

Обґрунтовано, що вибір структури поліградієнтних середовищ є одним з найважливіших етапів у процесі розробки нових конструкцій магнітних сепараторів. Показано, що задача вибору поліградієнтного середовища в робочому органі сепаратора повинна вирішуватися через процедури структурного, а в подальшому і параметричного синтезу. Виконано генетичний синтез внутрішньої структури поліградієнтного середовища. Підтверджено достовірність результатів дослідження

Ключові слова: магнітний сепаратор, поліградієнтне середовище, синтез, генетичний оператор, породжуючи структура

Обосновано, что выбор структуры полиградиентных сред является одним из важнейших этапов в процессе разработки новых конструкций магнитных сепараторов. Показано, что задача выбора полиградиентной среды в рабочем органе сепаратора должна решаться через процедуры структурного, а в дальнейшем и параметрического синтеза. Выполнен генетический синтез внутренней структуры полиградиентной среды. Подтверждена достоверность результатов исследования

Ключевые слова: магнитный сепаратор, полиградиентная среда, синтез, генетический оператор, порождающая структура

УДК 621.318

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.47785

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СТРУКТУРО- ОБРАЗОВАНИЯ ПОЛИГРАДИЕНТНЫХ СРЕД

И. А. Шведчикова

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: ishved@i.ua

И. А. Луценко

Доктор технических наук, доцент

Кафедра электронных аппаратов

Кременчугский национальный

университет им. М. Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600

E-mail: ke@kdu.edu.ua

Ю. А. Романченко

Аспирант*

E-mail: julia321123@rambler.ru

*Кафедра метрологии и приборов***

***Восточнoукраинский

национальный университет им. В. Даля

пр. Советский, 59-а, г. Северодонецк, Украина, 93400

1. Введение

Полиградиентная среда – это дискретная среда, состоящая из ферромагнитных объектов определенной геометрической формы, размещаемых в рабочих органах (фильтр-матрицах, сепарационных каналах) магнитных сепараторов. За счет ферромагнитных объектов (шаров, цилиндров, пластин, стержней и т. д.) происходит локальное усиление магнитного поля и повышение градиента его напряженности в зоне сепарации [1–5]. В фильтр-матрице осуществляется непосредственное взаимодействие полиградиентной среды с сепарируемой технологической средой, содержащей ферромагнитные или слабомагнитные включения. Магнитные сепараторы с дискретными рабочими средами получили название полиградиентных (или высокоградиентных).

Становление технологии полиградиентной (высокоградиентной) магнитной сепарации приходится на первую половину прошлого века. Первый патент на полиградиентный магнитный сепаратор матричного типа был получен Францем в 1937 г. [1]. К сожалению, присущая процессу полиградиентной сепарации сложность эвакуации задержанного материала и забивка фильтр-матриц оказались существенным тормозом на пути широкой реализации этой технологии. Несмотря на это, к настоящему времени разработаны многочис-

ленные конструктивные исполнения полиградиентных сепараторов матричного типа, расширяются области их практического применения. В частности, полиградиентные магнитные сепараторы все чаще применяются в биомедицине для сепарации наночастиц различных размеров [6, 7]. Обоснованный выбор структуры полиградиентных сред является одним из важнейших этапов в процессе разработки новых конструкций магнитных сепараторов.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В работе [8] рассмотрена полиградиентная среда с феррозаполнителем из стальных шариков и проведен расчет магнитного поля в пространстве между контактирующими ферромагнитными шарами с учетом эффекта насыщения. В [9] предложена конструкция матрицы сепаратора с составными стержнями и выполнено моделирование элемента матрицы. В публикации [10] затронуты вопросы параметрического синтеза стержневых матриц, выполнено моделирование магнитной системы методом конечных элементов. В то же время в указанных работах отсутствует обоснование выбора геометрии полиградиентных сред.

В [11] проанализированы основные факторы, определяющие формирование структуры силового поля фильтр-матриц полиградиентных сепараторов. Отмечено, что одним из этих факторов является форма элементов фильтра. Однако исследование влияния формы ограничилось рассмотрением стержневых матриц двух типов: из параллельных круговых цилиндров (рис. 1, *а*) и со стержнями, формирующими геометрию типа «зуб-впадина» (рис. 1, *б*). В работе [11] на основе расчетов, проведенных для одиночных элементов, показано, что стержни со сложной геометрией позволяют существенно повысить абсолютные значения магнитных сил поля.

