

УДК 537.6

© А. Г. Гилев, В. А. Ульянов, С. И. Калинин, М. В. Дьячков, Г. Е. Шмелев, 2019

ЭЛЕКТРОМАГНИТ УЗЛА ОБРАЗЦА РЕФЛЕКТОМЕТРА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ РЕАКТОРА ИР-8 НИЦ "КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ"

Разработан и создан электромагнит узла образца для рефлектометра поляризованных нейтронов (РПН), предназначенный для установки на "НЗ"-нейтроноводе реактора ИР-8 НИЦ "Курчатовский институт". Особенностью данного электромагнита являются повышенные требования к величине (200 мТл) и однородности индукции магнитного поля (максимальное отклонение направления вектора индукции от вертикали не более 2 %), а также компактности. Расчетные характеристики магнита подтверждены результатами экспериментальных измерений.

Кл. сл.: электромагнит, однородность индукции магнитного поля, рефлектометр поляризованных нейтронов

ВВЕДЕНИЕ

Рефлектометр поляризованных нейтронов (РПН) на "НЗ"-нейтроноводе реактора ИР-8 НИЦ "Курчатовский институт" создается с целью изучения различных физических свойств зеркальных однослойных и многослойных образцов, используемых для создания нейтронно-оптических устройств. Узел образца РПН должен позволять осуществлять воздействие на образец магнитного поля, при этом ориентация исследуемого зеркального образца относительно падающего поляризованного нейтронного пучка не должна нарушаться.

Для решения задачи изучения свойств зеркальных образцов при комнатной температуре в магнитном поле до 200 мТл был рассчитан электромагнит, который размещается на дистанционно управляемой юстировочной платформе, которая в свою очередь устанавливается на виброустойчивое основание.

К основным проблемам при создании электромагнита, требующим новых научно-технических решений, можно отнести:

- создание необходимой области однородности с заданным значением магнитного поля не менее 200 мТл;
- минимизация массы и габаритов (масса — не более 200 кг, габариты — не более 740×440×680 мм);
- минимизация тепловых потерь в катушках намагничивания электромагнита;
- отвод тепла от катушек намагничивания электромагнита.

Источники неоднородности магнитного поля

в зазоре можно условно разделить на следующие подгруппы [1]:

- связанные с конечной величиной магнитной проницаемости;
- связанные с краевыми эффектами;
- связанные с неоднородностью магнитной структуры полюсов.

Для создания оптимального электромагнита нужно минимизировать вклад каждого источника неоднородности.

Анализ существующих электромагнитов для рефлектометров показал, что описанные в открытых источниках образцы представляют собой либо морально устаревшие и не имеющие актуальной значимости разработки [1], либо не отвечающие заданным требованиям, касающимся размеров зоны однородности, к значению индукции магнитного поля [2, 3]. В связи с этим возникает необходимость в создании электромагнита, отвечающего перечисленным выше для узла образца рефлектометра характеристикам.

В данной работе приводятся результаты расчета и экспериментальные данные измерений магнитных параметров электромагнита, созданного для узла образца рефлектометра поляризованных нейтронов.

НОВЫЕ ПОДХОДЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА УЗЛА ОБРАЗЦА РПН

При разработке электромагнита для узла образца РПН расчеты проводились с помощью САПР на основе метода конечных элементов. При этом были применены следующие не использовавшиеся ранее в аналогичных задачах методики.

Табл. 1. Основные характеристики обмоточного провода

Марка провода	Нормативный документ	Температурный индекс	Тип изоляции	Материал проводника	Применение
ПЭТВ-2	ТУ 16-705.110-79	130 °С	Полиэфир	Медь	Для обмоток электрических машин, аппаратов и приборов

– Использование в качестве материала магнитопровода и полюсных наконечников сплава с высокой индукцией насыщения.

– Использование особого профиля полюсных наконечников. Особенностью данного профиля является выступ в центральной части, форма которого позволяет обеспечить высокую однородность поля в рабочей области магнитной системы. Эта форма и толщина выступа выбиралась в зависимости от размера рабочей области и требуемой однородности поля.

– Использование особого профиля магнитопровода, который позволяет замкнуть весь магнитный поток в системе, тем самым минимизировав паразитные утечки поля в окружающее пространство.

