

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОДВЕСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЖЕЛЕЗОТДЕЛИТЕЛЯ С НАБОРНЫМИ ПОЛЮСАМИ И ПОЛЮСНЫМИ НАКОНЕЧНИКАМИ

Математическое моделирование трехмерного магнитного поля подвесных электромагнитных железоотделителей, используемых в промышленности для сепарации ферромагнитных включений из сыпучих материалов, транспортируемых ленточными конвейерами, представляет для разработчиков железоотделителей сложную задачу, так как связано с принятием значительных упрощающих задачу допущений, при которых трехмерное магнитное поле железоотделителя заменяется плоскопараллельной моделью. Магнитное поле железоотделителя в межполюсном зазоре и под полюсными наконечниками имеет резкую неоднородность. Моделирование такого поля с применением программных пакетов конечно-элементного анализа (например, ANSYS) требует дополнительного подтверждения надежности результатов математического моделирования экспериментальными данными, полученными при физическом макетировании железоотделителей.

В статье приводится описание испытательного стенда и методики исследования трехмерного магнитного поля подвесного электромагнитного железоотделителя путем измерения составляющих вектора магнитной индукции миллитесламетром исполнения ТПУ, снабженного измерительным зондом с преобразователем Холла. На основе обработки экспериментальных данных в пакете Excel выполнена визуализация картин пространственного распределения модуля и составляющих вектора магнитной индукции железоотделителя. Результаты исследований трехмерного магнитного поля макетного образца подвесного электромагнитного железоотделителя, полученные на испытательном стенде, сопоставлены с результатами численного расчета плоскопараллельного магнитного поля в комплексе программ ELCUT 6.0 (профессиональная версия).

**Ключевые слова:** физическое макетирование, испытательный стенд, подвесной электромагнитный железоотделитель, межполюсный зазор, полюсные наконечники, трехмерное неоднородное магнитное поле, магнитная индукция, магнитная сила.

Подвесные электромагнитные железоотделители (ЭЖ) относятся к числу наиболее распространенных и эффективных средств сепарации железосодержащих примесей из потока твердых сыпучих материалов, транспортируемых ленточными конвейерами [1–6]. Типовая конструкция магнитной системы подвесного ЭЖ имеет П-образный магнитопровод с наборными стальными полюсами, ярмом и полюсными наконечниками, секционированную обмотку, состоящую из двух последовательно соединенных

катушек, размещенных на противоположных полюсах. При прохождении постоянного тока по виткам секционированной обмотки под действием намагничивающей силы обмотки в межполюсном зазоре возникает резко неоднородное магнитное поле с постепенным выравниванием магнитной индукции в области полюсных наконечников. Если интенсивность неоднородного магнитного поля определяется намагничивающей силой обмотки, то максимум ponderomotive (магнитной) силы  $F_M$  необходимой

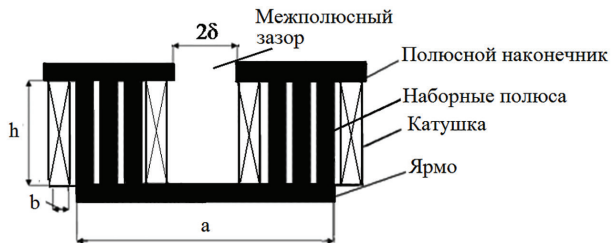


Рис. 1. Эскиз магнитной системы подвешенного электромагнитного железотделителя с П-образным магнитопроводом



Рис. 2. Внешний вид испытательного стенда для исследования трехмерного магнитного поля макетного образца подвешенного ЭЖ:

- 1 — неравномерная прямоугольная сетка на поверхности подвижной рамки;
- 2 — катушки, расположенные на разных полюсах ЭЖ;
- 3 — цифровой миллитесламетр исполнения ТПУ;
- 4 — измерительный зонд с преобразователем Холла;
- 5 — направляющие для перемещения подвижной рамки с оргстеклом на различном расстоянии от полюсных наконечников

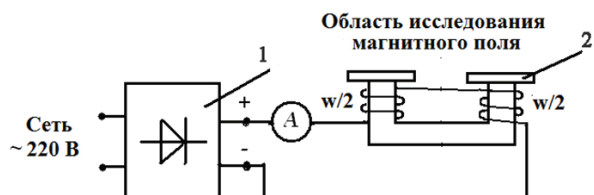


Рис. 3. Электрическая схема для проведения испытаний: 1 — выпрямитель; 2 — подвешенной ЭЖ