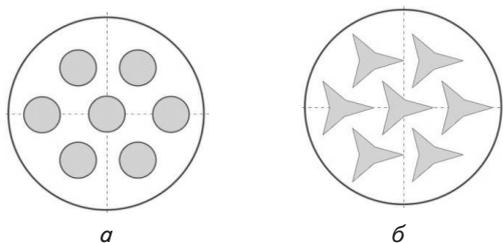


Рис. 1. Сепарационный канал с ферромагнитными стержнями в виде: *а* – круговых цилиндров; *б* – стержней сложной геометрии типа «зуб-впадина»

Классификация гетерогенных структур, к которым отнесены и полиградиентные среды магнитных сепараторов, предложена в [12]. Она основана, в частности, на учете некоторых структурных особенностей полиградиентных сред, например, геометрических и физических параметров компонентов, масштабов включений и их агрегатного состояния.

Анализ литературных источников показал, что вопрос особенностей структурообразования полиградиентных сред остается открытым и требует дальнейших исследований.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является синтез внутренней структуры полиградиентных сред магнитных сепараторов с использованием методологических инструментов структурно-системного подхода.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- синтез конечного множества структурных вариантов полиградиентных сред;
- проверка достоверности результатов синтеза.

4. Генетические принципы структурообразования полиградиентных сред магнитных сепараторов

Задача выбора полиградиентной среды в рабочем органе сепаратора должна решаться через процедуры структурного, а в дальнейшем с учетом свойств среды и параметрического синтеза. Генетические принципы синтеза, результаты которого мы наблюдаем в живой природе и в технике, универсальны [13, 14]. Это указывает на возможность их применения к задачам синтеза внутренней структуры полиградиентных сред.

Исходя из положений генетической теории структурной организации электромагнитных систем [13], полиградиентные магнитные сепараторы относятся к классу совмещенных систем, в которых структурно объединены такие структурные элементы, как электромагнитная система и рабочий орган (фильтр-матрица), имеющий свою внутреннюю структуру. Статус полиградиентных сепараторов – это подкласс (подсемейство) в классе (семействе) магнитных сепараторов [15, 16].

Ферромагнитные твердые тела, как порождающие элементы внутренней структуры полиградиентных сред, представляют собой элементарные моноструктуры различной геометрической формы (рис. 2). С точки зрения генетической концепции такие элементарные моноструктуры представляют собой родительские хромосомы.

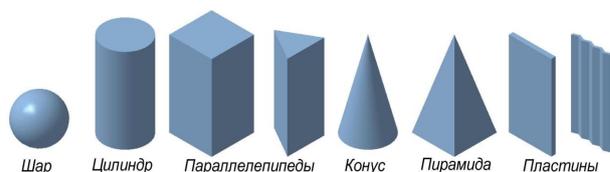


Рис. 2. Примеры ферромагнитных тел – порождающих элементов внутренней структуры полиградиентных сред

Основу алгоритмов генетического синтеза образуют генетические операторы синтеза [17–19], в частности, генетические операторы скрещивания, репликации, мутации и пространственной инверсии. При синтезе внутренней структуры полиградиентных сред эти операторы характеризуются следующими особенностями:

1. Генетический оператор скрещивания f_C моделирует пространственное совмещение двух или более структур.
2. Генетический оператор репликации f_R (с коэффициентом репликации $k_R=2, 3, \dots$) отвечает за изменение количественного состава основных элементарных компонентов генетической структуры.
3. Генетический оператор мутации f_M моделирует процессы, связанные с изменением геометрических размеров и пространственной формы элементов структуры.
4. Генетический оператор пространственной инверсии f_{SI} отвечает за изменение порядка пространственного размещения элементов электромеханической структуры.

Правила размещения элементарных моноструктур в пространстве подчиняются принципам симметрии и изомерии. Если симметрия отвечает за порядок (ритм, периодичность), то изомерия определяет допустимые варианты пространственных форм реализации этого порядка (при неизменном количестве элементов).

На рис. 3–6 представлены структурные варианты полиградиентных сред, которые можно рассматривать как результат действия генетических операторов синтеза:

- репликации элементарных моноструктур определенной геометрии (рис. 3, *а–в*; 4, *а, б*; 5, *а*);
- совместного применения операторов репликации и мутации (рис. 4, *б*; 5, *б*);
- скрещивания (гибридные структуры на рис. 5).

