

А. Н. Миронов, Е. С. Дементьева, Э. В. Карпухин

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ УРОВНЕМЕРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ SDN-СЕТЕЙ

A. N. Mironov, E. S. Dementeva, E. V. Karpukhin

NUMERICAL CALCULATION OF MAGNETIC FIELDS OF MAGNETOSTRICTIVE CONVERTERS OF LEVEL USING SDN-NETWORKS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассмотрена задача расчета магнитных полей магнитоотриксционных уровнемеров (МУ), в частности МУ накладного или погружного типа, основанных на применении ультразвуковых волн (УЗВ) кручения, численными методами. Выявлены наиболее распространенные недостатки при проектировании МУ – невысокая точность и значительная сложность вычислений. Показан способ устранения этих недостатков путем применения SDN-сетей. **Материалы и методы.** Для этого предлагается получение математической модели магнитных полей МУ накладного или погружного типа на УЗВ кручения с помощью численного решения интегральных уравнений. Это обобщает решение задачи для любой расчетной области и обеспечивает минимальную погрешность аппроксимации. Также приводится способ повышения эффективности расчета за счет использования более сложных схем разностной аппроксимации. **Результаты.** На основании данных, представленных в статье, было проведено моделирование выходных параметров магнитного поля МУ накладного или погружного типа на УЗВ кручения с помощью ЭВМ, объединенных в SDN-сеть. **Выводы.** По результатам этого эксперимента сделаны выводы об увеличении точности расчетов и скорости сходимости численных методов. Показано, что подобный подход к расчету магнитных полей МУ позволяет снизить число необходимых итераций более чем в 1000 раз.

A b s t r a c t. Background. In this paper, we consider the problem of calculating the magnetic fields of magnetostrictive level gauges (MUs), in particular MUs of invoiced or submerged type on ultrasonic waves (TWS) of torsion, by numerical methods, and the most common and common complications – low tonalities and significant computational complexity. The way to eliminate these shortcomings of existing methods through the use of SDN-networks. **Materials and methods.** For this purpose, it is proposed to obtain a mathematical model of magnetic fields MU of an overhead or submerged type on a TWS of torsion by means of a numerical solution of integral equations. This generalizes the solution of the problem for any computational domain and provides a minimal approximation error. A method is also given to increase the efficiency of the calculation by using more complex schemes of difference approximation. **Results.** Based on the data presented in the article, the output parameters of the magnetic field MU of the invoiced or submerged type were simulated on the ultrasound torsion using a computer integrated into an SDN network. **Conclusions.** Based on the results of this experiment, conclusions are drawn about increasing the accuracy of calculations and the convergence rate of numerical methods. It is shown that such an approach to the calculation of magnetic fields of MU allows to reduce the number of necessary iterations by more than 1000 times.

К л ю ч е в ы е с л о в а: SDN-сети, магнитные поля, численные методы, математическое моделирование.

К e y w o r d s: SDN-networks, magnetic fields, numerical methods, mathematical modeling.

Введение

Задача расчета магнитных полей магнитоотрицательных уровней (МУ) часто возникает в различных отраслях производства при внедрении систем автоматизации с использованием магнитоотрицательных преобразователей [3–10]. Существуют известные решения [2, 5], где подобные расчеты проводятся численными методами с применением ЭВМ, но в то же время для повышения точности выходных данных и сокращения времени расчета мощности отдельных ЭВМ часто оказывается недостаточно.

Для устранения этого недостатка вычисления дальнейшего моделирования можно проводить на предприятиях, где ЭВМ объединены в вычислительные сети, в частности программно-определяемые (SDN) сети как наиболее перспективные и простые для развертывания и настройки.

Концепция SDN-сетей основательно меняет принципы функционирования сетей и их управления. В быстроменяющемся современном мире именно сети передачи данных были названы «тонким звеном», которое ограничивает рост производительности приложений по мере роста количества мобильных пользователей, масштабирования виртуальных сред, формирования кластеров для Больших Данных. В SDN-сетях задачи коммутации трафика и задачи управления строго разделены. Вся логика управления централизуется и передается **контроллеру. Коммутатор** в концепции SDN – довольно примитивное устройство, которое отвечает только за переключение пакетов на основании очень простых правил [1]. Для проведения вычислительного эксперимента может быть использована SDN-сеть, построенная на основе сети ЭВМ малой мощности. Технология SDN при этом позволит уменьшить затраты на покупку дополнительного оборудования и предельно упростить его настройку.

