки намагнічування з використанням визначених експериментально залежностей питомої потужності розсіяння обмоток підвісних сепараторів від геометричних параметрів котушок при різних значеннях усталеного перегріву; розрахунок магнітопроводу й потокорозподілу у ньому, яка дозволяє проводити багатокритеріальну оптимізацію розглядаємих магнітних систем;

2. Результати практичної реалізації розроблених методів розрахунку і проектування електромагнітних систем підвісних сепараторів, а саме:

2.1. Нові, захищені авторськими свідоцтвами, конструкції сепараторів і їх обмоток намагнічування.

2.2. Алгоритми розрахунку електромагнітних систем підвісних сепараторів.

2.3. Алгоритм проектування електромагнітних систем підвісних сепараторів, який забезпечує збереження оптимальних значень геометричних параметрів.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані її мета й вирішувані завдання; подана анотація результатів, що виносяться на захист, та інформація про апробацію роботи і впровадження.

У першій главі наведені огляд та аналіз конструкцій підвісних електромагнітних сепараторів, подана характеристика основних задач їхнього проектування, а також наведено огляд методів розрахунку та проектування відкритих магнітних систем.

Основою підвісних електромагнітних сепараторів є магнітні системи, що містять для створення робочого магнітного поля у відносно великих об'ємах значні міжполюсні зазори, наявність яких суттєво ускладнює їхні розрахунки.

Магнітні підвісні сепаратори зі збудженням від постійних магнітів не найшли застосування за умов експлуатації, прийнятих в Україні та країнах СНД (перш за все, велика нормативна товщина шару матеріалу на стрічці). Для таких високопродуктивних (важквантажених та швидкісних) транспортерів застосовуються більш ефективні підвісні сепаратори з електромагнітним збудженням постійним струмом.

Головні завдання, що вирішуються при конструюванні підвісних електромагнітних сепараторів і визначають основні шляхи удосконалення їхніх конструкцій: поліпшення видобувної спроможності магнітного поля в робочій міжполюсній зоні, інтенсифікація охолодження обмоток і зменшення енерговитрат, покращення технологічних умов сепарації, підвищення надійності розвантаження видобутого металу. У відповідності з цим були проведені огляд, класифікація і аналіз відомих на теперешній час технічних рішень для кожної із сформульованих задач.

В нашій країні серійно не виготовляється обладнання спеціально призначене для сепарації при вторинній переробці металів, а сепаратори, що застосовуються для цього, створені на базі модернізації залізівідокремлювачів (апаратів для захисту технологічного обладнання), неефективні і не відповідають технологічним умовам процесу вторинної переробки (інтенсивність поля, що створюється ними в робочій зоні, недостатня для якого протікання процесу сепарації).

Існуючі технологічні схеми застосування електромагнітних підвісних сепараторів і відомі конструктивні рішення задачі інтенсифікації охолодження їхніх котушок намагнічування в цілому задовольняють сучасним вимогам.

З усього різноманіття конструктивних рішень задачі поліпшення видобувної спроможності таких неспеціалізованих конструкцій (побудованих на базі залізівідокремлювачів) сепараторів для вторинної переробки металів слід особливо відзначити конструкцію, яка створена на базі двох підвісних електромагнітних залізівідокремлювачів з П-образною магнітною системою та дискового розвантажувального пристрою з кілцевим виступом (А.с. №1319906 В03С), яка дозволяє проводити двохстадійну переробку сепаруе-

мого матеріалу. Однак, її недоліками є розвантаження видобутої фракції на дві сторони від стрічки транспортеру, складність конструкції та великий лінійний габаритний розмір.

Аналогічну технологічну схему сепарації (з двома робочими зазорами) можна отримати при застосуванні більш технологічної і компактної конструкції на базі Ш-образної магнітної системи. Однак, і в цій конструкції сепаратора розвантаження видобутої фракції здійснюється у два прийомних бункера, що дозволяє провести її подальше удосконалення.

Незалежним від конструкції сепаратора важливим напрямком підвищення його техніко-економічних характеристик є оптимальне проектування (вибір геометричних та інших параметрів) відкритої Ш-образної магнітної системи, виду показаного на рис.1. При цьому загальна задача проектування електромагнітних систем підвісних сепараторів для вторинної переробки металів включає розв'язання наступних задач: розрахунок раціональної конфігурації профілю робочої області полюсних наконечників; розрахунок нагріву масивних обмоток намагнічування; розрахунок розподілу магнітних потоків; синтез електромагнітної системи підвісного сепаратора і вибір її оптимальних за прийнятим критерієм параметрів.

З урахуванням викладеного були визначені завдання дослідження.

**У другій главі** викладено методику розрахунку раціональної конфігурації профілю робочої області полюсних наконечників на базі методу магнітних модулів і методику теплового та електричного розрахунку обмоток намагнічування сепаратора, яка використовує визначені експериментально залежності питомої потужності розсіяння обмоток підвісних сепараторів від геометричних параметрів котушок при різних значеннях усталеного нагріву.

При створенні сепараторів на стадії ескізного проектування поперед всього необхідно відпрацювати конфігурацію профілю робочої області міжполюсного зазору, так як саме цим визначається конфігурація робочого поля і в кінцевому разі видобувна спроможність сепаратора за інших рівних умов.