Генетический синтез внутренней структуры полиградиентных сред обладает следующими преимуществами [20, 21]:

- обеспечивает направленный характер и полноту синтеза структур при условии заданной целевой функции поиска;
- обеспечивает возможность автоматизации трудоемких процедур генерации и визуализации результатов синтеза;
- определяет стратегию прогнозирования новых структурных вариантов полиградиентных сред.

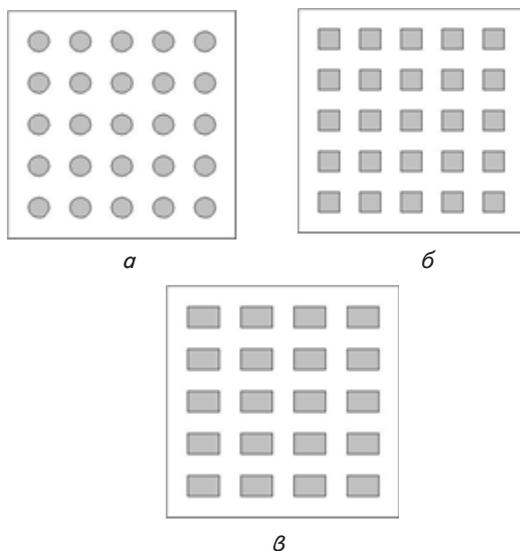


Рис. 3. Стержневые полиградиентные среды со стержнями: а – круглого сечения; б – квадратного сечения; в – прямоугольного сечения

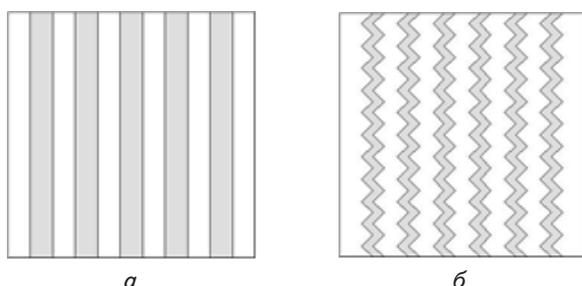


Рис. 4. Пластинчатые полиградиентные среды: а – с гладкими пластинами; б – с зигзагообразными пластинами

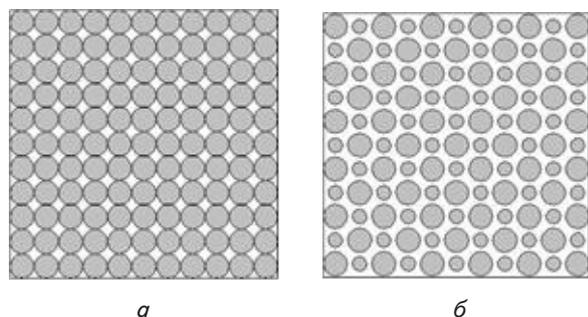


Рис. 5. Шарообразные полиградиентные среды: а – однокомпонентная среда; б – двухкомпонентная среда

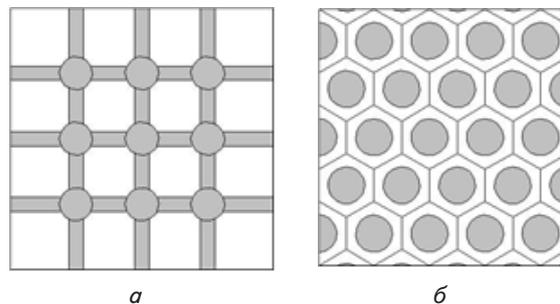


Рис. 6. Решетчатые полиградиентные среды: а – двухкомпонентная среда с прямоугольной решеткой; б – двухкомпонентная среда с сотовой решеткой

5. Синтез структурных вариантов полиградиентных сред

Практическая реализация процедуры структурного (генетического) синтеза предусматривает определение функции цели F_S для получения множества возможных вариантов решения (S_1, S_2, \dots, S_i) . Исходя из анализа известных проектов, достигнутого технического уровня и технических требований, в качестве целевой функции поиска F_S примем следующие существенные признаки:

1. На данном этапе исследований ограничиваемся рассмотрением полиградиентных магнитных сепараторов поступательного движения базового вида ПЛ 2.2х. Составляющие генетического кода ПЛ 2.2х определяются по геометрии и топологии активной поверхности, образованной полюсными наконечниками полюсов устройств [16]: геометрический класс активной поверхности – плоский (ПЛ), топологический класс активной поверхности – продольно ориентированная (х-ориентация) двухсторонняя разомкнутая поверхность с краями (2.2 х).

