



РАЗРАБОТКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДАТЧИКА ДЛЯ ПМР-АНАЛИЗАТОРА

А.Ю. Свинин¹, Р.С.Кашаев², О.В. Козелков³

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: Разработка средств измерений в области ядерного (протонного) магнитного резонанса является важнейшей задачей в химии, нефтехимии, медицине и других науках. Создание однородного магнитного поля зачастую определяет эффективность и точность конечных результатов измерений методом протонного магнитного резонанса, поэтому основной задачей данной работы является разработка магнитной системы Хальбаха на основе конструктивных задач и параметров проектируемого ПМР-анализатора. В данной работе описан процесс разработки и представлены результаты создания ряда основных компонентов магнитной системы датчика для проточного ПМР-анализатора. Произведён анализ различных вариантов сборок магнита Хальбаха на степень однородности распределения магнитного поля, разработана и изготовлена 3D-модель магнитной сборки Хальбаха для магнитной системы датчика ПМР-анализатора с использованием редкоземельных постоянных магнитов. Описан процесс разработки и создания кварцевого генератора по схеме Пирса требуемой частоты для приёмно-передающей катушки магнитной системы датчика ПМР-анализатора. Результаты и опыт могут быть использованы для комплексного расчета при проектировании магнитных датчиков с высокой степенью однородности магнитного поля, а также устройств, использующих в своей основе метод протонного магнитного резонанса.

Ключевые слова: ядерный (протонный) магнитный резонанс, приёмно-передающая катушка, магнитная система Хальбаха, ПМР-анализатор, кварцевый генератор.

Благодарности: Авторы благодарны кафедре Приборостроения и мехатроники Казанского государственного энергетического университета за помощь в разработке оборудования.

Для цитирования: 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.

THE DEVELOPMENT OF THE MAGNETIC SYSTEM OF SENSOR FOR NMR-ANALYSER

AY. Svinin¹, RS. Kashaev², OV. Kozelkov³

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: The enhancement of the measuring instruments accuracy has always been the most crucial task for engineers and scientists. In particular, in the field of nuclear magnetic resonance, the creation of uniform magnetic field often defines the results of measurements, therefore the main task of this study is to develop Halbach magnet array based on design characteristics of developing NMR-analyzer. The research describes the development process of the main sensor's magnetic system components for continuous-flow portable NMR-analyzer. The scientific paper makes a different variations analysis of Halbach magnet arrays on the degree of the magnetic field homogeneity, shows the process of development and production of the 3D-framework for Halbach magnet array for NMR-analyzer. The article also gives information on the design of quartz generator based on Pierce oscillator circuit for receiver-transmitter coil of the NMR-analyzer's sensor. The results could be useful for the magnetic sensors design with high degree of homogeneity, measuring instruments and devices using the method of nuclear magnetic resonance in its foundation.

Key words: nuclear (proton) magnetic resonance, receiving translating coil, Halbachmagnet array, NMR-analyzer, quartz generator.

Acknowledgments: The authors are grateful to the Department of Instrument Engineering and Mechatronics of Kazan State Power Engineering University for support in the development of equipment.

For citation: Svinin AY, Kashaev RS, Kozelkov OV. The development of the magnetic system of sensor for PMR-analyser. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(4):115-122. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-115-122.

Введение

Явление ядерного (протонного) магнитного резонанса (далее ПМР или ЯМР) является сегодня одним из самых информативных и перспективных методов исследования структуры и динамических изменений молекул. ПМР-спектроскопия позволяет регистрировать переходы между магнитными энергетическими уровнями атомных ядер, вызываемые радиочастотным излучением. Сфера применения ПМР расширяется с каждым годом, охватывая всё новые области применения [1], что подтверждает актуальность данной работы. Одним из самых сложных элементов ПМР-анализаторов является магнитная система датчика, от которой во многом зависит погрешность измерений [2]. Магнитная сборка Хальбаха (МСХ) [3] с дискретными магнитами, которая широко используется в построении магнитного датчика ПМР-анализаторов [4], обладает большим количеством преимуществ, однако не лишена недостатков.

Целью данной работы является разработка составных частей магнитной системы датчика разрабатываемого проточного портативного ПМР-анализатора для оперативного контроля состава жидкостей, полимеров и твёрдых веществ [5], а именно каркаса для магнитной сборки Хальбаха, эюр однородностей магнитных полей, кварцевого генератора для прямо-передающей катушки.