– Расположение катушек намагничивания электромагнита симметрично в непосредственной близости от рабочей зоны, что создает необходимую ориентацию и величину поля. Это позволяет магнитному потоку от источника магнитодвижущей силы до конца полюсного наконечника проходить одинаковый путь, что влечет за собой отсутствие разности магнитных потенциалов.

Дополнительно были применены следующие технические решения:

– заливка катушек теплопроводящим компаундом для обеспечения продолжительного режима работы электромагнита (для наилучшего отвода тепла);

– использование с этой же целью дополнительных вентиляторов для принудительного воздушного охлаждения.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТА УЗЛА ОБРАЗЦА РПН

При расчете вводятся следующие оси координат: Y — вертикальное направление, совпадающее с направлением поляризации нейтронов и перпендикулярное падающему нейтронному пучку; Z — горизонтальное направление, совпадающее с направлением падающего нейтронного пучка; X — горизонтальное направление, перпендикулярное падающему нейтронному пучку.

К магнитной системе узла образца РПН предъявлялись следующие требования.

– Размеры области, в которой нужно создать однородное магнитное поле, мм — $80 \times 50 \times 50$ (Z, Y, X).

– Ориентация магнитной индукции — вертикальная, т.е. есть вертикальная компонента магнитной индукции B_Y должна быть максимально возможной, а компоненты B_X и B_Z требуется минимизировать.

– Обеспечить в любой точке рабочей области выполнение условия $B_Y \geq 200$ мТл.

– Максимальное отклонение направления вектора магнитного поля от вертикального не более 2 %.

– Система должна иметь минимально возможные габариты и вес (как указывалось выше: масса не более 200 кг, габариты не более $740 \times 440 \times 680$ мм).

При выборе обмоточного провода для катушек учитывались класс изоляционной стойкости, а также площадь сечения, позволяющая изготовить катушку без применения специализированного оборудования. Выбор пал на современную марку провода ПЭТВ-2 диаметром 1.5 мм. В табл. 1 представлены основные характеристики обмоточного провода.

В качестве материала магнитопровода был использован сплав с высокой индукцией насыщения (около 2.18 Тл) — АРМКО. Технически чистое железо (АРМКО) (содержание примесей — до 0.08–0.1%, в том числе углерода — до 0.02%) устойчиво к коррозии, обладает повышенной электропроводностью и очень высокой пластичностью, имеет малое удельное электрическое сопротивление, обладает повышенными потерями на вихревые токи. В связи с этим применение его до сих пор ограничивается в основном магнитопроводами постоянного магнитного потока (полюсные наконечники электромагнитов, магнитопроводы реле, сердечники и т.п.), работающими в постоянных и медленно меняющихся магнитных полях. Выбранный материал отличается малой коэрцитивной силой — $H_c = 66$ А/м и большой магнитной проницаемостью — $\mu_{\max} = 4500$.