2. Форма сепарационного канала для размещения полиградиентной среды – прямоугольная.

3. Элементарная порождающая моноструктура S_0 полиградиентной среды – пластина в форме равнобедренного треугольника, привязанная к прямоугольной декартовой системе координат так, как показано на рис. 7.

4. Задача синтеза ограничивается результатами генерации структур при коэффициентах репликации $k_{R0x}=2, k_{R0y}=4, k_{R0z}=3$ по координатным осям $0x, 0y$ и $0z$ соответственно.

5. Генетический оператор мутации f_M отвечает за изменение формы элементарной пластины из равнобедренного треугольника в прямоугольный.

6. На данном этапе поиска исключаем из рассмотрения полиградиентные структуры более высоких уровней сложности, в частности, гибридные и совмещенные.

7. Результаты синтеза должны включать информацию о генетически допустимом разнообразии полиградиентных сред, в т. ч. и о потенциально возможных, еще отсутствующих на данное время технической эволюции.

8. Полученная информация должна обеспечивать гарантированную полноту поиска.

Таким образом, целевая функция поиска принимает вид

$$F_S = \{V_{var}, R_s, S_0, L_g, Q_\Sigma\}, \tag{1}$$

где V_{var} – требование по виду пространственного движения рабочего органа магнитного сепаратора; R_s – форма сепарационного канала; S_0 – элементарная порождающая структура (треугольная пластина); L_g – ограничения на применение генетических операторов синтеза; Q_x – требование полноты поиска.

Генетический оператор репликации f_R является основным источником структурного разнообразия полиградиентных сред. Сам термин «полиградиентный» указывает на наличие множества локальных зон высокого градиента. Генерация возможных пространственных композиций полиградиентных сред осуществляется путем последовательного применения по отношению к порождающей структуре S_0 (рис. 7) генетического оператора репликации f_R по координатным осям $0x$, $0y$ и $0z$ соответственно. В результате генерации, при заданных ограничениях, наложенных на коэффициент репликации k_R , получаем конечное множество пространственных композиций S_X (по x -координате, рис. 8, а), S_Y (по y -координате, рис. 8, б), S_Z (по z -координате, рис. 8, в), синтезированных на основе S_0 .

$$f_R(S_0) \rightarrow (S_X, S_Y, S_Z). \quad (2)$$

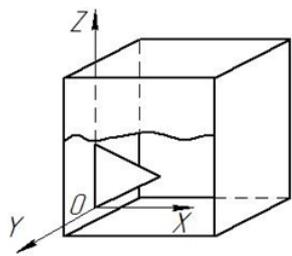


Рис. 7. Элементарная порождающая моноструктура S_0 синтезируемой полиградиентной среды

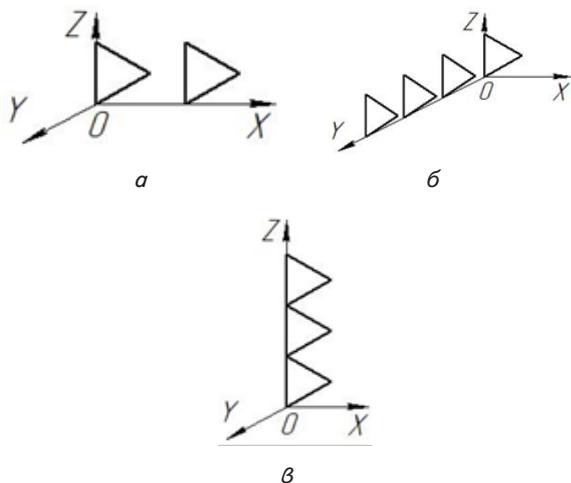


Рис. 8. Реплицированные пространственные композиции: а – S_X ($k_{R0x}=2$); б – S_Y ($k_{R0y}=4$); в – S_Z ($k_{R0z}=3$)

