

УДК 621.313.17

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-31-37

**Е. Г. АНДРЕЕВА
В. С. ПЛЕХАНОВА**Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ЕГО СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С НЕЗАМКНУТОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

Статья посвящена исследованию магнитных полей и их силовых характеристик в электротехнических устройствах (ЭУ) с незамкнутой магнитной системой (магнитопроводом) различного конструктивного исполнения и функционального назначения. Цель исследования: разработка ЭУ с различным конструктивным исполнением незамкнутых магнитных систем, их математическое и имитационное моделирование с учетом магнитных свойств используемых материалов для улучшения технико-экономических и массогабаритных показателей (энергоэффективности). Методы исследования: численное решение уравнений магнитного поля методом конечных элементов и имитационное моделирование с помощью программных продуктов ANSYS и ELCUT. Результатами исследования ЭУ с незамкнутой магнитной системой различного конструктивного назначения, проводимыми в течение длительного времени, являются разработка концентраторов магнитного поля и создание гибридных магнитных систем. Вывод: разработанные ЭУ с незамкнутым магнитопроводом позволяют за счет своего конструктивного исполнения и конфигурации магнитного поля увеличивать силовые характеристики магнитного поля, пондеромоторные силы, технико-экономические и эксплуатационные свойства устройств.

Ключевые слова: электротехническое устройство, магнитная система (магнитопровод), магнитное поле, силовые характеристики магнитного поля, численное моделирование, программный продукт.

Введение. Модернизация и создание новых, современных, промышленных и используемых в быту технологий, внедрение во все сферы жизни людей новейших коммуникационных и информационных средств, развитие новых потребностей людей и их техническая реализация требует разработки, проектирования и исследования энергоэффективных, экологичных, качественных, надежных [1], имеющих не использованные ранее функциональные возможности технических устройств, в том числе и электротехнических устройств. К таким устройствам, имеющим новые функциональные возможности, можно отнести ЭУ с незамкнутым

магнитопроводом, которые по различным функциональным потребностям, качеству, энергоэффективности должны иметь соответствующие силовые параметры и характеристики электротехнических устройств: значения индукции B и напряженности H магнитного поля, пондеромоторные силы; картины магнитного поля (распределение силовых и эквипотенциальных линий магнитостатического и переменного магнитного полей), которые получают в результате электромагнитных расчетов электротехнических устройств [2, 3].

К электротехническим устройствам с незамкнутым магнитопроводом можно отнести устройства

с линейной траекторией движения и статические устройства на основе электромагнитов постоянного и переменного тока, а также постоянных магнитов [2, 4].

Численное моделирование и исследование магнитного поля и его силовых характеристик. Имитационное и математическое (численное) моделирование магнитного поля и его силовых характеристик электротехнических устройств с магнитопроводами различного конструктивного исполнения проводится с помощью двумерных (плоских или декартовых), осесимметричных, трехмерных численных полевых моделей, учитывая сложность их геометрии, на основе уравнений Максвелла [2–7]. Расчеты таких моделей проводятся с использованием проекционно-сеточных методов, а именно, метода конечных элементов (МКЭ) [8–11], реализованного в таких программных продуктах, как ANSYS [12–14] и ELCUT [15, 16] (профессиональные версии), COMSOL Multiphysics [17]. Можно использовать сети конечных элементов с большим их числом и с малым (предварительные, поверочные, учебные модели) на компьютерах средней и большой производительности.

В настоящее время большой интерес представляют мультифизические задачи, т.е. исследование связанных задач: магнитное поле – электрическое поле – тепловое поле или совместное рассмотрение разных по физическому характеру процессов как в стационарных, так и в динамических режимах работы. К ним также можно отнести и задачи междисциплинарного характера, например, «энергетика – экономика», «электротехника – экономика». Любая техническая система, в том числе и электротехническая, состоит из нескольких динамически устойчивых подсистем (компонент): электрической, электронной, магнитной, электромеханической, пневматической, термодинамической, газодинамической и т.д. Для каждой подсистемы или компоненты электротехнической системы может быть разработана своя математическая модель (ММ) определенной степени адекватности и точности моделируемому физическому процессам [4].