Вихідними (що задаються з умов процесу сепарації) для такого опрацювання окрім необхідних характеристик магнітного поля, що має бути створене в робочій зоні сепаратора, є конструкція робочого органу розвантажувального пристрою, гранулометричний склад сепаруємих матеріалів, співвідношення продуктивності "вхід-вихід" сепаратора з урахуванням процентного змісту видобуваної фракції і т.і. Можливість урахування великої кількості різноманітних початкових даних, що характеризують допоміжне технологічне обладнання, технологію сепарування та сепаруємих матеріал,

дозволяє проектувати високоефективні сепаратори, які призначені для конкретного вузькоспеціального використання.

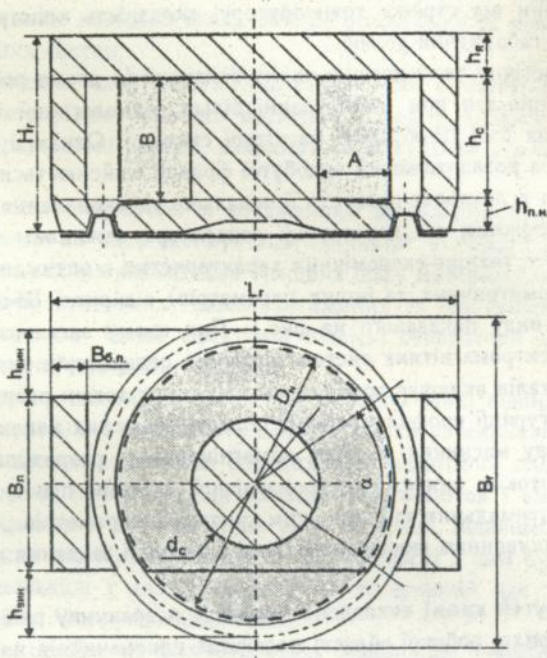


Рис. 1. Конструкція Ш-образної магнітної системи підвісного сепаратора для вторинної переробки металів

Параметрами поля, що визначають пондеромоторну силу, яка створюється в робочій зоні сепаратора, є напружність магнітного поля  $H$  та градієнт  $\text{grad}H$  на глибині видобутку  $y_0$ .

Розрахунок раціональних геометричних співвідношень полюсних наконечників магнітної системи за умов максимальної напружності магнітного поля в робочій зоні на глибині видобутку може бути проведений на підставі методу магнітних модулів. Згідно з ним, напружність магнітного поля  $H$ , яка створюється в будь-якій точці простору  $P(x, y, z)$  намагніченим модулем кінцевої довжини ( $a \times b \times h$ ) з намагніченістю  $M$ , може бути визначена як

$$\vec{H} = H_x \vec{i}_x + H_y \vec{i}_y + H_z \vec{i}_z,$$

де

$$H_x = \frac{-M}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^{i+j+k} \ln \left[ z_k + (x_i^2 + y_j^2 + z_k^2)^{1/2} \right];$$

$$H_y = \frac{-M}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^{i+j+k} \left\{ \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{x_i y_j}{z_k (x_i^2 + y_j^2 + z_k^2)^{1/2}} \right] + \right.$$

$$\left. + \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{y_j z_k}{x_i (x_i^2 + y_j^2 + z_k^2)^{1/2}} \right] \right\};$$

$$H_z = \frac{-M}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (-1)^{i+j+k} \ln \left[ x_i + (x_i^2 + y_j^2 + z_k^2)^{1/2} \right].$$

Тут  $x_1 = x$ ;  $x_2 = x - a$ ;  $y_1 = y$ ;  $y_2 = y - b$ ;  $z_1 = z$ ;  $z_2 = z - h$ .

Практичне використання методу полягає у застосуванні принципу суперпозиції, згідно з яким напруженість магнітного поля від системи магнітних модулів, яка замінює реальну магнітну систему, визначається як сума напруженостей від кожного окремого магнітного модуля. Таким чином, будь-яку систему полюсів можна зобразити у вигляді набору магнітних модулів і визначити напруженість поля, що створюється такою системою, у точці, яка нас цікавить. При цьому, основну складність у практичній реалізації принципу суперпозиції до розрахунку довільної комбінації магнітних модулів уявляють труднощі алгебраїчної ув'язки координатних систем для кожного з модулів пакету. В дисертації отримані узагальнені формули для визначення координат магнітного модуля при розрахунку міжполюсного зазору трапецієвидної форми.

Намагніченість магнітних модулів у такому розрахунку може бути визначена при використанні математичної моделі намагнічування з постійною підведеною до полюсних наконечників магнітною напругою, що дозволяє урахувати магнітні характеристики матеріалу, з якого зроблено полюсні наконечники та знайти раціональне значення товщини полюсних наконечників.

Розроблена математична модель адекватно відображує реальні процеси і може бути застосована в інженерних розрахунках при попередній компоновці профілю полюсних наконечників підвісних сепараторів.

Теплові процеси, які мають місце при роботі електромагнітних сепара-

торів, пов'язані з виділенням джоулевого тепла при протіканні електричного струму у обмотці намагнічування, а також з його тепловідводом.