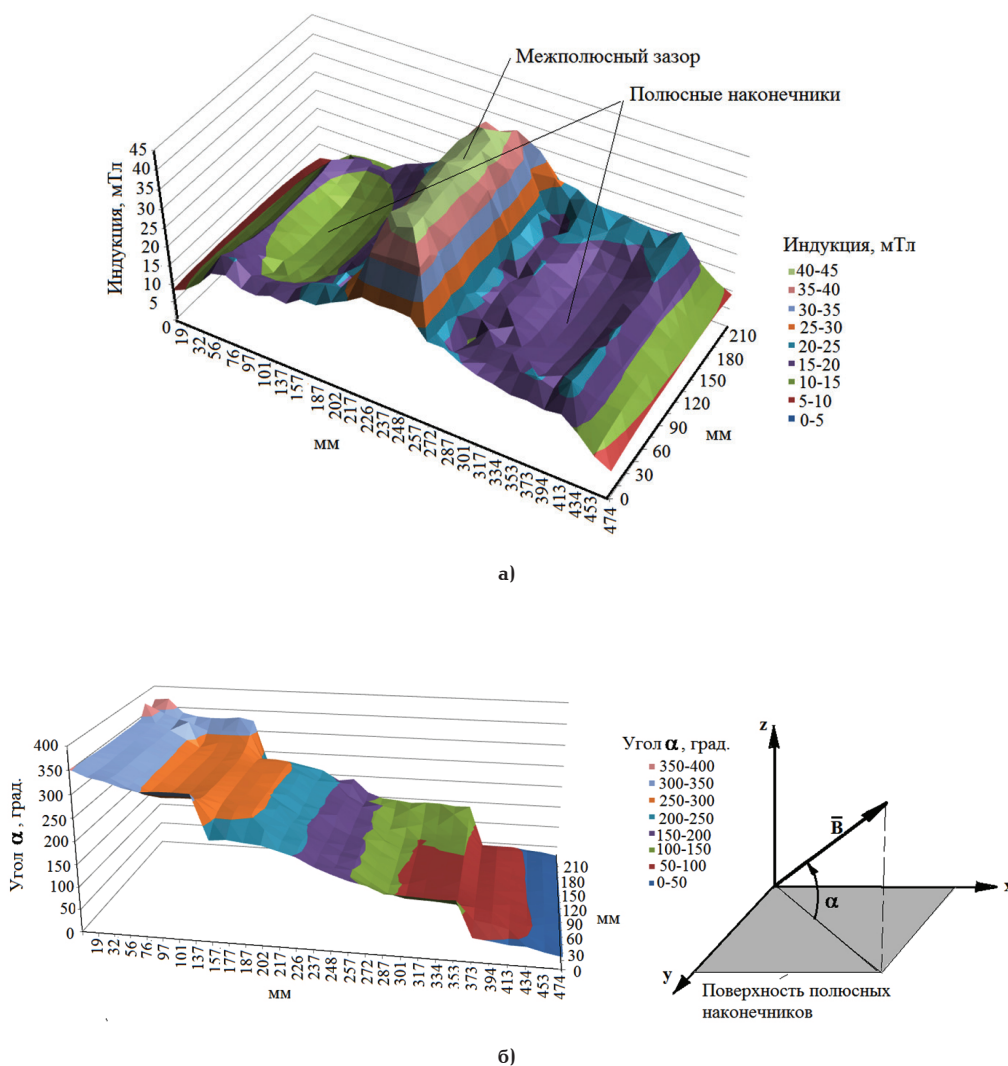


Рис. 4. Визуализация картин распределения модуля (а) и направления (б) вектора магнитной индукции в зоне сепарации ЭЖ