Особенный интерес в электроэнергетике, электромеханике, электротехнике представляют задачи типа «цепь – поле» [4], где можно использовать сочетание пакетов, например, MatLab – Comsol Multiphysics или MatLab – Ansys Multiphysics [18].

При моделировании магнитного поля электротехнических устройств с незамкнутым магнитопроводом приняты следующие допущения:

- магнитные свойства электротехнической стали модели задаются либо относительной магнитной проницаемостью $\mu = \text{const}$ (1000, 2000), либо кривой намагничивания стали, которая может быть приведена в самом программном продукте или введена пользователем-исследователем;
- относительная магнитная проницаемость воздуха и медной обмотки равна единице;
- плотность тока в сечении обмотки распределяется равномерно, ток обмотки постоянный;
- расчет магнитного поля магнитной системы с незамкнутым магнитопроводом рассматривается как задача магнитостатики;
- на границе расчетной области приняты нулевые граничные условия.

Математические модели исследуемых электротехнических задач представляют собой магнитостатические векторные модели на основе дифференциаль-

ных уравнений Максвелла для электротехнических устройств с незамкнутой магнитной системой

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

$$\text{div } \vec{B} = 0, \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (3)$$

где \vec{B} — вектор магнитной индукции (Тл); \vec{H} — вектор напряженности магнитного поля (А/м); \vec{J} — вектор плотности тока (А/м²), μ — относительная магнитная проницаемость материала, μ_0 — магнитная постоянная (Гн/м) [4].

Таким образом, силовая характеристика магнитного поля определяется как:

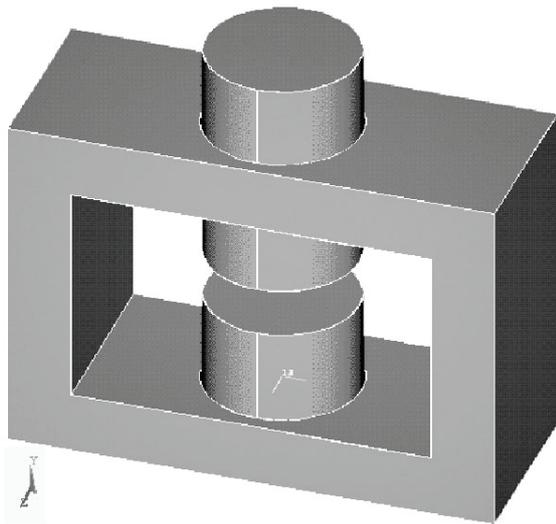
$$\vec{H} = -\text{grad} \varphi_m = \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A}, \quad (4)$$

где φ_m — скалярный магнитный потенциал [19], \vec{A} — векторный магнитный потенциал. Расчет двумерных, осесимметричных и трехмерных моделей производился с помощью численного метода конечных элементов в программных продуктах ANSYS и ELCUT. Решатель магнитостатических задач (solver) обрабатывает линейные и нелинейные двумерные и трехмерные задачи, используя математическую модель (1)–(4).

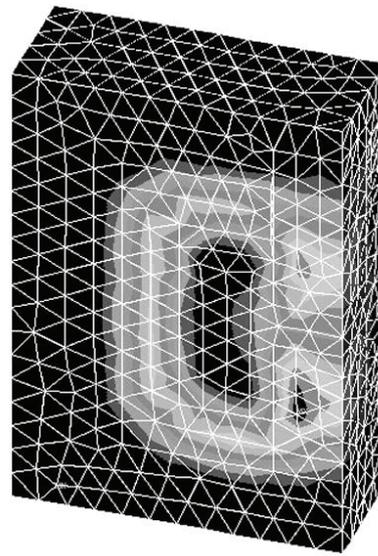
Электротехнические устройства с незамкнутым магнитопроводом. ЭУ с незамкнутым магнитопроводом — это линейные индукционные машины с жидкометаллическим рабочим телом, например, насосы [4, 20], линейные асинхронные двигатели, используемые в линейных транспортных средствах [21]. Линейные электромагнитные двигатели с незамкнутым магнитопроводом, которые используются в приводе возвратно-поступательного, ударного и вибрационного действия в молотах, прессах, насосах и компрессорах, представляют собой синхронные реактивные явнополюсные машины [4].

