



РАЗРАБОТКА МНОГОСЛОЙНЫХ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ МАГНИТНЫХ СБОРОК ХАЛБАХА ДЛЯ ПМР-РЕЛАКСОМЕТРА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТА

Нгуен Дык Ань, Кашаев Р.С., Козелков О.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

navupro1991@gmail.com

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Магнит является важным блоком в конструкции измерительно-аналитической техники, основанной на методах ядерного (протонного) магнитного резонанса. Большой объем межполюсного пространства и однородность магнитного поля являются – желательными качествами магнита, непосредственно влияющие на точность измерений. Магнитная сборка Халбаха (МСХ) являются перспективным типом магнитов и приоритетно исследуются для применения в новых поколениях портативных ПМР-релаксометров. Они обладают меньшими габаритами и массой, но создают значительно большее магнитное поле в зазоре по сравнению с дипольными магнитами той же массы и расстоянием между полюсами. Поэтому исследование и поиск решений для оптимизации параметров МСХ является актуальной задачей в рамках разработки усовершенствованных портативных ПМР-релаксометров. **ЦЕЛЬ.** Целью работы является исследование и определение факторов, влияющих на такие важные параметры магнита, как: масса, габариты, плотность магнитного потока и однородность магнитного поля в зазоре магнита и разработка математические уравнения для описания влияния этих факторов на параметры магнита. На основе результатов расчетов и моделирования в программном обеспечении практической целью было создать экспериментальный прототип МСХ для оценки и калибровки величин в математических уравнениях. **МЕТОД.** В качестве примененного метода была использована теория магнитных комбинаций, составленных из одинаковых магнитов, предложенная Клаусом Халбахом и другими исследователями в области магнитов, на основе которой разрабатываются соответствующие математические уравнения. Программное обеспечение для моделирования магнитных полей ANSYS Maxwell использовался для предварительной оценки теоретических расчетов. Применялся метод экспериментального исследования в сочетании со статистическим анализом для сбора и обработки данных в процессе испытаний на прототипе МСХ. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Результатом является разработка метода оптимизации параметров МСХ путем определения влияния факторов на параметры МСХ на основе расчетов и программного моделирования прототипа МСХ для проверки оптимизации. В рамках исследования было также разработано устройство для измерения значений магнитного поля в диапазоне 0–1.25 Т с разрешением 4 мВ/мТ, основанное на датчике Холла и плате Arduino, что стало дополнением исследований. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** На основе расчетов оптимизированных параметров по математической модели был разработан прототип МСХ. Он имеет массу 4.5 кг, размеры 140×140×120 мм и состоит из 10 уложенных друг на друга слоев кубических магнитов. Разработанный МСХ низкую цену, прост в изготовлении и сборке, а также обладает гибкостью изменения конструкции для регулировки значений магнитного поля в зазоре. При конструкции из 10 слоев плотность магнитного потока в зазоре достигает $B_0 = 0.344$ Тл с неоднородностью $\Delta B/B_0 = 2000$ ppm в объеме 6 см^3 в центре зазора диаметре $d = 30$ мм. Значение плотности магнитного потока в зазоре МСХ аналогична величине в дипольных магнитах, используемых в релаксометрах ПМР-NP1 и ПМР-NP2, при этом масса и габариты значительно меньше.

Ключевые слова: магнитная сборка Халбаха (МСХ); неоднородность; плотность магнитного потока; экспресс-контроль; релаксометр; оптимизация; параметр.

Для цитирования: Нгуен Дык Ань, Кашаев Р.С., Козелков О.В. Разработка многослойных усовершенствованных магнитныхборок Халбаха для ПМР-релаксометра на основе оптимизации параметров магнита // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 20-32. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-20-32.

DEVELOPMENT OF AN IMPROVED MULTILAYER HALBACH ASSEMBLY MAGNET FOR PMR RELAXOMETRY BASED ON OPTIMIZATION OF MAGNET PARAMETERS

Nguyen Duc Anh, Kashaev R.S., Kozelkov O.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

navypro1991@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE.* A magnet is an important block in the design of measuring and analytical equipment based on nuclear (proton) magnetic resonance methods. A large volume of interpolar space and homogeneity of the magnetic field are desirable qualities of a magnet, directly affecting the accuracy of measurements. The Halbach magnetic assembly (HMA) is a promising type of magnet and is a priority for research for use in new generations of portable PMR relaxometers. They have smaller dimensions and weight but create a significantly greater magnetic field in the gap compared to dipole magnets of the same mass and distance between the poles. Therefore, the study and search for solutions to optimize the HMA parameters is an urgent task in the development of improved portable PMR relaxometers. *OBJECTIVE.* The aim of the work is to study and determine the factors influencing such important magnet parameters as: mass, dimensions, magnetic flux density and homogeneity of the magnetic field in the magnet gap and to develop mathematical equations to describe the influence of these factors on the magnet parameters. Based on the results of calculations and software modeling, the practical goal was to create an experimental prototype of HMA for evaluating and calibrating the quantities in mathematical equations. *METHOD.* The applied method was the theory of magnetic combinations composed of identical magnets proposed by Klaus Halbach and other researchers in the field of magnets, based on which the corresponding mathematical equations are developed. ANSYS Maxwell magnetic field modeling software was used for preliminary evaluation of the theoretical calculations. An experimental study method was used in combination with statistical analysis to collect and process data during tests on the HMA prototype. *RESULTS.* The result is the development of a method for optimizing the HMA parameters by determining the influence of factors on the HMA parameters based on calculations and software modeling of the HMA prototype to test the optimization. As part of the study, a device for measuring magnetic field values in the range of 0–1.25 T with a resolution of 4 mV/mT based on a Hall sensor and an Arduino board was also developed, which complemented the research. *CONCLUSION.* Based on the calculations of optimized parameters using a mathematical model, a prototype of the HMA was developed. It weighs 4.5 kg, dimensions 140×140×120 mm, and consists of 10 layers of cubic magnets stacked on top of each other. The developed HMA has a low price, is easy to manufacture and assemble, and has the flexibility of changing the design to adjust the magnetic field values in the gap. With a design of 10 layers, the magnetic flux density in the gap reaches $B_0 = 0.344$ T with inhomogeneity $\Delta B/B_0 = 2000$ ppm in a volume of 6 cm³ in the center of the gap with a diameter of $d = 30$ mm. The value of the magnetic flux density in the HMA gap is like the value in the dipole magnets used in the PMR-NP1 and PMR-NP2 relaxometers, while the mass and dimensions are significantly less.

Keywords: Halbach magnetic assembly (HMA); non-uniformity; magnetic flux density; express control; relaxometer; optimization; parameter.

For citation: Nguyen Duc Anh, Kashaev R.S., Kozelkov O.V. Development of an improved multilayer Halbach assembly magnet for PMR relaxometry based on optimization of magnet parameters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 20-32. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-20-32.