Стандарт встановлює для електромагнітних сепараторів тривалий режим роботи S1, що дозволяє розглядати всю сукупність теплових процесів в електромагнітних сепараторах, як деякий усталений тепловий процес, при якому у всіх точках обмотки намагнічування температура приймає деяке усталене значення, максимально можливе для конкретних умов тепловідводу.

Для отримання, характерних для данного виду апаратів, залежностей питомої потужності розсіяння і коефіцієнта тепловіддачі котушок намагнічування від їхніх геометричних параметрів були використані результати випробування серійних і дослідних конструкцій підвісних (П) та підвісних саморозвантажувальних (ПС) сепараторів різних типорозмірів і кліматичних виконань, що були виготовлені на Луганському машинобудівному заводі ім.Пархоменка в період з вересня 1980 р. по травень 1992 р.

Викладена методика дозволяє проектувати котушки намагнічування при їхньому вертикальному та горизонтальному секціонуванні, враховуючи високу ефективність і широку застосованість такого способу інтенсифікації охолодження котушок сепараторів; при виконанні їхньої намотки в декілька паралельних гілок, що дозволяє уникнути практичних труднощів, які пов'язані з вузьким сортаментом досяжних провідникових матеріалів; при урахуванні конкретного рівня технології виготовлення масивних котушок намагнічування (коефіцієнт укладання проводу у шарі, коефіцієнт укладання шарів), завдяки чому в процесі виготовлення вдається отримати параметри обмоток намагнічування близькі до розрахункових.

**У третій главі** подано дослідження та методичку розрахунку розподілу магнітного поля у відкритому робочому міжполюсному просторі і магнітопроводі Ш-образної магнітної системи.

Завдання дослідження магнітного поля електромагнітних підвісних сепараторів зводиться до визначення картини поточкорозподілу, розробці еквівалентної схеми заміщення магнітного кола і розрахунку її елементів (магнітних провідностей повітряних ділянок і спадів магнітного потенціалу на ділянках магнітопроводу), точність яких визначає точність розрахунку магнітної системи.

Найбільш ефективними та достовірними методами дослідження плоскопаралельних магнітних полів у зазорах відкритих електромагнітних систем є експериментальні методи, результати яких можуть бути розповсюджені на будь-які інші геометрично подібні магнітні системи, що мають подібну зміну параметрів середовищ у межах області поля. Експериментальні дос-

лідження проводились на розробленій узагальненій фізичній моделі Ш-образної магнітної системи підвісного сепаратора. При цьому вимірялись напруженість магнітного поля у різних перерізах у робочій зоні, магнітні потоки в різних перерізах магнітопроводу та різниця магнітних потенціалів між характерними точками.

На підставі аналізу даних моделювання на електропровідному папері, експериментальних досліджень поточкорозподілу на фізичних моделях та натурних промислових зразках підвісних електромагнітних сепараторів, а також відомого методу ділянок була розроблена узагальнена схема заміщення Ш-образних магнітних систем підвісних сепараторів, що відображає реальну об'ємність поля і картину замкнення умовно виділених локальних магнітних потоків з урахуванням магнітного опору сталі на всіх ділянках магнітопроводу.

У силу симетрії розглядаємої Ш-образної магнітної системи відносно вертикальної осі сепаратора схема земіщення складалась з урахуванням на один робочий зазор.

Згідно з проведеними дослідженнями для багатьох практичних випадків при проектуванні слабо- та середньонасичених магнітних систем можливо застосовувати спрощену схему поточкорозподілу (рис.2,а) і відповідну до неї схему заміщення, представлену на рис.2,б, в котрій ярмо зображене однією ділянкою, а центральний, боковий полюси та полюсний наконечник центрального полюса розбиті на дві ділянки кожний.

На схемі прийняті такі позначення:

$F_B$  - магніторушійна сила котушки намагнічування;

$\Delta U_{\text{я}}$  - спад магнітного потенціалу у сталі ярма;

$\Delta U'_{\text{п1}}$  і  $\Delta U''_{\text{п1}}$  - спади магнітного потенціалу на першій і другій ділянках сталі бокового полюса, відповідно;

$\Delta U'_{\text{п2}}$  і  $\Delta U''_{\text{п2}}$  - спади магнітного потенціалу на першій і другій ділянках сталі центрального полюса, відповідно;

$\Delta U_{\text{п1}}$  - спад магнітного потенціалу у сталі полюсного наконечника бокового полюсу;

$\Delta U'_{\text{п2}}$  і  $\Delta U''_{\text{п2}}$  - спади магнітного потенціалу на першій і другій ділянках сталі полюсного наконечника центрального полюса, відповідно;

$\Lambda_{\text{с1}}$  - провідність локального потоку  $\Phi_{\text{с1}}$ , що замикається всередині обмотувального вікна між осердям центрального полюсу і боковим полюсом;

$\Lambda_{\text{с2}}$  - провідність локального потоку  $\Phi_{\text{с2}}$ , що замикається в зовнішньому просторі між полюсним наконечником центрального полюсу і боковим полюсом;