ЭУ с незамкнутым магнитопроводом могут иметь подвижные части, однако существуют статические устройства, т.е. ЭУ с магнитными системами открытого типа (концентратор), магнитными системами разомкнутого типа (железоотделитель) и гибридными магнитными системами (железоотделитель совместно с концентратором). Они используются в производстве, электроэнергетике и теплоэнергетике, сельском хозяйстве и сельхозпереработке, в быту, медицине, транспорте, например, для повышения октанового числа нефтепродуктов, улучшения качества нефти, экологической очистки и консервации продуктов питания и воды, в качестве электромагнитных замков, коммутирующей и релейной защиты, экологической очистки окружающей среды, в физических и медицинских приборах для повышения магнитной индукции и напряженности внешнего магнитного поля в пищевой промышленности, в рудопроизводстве и на обогатительных фабриках, в теплоэлектростанциях, на предприятиях промышленности строительных материалов, коксохимических заводах для защиты рабочих органов от поломок ферромагнитными предметами; на металлургических комбинатах в литейных цехах для очистки формовочной смеси [2, 22, 23].

Линейные электромагнитные двигатели. Распределенная математическая модель электромагнитного двигателя (ЭМД) микрокомпрессора пред-



а)



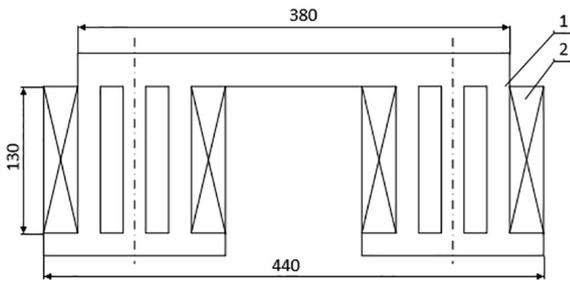
б)

```

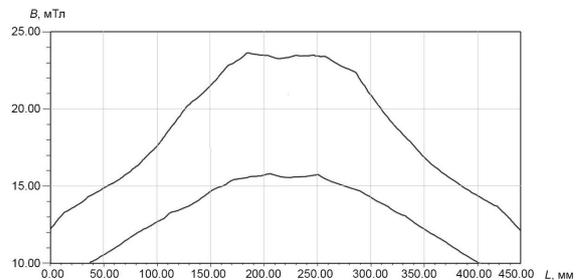
ANSYS 5.3
SEP 16 1997
16:57:24
NODAL SOLUTION
STEP=2
SUB =1
TIME=2
BSUM (AVC)
SMN = .701E-06
SMX = .025064

XV =1
YV =2
ZV =3
*DIST=.072592
*XF =-.010119
*YF =.033164
*ZF =.018151
Z-BUFFER
■ .701E-06
■ .002785
■ .00557
■ .008355
■ .01114
■ .013925
■ .016709
■ .019494
■ .022279
■ .025064
    
```

Рис. 1. Геометрия полной модели магнитопровода ЭМД (электромагнита) (а), распределение вектора напряженности магнитного поля H (б)



а)



б)

Рис. 2. Геометрическая модель (базовая) без концентраторов П-образного электромагнитного железоотделителя (а) и распределение магнитной индукции под полюсами железоотделителя (б): 1 — магнитопровод; 2 — обмотка

ставляет собой трехмерное магнитоэстатическое поле для кусочно-однородной, линейной, изотропной среды. Эскиз устройства или геометрия полной модели магнитопровода ЭМД приведен на рис. 1а. Конструктивно двигатель представляет собой электромагнит с втяжным якорем [12]. Для сокращения времени расчетов исследуется магнитное поле четверти устройства (электромагнитного двигателя, электромагнита), учитывая его симметрию.

Полученные результаты расчета для модели четверти ЭМД (рис. 1б) при соответствующих граничных условиях на плоскостях симметрии позволяют интерпретировать их как результаты расчета для полной модели устройства.