Разработка каркаса для магнитной сборки Хальбаха

Магнитная сборка Хальбаха (далее МСХ) представляет собой концепцию специального построения постоянных магнитов, расположенных в пространстве в определённом порядке, с учётом полярности каждого отдельного магнита. Главная задача магнитной сборки Хальбаха – создать однородное поперечное магнитное поле внутри сборки, позволяющее использовать катушки внутри магнита [6]. Другими ее достоинствами являются хорошая помехоустойчивость и высокое значение поля. МСХ усиливает магнитное поле в её центре и поглощает внешние силовые линии поля.

Существуют несколько вариантов выполнения сборки: клиноподобные, квадратные, цилиндрические, шестиугольные конструкции и кольцевая. Далее будет рассмотрен кольцевой вариант, как доступный и конструктивно наиболее просто реализуемый из набора отдельных элементов - постоянных магнитов на редкоземельных сплавах $NdFeB$.

Однородность магнитного поля бесконечно длинного кольца зависит от угла Φ_1 положения центра постоянного магнита и угловой ориентации его намагниченности Φ_2 , как это показано на рис.1. Отношение между этими величинами представлено следующим уравнением (1):

$$\Phi_2 = k\Phi_1, \quad (1)$$

Если $k = 2$, магнитная сборка Хальбаха усиливает магнитное поле в её центре и поглощает внешние излучения как показано на рис. 1-6. В этом случае, магнитное поле в диаметре отверстия будет полностью однородным [7]. Статическое магнитное поле B_0 в центре кольца представлено уравнением (2):

$$B_0 = B_r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right), \quad (2)$$

где B_0 – магнитная индукция поля в центре; B_r – остаточная намагниченность материала (магнитов); r_1 –внутренний радиус кольца; r_2 – внешний радиус кольца.

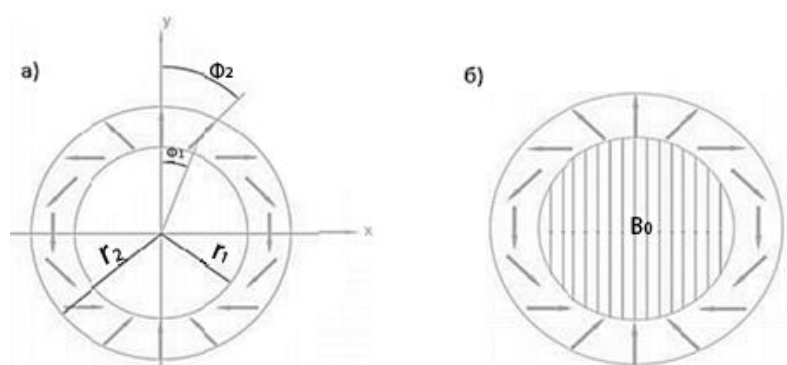


Рис. 1.Магнитная сборка Хальбаха а) сила поля в центре зависит от амплитуды намагниченности, внутреннего и внешнего радиуса кольца б) магнитная сборка Хальбаха усиливает магнитное поле в её центре и поглощает внешние излучения

При изменении коэффициента k реализуются варианты полей, показанные на рис. 2.

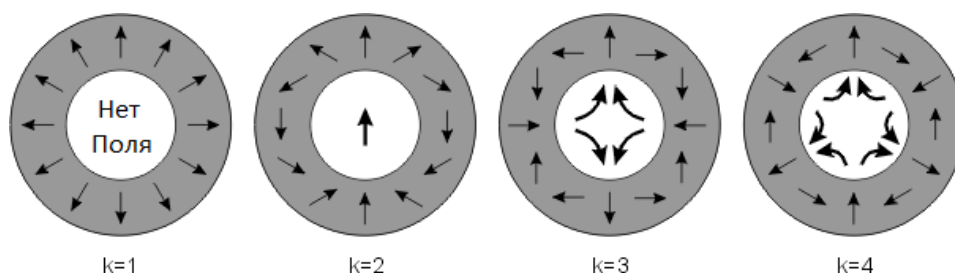


Рис. 2. Изменение магнитного поля в зависимости от изменения коэффициента k

Идеальное кольцо Хальбаха показано на рис. 1-б, однако поляризовать непрерывное кольцо в соответствии с представленными направлениями полярности практически невозможно. Для того, чтобы преодолеть эту проблему было решено разделить кольцо Хальбаха на равное число идентичных постоянных магнитов с числом n .