Пространственное совмещение реплицированных структур S_X , S_Y , S_Z позволяет получить следующий результат (рис. 9)

$$f_C(S_X, S_Y, S_Z) \rightarrow S_{XYZ}. \quad (3)$$

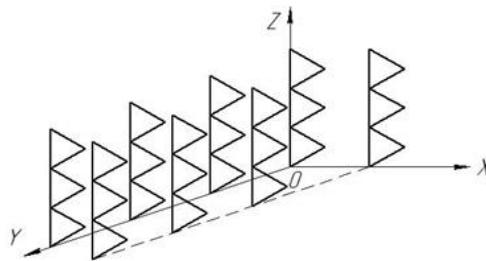


Рис. 9. Реплицированная совмещенная структура S_{XYZ}

Композиция S_{XYZ} определяет структурное наполнение популяции реплицированных структур, отличительным признаком которых является наличие пластинчатой полиградиентной среды с односторонней зубчатостью и с расположением выступов одной пластины напротив гладкой поверхности другой.

Для реплицированной структуры S_{XYZ} могут быть получены инверсные структуры S^*_{XYZ} путем изменение порядка пространственного размещения элементов (треугольных выступов), в частности, путем изменения знаков пространственных координат x , z выступов одного из рядов пластин на противоположные: $x \rightarrow -x$, $z \rightarrow -z$

$$f_{SI}(S_{XYZ}) \rightarrow S^*_{XYZ}. \quad (4)$$

Конечное множество пространственных компоновок или изомеров реплицированной инверсной структуры S^*_{XYZ} имеет вид

$$S^*_{XYZ} = (S^{X*}_{XYZ}, S^{Y*}_{XYZ}, S^{Z*}_{XYZ}, S^{XY*}_{XYZ}, S^{YZ*}_{XYZ}, S^{XZ*}_{XYZ}, S^{XYZ*}_{XYZ}), \quad (5)$$

где S^{X*}_{XYZ} , S^{Y*}_{XYZ} , S^{Z*}_{XYZ} – синтезированные инверсные структуры, особенностью которых является смещение одного ряда пластин с треугольными выступами вдоль осей $0x$, $0y$ и $0z$ соответственно; S^{XY*}_{XYZ} , S^{YZ*}_{XYZ} , S^{XZ*}_{XYZ} – структуры, образованные в результате попарного совмещения структур S^{X*}_{XYZ} , S^{Y*}_{XYZ} и S^{Z*}_{XYZ} ; S^{XYZ*}_{XYZ} – структура, образованная в результате одновременного совмещения структур S^{X*}_{XYZ} , S^{Y*}_{XYZ} , S^{Z*}_{XYZ} .

Таким образом, общее число пространственных композиций, синтезированных на основе реплицированной инверсной структуры S^*_{XYZ} , составляет 7. Некоторые изомерные композиции представлены на рис. 10 (для наглядности показаны только две пластины рассматриваемой полиградиентной среды).

Порождающая структура S^*_{XYZm} представляет собой результат действия оператора f_M мутации по отношению к структуре S^*_{XYZ} , заключающийся в изменении геометрической формы треугольной порождающей пластины

$$f_M(S^*_{XYZ}) \rightarrow S^*_{XYZm}. \quad (6)$$

Мутация может быть полной (изменение формы наблюдается у всех элементов структуры, рис. 11, а) или частичной (только отдельные элементы структуры изменяют свою форму, рис. 11, б). Это значит, что из каждой инверсной реплицированной структуры (формула (5)) могут быть получены две новые структуры, отличающиеся характером мутации (полная или частичная). Тогда общее количество структурных вариантов, синтезированных на основе порождающей структуры S^*_{XYZm} , составит 14.