ЭУ с магнитной системой разомкнутого типа. Железоотделители можно отнести к устройствам с разомкнутым магнитопроводом. Электромагнитный железоотделитель состоит из П-образного или Ш-образного сердечника с полюсами из электротехнической или качественной конструкционной стали и обмотки из изолированного алюминиевого или медного провода, которая подключается к источнику постоянного тока. Предназначен для извлечения ферромагнитных частиц из сыпучих сред или жидкости, перемещаемых по транспортеру или трубопроводу. Используется в качестве подъемных электромагнитов. Сердечник П-образного вида

выполнен из стали марки 1045, число ампер-витков обмоток электромагнитного железоотделителя $I_w = 2600$ А. Напряжение на зажимах обмотки $U = 40$ В, ток $I = 4$ А. Основные размеры железоотделителя указаны на рис. 2а в мм.

Результаты расчета плоскопараллельной распределенной полевой модели в программном пакете ANSYS представлены на рис. 2б. Нижняя кривая индукции соответствует расстоянию от полюсов до транспортера — 100 мм, а верхняя кривая — 60 мм.

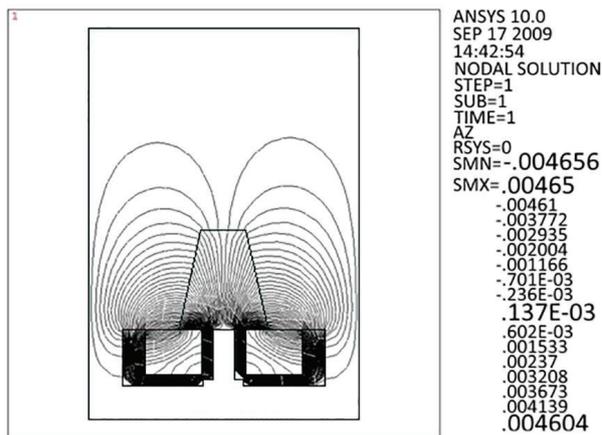
ЭУ с магнитной системой открытого типа. Магнитная система открытого типа представляет собой совокупность стального магнитопровода с обмоткой (питается постоянным или переменным током) и ферромагнитных насадок переменного поперечного сечения (рис. 3а) [22].

Результаты расчета осесимметричной полевой модели концентратора с насадкой в виде усеченного конуса приведены на рис. 3б. Такие магнитные системы позволяют концентрировать, усиливать или расширять область действия устройства.

ЭУ с гибридной магнитной системой. В работе исследуется электротехническое устройство с разомкнутым магнитопроводом или гибридной (комбинированной) магнитной системой, состоящей и П-образного железоотделителя (разомкнутая

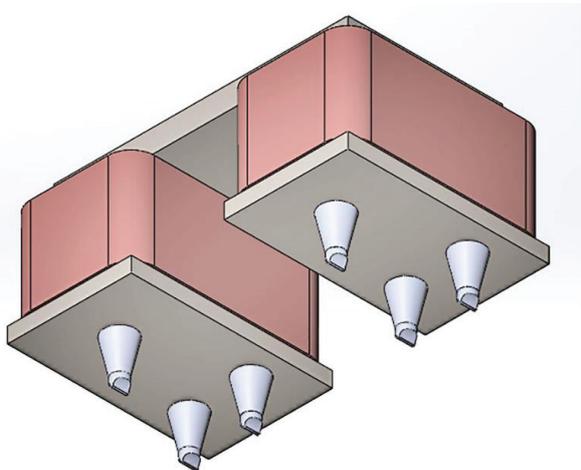


a)

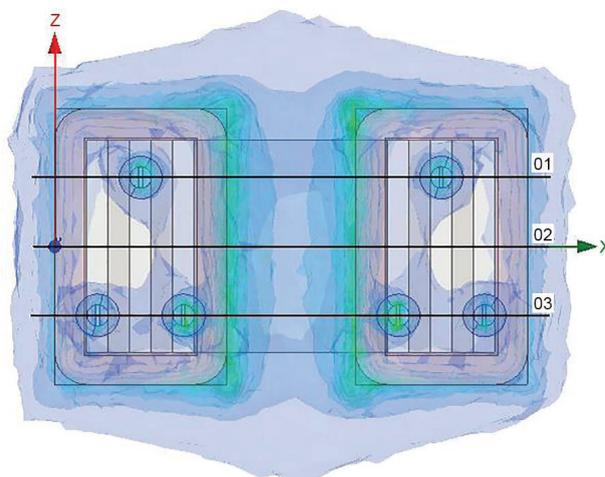


б)