На основе этой идеи МСХ с дискретными магнитными [8] такой вариант сборки не только унаследовал достоинства магнита Хальбаха, но также имеет ряд преимуществ: она дешевле в изготовлении и её значительно проще собрать, так как состоит из n отдельных магнитов (рис. 3-а, 3-б, 3-в).

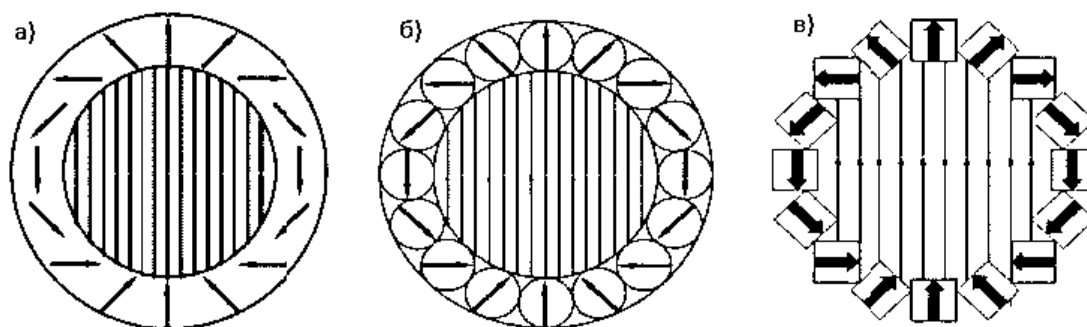


Рис. 3. Магнитная сборка Хальбаха. а) в общем виде б) с постоянными магнитами круглой формы в) с постоянными магнитами квадратной формы.

Для оценки влияния количества постоянных магнитов на однородность магнитного поля, можно рассмотреть магнитные сборки с $n=4, 8, 16$, и 32-я постоянными квадратными в сечении магнитами в виде параллелепипедов, расположенными как на рис. 4.

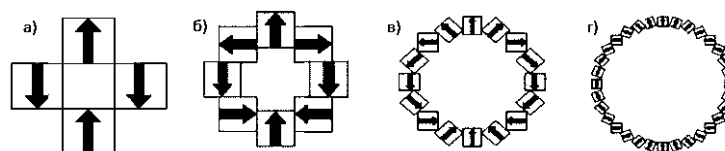


Рис. 4. Варианты магнитных сборок с разным числом квадратных постоянных магнитов а) $n=4$, б) $n=8$, в) $n=16$, г) $n=32$.

С помощью 2D-моделирования можно оценить распределение магнитного поля внутри МСХ. В качестве исходного материала для моделирования был выбран постоянный магнит *FeNdB-37* на основе сплава из редкоземельных элементов с магнитной проницаемостью $\mu = 1,049$ и коэрцитивной силой $H_c = 911$ кА/м.

Плотность магнитного поля симулирована в 2D, и показана на рис 5. Направление индукции магнитного поля B_0 определено осью ординат. Из рис.5. наглядно прослеживается, как поле усиливается в центре и поглощается снаружи. По мере увеличения количества магнитов (n) увеличивается и диаметр кольца МСХ и, как следствие, уменьшается сила магнитного поля в центре, но увеличивается общая однородность магнитного поля.