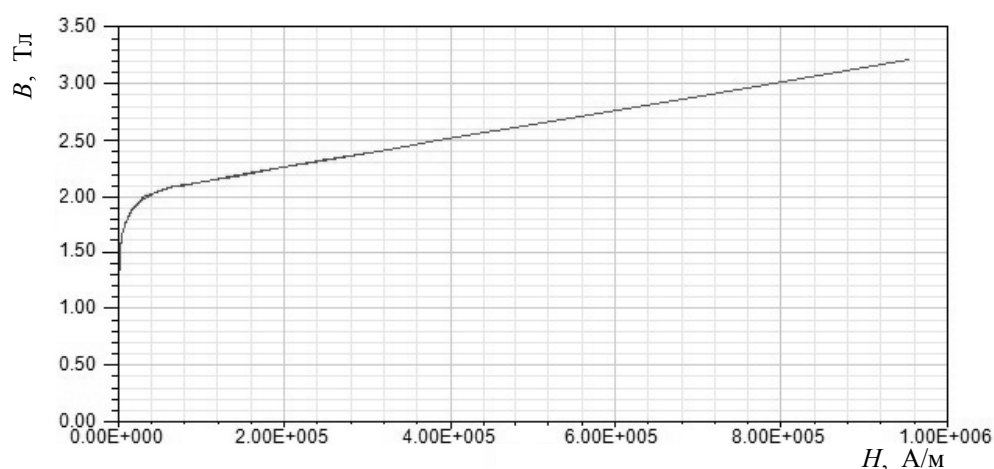


Рис. 1. Кривая намагничивания сплава АРМКО

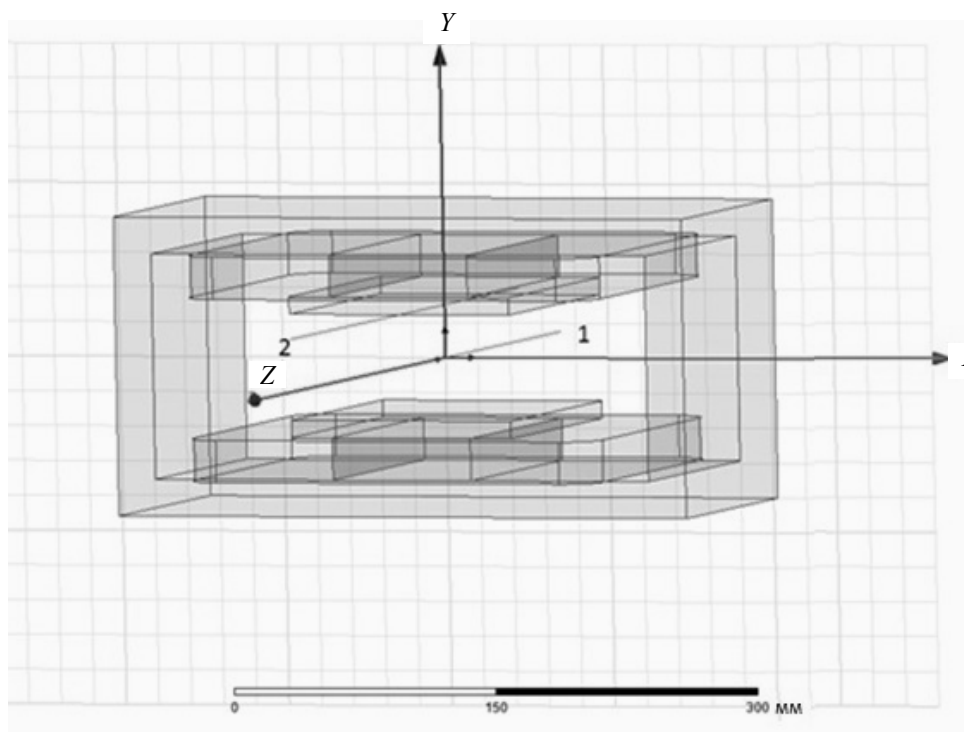


Рис. 2. Общий вид рассчитанной магнитной системы

На рис. 1 показана кривая намагничивания используемого в расчетах сплава АРМКО.

На рис. 2 показан общий вид магнитной системы с линиями 1 и 2, вдоль которых произведен расчет распределения индукции, результат которого представлен на рис. 3 и 4 соответственно.

Для наглядности в плоскостях 50×80 мм произведен расчет однородности индукции магнитного

поля (рис. 4) в верхней части рабочей области с шагом по Y 12.5 мм. Подобные плоскости в нижней части рабочей области симметричны. Необходимо заметить, что на всех распределениях фигурирует только Y -компонента индукции поля, поскольку она является преобладающей в таких системах. Компоненты B_x и B_z минимальны и составляют не более 0.25% от составляющей B_y .