Рис. 3. Концентратор с насадкой в виде усеченного конуса (а), картина магнитного поля (б)



a)



б)

Рис. 4. Трехмерная модель гибридной магнитной системы (а), картина магнитного поля (вид снизу вверх) (б)

магнитная система) и концентратора с различными насадками переменного поперечного сечения (открытая магнитная система). Рассматривается трехмерная модель П-образного железоотделителя с тремя концентрирующими насадками ножевидной формы (рис. 4а). Такие магнитные системы позволяют не только усиливать магнитное поле в межполюсном зазоре, под полюсами и на уровне транспортера с очищаемой сухой смесью, а также меняют конфигурацию магнитного поля, что приводит к увеличению пондеромоторных сил, действующих на ферромагнитные частицы, извлекаемые из очищаемого вещества, а также охватить больший объем очищаемого материала магнитным полем [24].

Проведя моделирование и расчет магнитного поля постоянного тока П-образного железоотделителя с одинаковыми габаритными размерами без концентраторов (базовая конструкция), с концентраторами различной формы и количества (рис. 4б), построив графики индукции (табл. 1), можно сделать следующие выводы:

— значение магнитной индукции, создаваемое П-образным железоотделителем на расстоянии

100 мм от полюса до транспортера на треть меньше, чем на расстоянии 60 мм до транспортера;

— наибольшее значение магнитной индукции (0,5 Тл), создаваемое П-образным железоотделителем, получено при использовании трех концентраторов на расстоянии 60 мм до транспортера. Максимальное значение магнитной индукции с использованием трех концентраторов больше, чем без них более чем в 20 раз.

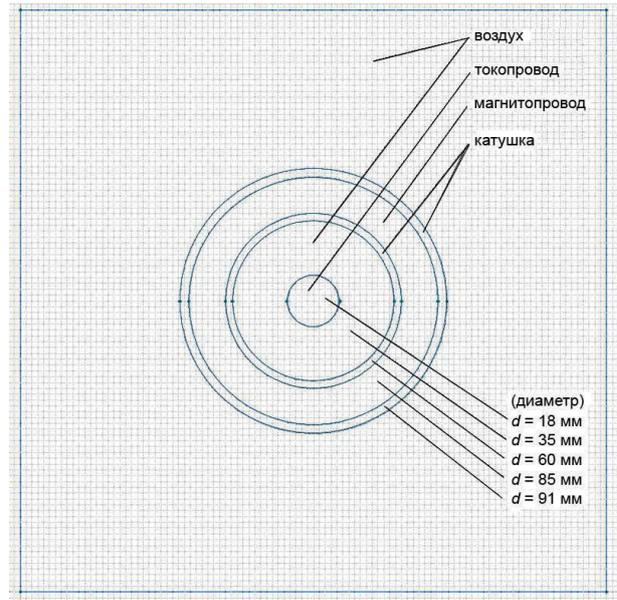
Магнитные свойства электротехнической стали магнитопроводов трансформаторов тока. Решается задача расчета магнитного поля переменных токов одновиткового трансформатора тока (ТТЭ 150/5А) (рис. 5а). Использование магнитопроводов в трансформаторе тока (ТТ) из магнитомягких электротехнических сталей, особенно аморфных, повышает их энергоэффективность, снижает потери, уменьшает габариты устройства. Численные эксперименты (расчеты) проводились на основе метода конечных элементов с помощью программного пакета ELCUT, профессиональная версия [15, 16]. В ходе численного эксперимента рассматривались модели ТТ с различными габаритными размерами магнитопровода и магнитными свойствами [25].

Результаты расчета П-образного железотделителя

Расстояние от середины полюса до транспортера	П-образный железотделитель без концентраторов (базовая конструкция)	П-образный железотделитель с одним концентратом в виде ножа	П-образный железотделитель с тремя концентраторами в виде ножа
	Наибольшее значение магнитной индукции, Тл		
60 мм	0,023	0,12	0,5
100 мм	0,016	0,018	0,02