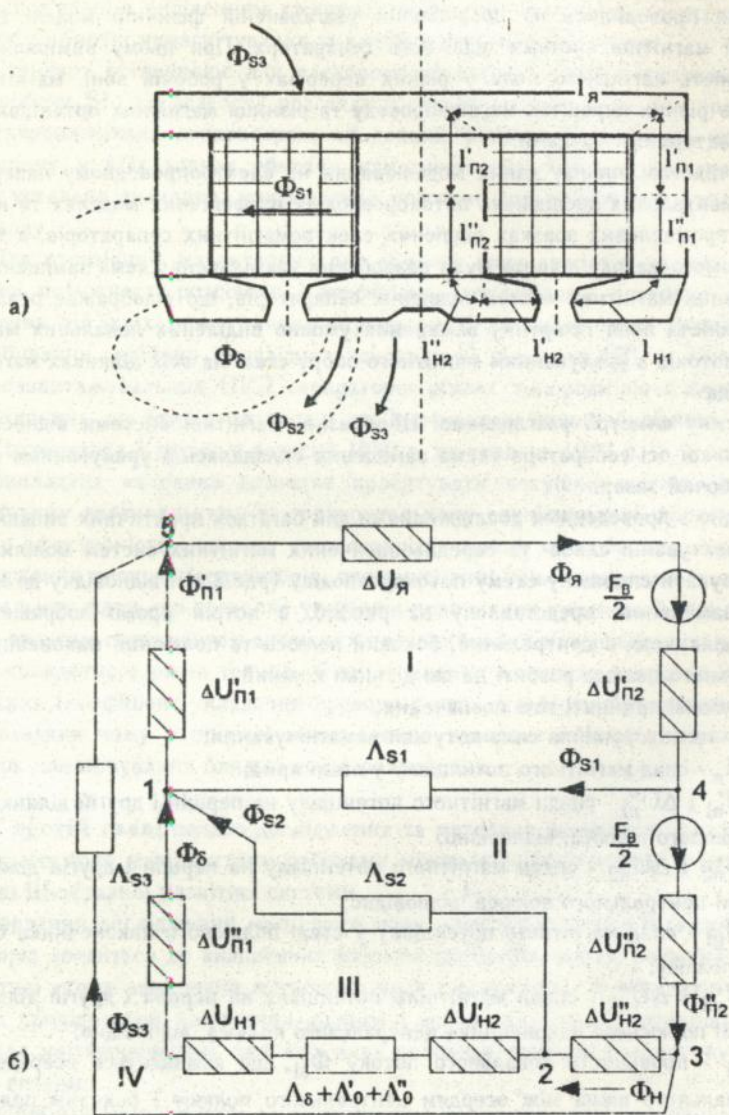


Рис.2. Зпрошені схеми: а - поточкорозподілу, б - еквівалентна заміщення ( $k=1, p=2, n=2$ )

$\Lambda_{s3}$  - провідність локального потоку  $\Phi_{s3}$ , що замикається в зовнішньому просторі між полюсним наконечником центрального полюсу і ярмом;

$\Lambda_{\delta}$  - провідність локального потоку  $\Phi_{\delta}$ , що замикається в робочій міжполюсній області між полюсними наконечниками;

$\Lambda'_0$  і  $\Lambda''_0$  - провідності локального потоку  $\Phi_{\delta}$ , що замикається між лцевими і тильними поверхнями полюсних наконечників, відповідно.

При розгляді поля робилось припущення о його плоскопаралельності в локальних областях. Так поле в обмотувальному вікні сепаратора було прийняте плоскопаралельним в вісєвому напрямку вздовж осердя центрального полюса, і для визначення магнітної провідності локального потоку  $\Phi_{s1}$ , що замикається всередині обмотувального вікна між осердям центрального полюсу і боковим полюсом, була використана відома формула для провідності потоку в вікні броньового електромагніту з поправковим коефіцієнтом, який дозволяє розширити діапазон її застосовуваності. Поле в інших локальних областях було прийняте плоскопаралельним в напрямку вздовж ширини магнітної системи і для визначення магнітних провідностей відповідних локальних потоків було використано метод підсумовування простих об'ємних фігур. Використання цих методів розрахунку провідностей дозволило перераховувати їх значення в ході проектного розрахунку при зміні конфігурації магнітопроводу.

Для розрахунку магнітного кола крива намагнічування сталі була подана у вигляді апроксимаційної аналітичної залежності й увесь розрахунок зводився до розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, які складаються звичайним способом за законами Кірхгофа.

Однак, застосування для розв'язання систем нелінійних рівнянь, які описують схеми заміщення магнітних систем електричних апаратів, відомих чисельних методів, заснованих на різноманітних ітераційних процесах, пов'язане з низкою труднощів. Крім того, деякі труднощі при реалізації цих методів пов'язані з поданням розв'язуваної системи рівнянь як декотрої функції в багатомірному просторі.