В данной статье будет рассмотрен способ численного расчета магнитных полей МУ с помощью метода интегральных уравнений, реализованный на основе SDN-сети, а также оценена его эффективность.

Постановка задачи

Пусть в части пространства, ограниченной замкнутой поверхностью s , магнитная проницаемость определяется функцией $\mu_i(x, y, z)$. Тогда методом введения в расчетную область вторичных источников поля можно свести среду к однородной с магнитной проницаемостью μ_e . Плотность вторичных источников магнитного поля при этом будет равна [2]

$$\rho_m = -\frac{\mu_e}{\mu_i} \overline{H}_i \operatorname{grad} \mu_i, \quad \sigma_m = 2\mu_e \lambda H_n, \quad (1)$$

где H_n – нормальная к поверхности s составляющая напряженности \overline{H}_i магнитного поля,

$$\lambda = \frac{\mu_i - \mu_e}{\mu_i + \mu_e}.$$

Далее в соответствии с известными рассуждениями [2] составляется интегральное уравнение относительно размещенных на поверхности s (рис. 1) магнитных зарядов плотностью σ_m вида

$$\sigma_m - \frac{\lambda}{2\pi} \oint_s \frac{\sigma_m \cos(\overline{r}, \overline{n})}{r^2} ds = 2\mu_e \lambda H_{0n}, \quad (2)$$

где H_{0n} – напряженность магнитного поля вторичных источников.

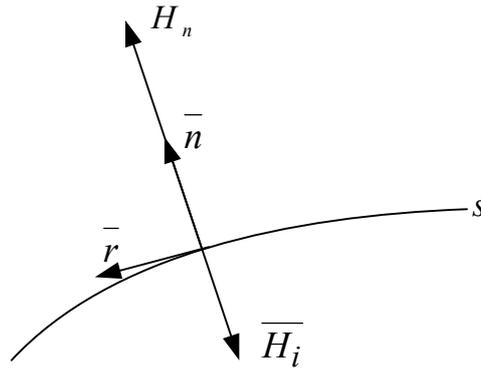


Рис. 1. Вектора напряженности магнитного поля

В рамках решаемой задачи расчета магнитного поля МУ аналитическое решение этого уравнения является нецелесообразным из-за высокой сложности, однако для этого может быть применен один из известных численных методов решения таких уравнений [2, 3], реализованный в виде программы, выполняемой в SDN-сети.

Методы испытаний

Для расчета магнитного поля, распространяемого в области V со средой, имеющей магнитную проницаемость μ_e , можно применить метод интегральных уравнений, известный своей эффективностью при решении подобных задач [3–5]. Так, в случае использования плоскопараллельного поля, подынтегральная функция в (2) примет упрощенный вид и (2) можно переписать [2]

$$\sigma_m - \frac{\lambda}{\pi} \oint_l \frac{\sigma_m \cos(\bar{r}, \bar{n})}{r} dl = \frac{\lambda}{\pi} \int_s \frac{\rho_{MB} \cos(\bar{r}, \bar{n})}{r} ds, \quad (3)$$

где l – длина контура, ограниченного поверхностью s ; ρ_{MB} – объемная плотность магнитных зарядов, определяющих внешнее поле.

Для численного решения уравнения (3) можно воспользоваться, например, методом последовательных приближений [5], являющимся наиболее эффективным при реализации на ЭВМ.

В соответствии с этим методом, предполагается построение рекуррентной последовательности. Пусть имеется интегральное уравнение вида

$$y(x) - \lambda \int_a^b K(x, t) y(t) dt = f(x). \quad (4)$$

Будем искать его решение в виде ряда по степеням параметра λ [2]:

$$y(x) = f(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \lambda^n \psi_n(x). \quad (5)$$

Подставим ряд (5) в уравнение (4) и приравняем коэффициенты при одинаковых степенях λ , получив тем самым рекуррентные соотношения для определения функций $\psi_n(x)$:

$$\begin{cases} \psi_1(x) = \int_a^b K(x, t) f(t) dt, \\ \psi_2(x) = \int_a^b K(x, t) \psi_1(t) dt = \int_a^b K_2(x, t) f(t) dt, \\ \psi_3(x) = \int_a^b K(x, t) \psi_2(t) dt = \int_a^b K_3(x, t) f(t) dt, \\ \dots \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $K_n(x, t)$ – интегрированные ядра уравнения (4), вычисляемые по формуле

$$K_n(x, t) = \int_a^b K(x, z) K_{n-1}(z, t) dz, \quad (7)$$

где $n = 2, 3, \dots$, а $K_1(x, t) \equiv K(x, t)$.