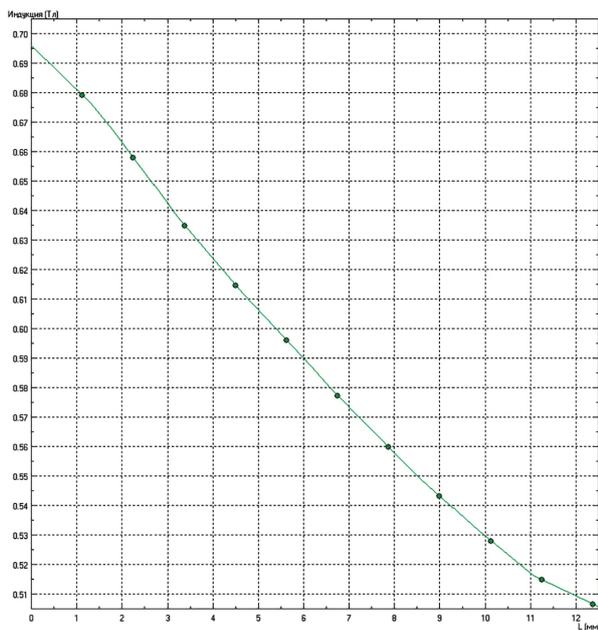


а)

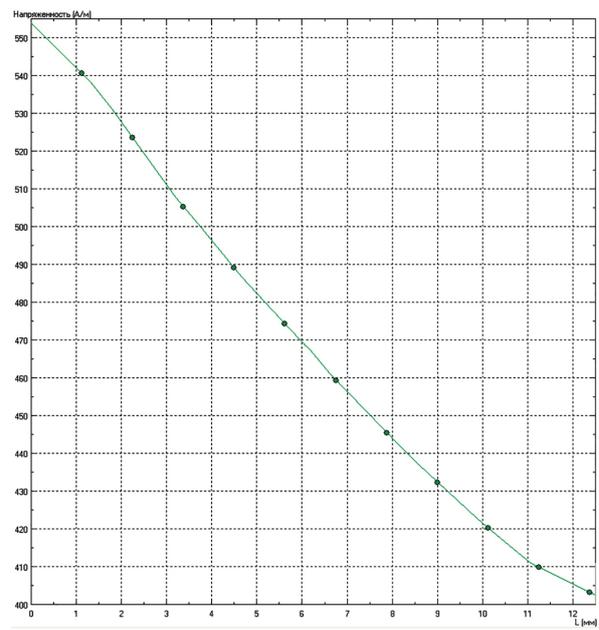


б)

Рис. 5. Трансформатор тока типа ТТЭ-150/5 А: вид сверху (а), геометрическая модель трансформатора тока (б)

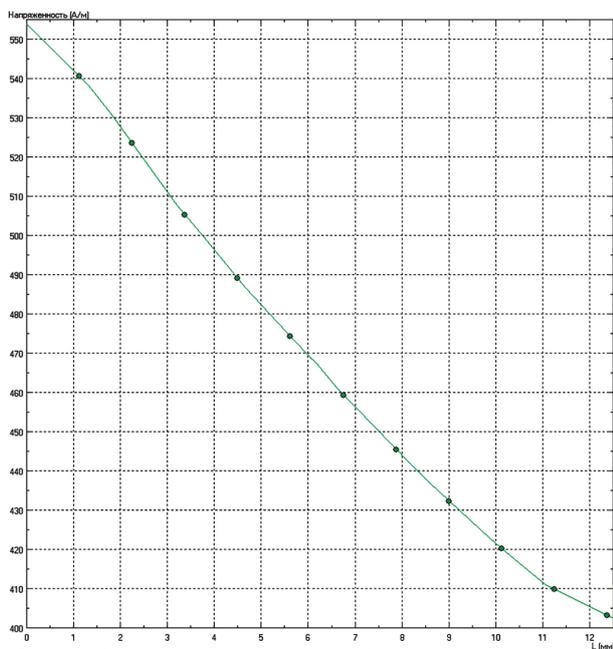


а)