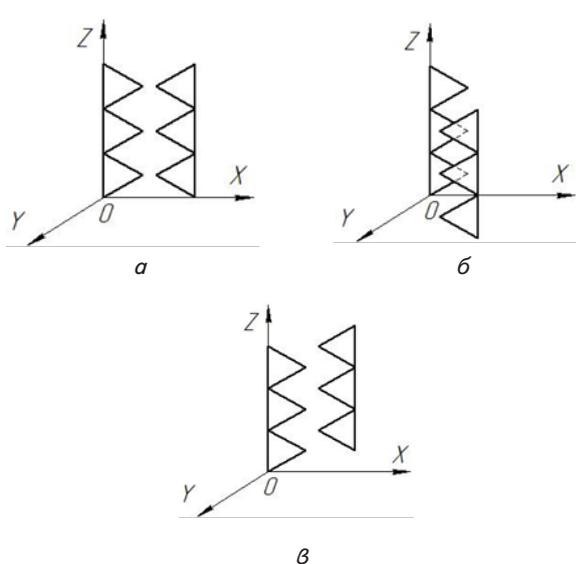


Рис. 10. Примеры изомерных композиций реплицированной инверсной структуры S^*_{XYZ} : а – структура S^{X*}_{XYZ} ; б – структура S^{Y*}_{XYZ} ; в – структура S^{Z*}_{XYZ}

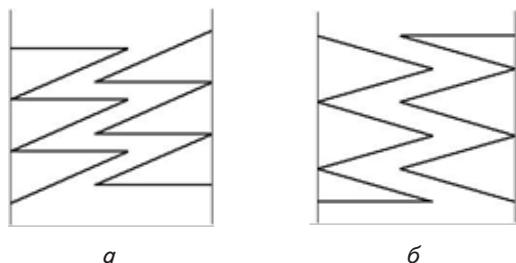


Рис. 11. Порождающая структура S^*_{XYZm} : а – полная мутация; б – частичная мутация

Результаты синтеза составляют исходную основу для выбора и разработки оригинальных технических решений. В качестве примера на рис. 12 показан вариант конструктивного решения электромагнитного сепаратора, синтезированного на основе порождающей структуры S^*_{XYZm} и предназначенного для извлечения слабомагнитных или мелкодисперсных ферромагнитных частиц из разных сыпучих немагнитных материалов [22].

Синтезированный вариант электромагнитного сепаратора обладает рядом преимуществ по сравнению с известными аналогами, в том числе:

- более равномерным распределением локальных зон высокой интенсивности и неоднородности магнитного поля в рабочем объеме матрицы (кассеты) сепаратора;
- более высокой эффективностью извлечения слабомагнитных и мелких ферромагнитных включений крупностью менее 1 мм.

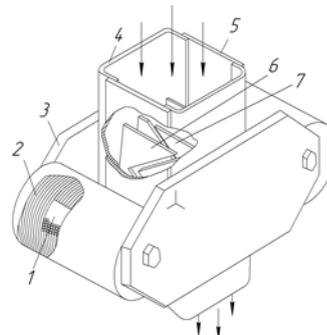


Рис. 12. Конструкция электромагнитного сепаратора, разработанного по результатам генетического синтеза (порождающая структура S^{Z*}_{XYZm}): 1 – сердечник, 2 – намагничивающая катушка, 3 – полюс, 4, 5 – стенки кассеты, 6, 7 – ферромагнитные пластины

6. Выводы

1. С использованием генетических операторов синтеза получено 22 структурных варианта полиградиентной среды, элементарной порождающей моноструктурой которой является пластина в форме треугольника.
2. Достоверность результатов генетического синтеза обоснована путем сопоставления результатов синтеза с результатами патентно-информационных исследований, в ходе которых выявлены структурные представители не менее шести синтезированных структур, в т. ч. представители структур S^*_{XYZ} , S^{Z*}_{XYZm} .
3. Полученные результаты ограничены рассмотрением только пластинчатой разновидности элементарной порождающей моноструктуры в форме треугольника. Направлением дальнейших исследований является обобщение полученных результатов и на другие геометрические формы порождающих структур, что позволит перейти к разработке обобщенной генетической модели структурообразования полиградиентных сред.

Литература

1. Загирняк, М. В. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования [Текст]: монография / М. В. Загирняк, Ю. А. Бранспиз, И. А. Шведчикова; под ред. М. В. Загирняка. – К.: Техніка, 2011. – 224 с.
2. Obertuffer, I. A. Magnetic separation: a review of principles, devices and applications [Text] / I. A. Obertuffer // IEEE Transactions On Magnetics. – 1974. – Vol. 10, Issue 2. – P. 223–238. doi: 10.1109/tmag.1974.1058315
3. Svoboda, J. Magnetic Methods for the Treatment of minerals [Text] / J. Svoboda. – Elsevier, 1987. – 692 p.
4. Unkelbach, K. H. Magnetic separators mode of operation and applicability for the separation of materials [Text] / K. H. Unkelbach. – Köln: KHD Humboldt Wedag AG, 1990. – 87 p.
5. Zagirnyak, M. Magnetic Separators [Text] / M. Zagirnyak // Proceedings of the seventeenth International Electrotechnical and Computer science Conference ERK. – Portorož, 2008. – P. 7–8.
6. Загирняк, М. В. Сепарация наночастиц по фракциям с использованием магнитной системы Фарадея [Текст] / М. В. Загирняк, Е. Е. Волконанин // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 30–34.