Запропоновано методику розрахунку електромагнітних систем електричних апаратів за схемами заміщення, складеними відповідно до методу ділянок, засновану на згортанні (відносно двох потоків аргументів  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$ ) системи нелінійних рівнянь, які описують схему заміщення, до системи двох нелінійних рівнянь  $G_1 = f(\Phi_1; \Phi_2)$  і  $G_2 = f(\Phi_1; \Phi_2)$  (що являють собою рівняння, записані за другим законом Кірхгофа для непогодженості МРС і спадів магнітного потенціалу по незалежних контурах) і геометричної інтерпретації цих двох рівнянь у вигляді пересічних поверхней у тримірному просторі (рис.3), рішенням яких є точка перетину "слів" (ліній пере-

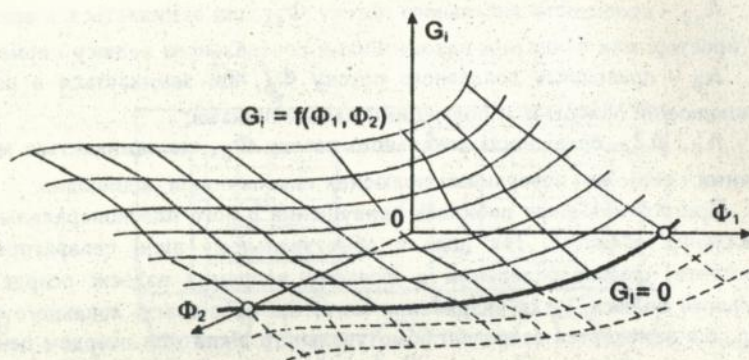


Рис.3. Геометрична інтерпретація рішення нелінійного характеристичного рівняння відносно двох потоків

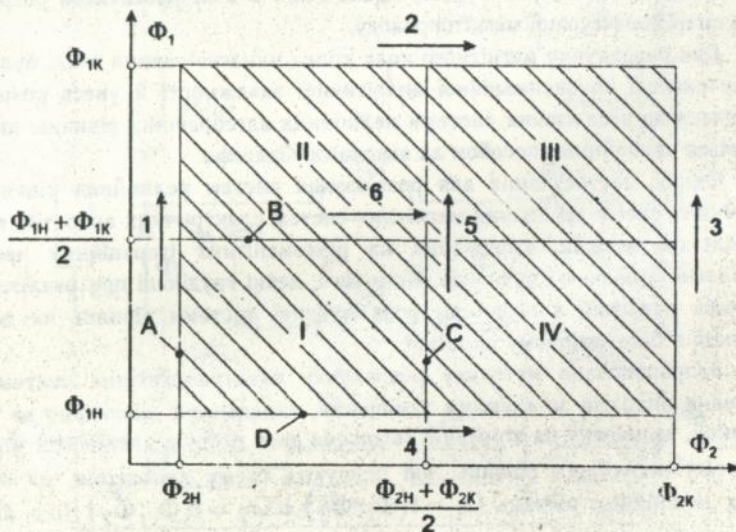


Рис.4. Розбивання області пошуку коренів на квадранти

січіння поверхней з нульовою площиною) обох характеристичних функцій  $G_1$  і  $G_2$ . Використовуючи таку геометричну інтерпретацію та припускаючи, що система рівнянь, яка описує реальну магнітну систему, на всій множині потоків-аргументів  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  має один корінь, був розроблений метод пошуку коренів, названий методом квадросекції.

Алгоритм методу квадросекції містить чотири етапи (сканування, обробка даних, аналіз даних, реконфігурація області пошуку), і полягає в розбиванні досліджуваної області потоків-аргументів на чотири квадранти з наступним пшуком і локалізацією кореня в одному з них з подальшим повторним застосуванням цього методу до виділеного квадранта і так далі до досягнення необхідної точності, визначаємої величиною інтервалу по потокам-аргументам.

У фазі сканування область потоків-аргументів досліджується в шести площинах, які расікають її на чотири підобласті (квадранта) (рис.4). В процесі сканування фіксуються значення потоків-аргументів  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  при яких характеристичні функції  $G_1$  і  $G_2$  дорівнюють нулю (точки, які належать "слідам").

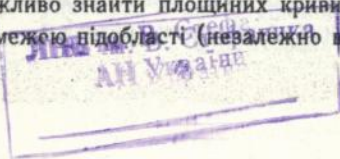
У фазі обробки даних аналізуються дані о поводженні "слідів" характеристичних функцій, отримані у фазі сканування.

Для кожної точки пересічіння напрямку сканування (проходи 1, 2, ..., 6, рис.4) зі "слідами" характеристичних функцій аналізується належність цієї точки конкретній стороні конкретного квадранту. При цьому, не розглядаючи подробиці поводження "сліда" характеристичної функції всередині квадранта можна виділити шість випадків перетину "сліда" зі сторонами квадранту (A - B, A - C, A - D, B - D, B - C, C - D).

Необхідною умовою наявності кореня всередині квадранта є перетин його простору "слідами" обох характеристичних функцій. Враховуючи цей факт і шість можливих випадків перетину "сліда" зі сторонами квадранту маємо 36 варіантів взаємного поводження "слідів" на межі підобласті. Однак, перетин простору квадранта "слідами" обох характеристичних функцій лише необхідна, але недостатня умова наявності кореня всередині квадранта.