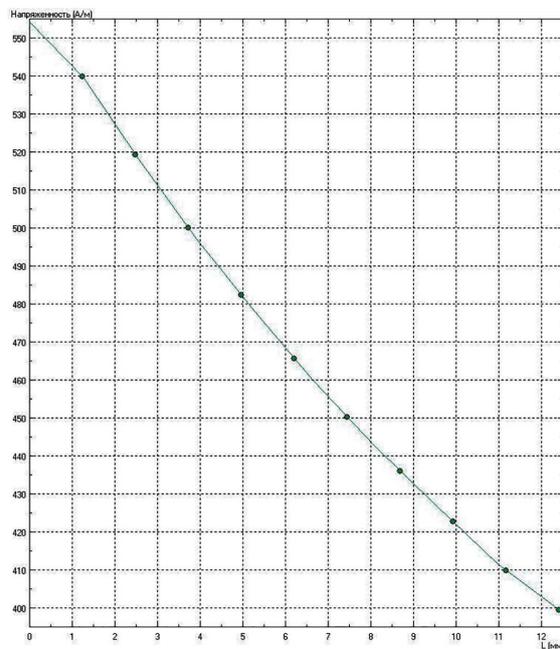


б)

Рис. 6. Векторы магнитной индукции, Тл (а) и напряженность магнитного поля, А/м (б) ТТ с параметрами: L =12 мм, $\mu=1000$



а)



б)

Рис. 7. Векторы магнитной индукции, Тл (а) и напряженности магнитного поля, А/м (б) ТТ с параметрами: $L=12$ мм, аморфная сталь магнитопровода с $\mu = 60000$

Решалось несколько задач расчета магнитного поля ТТ и характеристик поля с различными относительными магнитными проницаемостями стали и размерами магнитопровода ТТ шириной $L = 12$ мм и $L = 22$ мм (рис. 5б). В математической модели использовались амплитудные значения токов со следующими значениями: $i = -5$ А (внутренняя сторона катушки); $i = 5$ А (внешняя сторона катушки); $I = 150$ А — токопровод. Принимались следующие условия: токопровод медного исполнения с $\mu = 1$; магнитопроводы из электротехнической стали или аморфной стали.

Использование аморфного железа с магнитной проницаемостью в 60000 приводит к усилению магнитной индукции практически в 60 раз при тех же габаритах трансформатора тока, то есть магнитопровод из аморфного железа позволяет уменьшить габариты трансформатора (рис. 6а, 7а).

Однако стоит обратить внимание, что при одних и тех же габаритах магнитопровода и различных магнитных свойствах (μ) стали магнитопровода ТТ напряженность H магнитного поля практически не меняется, т.е. для исследуемых образцов $H \approx 550$ А/м (ширина магнитопровода $L = 12$ мм); $H \approx 800$ А/м (ширина магнитопровода $L = 22$ мм) А/м при $\mu = 1000, 3000, 60000$ (рис. 6б, 7б) [25], таким образом, напряженность магнитного поля зависит от габаритных размеров магнитопровода и величины тока в обмотке.

Выводы. Исследования электротехнических устройств с незамкнутой магнитной системой различного конструктивного исполнения и назначения показали, что в зависимости от геометрии и магнитных свойств материалов можно получить усиление силовых характеристик поля: магнитной индукции, напряженности магнитного поля; достаточно сильное искажение магнитного поля, что приводит к увеличению пондеромоторных (подъемных) сил; уменьшить габаритные размеры рассматриваемых и разрабатываемых в настоящем и будущем

устройств. Это, в свою очередь, улучшает энергоэффективность и эксплуатационные свойства электротехнических устройств с незамкнутым магнитопроводом в зависимости от их функционального назначения.

Библиографический список

1. Цырук С. А. Об энергосбережении и энергоэффективности // Электрика. 2009. № 6. С. 3–7.
2. Андреева Е. Г. Моделирование электротехнических устройств с незамкнутым магнитопроводом // Промышленная энергетика. 2017. № 3. С. 19–24.
3. Тамм И. Е. Основы теории электричества. 10-е изд., испр. М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 504 с. ISBN 5-02-014244-1.
4. Андреева Е. Г., Ковалев В. З. Математическое моделирование электротехнических комплексов: моногр. / под общ. ред. Ю. З. Ковалева. Омск: Изд-во ОмГТУ, 1999. 170 с. ISBN 5-8149-0017-2.
5. Плеханова В. С., Андреева Е. Г. Конструкции и методы математического моделирования магнитных систем незамкнутого типа // Актуальные проблемы современной науки: материалы IV Регион. науч.-практ. конф. Омск, 2015. С. 100–103.
6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая шк., 1978. 231 с.
7. Муромцев Д. Ю., Зырянов Ю. Т., Федюнин П. А. [и др.]. Электродинамика и распространение радиоволн. 2-е изд., доп. СПб.: Лань, 2014. 448 с. ISBN 978-5-8114-1637-0.
8. Марчук Г. И., Агошков В. И. Введение в проекционно-сеточные методы. М.: Наука, 1981. 416 с.
9. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: пер. с англ. М.: Мир, 1979. 392 с.
10. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация / пер. с англ. Б. И. Квасова. М.: Мир, 1986. 318 с.
11. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков: пер. с англ. М.: Мир, 1986. 229 с.
12. Андреева Е. Г., Шапец С. П., Колмогоров Д. В. Конечно-элементный анализ стационарных магнитных полей с