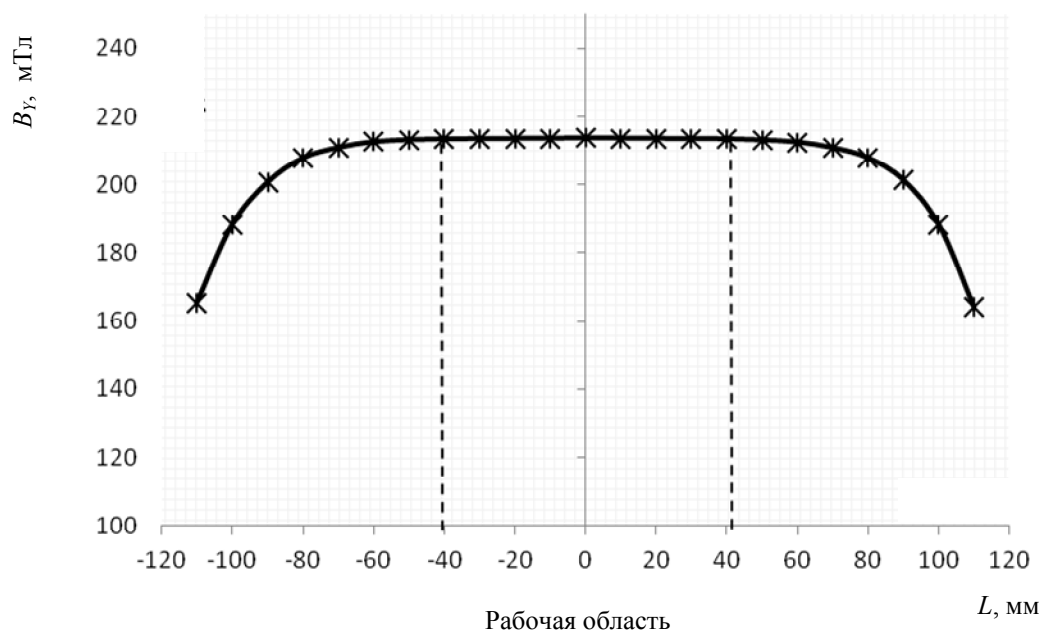


Рис. 3. Рассчитанное распределение Y -составляющей индукции магнитного поля в рабочей области вдоль линии 1 на рис. 2 ($x = 0$ мм, $y = 0$ мм, $z = -40 \dots +40$ мм)

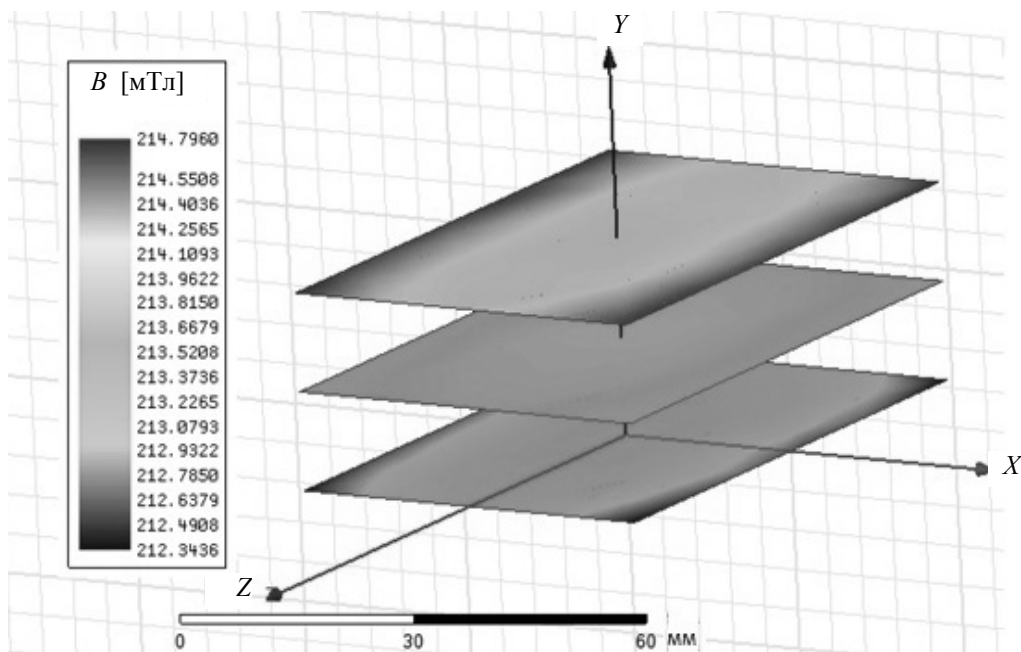


Рис. 4. Распределение индукции магнитного поля по плоскостям

Как следует из рис. 3 и 4, максимальная разница в однородности поля по всему объему рабочей области (длина 80, высота 50, ширина 50 мм) составляет не более — 2.45 мТл (что составляет 1.2 % от величины B_y).

В ходе моделирования были получены следующие обмоточные данные электромагнита:

- провод: ПЭТВ-2 диаметром 1.5 мм;
- количество витков 1055;
- номинальный ток 5 А;

- сопротивление 8.8 Ом;
- тепловыделение на 1 катушке 220 Вт;
- коэффициент заполнения 0.55.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНСТРУКТОРСКОЙ РАЗРАБОТКИ И ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ДЛЯ УЗЛА ОБРАЗЦА РПН

Согласно проведенным теоретическим расчетам была разработана конструкция электромагнита для узла образца РПН. На рис. 5 показаны три вида: вид спереди (а), сбоку (б) и сверху (в).