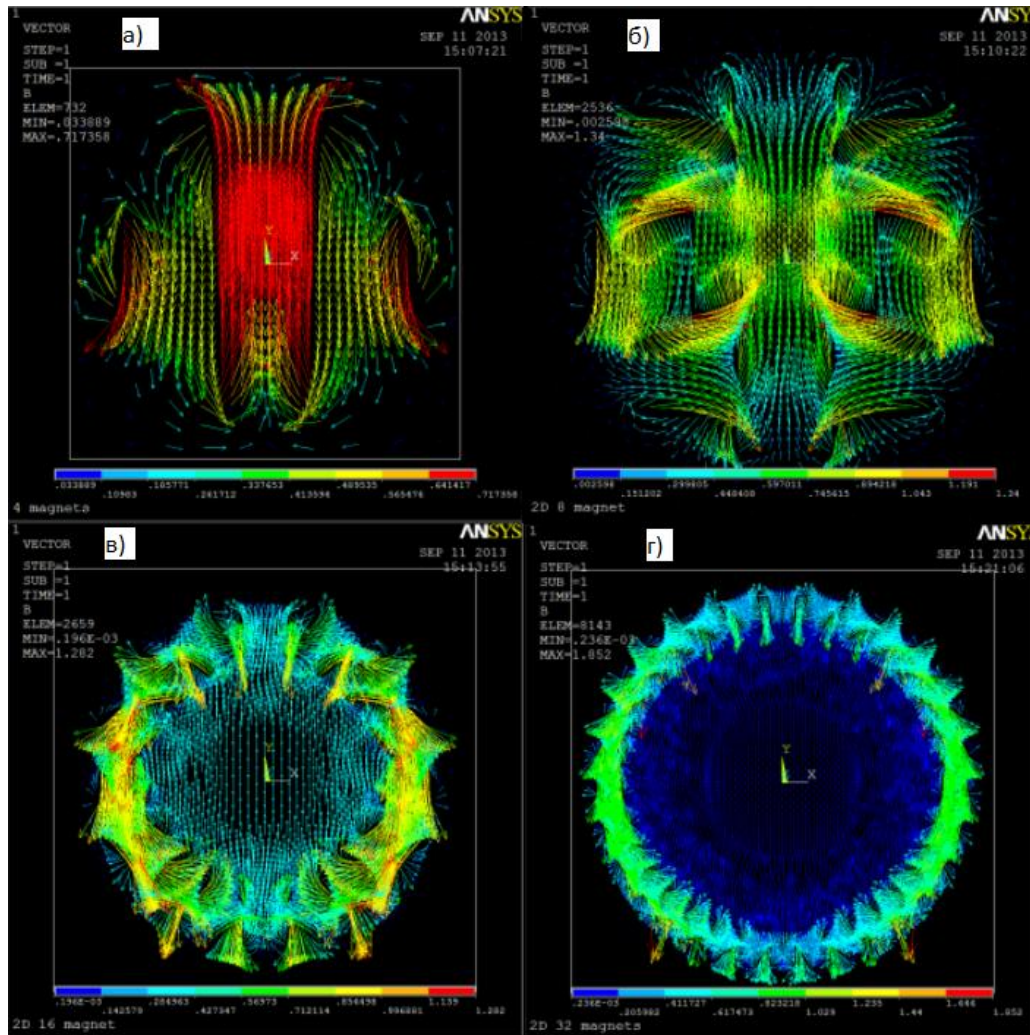


Рис. 5. Распределение плотности магнитных полей магнитных сборок с разным числом n квадратных постоянных магнитов а) $n=4$, б) $n=8$, в) $n=16$, г) $n=32$

На основе анализа модели распределения магнитных полей, а также поставленных конструктивных задач было решено использовать 16 постоянных квадратных редкоземельных магнитов со стороной 5 мм.

При проектировании 3D-модели МСХ, используя формулу (1) расчета углов Φ_1 и Φ_2 , находится симметричная позиция [9] каждого отверстия (рис. 6) для расположения постоянного магнита: $2 \cdot 22,5 = 45^\circ$.

Каркас МСХ был изготовлен из пластика методом 3D-печати. Из-за особенности 3D-печати расстояние между зазорами не должно было превышать 1 мм, что также накладывало определенные ограничения при разработке модели. Внутренний диаметр конечной модели составил 30 мм. Внешний диаметр магнитной сборки Хальбаха составил 50 мм, ширина – 20 мм (рис 7).

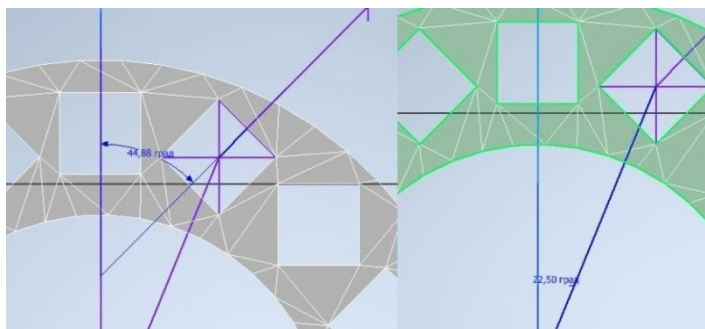


Рис. 6. Расчет положения отверстия для магнита на основе положения центра постоянного магнита и угловой ориентации его намагниченности