У фазі аналізу послідовно досліджуються усі квадранти для визначення характеру перетину "слідів" зі сторонами квадранту (перевіряються додаткові умови, виконання яких дозволяє зробити висновок о наявності перетину "слідів" в підобласті).

Отримані в дисертації додаткові умови можна вважати достатніми в силу того, що вони охоплюють усі теоретично можливі випадки поводження "слідів" на межі квадранту і неможливо знайти площинних кривих, які би маючи такий характер перетину з межею підобласті (незалежно від



її розмірів) не мали хоч би однієї точки перетину всередині неї. Це дає можливість детально не розглядати характер поведіння "слідів" всередині квадранта, а обмежитися лише аналізом їх перетину з межами. І на підставі такого аналізу зробити вивод о можливості наявності перетину "слідів" всередині нього.

Таким чином, в результаті фази аналізу однозначно визначається під-область (квадрант), в якій локалізовано корень.

Далі у фазі реконфігурації виконується підготовка нових значень межових координат області пошуку  $\Phi_{1н}$ ,  $\Phi_{1к}$ ,  $\Phi_{2н}$ ,  $\Phi_{2к}$  для наступного шагу ітерації, нових значень шагів сканування по потокам-агументам і перевірка на досягнення заданої точності розрахунку. В якості нових значень межових координат приймаються координати меж квадранту, в якому локалізовано корень. При незадоволенні процес розрахунку повторюється з початку для нового квадранту.

Зазначений метод реалізовано у вигляді програми для ПЕОМ і, як показали проведені розрахунки, має такі достоїнства: процес згортання простий (не складніший, за складання самої системи рівнянь за законами Кірхгофа); у двомірному просторі потоків-аргументів, завдяки візуалізації за допомогою "слідів", легко знаходиться область коренів, яка в подальшому для всіх режимів навантаження сталі магнітопроводу залишається єдиною; процес пошуку рішення швидко збігається; можливо досягти будь-яку необхідну точність рішення, тобто застосування методу не вносить додаткової похибки в розрахунок магнітної системи і точність розрахунку визначається лише точністю визначення елементів схеми заміщення. Все це дозволяє застосовувати розробтану методику розрахунку магнітного кола не тільки як перевірку, але і на етапі проектування електромагнітної системи сепаратора.

**В четвртій главі** розглядається проектування електромагнітних систем підвісних сепараторів.

Сформульована задача синтезу електромагнітних систем підвісних сепараторів, що включає розрахунок раціональної конфігурації профілю робочої області полюсних наконечників; розрахунок обмотки намагнічування з використанням визначених експериментально залежностей питомої потужності розсіяння обмоток підвісних сепараторів від геометричних параметрів котушок при різних значеннях усталеного перегріву; розрахунок магнітопроводу й поточорозподілу у ньому і розроблено відповідний алгоритм пошуку рішення задачі синтезу електромагнітної системи підвісного сепаратора. Показано, що ця задача через багатоваріантність рішень вимагає доповнення розв'язанням оптимізаційної задачі вибору найкращого варіанта рішення за декотрим критерієм.

Відповідно до існуючих рекомендацій щодо врахування виробничих факторів у якості основних критеріїв оптимізації електромагнітних шківів були прийняті маса ( $P_{Fe}$ ,  $P_{Cu}$ ) і вартість ( $C_{Fe}$ ,  $C_{Cu}$ ) активних матеріалів, а також електрична потужність  $P_3$ . Показано, що найбільш придатним методом розв'язання задачі вибору найкращого варіанта за кожним з цих критеріїв (яка характеризується як несувора однокритеріальна оптимізаційна задача) з урахуванням багатомірності функцій цілі, невідомості властивостей функцій цілі і обмежень, а також необхідності знаходити рішення одразу для декількох функцій цілі, є метод послідовного перебору.

Розроблено методику багатокритеріальної оптимізації Ш-образних електромагнітних систем підвісних сепараторів, яка дозволяє здійснювати пошук їхніх раціональних параметрів незалежно від кількості та властивостей критеріїв оптимізації. В результаті реалізації у програмі для ПЕОМ розробленого алгоритма й розв'язання означеної задачі синтезу було встановлено, що для більшості випадків забезпечення мінімальної, що задається за умов-процесу сепарації, відстані виносу вилученої фракції  $h_{ввн}$  від краю полюсного наконечника (рис.1) призводить до додаткового збільшення (більше необхідної для розміщення обмотки намагнічування) відстані між полюсами магнітної системи. Це в цілому знижує техніко-економічні показники сепараторів, що проектуються, за рахунок непродуктивного збільшення лінійних (вздовж напрямку руху сепаруемого матеріалу) розмірів магнітопроводу і пов'язаними з цим додатковими потоками розсіювання та втратами у сталі магнітопроводу.

Для усунення цих недоліків була запропанована, захищена авторським свідоцтвом, конструкція підвісного електромагнітного сепаратора для вторинної переробки металів с Ш-образною магнітною системою і дисковим розвантажувальним пристроєм, в якій вісь оберту робочого органу розвантажувального пристрою (кювети) зсунута від вісі магнітної системи сепаратора на відстань  $\Delta$  в напрямку перпендикулярному к напрямку руху сепаруемого матеріалу (рис.5).