Таким образом, использование выражения (6) с коэффициентами, вычисленными по формуле (7), позволяет со сколь угодно высокой точностью получить численное решение интегрального уравнения вида (4). При реализации на ЭВМ вычисление интегралов в выражениях (6) и (7) также может осуществляться численно, например, с помощью формулы Симпсона [11].

Описанная методика была реализована в виде программ для ЭВМ, объединенных в SDN-сеть, и проведен вычислительный эксперимент расчета параметров магнитного поля МУ. Обсудим его результаты.

Рассматривая магнитное поле в пространстве объемом V , разобьем его на совокупность одинаковых кубов с длиной ребра h (рис. 2).

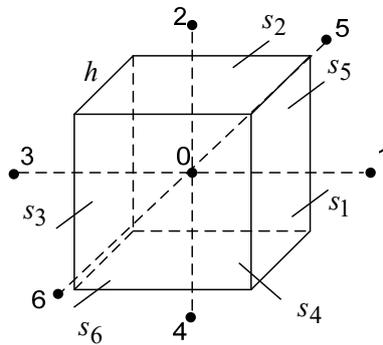


Рис. 2. Разностная аппроксимация магнитного поля в пространстве

Для формирования конечно-разностных уравнений в этом случае проинтегрируем (1) [2]:

$$\oint_s \mu \operatorname{grad} u d\bar{s} = \oint_s \mu \frac{\partial u}{\partial n} ds = -m, \quad (8)$$

где m – магнитный заряд.

Пусть магнитный заряд m размещен в центре куба (точка 0 в центре рассматриваемого куба), тогда интеграл (8) по всей поверхности куба может быть заменен суммой интегралов по всем его сторонам (поверхностям s_1, s_2, \dots, s_6 на рис. 2), которые имеют вид

$$\begin{cases} \oint_{s_1} \mu(x, y, z) \operatorname{grad}_x u ds \cong (\mu_{1\text{cp}} h^2 + \mu_{0\text{cp}} h^2) \frac{u_1 - u_0}{h} = k_1 (u_1 - u_0), \\ \oint_{s_2} \mu(x, y, z) \operatorname{grad}_y u ds \cong (\mu_{2\text{cp}} h^2 + \mu_{0\text{cp}} h^2) \frac{u_2 - u_0}{h} = k_2 (u_2 - u_0), \\ \dots \\ \oint_{s_6} \mu(x, y, z) \operatorname{grad}_z u ds \cong (\mu_{6\text{cp}} h^2 + \mu_{0\text{cp}} h^2) \frac{u_6 - u_0}{h} = k_6 (u_6 - u_0). \end{cases} \quad (9)$$

Здесь величины $\mu_{0\text{cp}}, \mu_{1\text{cp}}, \dots, \mu_{6\text{cp}}$ – средние значения функции $\mu(x, y, z)$ в соответствующих кубах.

Складывая приближенные значения интегралов в (9), приходим к конечно-разностному уравнению

$$\sum_{i=1}^6 k_i u_i - u_0 \sum_{i=1}^6 k_i = -\rho_{\text{cp}} h^3, \quad (10)$$

где $\rho_{\text{cp}} = m / h^3$.

Уравнение (10) связывает потенциал u_0 узла 0 с потенциалами соседних шести узлов. Совокупность таких уравнений образует систему, которая может быть разрешена относительно неизвестных потенциалов описанной ранее методикой.

Результаты вычислительного эксперимента и их обсуждение

В ходе вычислительного эксперимента по расчету магнитных полей МУ предложенным методом был осуществлен подсчет общего числа итераций n_2 по формуле (7) для различных начальных приближений $y_0(x)$, вычисленных в соответствии с (4)–(7) при $n_1 = 1...5$. Полученная зависимость общего числа итераций n_2 от числа слагаемых n_1 начального приближения имеет вид, показанный на рис. 3.