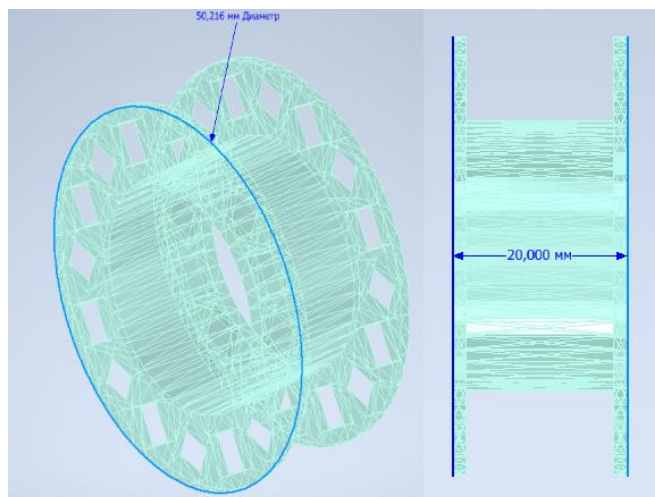


Рис. 7. 3D-модель каркаса магнитной сборки (вид со стороны и сбоку)

После 3D печати и вставки магнитов в пазы МСХ имеет вид (рис. 8). Распределение магнитного поля получившегося образца будет иметь вид, соответствующий рис. 5-в.

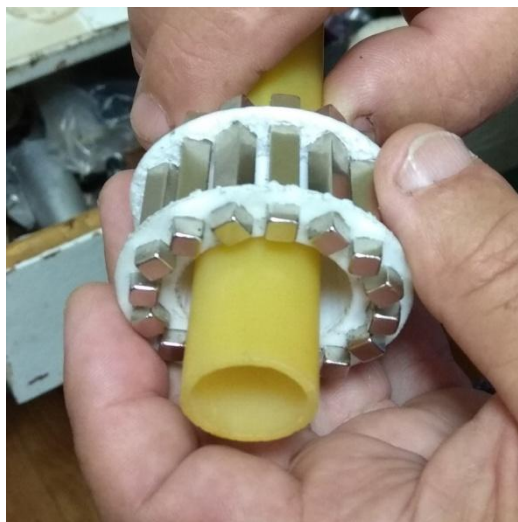


Рис. 8. Распечатанный каркас по 3D-модели со вставленными магнитами в МСХ и трубкой для потока жидкости в проточном ПМР-анализаторе

Разработка кварцевого генератора для прямо-передающей катушки

Портативный ПМР-релаксометр состоит из нескольких важных компонентов: магнитная система, радиочастотные катушки и электронного блока, включающего генератор резонансной частоты, генератора импульсных последовательностей, клапана, предусилителя, передатчика, приемника, АЦП, контроллера, компьютера и системы передачи информации на диспетчерский пульт [10]. Приемно-передающая катушка принимает сигнал и облучает анализируемое вещество последовательностями импульсов [11].

Переносной проточный ПМР-анализатор, в который входит ПМР-релаксометр, включает в нашем случае, также систему пробоотбора [12] и МСХ с проточным датчиком на рис.8. Магнитная система создает статическое магнитное поле B_0 , которое ориентирует намагниченность M в исследуемом веществе вдоль поля [13]. Сила магнитного поля определяет уровень поляризации, следовательно, и точность измерений. Кроме того, оно определяет протонный резонанс на частоте $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ измерений в соответствии с формулой:

$$\omega_0 = 2\pi\nu_0 = \gamma B_0, \quad (3)$$

где ω_0 – угловая радиочастота, на которой облучается образец переменным магнитным полем B_1 на частоте $\omega_0 = \pi\nu_0 = \gamma B_0$, $\gamma = 4258$ Гц/Гс – гиромагнитное отношение для протонов.

Принцип построения кварцевого генератора, генерирующего сигнал на нашей резонансной частоте $\nu_0 = 6,5$ МГц основан на ёмкостной трехточке по схеме Пирса [14] (рис. 9), в которой биполярный транзистор включен по схеме с общим эмиттером. Резисторы $R1$ и $R2$ задают режим работы транзистора $T1$ по постоянному току, и выбираются исходя из тока покоя транзистора 1-5 мА в зависимости от частоты генерируемого сигнала. Для поворота фазы на 180° дополнительно вводятся конденсаторы $C1$ и $C2$, которые будут обеспечивать возбуждение усилителя через положительную обратную связь. При возбуждении кварцевого резонатора на нечётных механических гармониках кварца включается катушка индуктивности $L1$. Питание кварцевого генератора может быть обеспечено разработанным на кафедре «Приборостроения и мехатроники» блоком импульсного питания для портативного ПМР-анализатора [15].