Введение (Introduction)

Долгое время считалось, что нефтегазовая отрасль существенно отстает в использовании цифровых технологий [1-4]. Поэтому в последние годы особое внимание уделяется развитию цифровых нефтяных месторождений с возможностью автоматического контроля, всеобъемлющего и многопараметрического контроля физико-химических свойств (ФХС) нефти, таких как концентрация воды, нефти, газа, асфальта и т.д. [3, 4] и скважинной жидкости (СКЖ) [5]. Преимуществом аналитического метода на основе (протонного) ядерного магнитного резонанса (ПМР), являются его многопараметричность (по нескольким параметрам ЯМР), высокая производительность, неразрушающий контроль, не требующий

пробоподготовки и больших объемов пробоотбора. Метод измерения релаксации ЯМР стал одним из важнейших методов для экспресс-контроля и количественной оценки СКЖ и сырой нефти в потоке [5]. Одним из важнейших элементов оборудования для анализа и контроля параметров жидкости и нефти на основе ЯМР является магнитная система, характеризующаяся плотностью и однородностью магнитного поля в зазоре магнита, что является основой для определения погрешности анализов и измерений [6].

Развитие технологий в области материаловедения в начале 1980-х годов позволило создать новые магнитные материалы с составами, включающими редкоземельные элементы, такие как $NdFeB$ (Неодим-Железо-Бор) и $SmCo$ (Самарий-Кобальт). При этом магниты на основе $NdFeB$ обладают превосходными магнитными свойствами по сравнению с магнитами $SmCo$. Они способны создавать значительно более сильные магнитные поля по сравнению с традиционными дипольными литыми из твердых сплавов и ферритовыми магнитами. Однако при использовании конструкции дипольного магнита они являются слишком тяжёлыми для измерительных приборов, таких как портативные релаксометры на основе ЯМР. В 1980 году Клаус Хальбах предложил новую магнитную структуру, названную его именем – магнитная сборка Халбаха (МСХ), в которой магнитная матрица собирается из множества одинаковых кубических постоянных магнитов с разными направлениями намагничивания, расположенным по определенным правилам [7]. Поэтому плотность магнитного поля значительно увеличивается в центре МСХ и уменьшается на его периферии. На основе этого принципа Рейх и Блюмлер в 2004 году предложили структуру МСХ для приложений ЯМР, включающую несколько отдельных кубических магнитов, которая получила название *NMR-Mandhalas* [8]. Преимущества, представленные в их исследованиях новой магнитной структуры, это небольшая масса и размеры, высокая плотность магнитного поля в зазоре по сравнению с дипольными магнитами, а также низкая магнитная дисперсия в окружающей среде [9]. Эти преимущества побудили авторов данной статьи выбрать структуру *NMR-Mandhalas* в качестве прототипа для дальнейших исследований по улучшению однородности и плотности магнитного поля в зазоре, с меньшей массой и размером.

На основе описанных задач определена цель исследования:

Целью исследования заключается в определении факторов и исследование их влияния на параметры МСХ, такие как масса, размеры, неоднородность и плотность магнитного поля в зазоре магнита и построении математических уравнений для описания этих взаимосвязей. Решениями этих уравнений являются оптимальные параметры структуры МСХ по массе, размерам, неоднородности и плотности магнитного поля. Это служит основой для проектирования экспериментального прототипа с небольшой массой и габаритами, но с однородностью и плотностью магнитного поля в зазоре, аналогичными магнитам резонансных приборов ПМР- NP_1 и ПМР- NP_2 при измерении времен продольной релаксации T_1 и времен спин-спиновой релаксации T_2 [10].

Научная значимость исследования заключается в определении факторов и изучении их влияния на габариты, массу, однородность и плотность магнитного поля в зазоре МСХ, и в их описание математическими уравнениями. Оптимальность математических уравнений проверяется с помощью моделирования и экспериментальных измерений, сбора и обработки данных, полученных на экспериментальной модели. Значимость заключается также в обосновании методологии MSK и точности математической модели для оптимизации конструкции МСХ. Использование программного обеспечения ANSYS Maxwell для моделирования магнитного поля в зазоре с различными структурами МСХ позволило выбрать вариант конструкции экспериментальной модели МСХ.

Практическая значимость исследования заключается в разработке методики расчета конструкции МСХ с использованием специализированного программного обеспечения для моделирования магнитного поля ANSYS Maxwell в предлагаемой структуре МСХ. Прототип магнитной сборки был разработан на основе результатов расчета оптимальных параметров. Оценка прототипе показывает, что разработанная структура МСХ имеет небольшую массу, напряженность и неоднородность магнитного поля, которые позволяют определять времена релаксации T_1 и T_2 в образцах СКЖ и сырой нефти. Одновременно для проведения измерений и сбора данных на экспериментальной модели МСХ на датчике Холла магнитного поля и плате Arduino было разработано устройство для измерения с высокой чувствительностью, стабильностью в широком диапазоне температур величины и однородности магнитных полей, позволяющее гибко рассчитывать параметры магнитов других конструкций. Результаты измерений и обработки данных показали, что экспериментальная структура MSX имеет небольшую массу, величину магнитного поля и

степень его неоднородности, достаточные для определения времен релаксации T_1 и T_2 в образцах СКЖ и сырой нефти.

Литературный обзор (Literature Review)

В своей публикации *Moresi* и *Magin* описали разработанную ими конструкцию портативной структуры МСХ [11]. Структура эта состоит из восьми цилиндрических редкоземельных магнитов типа *SmCo* длиной 150 мм и диаметром 20 мм, установленных в каркасе из алюминия. Область с объемом $3 \times 3 \times 5$ мм³ расположена в центре зазора размерами 5 мм в высоту, 32 мм в ширину и 230 мм в длину, где плотность магнитного поля достигает $B_0 = 0.596$ Тл, а неоднородность составляет $\Delta B/B_0 = 20$ ppm. Такая однородность достигается за счет использования двух пластин из мягкого железа с высокой магнитной проницаемостью ($\mu > 10000$), расположенных перпендикулярно магнитному полю и закрепленных винтами. Недостатком конструкции является зазор шириной всего 5 мм, что ограничивает её применение для различных приложений.

Метод улучшения неоднородности магнитного поля в зазоре МСХ был опубликован *Solmer* и *Blümner* [12] в их исследовании. В данной работе структура МСХ была построена из восьмиугольных магнитных элементов на основе структуры *NMR-Mandhalas*, представленной в [8]. Установка колец *Mandhalas* с соответствующим расстоянием существенно повысила однородность, достигнув значения $\Delta B/B_0 = 100$ ppm. Однако общая масса данной структуры МСХ оказалась слишком большой, достигая 300 кг. Кроме того, восьмиугольные редкоземельные магниты на рынке имеют очень высокую стоимость. Поэтому данная конструкция МСХ не подходит для мобильных и недорогих приложений ЯМР.