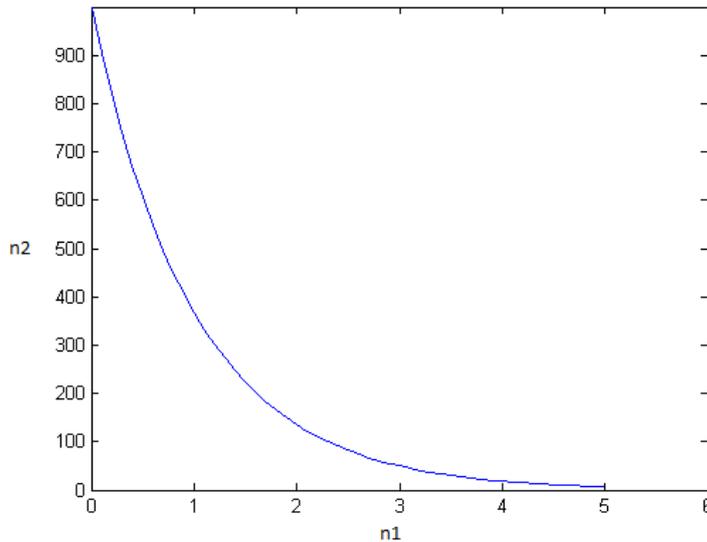


Рис. 3. Зависимость общего числа итераций n_2 от числа слагаемых n_1 начального приближения

Как видно, выбор начального приближения, содержащего всего пять слагаемых, определенных в соответствии с (4)–(7), сокращает общее число итераций почти в 1000 раз, что подтверждает эффективность метода.

При этом получены картины распределения напряженности H_x вдоль магнитоотрицательного стержня МУ (рис. 4) (здесь x – отклонение от рабочей точки на оси магнитоотрицательного стержня МУ).

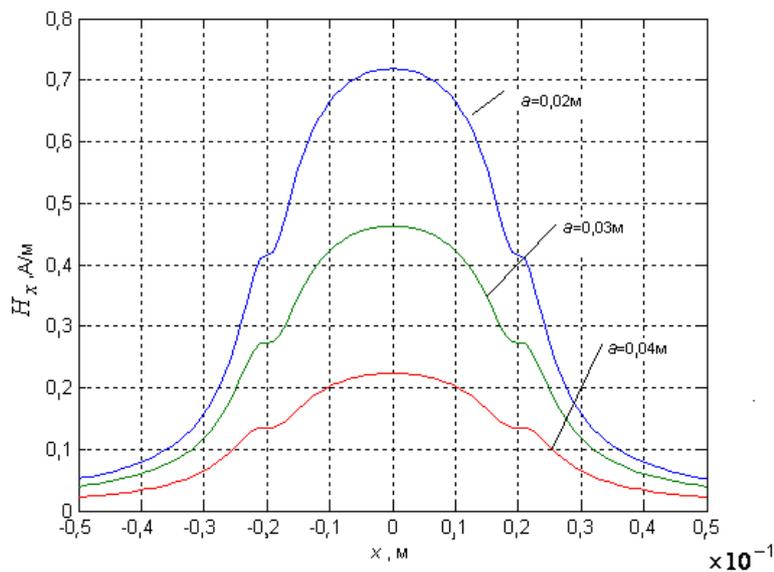


Рис. 4. Напряженность магнитного поля МУ

При расчете магнитных полей МУ с помощью SDN-сети возможно задействование разностной аппроксимации с учетом производных более высокого порядка и многоточечных разностных схем. Кроме того, этот подход позволит расширить рамки решаемой задачи и проводить моделирование магнитных полей в пространстве. На рис. 5 показаны результаты моделирования магнитного поля МУ на всем пространстве его рабочей области.