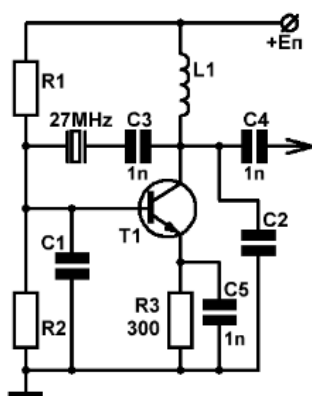


Рис. 9. Схема Пирса с выходной частотой 6,5 МГц

Разводка схемы на печатной плате имела следующий вид (рис. 10)

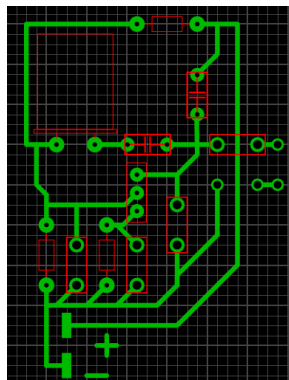


Рис. 10. Моделирование печатной платы кварцевого резонатора

Общий вид кварцевого генератора представлен на рис. 11



Рис. 11. Кварцевый генератор на 6,5 МГц после сборки

Заключение

Был произведён анализ различных магнитных сборок Хальбаха на предмет зависимости между количеством постоянных магнитов и однородностью магнитного поля, а также рядов параметров, от которых зависит распределение магнитного поля внутри и снаружи различных вариантов магнитных сборок Хальбаха.

На основе сделанных выводов и конструктивных требований, была разработана и распечатана 3D-модель каркаса для магнитной сборки Хальбаха постоянных редкоземельных магнитах.

Построен кварцевый резонатор на радиочастоту $\nu_0 = 6,5$ МГц для приёмо-передающей катушки датчика проточного портативного ПМР-релаксометра.

Литература

1. Peter Blümler, Daniel Holland, John Van Duynhoven, Bruce Balcom, Eichii Fukushima, Martin Hurlimann, Anatoly Legchenko, Nan Sun, Michelle Espy, Andrew McDowell, Matthew Rosen, Bernard Blümich, William Price. Mobile NMR and MRI: developments and applications. 2015.
2. Кашаев Р.С., Свинин А. Ю., Козелков О.В. Минимизация ошибок эксперимента в методе ПМР и возможности получения спектра времен релаксации. Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2018. №11-12. Т.20. С.152-160.
3. Mitchell J., Gladden L.F., Chandrasekera T.C. Low-field permanent magnets for industrial process and quality control // Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy.
4. Hung Dang Phuc. Development of portable low field NMR magnet: Design and construction. Medical Imaging. INSA de Lyon, 2015. English. fFNNT: 2015ISAL0007ff. fftel-01247499f
5. Кашаев Р.С., Газизов Э.Г. Оперативный контроль компонентов битума и нефти методом ядерного магнитного резонанса при воздействии облучения в видимой инфракрасной области спектра. Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2010. № 7-8. С. 46-62.
6. Sophia Anferova., Vladimir Anferov., Juliane Arnold., et al. Improved Halbach sensor for NMR scanning of drill cores // Magnetic resonance imaging. 2007.
7. Hanspeter Raich., Peter Blümler. Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets: NMR Mandhalas // Concepts in Magnetic Resonance Part B Magnetic Resonance Engineering. 2012.23B(1).pp.16-25.
8. Bernhard Blümich., Christian Rehorn., Asaf Zia. Magnets for Small-Scale and Portable NMR: Technologies and Systems // Micro and Nano Scale NMR. 2018. pp.1-20.
9. Wentao Liu., Federico Casanova., Bernhard Blümich., et al. An Efficacious Target-Field Approach to Design Shim Coils for Halbach Magnet of Mobile NMR Sensors // Applied Magnetic Resonance. 2012.
10. Кашаев Р.С., Кубанго Б.Э. Проточные ЯМР-анализаторы для контроля скважинной жидкости, сырой нефти и нефтяных дисперсных систем. 2016.
11. Meiboom S., Gill D. // Review of Scientific Instruments. (1958).
12. Кашаев Р.С., Козелков О.В., Кубанго Б.Э. Проточные протонные магнитно-резонансные анализаторы для контроля скважности жидкости по ГОСТ Р 8.615-2005 ГСИ. Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2017. № 1-2. Т.19. С. 137-151.
13. Bottomley P.A. A versatile magnetic field gradient control system for NMR imaging // Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1981.
14. Кварцевые генераторы на биполярных и полевых транзисторах, а также на цифровых КМОП и ТТЛ микросхемах [Электронный ресурс]. Доступно по :https://vpyaem.ru/inf_genQua.html Ссылка активна на: 20 апреля 2019.
15. Ты Киен Нгуен, Кашаев Р.С., Козелков О.В. Импульсный блок питания для