Усовершенствованное решение для улучшения однородности магнитного поля в зазоре магнитной структуры Хальбаха с использованием метода *Shimming* (активное улучшение однородности) представлено в публикациях *B. Blümich* и др. [13] и *Cooley, Stockmann* и др. [14]. Использование активных элементов шиммирования кольцами и катушками подмагничивания позволяет значительно улучшить однородность магнитного поля. Однако этот метод требует большого объема расчетов, изготовления и точной механической обработки. Поэтому он также малопригоден для широкого применения в недорогих проектах ЯМР-релаксометрии.

В своих публикациях *Богайчук* и коллеги [15] представили структуру МСХ с восемью квадратными магнитами *NdFeB* типа *N27* размерами 10x10x100 мм, расположенными в два кольца. Для улучшения однородности зазора, магнитные элементы специально подбираются и располагаются один за другим до достижения наилучшей однородности. Результаты измерений показывают, что напряженность магнитного поля достигает $B_0 = 0.598$ Тл с неравномерностью $\Delta B/B_0 = 229$ ppm в области диаметром 4 мм и высотой 10 мм в центре зазора МСХ, при массе всего 0.6 кг. Однако этот метод во многом зависит от качества выбранных магнитов, погрешности их силы и направления намагничивания каждого магнита. Смена магнита требует переделки подбора и расстановки магнитных частей. Объем однородной области магнитного поля также очень мал. Этот метод применим только для релаксометров с диаметром катушки датчика меньше 4 мм и количеством магнитов менее восьми.

В 2020 году *Свинин, Кашаев* и *Козельков* представили в своей публикации небольшую конструкцию МСХ, состоящую из 16 магнитных стержней *NdFeB* типа *N37* размером 0.5x0.5x40 мм [16]. Эта структура МСХ имеет небольшие размеры и массу не более 500 г при диаметре зазора данной магнитной структуры 30 мм. Однако плотность магнитного поля в центре зазора составляет $B_0 = 0.15$ Т, а неоднородность $\Delta B/B_0 = 11000$ ppm. При таком уровне магнитного поля и однородности использование данной конструкции в приборах для измерений, основанных на методе ЯМР оказывается недостаточно чувствительным при отсутствии специальных мер повышения однородности поля профилированными пластинами из электромагнитной стали.

На основе исследования и анализа представленных публикаций можно видеть, что текущие исследования в основном сосредоточены на улучшении неоднородности и плотности магнитного поля. В последующих частях статьи авторы представят метод определения и описания факторов, направленных на улучшение однородности и плотности магнитного поля в зазоре без увеличения массы и размеров МСХ. Разработанный прототип МСХ был параметрически оптимизирован экспериментами по измерениям времени поперечной релаксации T_2 некоторых образцов сырой нефти с использованием портативного релаксометра ПМР-*NP*₂.

Материалы и методы (Materials and methods)

Идеальная структура МСХ представляет собой бесконечно длинный цилиндр, изготовленный из магнитотвердого материала, в котором магнитные компоненты непрерывно поляризованы таким образом, что вектор намагниченности поворачивается на 720° по окружности кольца (рис. 1а). Плотность магнитного поля в зазоре этой структуры определяется по формуле:

$$B_0 = B_r \frac{r_{\text{внеш}}}{r_{\text{внут}}} \quad (1)$$

где B_r – остаточная намагниченность используемого постоянного магнитного материала;

$r_{\text{внеш}}$ – внешний радиус идеального цилиндра Хальбаха (ЦХ);

$r_{\text{внут}}$ – внутренний радиус идеального ЦХ.

Структура ЦХ на рисунке 1б похожа на структуру на рисунке 1а, но в которой кольцо разделено на 16 равных частей и намагничено в соответствии с векторами, показанными на рисунке 1а. Однако данная структура все еще слишком сложна и дорога для изготовления, поэтому круговая структура МСХ, изготовленная из идентичных магнитов, называется *NMR-Mandhalas* (рис. 1в), представленная в [8], которая является основой для разработки авторами прототипа МСХ.

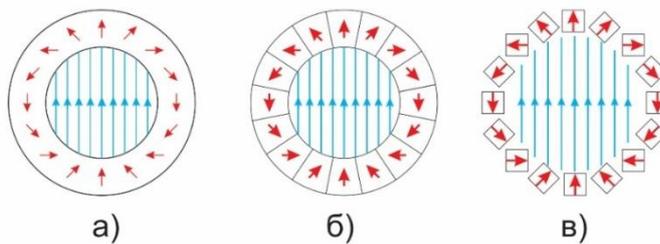


Рис. 1. Основные структурные формы ЦХ:

а) идеальный ЦХ, б) дискретная версия (а),

в) МСХ с 16 элементами

Fig. 1. The main structural forms of CH:

a) ideal CH, b) discrete version (a),

c) HMA with 16 elements

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Понятия ЦХ и способ изготовления представлены на рисунке 2. Направление магнитного поля в зазоре ЦХ находится в плоскости xu и ориентировано вдоль оси x , что иллюстрируется красной стрелкой (рис. 2а). В отличие от ЦХ (рис. 2а), МСХ состоит из n идентичных постоянных магнитов, расположенных по кругу для имитации формы ЦХ (рис. 2б и 2в). Изначально значение n определялось как кратное 8 [8], однако с развитием технологий магнитных материалов было установлено, что значения n , кратные 2, при условии $n \geq 4$, являются достаточными для использования в МСХ.

В соответствии с числом n магнитных элементов направление намагничивания каждого магнита определяется двумя углами α_i и β_i (рис. 2б). Положение i -го магнита из общего числа n магнитов, расположенных по кругу, определяется углом $\alpha_i = \frac{2\pi * i}{n}$, а направление его намагничивания определяется углом $\beta_i = 2\alpha_i$.

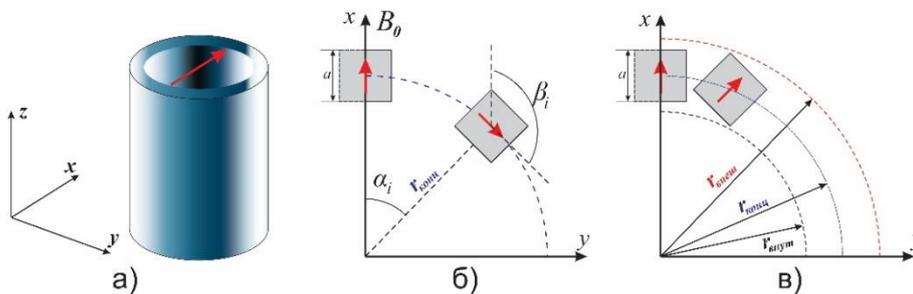


Рис. 2. Определение структуры ЦХ:

а) Определение системы координат. Конечный магнит образует цилиндр, ось которого направлена вдоль оси z , а основная составляющая магнитного поля ориентирована в направлении оси x ;

б) Принцип построения МСХ;

в) МСХ изготовлены из квадратных магнитов.