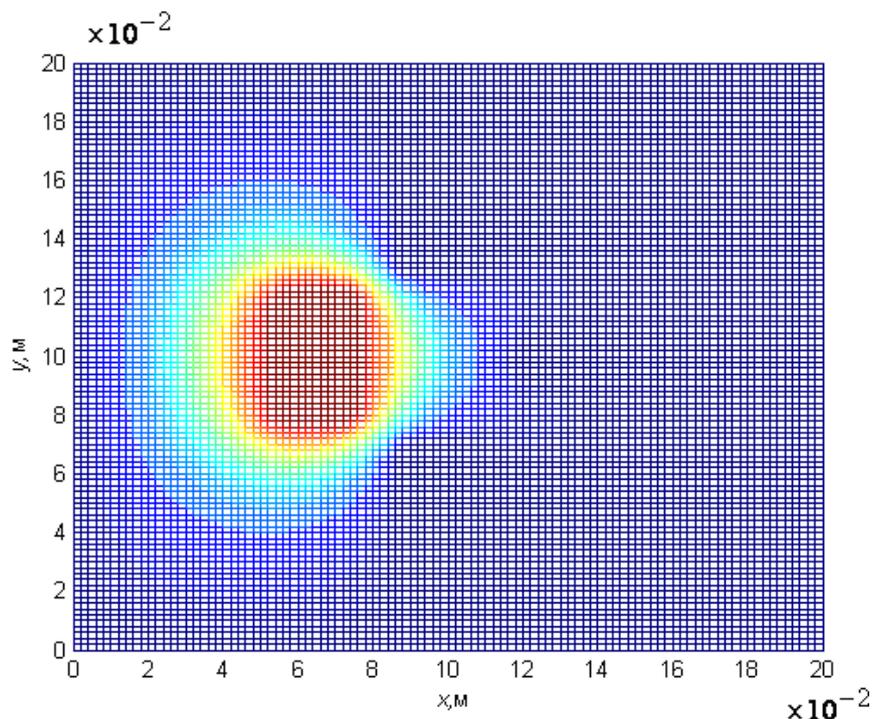


Рис. 5. Напряженность магнитного поля МУ в пространстве расчетной области

Последние результаты позволяют оценить адекватность полученных моделей магнитных полей предложенной методикой. Для этого можно воспользоваться существующими программными продуктами, предназначенными для исследования магнитных полей, например ELCUT, достоверность получаемых данных которыми доказана.

Так, для аналогичной расчетной области МУ (рис. 6), заданной в среде ELCUT, было найдено решение, графическое представление которого изображено на рис. 7.