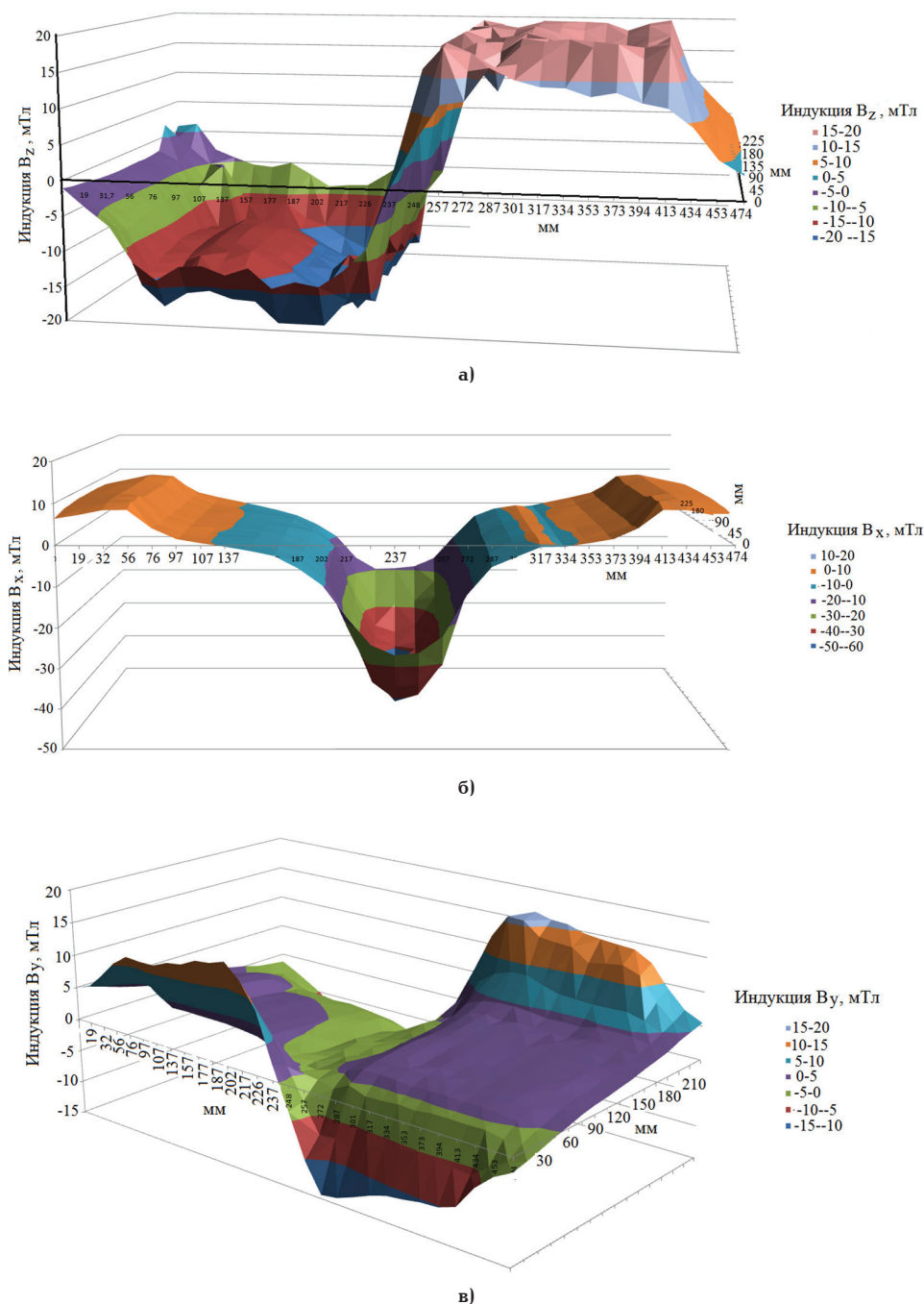


Рис. 5. Визуализация картин распределения составляющих вектора магнитной индукции в зоне сепарации: а — по оси z; б — по оси x; в — по оси y

для извлечения ферромагнитных предметов из сыпучих материалов на всей длине активной части зоны сепарации определяется градиентом изменения модуля напряженности магнитного поля  $H$  на середине межполюсного зазора.

$$F_M = H \cdot \text{grad}H. \quad (1)$$

Максимум магнитной силы не зависит от формы, размеров и природы извлекаемого тела, а характеризует только свойства магнитного поля и критерий качества разрабатываемой конструкции ЭЖ [7–11].

Исследование трехмерных магнитных полей подвесных ЭЖ в активной зоне сепарации экспериментальными и расчетными методами дает возможность уточнить их конструктивные и обо-

точные параметры магнитных систем, полученных на ранних стадиях проектирования с использованием упрощенных моделей магнитного поля. Вместе с тем оно позволяет в наглядной форме выполнить визуализацию пространственного распределения модуля и составляющих вектора магнитной индукции, пондеромоторной (магнитной) силы в зоне сепарации, установить уязвимые места электромагнитной сепарации, скорость затухания магнитного поля по мере удаления расчетной точки от плоскости полюсных наконечников.