помощью программного пакета ANSYS. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 90 с.

13. Ковалев Ю. З. [и др.]. Расчет электротехнических устройств с использованием программного пакета ANSYS. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 59 с. ISBN 978-5-8149-0983-1.

14. Полезные материалы по ANSOFT Maxwell / ANSYS Maxwell на русском языке // Админ (С) 2008–2011. URL: <http://ansoft-maxwell.narod.ru/documentation.html> (дата обращения: 02.09.2015).

15. Попов А. П. [и др.]. Расчет электрических и магнитных полей методом конечных элементов с применением комплекса программ ELCUT. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 83 с. ISBN 978-5-8149-1015-8.

16. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.8. Руководство пользователя. СПб: Производственный кооператив TOP, 2010. URL: <http://www.exponenta.ru/SOFT/OTHERS/elcut/Manual.pdf> (дата обращения: 03.09.2012).

17. Введение в COMSOL Multiphysics. URL: <https://cdn.comsol.com/documentation/5.3.0.316/IntroductionToCOMSOLMltiphysics.pdf> (дата обращения: 02.09.2016).

18. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств // Технічна електродинаміка. 2015. № 2. С. 3–15.

19. Шимони К. Теоретическая электротехника: пер. с нем. М.: Мир, 1964. 773 с.

20. Вольдек А. И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1969. 274 с.

21. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей: пер. с англ. Л.: Энергоатомиздат., Ленингр. отд-ние, 1983. 180 с.

22. Demin A. V., Andreeva E. G., Semina I. A. The study of electromagnetic processes and characteristics systems with open magnetic core // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2015), May 21–23, 2015. IEEE. 2015. P. 7146974. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7146974.

23. Сумцов В. Ф. Электромагнитные железотделители. М.: Машиностроение, 1978. 174 с.

24. Andreeva Ye. G., Semina I. A., Orlov A. S. The research of three-dimensional magnetic field of the hybrid magnetic system in the ANSYS Maxwell program // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics 2016),

November 15–17, 2016). IEEE. 2016. P. 7819012. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818964.

25. Андреева Е. Г., Березовский А. В. Исследование влияния магнитных свойств материала и размеров на силовые характеристики магнитного поля трансформатора тока // Актуальные проблемы современной науки: материалы VI Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск: ОмГТУ, 2017. С. 71–74.

Благодарности

Благодарю всех своих учеников за проделанную работу по данной тематике.

С уважением, профессор Андреева Елена Григорьевна.

АНДРЕЕВА Елена Григорьевна, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника».

SPIN-код: 8247-7262

AuthorID (РИНЦ): 259826

ORCID: 0000-0002-1303-669X

AuthorID (SCOPUS): 56825338600

Researcher ID: Q-1479-2015

Адрес для переписки: lenandr02@yandex.ru

ПЛЕХАНОВА Валентина Сергеевна, аспирантка, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника».

SPIN-код: 9935-3825

AuthorID (РИНЦ): 821460

ORCID: 0000-0002-4990-9544

ResearcherID: O-7714-2015

Адрес для переписки: denisova_valya@mail.ru

Для цитирования

Андреева Е. Г., Плеханова В. С. Исследование магнитного поля, его силовых характеристик, свойств материалов электротехнических устройств с незамкнутой магнитной системой // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 31–37. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-31-37.

Статья поступила в редакцию 24.04.2018 г.

© Е. Г. Андреева, В. С. Плеханова