Fig. 2. Definition of the structure of the CH:

a) Definition of the coordinate system. The final magnet forms a cylinder, the axis of which is directed along the z axis, and the main component of the magnetic field is oriented in the direction of the x axis;

b) The principle of constructing HMA;

c) HMA are made of square magnets.

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

В структуре одного кольца МСХ значения внутреннего и внешнего радиусов в соответствии с формулой (1) определяются по формуле:

$$r_{\text{внеш}} = r_{\text{конц}} * (1 + \sqrt{2} * \Xi(n)) \quad (2)$$

$$r_{\text{внут}} = r_{\text{конц}} * (1 - \sqrt{2} * \Xi(n)) \quad (3)$$

где

$$\Xi(n) = \frac{\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) - \sqrt{2} * \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{4\pi}{n}\right)}{2 \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{4\pi}{n}\right) + \sqrt{2}} \quad (4)$$

$r_{\text{конц}} = \frac{r_{\text{внут}} + r_{\text{внеш}}}{2}$ – радиус круга проходит через центр магнитных элементов;

n – общее количество магнитных элементов в одном кольце МСХ.

Уравнение (1) показывает, что плотность магнитного поля в зазоре магнита обратно пропорциональна внутреннему радиусу МСХ. Из формул (2) и (3) видно, что значения внутреннего радиуса и внешнего радиуса зависят от количества магнитных элементов в базе МСХ. Поэтому для увеличения плотности магнитного поля в зазоре магнитные элементы необходимо располагать как можно ближе друг к другу.

При моделировании идеальной структуры ЦХ в программе *ANSYS Maxwell* с очень большим размером по оси z было показано, что однородность и плотность магнитного поля в зазоре близки к идеальным. Однако при уменьшении этого значения однородность и плотность магнитного поля значительно снижаются. Тем не менее, конструкция ЦХ с бесконечной высотой нереалистична и значительно увеличивает массу. В статьях [8, 9] указывается, что использование нескольких слоев МСХ, расположенных друг над другом, позволяет улучшить однородность и плотность магнитного поля по сравнению со слоистой структурой МСХ.

Для определения оптимальной высоты магнитной структуры, состоящей из множества уложенных друг на друга слоев МСХ, необходимо сначала рассмотреть значение плотности магнитного поля МСХ по вертикальной оси (вдоль оси z) [11]. В соответствии с этим значение плотности магнитного поля в зазоре вдоль оси z при $x = y = 0$, определяется по формуле:

$$B_{xy}(z) = \frac{r_{\text{конц}}^5}{\left(r_{\text{конц}}^2 + (z - z_0)^2\right)^{5/2}} B_{xy}(0) \quad (5)$$

где z – высота многослойного МСХ от центра.

В многослойной структуре МСХ плотность магнитного поля достигает максимума в центре структуры и постепенно уменьшается с обеих сторон вдоль оси z . Для расчета высоты L многослойной структуры МСХ уравнение (5) интегрируется по диапазону $z_0 = \pm L/2$. В этом случае коэффициент ослабления f_L магнитного поля в центре магнита при $z = 0$ определяется по следующей формуле:

$$f_L = \int_{-L/2}^{L/2} B_{xy}(z = 0, z_0) = \frac{L(L^2 - 6r_{\text{конц}}^2)}{(L^2 + 4r_{\text{конц}}^2)^{3/2}} \quad (6)$$

В центре структуры коэффициент уменьшения плотности магнитного поля $f_L = 0$. Таким образом, оптимальная высота многослойной структуры МСХ определяется по формуле:

$$L = r_{\text{конц}} * \sqrt{6} \quad (7)$$

Исследования, представленные в работах [15, 17, 18], описывают методы уменьшения неоднородности путем изменения различных способов размещения магнитных элементов для достижения наибольшей однородности. Более простой метод описан в [9]. Установка прокладок между слоями МСХ позволяет значительно улучшить однородность магнитного поля вдоль оси z . Размер подкладочного слоя между двумя слоями МСХ определяется суммарной плотностью центрального магнитного поля B_{xy}^{Σ} , создаваемого двумя слоями, расположенными на расстоянии d друг от друга. Значение плотности центрального магнитного поля B_{xy}^{Σ} в центре между двумя слоями МСХ определяется уравнением:

$$B_{xy}^{\Sigma}(0, 0, z) = \frac{r_{\text{конц}}^5}{\left(r_{\text{конц}}^2 + \left(z + \frac{d}{2}\right)^2\right)^{5/2}} B_{xy}(0, 0, 0) + \frac{r_{\text{конц}}^5}{\left(r_{\text{конц}}^2 + \left(z - \frac{d}{2}\right)^2\right)^{5/2}} B_{xy}(0, 0, 0) \quad (8)$$

Для улучшения однородности по оси z вторая производная центрального магнитного поля B_{xy}^{Σ} должна быть равна нулю при $z=0$. Это значение определяется по формуле:

$$\frac{\partial(B_{xy}^{\Sigma})^2}{\partial z^2} = 5r_{\text{конц}}^2 B_{xy} \left[\frac{6(z+d/2) - r_{\text{конц}}^2}{(r_{\text{конц}}^2 + (z+d/2)^2)^{9/2}} + \frac{6(z-d/2) - r_{\text{конц}}^2}{(r_{\text{конц}}^2 + (z-d/2)^2)^{9/2}} \right] = 0 \quad (9)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial(B_{xy}^{\Sigma})^2(0)}{\partial z^2} = 0 \quad \Rightarrow d = \pm \frac{2r_{\text{конц}}}{\sqrt{6}} \quad (10)$$

Значения L и d позволяют определить количество слоев МСХ, а также оптимальные размеры и массу всей многослойной структуры МСХ при сохранении максимальной однородности магнитного поля в зазоре. Для дальнейшего улучшения неоднородности магнитного поля без изменения массы и размеров многослойной структуры МСХ рассматривается тщательный выбор магнитных элементов и добавление пассивных элементов для смягчения поля. Тщательный выбор магнитных элементов был описан Богайчуком в его публикации [15]. Несмотря на промышленное производство, невозможно гарантировать одинаковые магнитные характеристики элементов даже в рамках одной партии. Поэтому проверка и отбор магнитных элементов с близкими характеристиками магнитного поля позволяет улучшить однородность и плотность магнитного поля в зазоре МСХ. Другой метод улучшения однородности магнитного поля заключается в использовании двух пластин из мягкого ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью, расположенных перпендикулярно магнитному полю в зазоре, как описано в работе [12]. Это простые методы, которые позволяют улучшить однородность магнитного поля в зазоре многослойной структуры МСХ.

В следующей части статьи авторы представляют результаты разработки и усовершенствования прототипа МСХ, основанные на теории МСХ и параметрах, используемых для оптимизации размеров, массы, неоднородности и плотности магнитного поля в зазоре многослойной структуры МСХ.