Экспериментальная часть исследований трехмерного магнитного поля подвесного ЭЖ проводилась на макетном образце (рис. 1). Магнитная система железоотделителя имеет наборные полюса, полюсные наконечники и две последовательно соединенные катушки, размещенные на разных по-

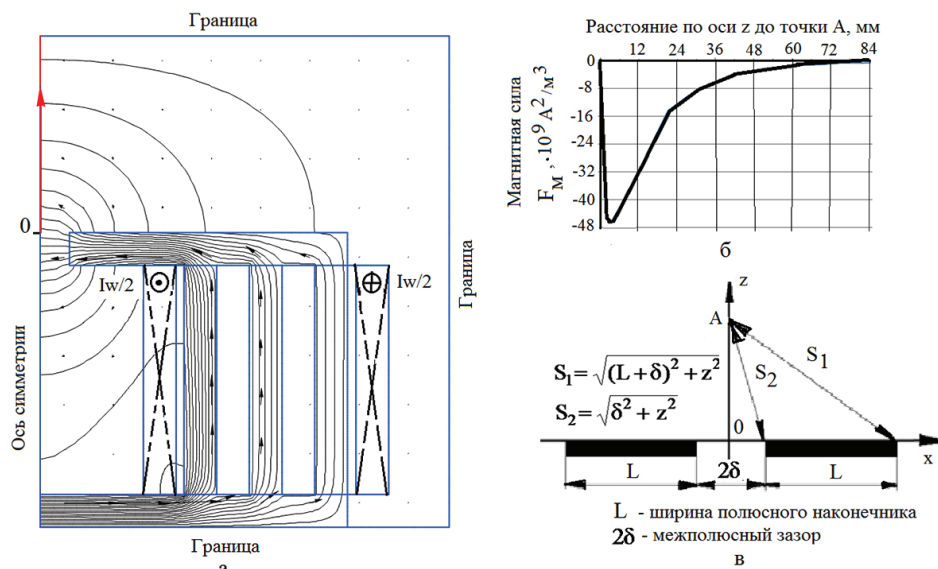


Рис. 6. Картина магнитного поля подвешенного ЭЖ (а) в комплексе программ Elcut и магнитная сила (б) на середине межполюсного зазора на различном расстоянии расчетной точки А от полюсных наконечников (в)

люсах. Магнитопровод макетного образца ЭЖ собран из прямоугольных призматических брусков горячекатаной стали марки ст. 20. Ядро сердечника имеет геометрические размеры  $376 \times 140 \times 20$  мм, шесть наборных полюсов  $20 \times 140 \times 140$  мм, два полюсных наконечника  $160 \times 140 \times 20$  мм соответственно. Зазор между наборными полюсами составляет 20 мм. После стяжки частей магнитопровода болтовыми соединениями граница активной зоны сепарации макетного образца ЭЖ представлена прямоугольником со сторонами  $376 \times 140$  мм, площадь которого охватывает полюсные наконечники и межполюсный зазор. Толщина стенок каркаса катушек равна 5 мм. Намотка катушек производится обмоточным проводом диаметром 1,16 мм марки ПЭВ-2. Полное число витков обмотки 1100. После намотки провода толщина катушки составляет 20 мм, а ее высота 130 мм.

Полюсные наконечники отстоят друг от друга на расстоянии межполюсного зазора 36 мм. Для удобства измерения составляющих вектора магнитной индукции в зоне сепарации цифровым миллитесламетром исполнения ТПУ макетный образец подвешенного ЭЖ установлен на испытательном стенде в перевернутом виде (рис. 2). Испытательный стенд снабжен немагнитной плоской рамкой с оргстеклом, которая может скользить по поверхности полюсных наконечников и перемещаться по направляющим на различном от них удалении. Рамка имеет геометрические размеры  $480 \times 225 \times 4$  мм. Площадь рамки почти 1,5 раза превосходит площадь активной зоны сепарации ЭЖ. На поверхность рамки нанесена неравномерная прямоугольная сетка, шаг которой уменьшается по мере приближения к межполюсному зазору. Сетка покрывает всю зону сепарации макетного образца подвешенного ЭЖ и содержит 480 узлов. В узлах сетки с помощью цифрового миллитесламетра исполнения ТПУ производится измерение составляющих вектора магнитной индукции.