Введення ексцентрисітету обумовлює появу зони проносу видобутих тіл, замість однієї з зон розвантаження (в напрямку протилежному ексцентрисітету) і таким чином, дозволяє здійснювати розвантаження видобутої фракції в один прийомний бункер. А також, при забезпеченні аналогічній (технологічно необхідній) мінімальної відстані виносу вилучених тіл  $h_{ввн}$  у зоні розвантаження, дозволяє зменшити діаметр робочого органу розвантажувального пристрою і розміри магнітопроводу сепаратора.

**Підсумкові висновки та основні результати.** В дисертаційній роботі на основі проведених досліджень викладено науково обгрунтована ме-

тодика розрахунку й проектування високоефективних і економічних електромагнітних систем підвісних сепараторів для вторинної переробки металів.

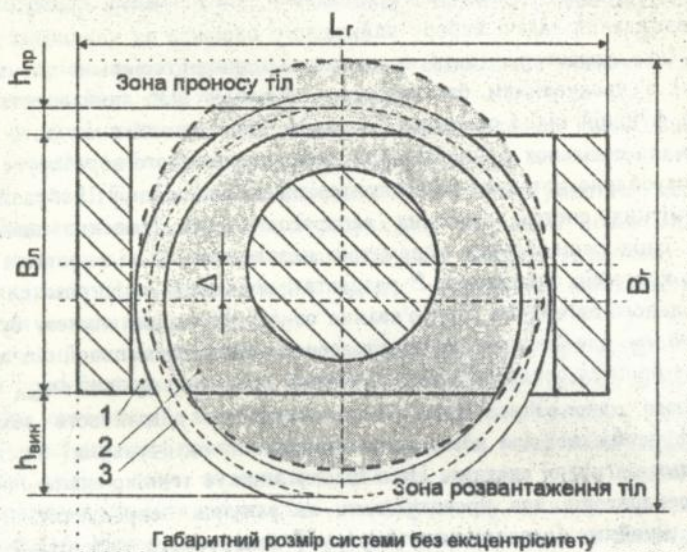


Рис.5. Удосконалена конструкція підвісного сепаратора для вторинної переробки металів

- 1 - ШІ-образний магнітопровід;
- 2 - обмотка намагнічування;
- 3 - профіль розвантажувальної кювети

Основні висновки та результати, що впливають з наукового дослідження, полягають у тому, що:

1. При проектуванні магнітних сепараторів вирішуються наступні задачі, що визначають основні шляхи удосконалення їхніх конструкцій: покращення видобувної спроможності в робочій зоні, інтенсифікація охолодження обмоток і зменшення енерговитрат, покращення технологічних умов сепарації, підвищення надійності розвантаження видобутих тіл. Запропоновано 7 захищених авторськими свідоцтвами конструктивних рішень, які відповідають зазначеним напрямкам.

Найважливішим, незалежним від конструкції сепаратора, напрямком підвищення його техніко-економічних показників є оптимальне проектування його магнітної системи, на основі розв'язання задачі синтезу, що

включає розрахунок раціональної конфігурації профілю робочої області полюсних наконечників; розрахунок масивних обмоток намагнічування; розрахунок магнітопроводу та розподілу магнітних потоків, та вибір оптимального за прийнятним критерієм рішення.

2. Запропоновано і розроблено методику розрахунку раціональної конфігурації профілю робочої області полюсних наконечників з застосуванням методу магнітних модулів й принципа суперпозиції, з визначенням намагніченості модулів при постійній підведеній до полюсних наконечників магнітній напрузі;

3. Розроблено методику теплового та електричного розрахунку обмотки намагнічування сепаратору з використанням визначених експериментально залежностей питомої потужності розсіяння від геометричних параметрів котушок при різних значеннях усталеного перегріву, яка дозволяє проводити проектування масивних котушок намагнічування при їхньому вертикальному та горизонтальному секціонуванні і виконанні намотки в декілька паралельних гілок, а також при урахуванні способу намотки проводу та рівню технології їх виготовлення.

4. На основі аналізу результатів досліджень поточкорозподілу у відкритих Ш-образних магнітних системах (фізичних моделях і промислових зразках електромагнітних сепараторів), та методу ділянок розроблено узагальнену схему заміщення для розрахунку магнітних систем розглядаемого класу з урахуванням магнітного опору сталі на всіх ділянках магнітопроводу.

5. Запропоновано і розроблено метод розрахунку магнітних систем електричних апаратів за схемами заміщення, що складені відповідно до методу ділянок, який заснований на згортанні системи нелінійних рівнянь, що описують схему заміщення, до системи двох нелінійних рівнянь і геометричної інтерпретації цих рівнянь у вигляді поверхней, які перетинаються в тримірному просторі. Метод дозволяє з будь-якою точністю і достатньо просто знайти корені систем нелінійних рівнянь, які зводяться до двох рівнянь.

6. Розроблено і реалізовано у програмі для OEM методику багатокриптеріальної оптимізації електромагнітних систем підвісних сепараторів, яка дозволяє проводити пошук їхніх раціональних параметрів.