Результаты (Results)

Разработка и доработка прототипа МСХ

Для разработки собственной многослойной структуры МСХ авторы выбрали конфигурацию, включающую 16 магнитных элементов в одном кольце каждого слоя МСХ. Магнитные элементы $NdFeB$ были тщательно отобраны к типу $N33$ с габаритами $10 \times 10 \times 10$ мм. В центре каждого слоя измеренная плотность магнитного поля составила $B_0 = 68$ мТл. Авторы обнаружили, что при использовании нескольких концентрических колец МСХ плотность магнитного поля в центре значительно увеличивается. Для проверки надежности было выполнено моделирование с использованием программного обеспечения *ANSYS Maxwell*, результаты которого представлены на рисунке 3. Параметры настройки магнитных элементов соответствуют реальным характеристикам.

При использовании структуры МСХ, состоящей из одного кольца с 16 магнитными элементами (как в работе Кашаев, Свинин [16] – будет еще одна ссылка на журнал), плотность магнитного поля в центре достигает $B_0 = 0.145$ Тл (рис. 3а). При использовании структуры из трех соосных колец, каждое из которых состоит из 16 магнитных элементов, плотность магнитного поля в центре составляет $B_0 = 0.423$ Тл, что почти в 3 раза больше, чем в случае структуры с одним кольцом (рис. 3б). Это можно объяснить явлением наложения магнитных полей, где магнитное поле в центре является суммарным полем от трех колец. Результаты фактических измерений показали, что при такой структуре плотность магнитного поля достигает $B_0 = 0.101$ Тл, что более чем в 1.5 раза превышает значение по сравнению с $B_0 = 0.068$ л для структуры с одним кольцом. Однако этот результат оказался меньше, чем значение, полученное при моделировании.

Опорный каркас для магнитных элементов и прокладка между двумя слоями магнитных колец прототипа были спроектированы с использованием программного обеспечения (ПО) *Solidworks*. Это специализированное ПО для проектирования, которое обеспечивает точное 3D-проектирование деталей для 3D-принтеров с помощью высокоточных лазерных резаков (рис. 4).

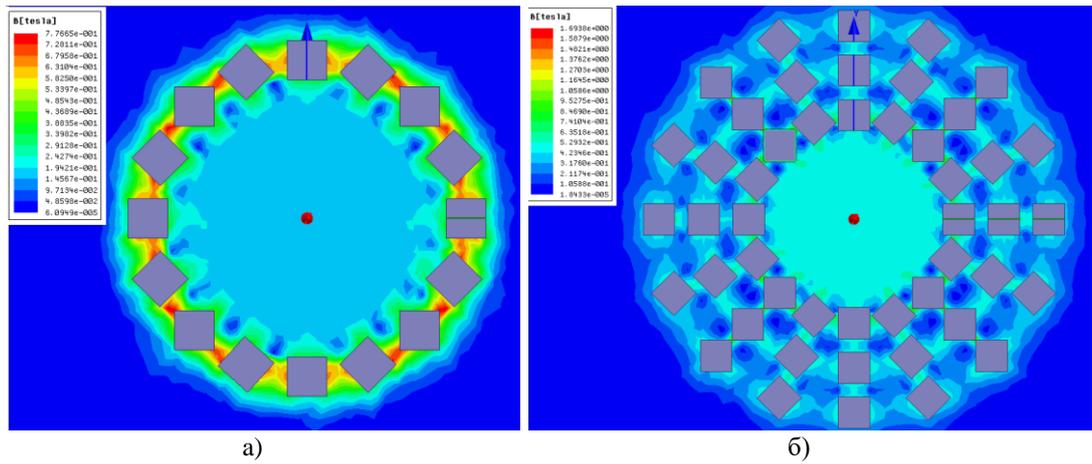


Рис. 3. Моделирование структуры МСХ:

- а) МСХ с одним кольцом;
- б) МСХ с тремя коаксиальными кольцами.

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 3. Modeling of HMA structure:

- a) HMA with one ring;
- b) HMA with three coaxial rings.

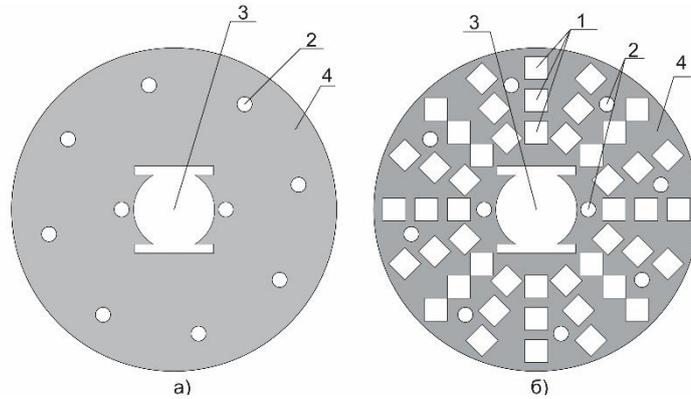


Рис. 4. Проектирование каркаса и прокладки для МСХ:

- а) Прокладка между 2 слоями магнитных колец;
 - б) Каркас для установки магнитов для слоя колец:
- 1 – Квадратное отверстие для установки магнита;
 - 2 – Отверстия для размещения и установки винтов, соединяющих слои;
 - 3 – Зазор в центре МСХ с 2 пазами для установки стержней из кремниевой стали с высокой магнитной проницаемостью;
 - 4 – Каркас.

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 4. Design of the frame and spacer for HMA:

- a) Laying between 2 layers of magnetic rings;
 - b) A frame for installing magnets for a layer of rings:
- 1 – Square hole for magnet installation;
 - 2 – Holes for placement and installation of screws connecting the layers;
 - 3 – HMA center gap with 2 slots for mounting silicon steel rods with high magnetic permeability;
 - 4 – The frame.

Формулы (7) и (10) позволяют определить максимальную высоту многослойного прототипа МСХ (МП МСХ) и оптимальное расстояние между двумя слоями МСХ. Многослойный прототип МСХ состоит из 10 слоев МСХ, расположенных друг над другом (рис. 5), с прокладками между слоями. Для устранения влияния затухания магнитного поля на верхнем и нижнем концах МП МСХ, три слоя МСХ без прокладок размещены над ними. Для повышения однородности магнитного поля используются пассивные решения, такие как размещение пластин из высокопроницаемого ферромагнитного материала в зазорах конструкции. Экспериментальные измерения показали однородность магнитного поля $\Delta B/B_0 = 2000 \text{ ppm}$ в объеме $1.2 \times 2.4 \times 2.0 = 5.76 \text{ см}^3$.