портативного протонно-магнитного резонансного релаксометра. Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2019.

Авторы публикации

Свинин Андрей Юрьевич – студент, Казанский государственный энергетический университет.

Кашаев Рустем Султанхамитович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

Козелков Олег Владимирович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Peter Blümmler, Daniel Holland, John Van Duynhoven, et al. *Mobile NMR and MRI: developments and applications*. 2015.
2. Kashaev RS, Svinin AYu, Kozelkov OV. Minimizatsiya oshibok eksperimenta v metode PMR i vozmozhnosti polucheniya spektra vremen relaksatsii. *Izvestiya VUZ ov. Problemy energetiki*. 2018; 20(11-12):152-160.
3. Mitchell J, Gladden LF, Chandrasekera TC, et al. Low-field permanent magnets for industrial process and quality control. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*.
4. Hung Dang Phuc. Development of portable low field NMR magnet: *Design and construction. Medical Imaging*. INSA de Lyon, 2015. English. ffNNT: 2015ISAL0007ff. fftel-01247499f.
5. Kashaev RS, Gazizov EG. Operativnyi kontrol' komponentov bituma i nefti metodom yadernogo magnitnogo rezonansa pri vozdeistvii oblucheniya v vidimoi i infrakrasnoi oblasti spektra. *Izvestiya VUZov. Problemy energetiki*. 2010;7-8:46-62.
6. Sophia Anferova, Vladimir Anferov, Juliane Arnold, et al. Improved Halbach sensor for NMR scanning of drill cores. *Magnetic resonance imaging*. 2007.
7. Hanspeter Raich, Peter Blümmler. Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets: NMR Mandhalas Pt B. *Concepts in Magnetic Resonance. Magnetic Resonance Engineering*. 201;23B(1):16-25.
8. Bernhard Blümich, Christian Rehorn, Asaf Zia. Magnets for Small-Scale and Portable NMR: Technologies and Systems. *Micro and Nano Scale NMR*. 2018. pp.1-20.
9. Wentao Liu, Federico Casanova, Bernhard Blümich, DonglinZu. An Efficacious Target-Field Approach to Design Shim Coils for Halbach Magnet of Mobile NMR Sensors. *Applied Magnetic Resonance*. 2012.
10. Kashaev RS, Kubango BE. *Protochnye YaMR-analizatory dlya kontrolya skvazhinnoi zhidkosti, syroi nefti i neftyanykh dispersnykh sistem*. 2016.
11. Meiboom S, Gill D. *Review of Scientific Instruments*. (1958).
12. Kashaev RS, Kozelkov OV, Kubango BE. Protochnye protonnye magnitno-rezonansnye analizatory DLYa kontrolya skvazhnosti zhidkosti po GOST R 8.615-2005 GSI. *Izvestiya VUZov. Problemy energetiki*. 2017;19(1-2):137-151.
- 13.. Bottomley PA. A versatile magnetic field gradient control system for NMR imaging. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1981.
14. Kwartseveye generatory na bipolyarnykh i polevykh tranzistorakh, a takzhe na tsifrovyykh KMOP i TTL mikroskhemakh [Elektronnyi resurs]. Available at: https://vpayaem.ru/inf_genQua.html. Accessed to: 20 Apr 2019.
15. T'i Kien Nguen, Kashaev RS, Kozelkov OV. Impul'snyi blok pitaniya dlya portativnogo protonno-magnitnogo rezonansnogo relaksometra. *Izvestiya VUZov. Problemy energetiki*. 2019.

Authors of publication

Andrei Y. Svinin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Rustem S. Kashaev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Kozelkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

02 июня 2020г.