После технологической проработки и уточнения параметров элементов электронной схемы питания электромагнита и схемы измерения индукции магнитного поля в рабочей области нахождения исследуемого образца был изготовлен электромагнит, внешний вид которого представлен в Приложении, рис. П1.

Для питания катушек электромагнита использовался источник питания LambdaGENH100-7.5, величина и направление тока которого задаются управляющей программой UNISONRPN. Подключение источника питания LambdaGENH100-7.5 к ПК осуществлялось через интерфейс RS-232.

Кроме того, был разработан и изготовлен блок реверса тока RA153.16 [4], питающего электромагнит. Блок реверса тока необходим для снятия магнитного гистерезиса при измерении величины и направления поляризации нейтронного пучка, отраженного от пленочного зеркального исследуемого образца. Управление блоком реверса осуществлялось через плату ввода-вывода PИО-D48.

Изменение величины и направление тока питающей катушки электромагнита, а также контроль и измерение индукции магнитного поля осуществлялось через управляющую программу UNISON RPN. Схема управления электромагнитом узла образца представлена на рис. 6.

Используя трехкомпонентный преобразователь магнитной индукции НВ0105.2А, были проведены измерения трех компонент индукции магнитного поля в рабочей области. Экспериментально измеренные значения распределения Y-составляющей индукции магнитного поля в центре магнита — 221.1 мТл, что несколько больше теоретически рассчитанной величины 213.7 мТл. При этом градиент поля в пределах рабочей области $x = 0, y = 0, z = -40 \dots +40$ составляет менее 1%, как показано на графике рис. 7 распределения поля вдоль оси Z.