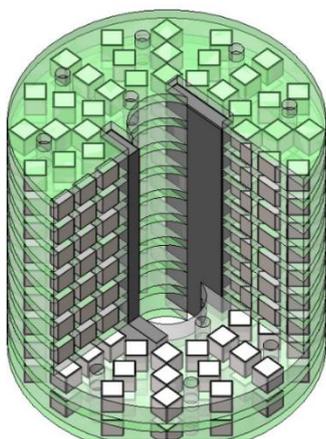


Рис. 5. Структура многослойного прототипа МСХ с 10 уложенными слоями *Fig. 5. Structure of a multilayer HMA prototype with 10 stacked layers*

**Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.*

Для уменьшения массы МП МСХ вместо ферритовых пластин были использованы листы из кремнистой стали для пассивного улучшения однородности. Эти листы обычно применяются в производстве трансформаторов благодаря их высокой магнитной проницаемости ($\mu_0 = 10000\text{--}15000$). Листы были разрезаны на более мелкие заготовки размером 120×35 мм, а края резки обработаны шлифовкой для удаления дефектов. Эти листы из кремнистой стали были плотно скреплены между собой, аналогично сердечникам трансформаторов, и помещены в заранее подготовленные пазы на каркасе МП МСХ. Слои МСХ и прокладок были надежно зафиксированы пластиковыми (или медными) винтами, чтобы избежать смещения и образования зазоров между слоями. Многослойный прототип МСХ имеет общие габариты (длина \times ширина \times высота) $14 \times 14 \times 12$ см и массу 4.5 кг.

Разработка оборудования для измерения магнитного поля

Прибор для измерения магнитного поля был разработан одновременно с процессом разработки МП МСХ в связи с тем, что в лаборатории отсутствуют приборы для измерения магнитного поля, а бюджета недостаточно для покупки их на рынке измерительных приборов с широким диапазоном измерений и чувствительностью до 0.4 мВ/мТл. Сердцем измерительного прибора является датчик магнитного поля Холла типа *AD22151* от *Analog Device*. Это высокочувствительный датчик магнитного поля, имеющий встроенную в микросхему температурную компенсацию и хорошую помехозащищенность (рис. 6).

АЦП-преобразователь на *Arduino* имеющий разрешение 10 бит и частоту дискретизации 10 Кбит/с, позволяет легко считывать выходной сигнал датчика. Алгоритм, встроенный в *Arduino*, позволяет точно определять напряженность и изменение во времени магнитного поля. Данные измерения магнитного поля собираются на компьютере через последовательную связь между компьютером и *Arduino*.

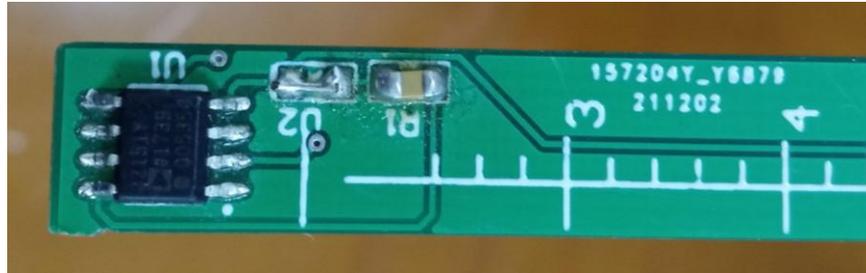


Рис. 6. Датчик AD22151 на измерительном штоте Fig. 6. AD22151 sensor on the measuring rod of the прибор для измерения магнитного поля magnetic field measuring device
*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Габариты разработанного датчика меньше по сравнению с аналогами и составляют 10×10×3 мм, конструкции упростилась, диапазон измерений магнитного поля вырос до 1.25 Тл. Стоимость разработки прибора для измерения магнитного поля составила не более 3500 рублей.

Определение параметров магнитного поля МП МСХ

Важными параметрами магнитного поля МП МСХ являются плотность и неоднородность магнитного поля в зазоре по осям x , y , z . На рисунке 7 представлены результаты измерения плотности магнитного поля вдоль оси z . Плотность магнитного поля в центре зазора МСХ достигает $B_0 = 0.334$ Тл. Область однородного магнитного поля участка значительно расширена за счет пассивации фольгой из кремнистой стали и оптимизирована прокладками между слоями МСХ.

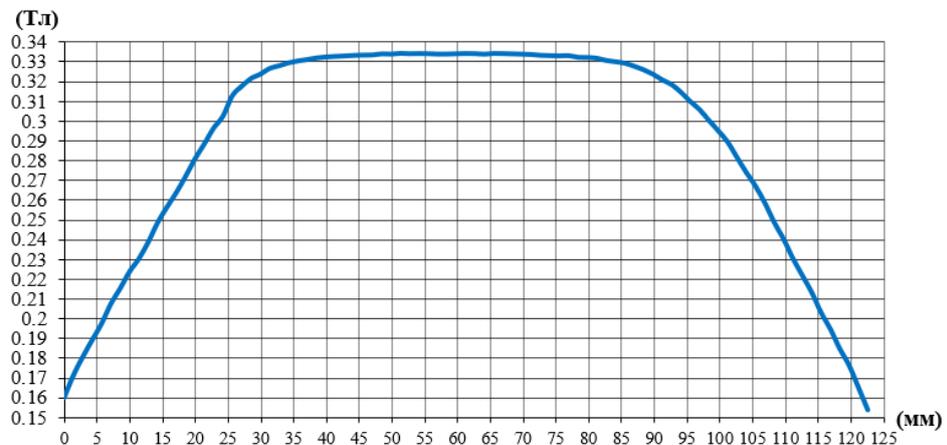


Рис. 7. График плотности магнитного поля в зазоре МП МСХ вдоль оси z Fig. 7. Graph of magnetic field density in the multilayer HMA prototype gap along the z axis
*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Измерения и расчеты для определения неоднородности показывают, что в области с габаритами 12×24×20 мм вокруг центра МП МСХ неоднородность магнитного поля достигает $\Delta B/B_0 = 2000 \text{ ppm}$. Это значение соответствует неоднородности магнитов, используемых для релаксметров ПМР- NP_1 и ПМР- NP_2 . По теории, напряженность магнитного поля $B_0 = 0.334 \text{ Тл}$ позволяет протонам в образце резонировать на частоте $\nu_0 = 14.22 \text{ МГц}$.

Для точной проверки резонансной частоты и возможности использования МП МСХ для портативных релаксметров, он был испытан в составе релаксметра ПМР- NP_2 (КГЭУ-2020). Для поиска резонансной области и частоты используется зонд, намотанный на трубу из ПВХ диаметром 18 мм. В качестве образца используется татарстанская тяжелая нефть, смешанная с бензином, что позволяет легко получать сигналы релаксации T_2 во время испытаний.