7. Теоретичні та прикладні результати дисертаційної роботи були використані при розробці й проектуванні електромагнітних систем підвісних сепараторів для вторинної переробки металів, а також в Державному проектно-конструкторському інституті збагачувального устаткування і Східноукраїнському державному університеті.

**Положення дисертації відображені в таких основних публікаціях:**

1. Загирняк М.В., Усатюк В.М. Магнитное оборудование для сепарации шлаков и вторичных металлов. - М.: Ин-т "Черметинформация", 1991. - 34 с. - (Сер. Обогащение руд. Вып.6).
2. Загирняк М.В., Усатюк В.М. Анализ результатов тепловых испытаний и расчет намагничивающих катушек электромагнитных сепараторов // Электротехника. - 1994. - № 1. - С. 54-58.
3. Загирняк М.В., Усатюк В.М. Алгоритм численного расчета схем замещения магнитных цепей // Изв.вузов. Электромеханика. - 1991. - №9. - С. 55-57.
4. Загирняк М.В., Усатюк В.М. Метод численного расчета магнитных систем электрических аппаратов по схемам замещения // Изв.вузов. Электромеханика. - 1994. - № 4-5. - С. 48-59.
5. Zagirnyak M.V., Usatyuk V.M. Method of magnetic systems numerical calculation by equivalent circuit // Proceedings of XIII-th Symposium "Electromagnetic phenomena in nonlinear circuits". - Poznan, 1994. - P. 101-106
6. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А., Усатюк В.М. Исследование электромагнитных подвесных железоотделителей с арочными полюсами // Конструирование и пр-во трансп. машин: Респ.межвед.науч.-техн.сб. - К.: ИСИО, 1994. - Вып. 24. - С. 47-55.
7. А.с. 1651968 СССР, МКИ В 03 С 1/16. Подвесной электромагнитный железоотделитель / М.В.Загирняк, В.М. Усатюк и др. (СССР). - 3 с.: ил.
8. А.с. 1687294 СССР, МКИ В 03 С 1/16. Подвесной электромагнитный железоотделитель / М.В.Загирняк, В.М.Усатюк и др. (СССР). - 3 с.: ил.
9. А.с. 1692653 СССР, МКИ В 03 С 1/16. Электромагнитный железоотделитель / М.В.Загирняк, В.М.Усатюк и др. (СССР). - 4 с.: ил.
10. А.с. 1710132 СССР, МКИ В 03 С 1/08. Электромагнитная система подвесного железоотделителя / М.В.Загирняк, В.М.Усатюк и др. (СССР). - 3 с.: ил.
11. А.с. 1801593 СССР, МКИ В 03 С 1/16. Подвесной электромагнитный сепаратор / М.В.Загирняк, В.М.Усатюк и др. (СССР). - 2 с.: ил.
12. А.с. 1834076 СССР, МКИ В 03 С 1/16. Железоотделитель электромагнитный подвесной / М.В.Загирняк, В.М.Усатюк и др. (СССР). - 4 с.: ил.

**Особистий внесок.** Основні результати дисертації одержані особисто автором. Усі публікації виконано дисертантом в співавторстві з науковим керівником дисертаційної роботи. В роботі [1] дисертантові належить класифікація технічних рішень, що удосконалюють конструкції підвісних сепараторів; у роботах [3-5] участь в розробці математичних моделей методу, створення алгоритмів і програм; в 6-ти роботах, включно роботи [2,6] - участь у розрахунках, експериментах, аналізі й обробці результатів, написанні; з 9 авторських свідоцтв, в роботі [11] - ідея винаходу і головна визначальна ознака, у решті характерні визначальні ознаки.

*Handwritten signature*

436996

## А Б С Т

Usatyuk V.M. Research and development of electromagnetic suspended separators for secondary processing of metals.

The thesis for a Candidate competition in Engineering on the speciality 05.09.06 - electrical apparatus, Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1996.

14 scientific works and 9 autor's certificates are defended. They include the problem solution of the design (calculation methods of main parameters and characteristics) electromagnetic systems of suspended separators for secondary metals processing. There proposed some improvement design of highly effective and economical suspended magnetic separators for secondary metals processing. The information on their industrial introduction is given.

## А Н Н О Т А Ц И Я

Усатюк В.М. Исследование и разработка электромагнитных систем подвесных сепараторов для вторичной переработки металлов.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.06 - электрические аппараты, Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 1996.

Защищается 14 научных работ и 9 авторских свидетельств, которые содержат решение задачи проектирования (методы расчета главных параметров и характеристик) магнитных систем подвесных сепараторов для вторичной переработки металлов. Предложены усовершенствованные конструкции высокоэффективных и экономичных подвесных сепараторов для вторичной переработки металлов. Приводятся данные о их промышленном внедрении.

Ключові слова:

ПІДВІСНИЙ МАГНІТНИЙ СЕПАРАТОР, ВТОРИННА ПЕРЕРОВКА МЕТАЛІВ, РОЗРАХУНКИ МАГНІТНИХ ПОЛІВ І КІЛ, ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ.

---

Підп. до друку 13.05.96 р. Формат 60x84 1/16. Друк. ар. 1,0

Тираж 100 прим.      Заказ 238

СУДУ, 348034, Луганськ, кв. Молодіжний, 20 А

---