7. Moeser, G. D. Hatton High-Gradient Magnetic Separation of Coated Magnetic Nanoparticles [Text] / K. A. Roach, W. H. Green, T. Alan // American Institute of Chemical Engineers. – 2004. – Vol. 50. – P. 2835–2848.
8. Тагунов, П. Е. Определение силовых характеристик полиградиентной шариковой среды в магнитном поле [Текст] / П. Е. Тагунов, Е. Я. Тагунов // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. – 2012. – № 2. – С. 117–121.
9. Кондратенко, И. П. Электротехническая система с составными стержнями для высокоградиентной магнитной сепарации [Текст] / И. П. Кондратенко, А. В. Некрасов, Е. Е. Волканин // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 2. – С. 38–41.
10. Волканин, Е. Е. Определение баланса сил, действующих на наночастицу в электротехнической системе магнитной сепарации [Текст] / Е. Е. Волканин, А. В. Некрасов, А. П. Оксанич и др. // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 2. – С. 28–31.
11. Толмачев С. Т. Некоторые вопросы полиградиентной магнитной сепарации [Текст] / С. Т. Толмачев, С. Л. Бондаревский // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип. 1 (17). – С. 31–36.
12. Толмачев, С. Т. Классификация гетерогенных структур и условие их двоякопериодичности [Текст] / С. Т. Толмачев, С. Л. Бондаревский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 5, № 5 (65). – С. 24–28. – Режим доступа: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/18108/15853>
13. Шинкаренко, В. Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем [Текст] / В. Ф. Шинкаренко. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
14. Кузнецов, Ю. Н. Генетический подход к созданию сложных технических систем [Текст] / Ю. Н. Кузнецов, В. Ф. Шинкаренко // Технологічні комплекси. – 2012. – № 1, 2 (5.6). – С. 21–29.
15. Шведчикова, И. А. Классификация полиградиентных магнитных сепараторов [Текст] / И. А. Шведчикова, Ю. А. Романченко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2014. – № 19 (1062). – С. 64–76.
16. Шведчикова, И. А. Структурно-системный анализ полиградиентных магнитных сепараторов [Текст] / И. А. Шведчикова, Ю. А. Романченко // Праці Таврійського державного агротехнічного університету. – 2015. – Вип. 15, Т. 2. – С. 117–125.
17. Shinkarenko, V. F. Structural-Systematic Approach in Magnetic Separators Design [Text] / V. F. Shinkarenko, M. V. Zagirnyak, I. A. Shvedchikova // Studies in Computational Intelligence. – 2011. – Vol. 327. – P. 201–217. doi: 10.1007/978-3-642-16225-1_11
18. Shinkarenko, V. F. Methods for using intertype homology for synthesizing new structural versions of magnetic separators [Text] / V. F. Shinkarenko, M. V. Zagirnyak, I. A. Shvedchikova // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 81, Issue 9. – P. 504–508. doi: 10.3103/s1068371210090105
19. Загирняк, М. В. Генетический синтез структур магнитных сепараторов [Текст] / М. В. Загирняк, И. А. Шведчикова // Техническая электродинамика. – 2010. – № 4. – С. 43–47.
20. Zagirnyak, M. Forming a genetic record of cylindrical magnetic separator structures [Text] / M. Zagirnyak, I. Shvedchikova, D. Miljavec // Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review). – 2011. – Vol. 3. – P. 220–223.
21. Zagirnyak, M. Automation design of multi-unit electromechanical structures of magnetic separators [Text] / M. Zagirnyak, I. Shvedchikova, S. Tkach // Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review). – 2014. – Vol. 12. – P. 292–295.
22. Заявка на Патент України на корисну модель u201504324 МКІЗ В 03 С 1/00. Електромагнітний сепаратор [Текст] / Шведчикова І. О., Романченко Ю. А. – заявл. 05.05.2015.