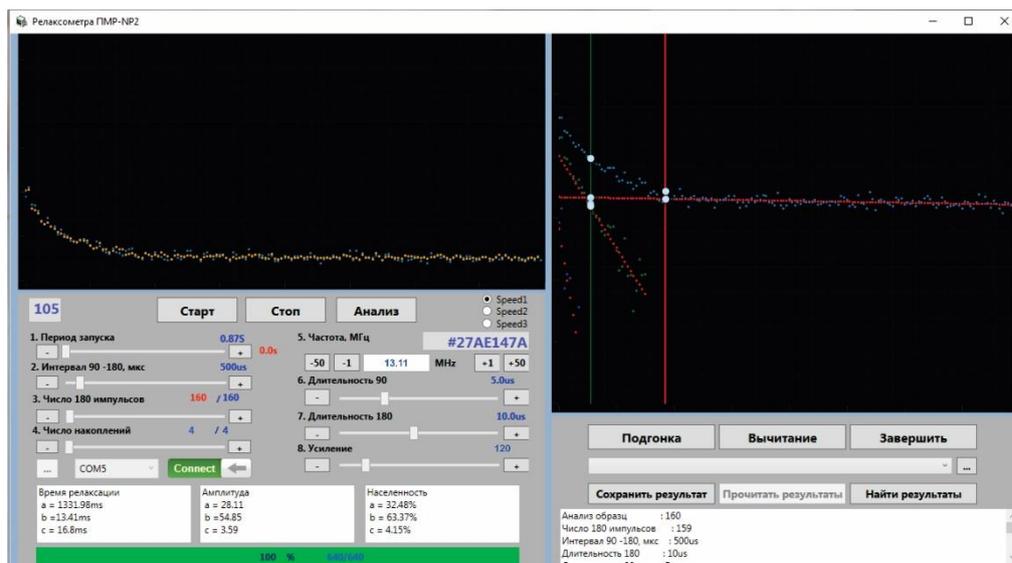


Рис. 8. Программный интерфейс управления релаксметром ПМР- NP_2 при испытании с прототипом МСХ

Fig. 8. PMR- NP_2 relaxometer control software interface when tested with the HMA prototype

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Сначала зонд настраивается на резонанс с теоретически рассчитанной частотой $\nu_0 = 14.22 \text{ МГц}$. Однако сигнал огибающей спин-эхо (СЭ) при данной частоте получен не был. Затем релаксометр настраивался с постепенным уменьшением резонансной частоты до тех пор, пока не был определен сигнал огибающей СЭ для определения времен релаксации T_2 . После многочисленных регулировок резонансная частота релаксметра с разработанным магнитом на МСХ подтверждена на значении $\nu_0 = 13.11 \text{ МГц}$. Программный интерфейс управления релаксметром ПМР- NP_2 представлен на рисунке 8.

Заключение (Conclusions)

Данное исследование является частью работы по разработке усовершенствованного портативного ПМР-релаксметра для применения в онлайн-анализаторных комплексах для экспресс-контроля параметров скважинной жидкости и сырой нефти. Задачи, решаемые в ходе исследования:

- определение факторов, влияющих на качество магнитного поля МП МСХ, и методы оптимизации этих параметров;
- разработка МП МСХ с использованием 3-коаксиальной кольцевой структуры в одном слое МСХ. Прототип магнита имеет габариты 14×14×12 см, массу 4.5 кг с диаметром зазора 30 мм, что позволяет вставить в зазор трубку $\varnothing 30 \text{ мм}$ для анализа проточной жидкости.
- способ улучшения однородности магнитного поля в зазоре МСХ за счет использования высокопроницаемых фольг из кремнистой стали, размещенных перпендикулярно магнитному полю, и использования прокладок между слоями МСХ. Плотность магнитного поля в зазоре МП МСХ достигает $B_0 = 0.334 \text{ Тл}$ с неоднородностью $\Delta B/B_0 = 2000 \text{ ppm}$ в области объемом $\approx 6 \text{ см}^3$ в центре зазора;
- разработан недорогой прибор для измерения магнитных полей на основе датчика Холла и платы *Arduino*. Прибор имеет диапазон измерения до 1.25 Тл при чувствительности

0.4 мВ/мТл. Прибор устойчив к помехам магнитного поля и не меняет чувствительность при изменении температуры в зоне измерения;

– испытания на протонном магнитном резонансе с МП МСХ показали, что прототип нормально работал с релаксометром ПМР- NP_2 на частоте $\nu_0 = 13.11$ МГц.

Литература

1. М. А. Юрчик, Н. В. Дукмасова. Цифровизация: новая эра для нефти и газа // Система управления экологической безопасностью: сборник трудов XIV международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 20-21 мая 2020 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2020 г. - С. 281-286.
2. Азиева Р.Х., Таймасханов Х.Э.. Необходимость И Возможности Использования Цифровых Технологий В Нефтегазовой Отрасли В Условиях Цифровой Трансформации Экономики.// Известия Санкт-Петербургского Государственного Экономического Университета. Номер: 5 (125) Год: 2020 С. 178-185.
3. Воробьев А.Е., Тчаро Х., Воробьев К.А. Цифровизация нефтяной промышленности: «интеллектуальный» нефтепромысел // *Вестник Евразийской науки*, 2018, №3. С. 71-87.
4. Сафиуллин Б.Р., Козелкова В.О., Кашаев Р.С., и др. Очистка нефти от асфальтено-смолов и парафинов // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т.24. № 5. С. 166-178.
5. Козелков Олег Владимирович. Методы и средства экспресс-контроля характеристик скважинной жидкости и нефти на базе протонной магнитной резонансной релаксометрии: Дис.докт. техн. наук. Казань; 2022.
6. Кашаев Р.С., Свинин А. Ю., Козелков О.В.. Минимизация ошибок эксперимента в методе ПМР и возможности получения спектра времен релаксации. // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2018, №11-12, т.20. с.152-160.
7. K. Halbach, "Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material," Nucl. Instrum. Methods. Feb. 1980, vol. 169, no. 1, pp. 1–10.
8. H. Raich and P. Blümler, "Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets: NMR Mandhalas," Concepts Magn. Reson. Part B Magn. Reson. Eng., Oct. 2004, vol. 23B, no. 1, pp. 16–25.
9. Нгуен Дык Ань, Кашаев Р.С. Усовершенствование модели магнита хальбаха для релаксометра протонного магнитного резонанса/ VIII Национальной н/пр. конф. Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ. (Казань 8-9 декабря 2022г.). – Казань, 2022. – Т.1. – С.82-87.
10. Amir D. Arslanov, Rustem S. Kashaev, Oleg V. Kozelkov. System of Oil Express Flow Control on the Basis of Proton Magnetic Resonance Relaxometry. 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon 2024), 24-30 March 2024. Sochi, Russia . pp. 214-219.
11. G. Moresi, R. Magin. Miniature permanent magnet for table – top NMR. Concepts in Magnetic Resonance Part B Magnetic Resonance Engineering 19B (1). 2003. pp: 35-43. <https://doi.org/10.1002/cmr.b.10082>.
12. Soltner, H. and Blümler, P., Dipolar Halbach magnet stacks made from identically shaped permanent magnets for magnetic resonance. Concepts Magn. Reson., 36A(4), pp: 211-222, 2010 <https://doi.org/10.1002/cmr.a.20165>.
13. Bernhard Blümich, Ernesto Danieli, Federico Casanova, et al. Mobile sensor for high resolution NMR spectroscopy and imaging. Journal of Magnetic Resonance, Volume 198, Issue 1, 2009, Pages 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2009.01.022>.
14. Cooley, C.Z., Stockmann, J.P., Armstrong, B.D., et al. Two – dimensional imaging in a lightweight portable MRI scanner without gradient coils. Magn. Reson. Med. 73(2), Pages 872–883 (2015). <https://doi.org/10.1002/mrm.25147>.
15. A. Bogaychuk, V. Kuzmin; Accounting for material imperfections in the design and optimization of low cost Halbach magnets. Rev. Sci. Instrum. 1 October 2020; 91 (10): 103904. <https://doi.org/10.1063/5.0013274>.
16. Свинин А.Ю., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Разработка магнитной системы датчика для ПМР-анализатора. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4 С. 115-122. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-115-122.
17. O'Reilly, T., et al., In vivo 3D brain and extremity MRI at 50 mT using a permanent magnet Halbach array. Magnetic Resonance in Medicine, 2021. 85(1): p. 495-505.
18. C. Z. Cooley et al., "Design of Sparse Halbach Magnet Arrays for Portable MRI Using a Genetic Algorithm," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 1, pp. 1-12, Jan. 2018, Art no. 5100112, doi: 10.1109/TMAG.2017.2751001.