Электрическая схема испытательного стенда показана на рис. 3. Питание обмотки макетного образца подвешенного ЭЖ производится от промышленной сети через понижающий трансформатор

и мостовую схему выпрямления. При проведении испытаний ток 2,1 А в обмотке ЭЖ фиксировался по показанию амперметра.

На рис. 4 и 5 показаны результаты обработки экспериментальных данных в пакете Excel модуля и составляющих вектора магнитной индукции в узлах сетки при расположении подвижной рамки на поверхности полюсных наконечников. Визуализация картин распределения составляющих вектора магнитной индукции в зоне сепарации ЭЖ выявила различные законы их изменения. Если в зоне межполюсного зазора ЭЖ значения модуля вектора магнитной индукции определяются значениями составляющей индукции по оси  $x$ , то по мере перемещения измерительного зонда миллитесламетра к центральным областям полюсных наконечников она быстро ослабевает до нуля. В центральных областях полюсных наконечников на значения модуля вектора магнитной индукции оказывает составляющая индукции по оси  $z$ , тогда как на середине межполюсного зазора эта составляющая отсутствует. Несмотря на увеличение значений составляющей вектора магнитной индукции по оси  $y$  в области ребер полюсных наконечников ее влияние на модуль вектора магнитной индукции в зоне сепарации является незначительным.

Результаты решения магнитоэлектронной задачи в комплексе программ Elcut [12–14] расчета плоскопараллельной модели магнитного поля подвешенного ЭЖ приведены на рис. 6. Для построения кривой магнитной силы на середине межполюсного зазора в точках А, расположенных по вертикали на разных расстояниях от плоскости полюсных наконечников, используется процедура вычисления магнитной силы по формуле (1) с помощью кубического сплайна функций, аппроксимирующей зависимость модуля напряженности магнитного поля в виде таблицы от расстояния до точки А.

На рис. 7 показан график изменения магнитной силы в зоне сепарации на поверхности полюсных наконечников и межполюсном зазоре вдоль оси симметрии магнитной системы ЭЖ, построенный на основе обработки экспериментальных данных о модуле вектора магнитной индукции (рис. 4).

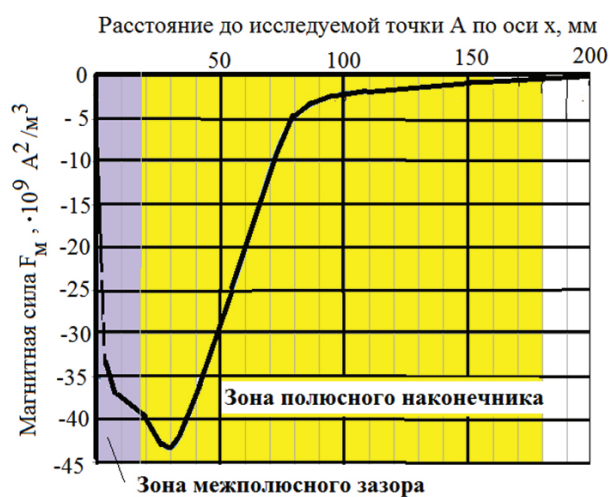


Рис. 7. Магнитная сила ЭЖ в активной зоне сепарации вблизи полюсных наконечников

### Выводы.

1. Визуализация картин составляющих вектора индукции магнитного поля в зоне сепарации макетного образца подвешенного ЭЖ выявила различные законы их распределения. На значения модуля вектора магнитной индукции существенное влияние оказывают составляющие вектора индукции вдоль координатных осей  $x$  и  $z$ .

2. Магнитная (пондеромоторная) сила подвешенного ЭЖ достигает максимума в зоне межполюсного зазора и затем резко снижается в области полюсных наконечников, что свидетельствует о неверном изначально представлении активной зоны сепарации, распространяемой на всю площадь полюсных наконечников и межполюсного зазора.

3. Допущение в расчете плоскопараллельной модели магнитного поля ЭЖ в комплексе программ Elcut (профессиональная версия) дает хорошее приближение с действительным распределением модуля вектора магнитной индукции и магнитной силы в центральной части магнитной системы железододелителя.