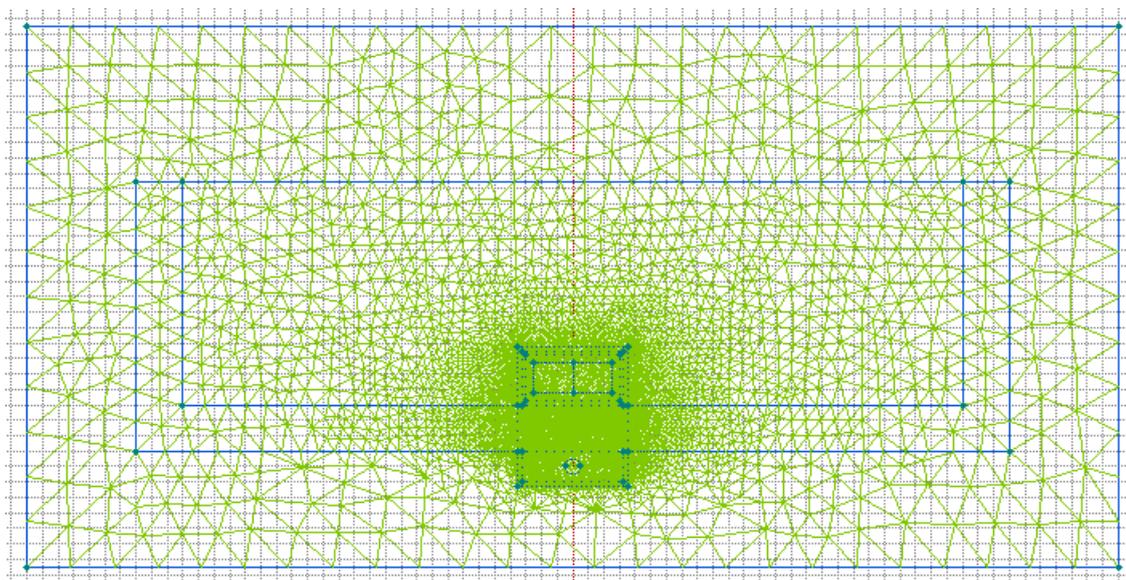


Рис. 6. Расчетная область МУ в системе ELCUT

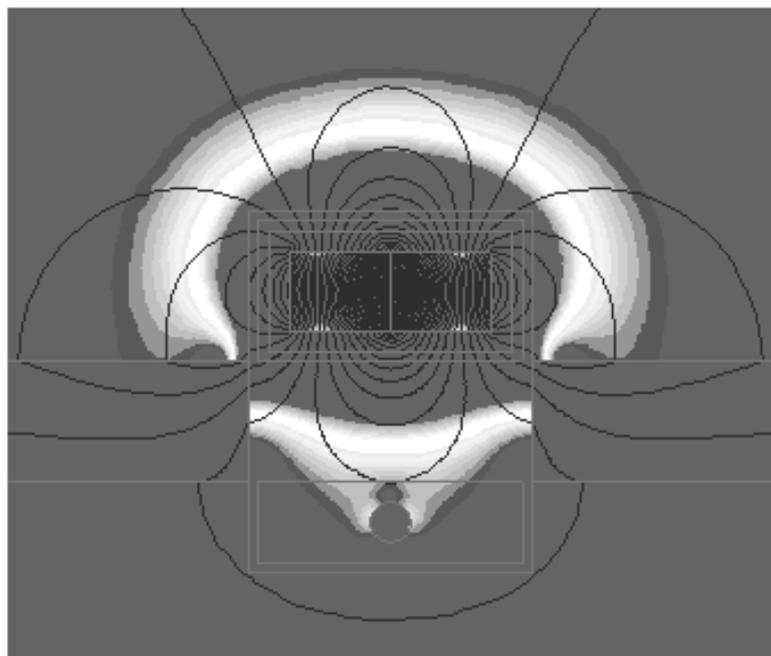


Рис. 7. Результаты моделирования магнитного поля МУ в системе ELCUT

Важным также является возможность учитывать влияние краевого и поверхностного эффекта при моделировании с помощью введения соответствующих коэффициентов при обработке полученных данных. Зависимости напряженности $H_{o,n}$ магнитного поля МУ в рабочей области с учетом влияния краевого эффекта приведены на рис. 8.

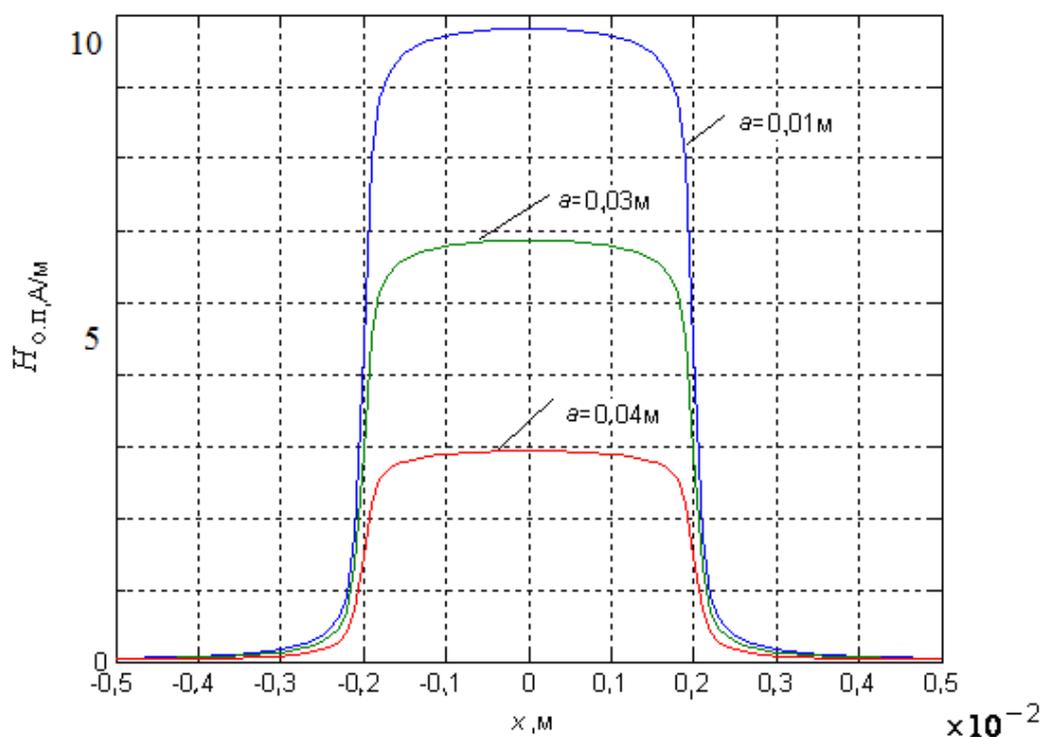


Рис. 8. Влияние краевого эффекта на напряженность магнитного поля МУ

Поверхностный эффект проявляется при формировании в среде магнитоstrictionного стержня токовых импульсов чтения или записи и также способен оказывать значительное влияние на работу МУ. Уменьшение амплитуды напряженности $H_{x,k}$ магнитного поля вследствие поверхностного эффекта показано на рис. 9.