Авторы публикации

Нгуен Дык Ань – аспирант кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. *ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-8870-3855>. Email: navupro1991@gmail.com*

Кашаев Рустем Султанхамитович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. *ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8582-1577>. Email: kashaev2007@yandex.ru*

Козелков Олег Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. *ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6067-8719>. Email: ok.1972@list.ru*

References

1. M. A. Yurchik, N. V. Dukmasova. Tsifrovizatsiya: novaya era dlya nefiti i gaza // Sistema upravleniya ekologicheskoi bezopasnost'yu: sbornik trudov XIV mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Ekaterinburg, 20-21 maya 2020 g.). — Ekaterinburg: UrFU, 2020 g. - pp. 281-286. (In Russ).
2. Azieva R.Kh., Taimaskhanov Kh.E.. Neobkhodimost' I Vozmozhnosti Ispol'zovaniya Tsifrovyykh Tekhnologii V Neftegazovoi Otraski V Usloviyakh Tsifrovoi Transformatsii Ekonomiki.// Izvestiya Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Ekonomicheskogo Universiteta. Nomer: 5 (125) God: 2020 pp. 178-185.(In Russ).
3. Vorob'ev A.E., Tcharo Kh., Vorob'ev K.A. Tsifrovizatsiya neftyanoi promyshlennosti: «intellektual'nyi» neftepromysel // Vestnik Evraziiskoi nauki, 2018, №3. pp. 71-87.(In Russ).
4. Safiullin B.R., Kozelkova V.O., Kashaev R.S.,i dr. Ochistka nefiti ot asfal'teno-smol i parafinov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI. 2022. T.24. № 5. pp. 166-178.(In Russ).
5. Kozelkov Oleg Vladimirovich. Metody i sredstva ekspress-kontrolya kharakteristik skvazhinnoi zhidkosti i nefiti na baze protonnoi magnitnoi rezonansnoi relaksometrii: Dis.dokt. tekhn. nauk. Kazan'; 2022.(In Russ).
6. Kashaev R.S., Svinin A. Yu., Kozelkov O.V.. Minimizatsiya oshibok eksperimenta v metode PMR i vozmozhnosti polucheniya spektra vremen relaksatsii. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI. 2018, №11-12, t.20. pp.152-160.(In Russ).
7. K. Halbach, “Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material,” Nucl. Instrum. Methods. Feb. 1980, vol. 169, no. 1, pp. 1–10.
8. H. Raich and P. Blümler, “Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets: NMR Mandhalas,” Concepts Magn. Reson. Part B Magn. Reson. Eng., Oct. 2004, vol. 23B, no. 1, pp. 16–25.
9. Nguen Dyk An', Kashaev R.S. Uovershenstvovannie modeli magnita khal'bakha dlya relaksometra protonnogo magnitnogo rezoansa/ VIII Natsional'noi n/pr. konf. Priborostroenie i avtomatizirovanniyi elektroprivod v TEK i ZhKKh. (Kazan' 8-9 dekabrya 2022g.). – Kazan', 2022. – T.1. – pp.82-87.(In Russ).
10. Amir D. Arslanov, Rustem S. Kashaev, Oleg V. Kozelkov. System of Oil Express Flow Control on the Basis of Proton Magnetic Resonance Relaxometry. 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon 2024), 24-30 March 2024. Sochi, Russia . pp. 214-219.
11. G. Moresi, R. Magin. Miniature permanent magnet for table – top NMR. Concepts in Magnetic Resonance Part B Magnetic Resonance Engineering 19B (1). 2003. pp: 35-43. <https://doi.org/10.1002/cmr.b.10082>.
12. Soltner, H. and Blümler, P., Dipolar Halbach magnet stacks made from identically shaped permanent magnets for magnetic resonance. Concepts Magn. Reson., 36A(4), pp: 211-222, 2010 <https://doi.org/10.1002/cmr.a.20165>.
13. Bernhard Blümich, Ernesto Danieli, Federico Casanova, et al. Mobile sensor for high resolution NMR spectroscopy and imaging. Journal of Magnetic Resonance, Volume 198, Issue 1, 2009, Pages 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2009.01.022>.
14. Cooley, C.Z., Stockmann, J.P., Armstrong, B.D., et al. Two – dimensional imaging in a lightweight portable MRI scanner without gradient coils. Magn. Reson. Med. 73(2), Pages 872–883 (2015). <https://doi.org/10.1002/mrm.25147>.
15. A. Bogaychuk, V. Kuzmin; Accounting for material imperfections in the design and optimization of low cost Halbach magnets. Rev. Sci. Instrum. 1 October 2020; 91 (10): 103904. <https://doi.org/10.1063/5.0013274>.

16. Svinin A.Yu., Kashaev R.S., Kozelkov O.V. Razrabotka magnitnoi sistemy datchika dlya PMR-analizatora. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI. 2020. T. 22. № 4 S. 115-122. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-115-122.(In Russ).

17. O'Reilly, T., et al., In vivo 3D brain and extremity MRI at 50 mT using a permanent magnet Halbach array. Magnetic Resonance in Medicine, 2021. 85(1): p. 495-505.

18. C. Z. Cooley et al., "Design of Sparse Halbach Magnet Arrays for Portable MRI Using a Genetic Algorithm," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 54, no. 1, pp. 1-12, Jan. 2018, Art no. 5100112, doi: 10.1109/TMAG.2017.2751001.

Authors of the publication

Nguyen Duc Anh – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-8870-3855>. Email: navypro1991@gmail.com

Rustem S. Kashaev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8582-1577>. Email: kashaev2007@yandex.ru

Oleg B. Kozelkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6067-8719>. Email: ok.1972@list.ru

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **08.01.2025 г.**

Отредактировано **31.01.2025 г.**

Принято **25.02.2025 г.**