### Библиографический список

1. Яковенко В. В., Парсентьев О. С. Сравнительная оценка затрат на магнитную сепарацию электромагнитными железододелителями // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. 2017. № 1-2 (3). С. 115–124.
2. Загирняк М. Расчет магнитного потока в окне U-образного электромагнита // Технічна електродинаміка. 2013. № 6. С. 14–19.
3. Копытин И. И. Электромагнитный железододелитель УСС-5М2 и его энергетические характеристики // Развитие научной, творческой и инновационной деятельности молодежи: сб. материалов IV Всерос. науч.-практ. конф. Курган: Изд-во Курганский ГСХА, 2013. С. 100–103.
4. Чарыков В. И., Жумашов Г. М., Федько С. А. Подход к синтезу электромагнитных сепараторов // Вестник Курганского государственного университета. Сер. Технические науки. 2010. № 17. С. 71–73.
5. Чарыков В. И., Соколов С. А., Кульпин И. А. Электромагнитные железододелители: теоретический и практический аспекты // Аграрная наука, образование, производство: актуальные вопросы: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с между-

дунар. участием. Новосибирск: Изд-во НГАУ, 2014. Вып. 16. С. 343–346. ISBN 978-5-94477-149-0.

6. Магнитные сепараторы. Железоотделители. Каталог продукции 2017 г. URL: <http://magnetpro.ru> (дата обращения: 15.01.2018).

7. Соловьёв Л. П., Булкин В. В., Пронина М. В. [и др.]. Электромагнитный сепаратор с пульсирующим током // Экология и промышленность России. 2011. № 7. С. 4–5.

8. Тыртыгин В. Н. Проблемы и перспективы применения высокоградиентных электромагнитных сепараторов для очистки промышленного сырья // Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта ім. Я. Купалы. Серыя 6 Тэхніка. 2015. № 2. С. 85–92.

9. Gasilin V. V., Nezovibat'ko Y. N., Poklipach G. S., Shvets O. M., Taran V. S. Tereshin V. I. Electromagnetic separator of a plasma // AIP Conference Proceedings PLASMA 2005: Int. Conf. PLASMA-2005 on Res. and Applic. of Plasmas; 3rd German-Polish Conf. on Plasma Diagnostics for Fusion Applic.; 5th French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Lab. 2006. С. 439–442.

10. Высокоградиентные магнитные сепараторы и фильтры HGMS-HGMF / Metso Minerals. URL: [http://www.metso.com/ru/miningandconstruction/Mining\\_Construction\\_Russia.nsf/WebWID/WTB-120409-22576-6AF5D/\\$File/HGMF&HGMS\\_RU.pdf](http://www.metso.com/ru/miningandconstruction/Mining_Construction_Russia.nsf/WebWID/WTB-120409-22576-6AF5D/$File/HGMF&HGMS_RU.pdf) (дата доступа: 07.10.2015).

11. Загирняк М. В., Усатюк В. М., Оксанич А. П. [и др.]. Проектирование электромагнитных систем шкивных сепараторов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2015. Вип. 3. С. 9–14.

12. Татевосян А. С., Радченко А. В. Исследование нестационарного магнитного поля электромагнита с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками в пакете ELCUT // Омский научный вестник. 2016. № 6 (150). С. 86–90.

13. Радченко А. В. Исследование динамики подвешенного железододелителя как объекта управления с массивным магнитопроводом // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: сб. материалов VIII Междунар. науч.-техн. конф. Самара: Изд-во СамГТУ, 2017. С. 232–235.

14. Программа «ELCUT». Руководство пользователя. СПб.: Тор, 2012. 356 с. URL: [http://www.elcut.ru/free\\_doc\\_r.htm](http://www.elcut.ru/free_doc_r.htm) (дата обращения: 11.02.2017).

**РАДЧЕНКО Анна Викторовна**, ассистент кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 5041-5168

AuthorID (РИНЦ): 916067

**НИКИТИН Константин Иванович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 3733-8763

AuthorID (РИНЦ): 641865

**ТАТЕВОСЯН Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 5995-1778

AuthorID (РИНЦ): 166166

**ТАЖИЕВ Руслан Тулегенович**, студент гр. Э-166 энергетического института.

Адрес для переписки: mechta7102@mail.ru

### Для цитирования

Радченко А. В., Никитин К. И., Татевосян А. С., Тажиев Р. Т. Визуализация и методика исследования трехмерного магнитного поля подвешенного электромагнитного железододелителя с наборными полюсами и полюсными наконечниками // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 70–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-70-74.

Статья поступила в редакцию 19.02.2018 г.

© А. В. Радченко, К. И. Никитин, А. С. Татевосян, Р. Т. Тажиев