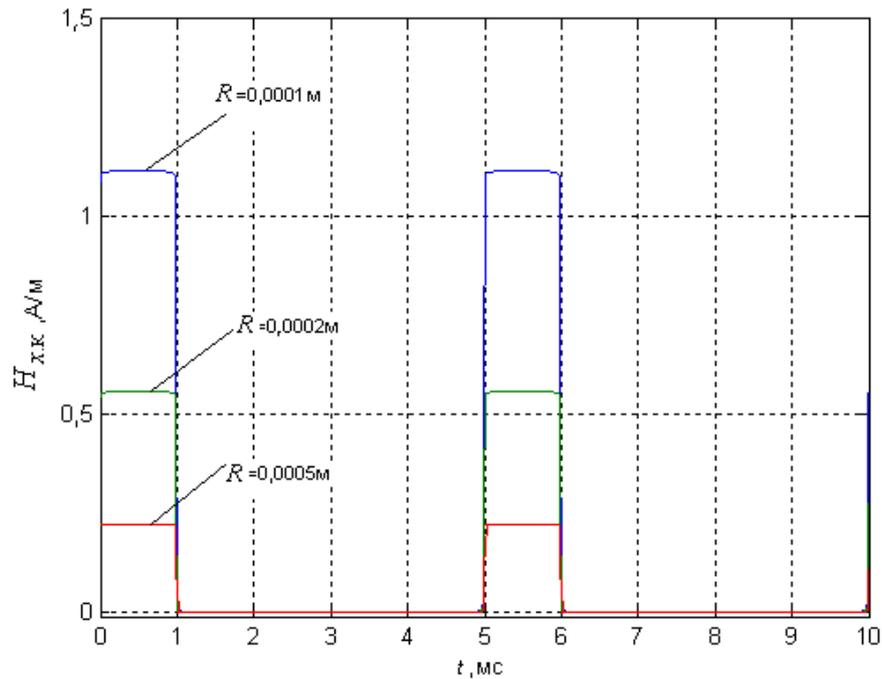


Рис. 9. Моделирование проявления поверхностного эффекта при формировании магнитного поля МУ

В результате с учетом всех полученных в ходе численного моделирования предложенной методикой данных получена пространственная картина распределения магнитного поля МУ в расчетной области, показанная на рис. 10. Анализ картины магнитного поля на рис. 5, рассчитанной ранее с помощью среды ELCUT, позволяет сделать вывод об адекватности полученных данных посредством предложенной методики.

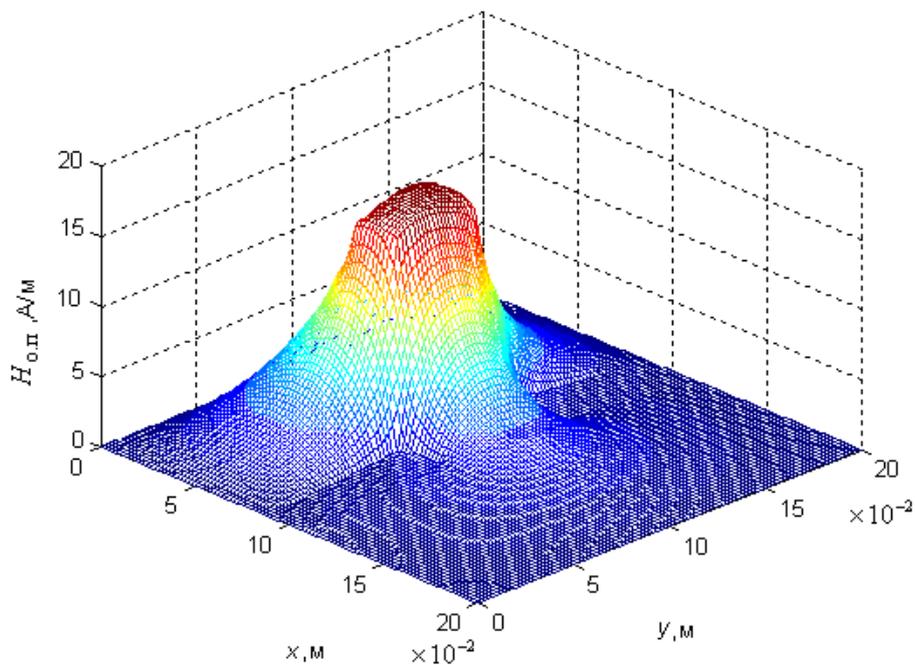


Рис. 10. Пространственная картина магнитного поля МУ

Из различных источников [3–10] известно, что исследуемые устройства обладают схожей картиной магнитного поля, однако применение вышеизложенной методики в составе SDN-сети позволяет получить ее более эффективно за счет снижения временных и вычислительных затрат.

Заключение

Таким образом, использование предложенной методики позволяет эффективно и с высокой степенью точности получить значения параметров магнитного поля МУ.

Применение SDN-сетей для проведения численных расчетов и моделирования позволит существенно повысить точность и информативность расчета магнитного поля МУ даже при том, что использование более сложных схем разностной аппроксимации усложнит вид конечно-разностных уравнений.

Библиографический список

1. Демирчян, К. С. Машинные расчеты электромагнитных полей / К. С. Демирчян, В. Л. Чечурин. – М. : Высш. шк., 1986. – 240 с.
2. Захаров, А. А. Аспекты информационной безопасности архитектуры SDN / А. А. Захаров, Е. Ф. Попов, М. М. Фучко // Вестник СибГУТИ. – 2016. – № 1. – С. 83–92.
3. Карпухин, Э. В. Способ повышения эффективности расчета параметров магнитоотрицательных преобразователей уровня с использованием программных комплексов / Э. В. Карпухин, Е. С. Дементьева, Ю. С. Кулькова // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12, ч. 5. – С. 902–906.
4. Карпухин, Э. В. Комплекс программ для расчета параметров магнитоотрицательных преобразователей уровня накладного типа со сложной геометрией акустического тракта / Д. А. Мокроусов, Э. В. Карпухин, С. Б. Демин, В. С. Дятков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – URL: www.science-education.ru/117-13707 (дата обращения: 09.02.2018).
5. Карпухин, Э. В. Математическое моделирование магнитных полей накладных магнитоотрицательных уровнемеров : монография / Э. В. Карпухин, С. Б. Демин. – Пенза : ПензГТУ, 2014. – 116 с.
6. Манжиров, А. В. Методы решения интегральных уравнений : справочник / А. В. Манжиров, А. Д. Полянин. – М. : Факториал, 1999. – 272 с.
7. Мокроусов, Д. А. К вопросу повышения точности моделирования магнитных полей магнитоотрицательных уровнемеров накладного типа со сложной геометрией акустического тракта / Д. А. Мокроусов, Е. С. Демин, Э. В. Карпухин, С. Б. Демин // Актуальные научные достижения – 2014 : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. (27–30 июня 2014 г.). – Чехия, Прага : Образование и наука, 2014. – С. 17–21.
8. Мокроусов, Д. А. Комплекс программ для расчета параметров магнитоотрицательных преобразователей уровня накладного типа со сложной геометрией акустического тракта / Д. А. Мокроусов, Э. В. Карпухин, С. Б. Демин, В. С. Дятков // Современные проблемы науки и образования. Технические науки. – 2014. – № 3. – URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13707> (дата обращения – 09.02.2018).
9. Мокроусов, Д. А. Повышение эффективности численных методов моделирования магнитоотрицательных уровнемеров накладного типа со сложной геометрией акустического тракта / Д. А. Мокроусов, Е. С. Демин, Э. В. Карпухин, С. Б. Демин // Актуальные научные достижения – 2014 : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. (27–30 июня 2014 г.). – Чехия, Прага : Образование и наука, 2014. – С. 13–16.
10. Мокроусов, Д. А. Применение численных методов для расчета магнитных полей в магнитоотрицательных уровнемерах / Д. А. Мокроусов, Э. В. Карпухин, В. С. Дятков, С. Б. Демин // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. – № 3. – С. 102–104.
11. Немыцкий, В. В. Качественная теория дифференциальных уравнений / В. В. Немыцкий, В. В. Степанов. – М.-Л. : ОГИЗ, 1947. – 448 с.

Миронов Андрей Николаевич

инженер,

Научно производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: mironovmir@yandex.ru

Mironov Andrey Nikolaevich

engineer,

Research and production enterprise "Rubin"
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

Дементьева Елена Сергеевна

кандидат педагогических наук,
заведующий кафедрой физики,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова /
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: demeles2013@yandex.ru

Dement'eva Elena Sergeevna

candidate of pedagogical sciences,
head of sub-department of physics,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova avenue/Gagarin street,
Penza, Russia)

Карпухин Эдуард Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра физики,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова /
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: edvar1@rambler.ru

Karpukhin Eduard Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of physics,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova avenue/Gagarin street,
Penza, Russia)

УДК 621.618

Миронов, А. Н.

Численный расчет магнитных полей магнитострикционных уровнемеров с применением SDN-сетей / А. Н. Миронов, Е. С. Дементьева, Э. В. Карпухин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 67–76. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-9.