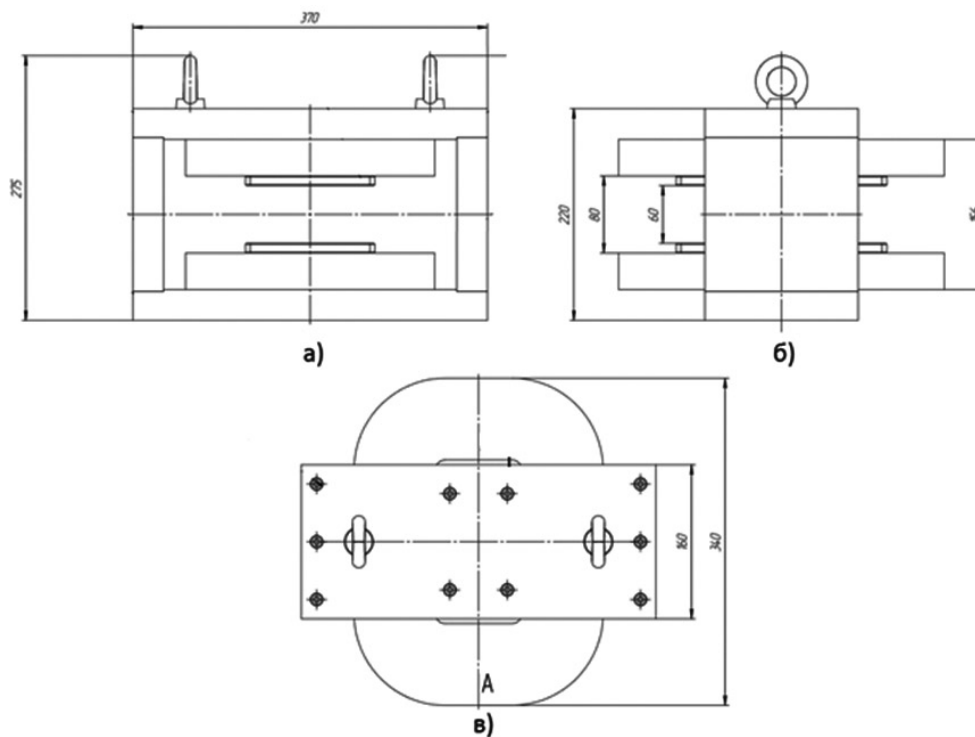


Рис. 5. Сборочный чертеж электромагнита узла образца РПН

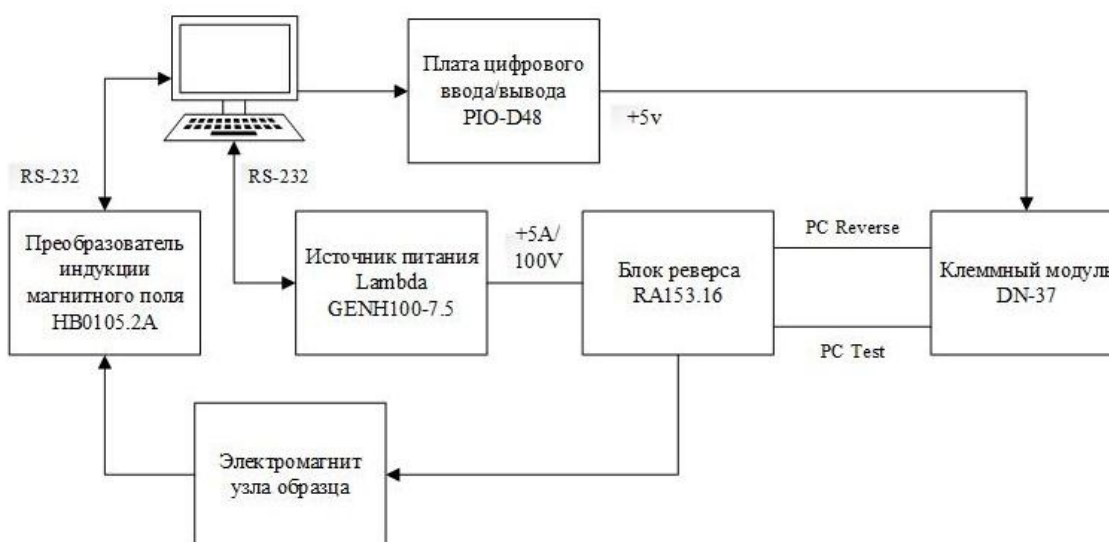


Рис. 6. Схема измерения величины индукции магнитного поля, а также управления током электромагнита узла образца РПН

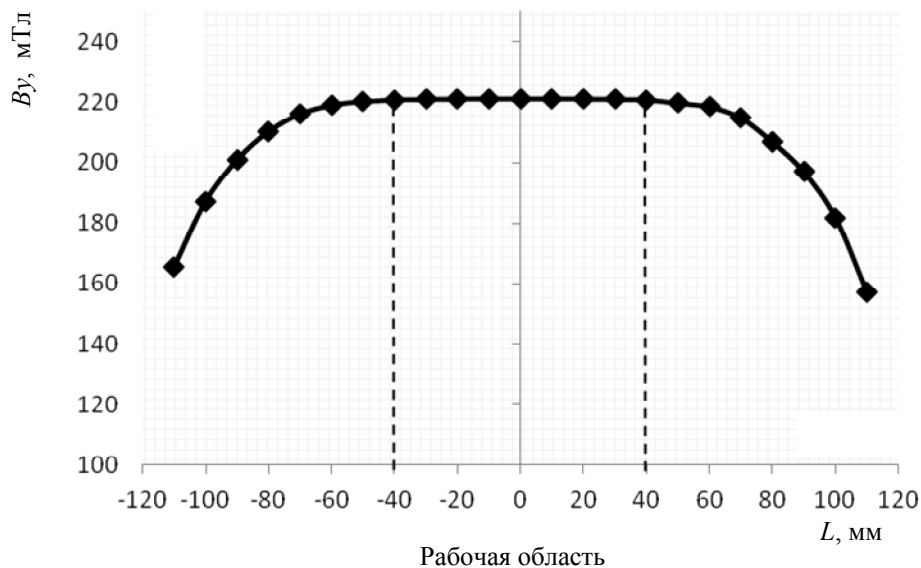


Рис. 7. Измеренное распределение Y-составляющей индукции магнитного поля в рабочей области вдоль линии 1 на рис. 2 ($x = 0$ мм, $y = 0$ мм, $z = -40 \dots +40$ мм)

Измеренные значения B_x и B_z индукции магнитного поля в центре электромагнита вдоль линии 1 на рис. 2 ($x = 0$ мм, $y = 0$ мм, $z = -40 \dots +40$ мм) равны 1.6 и 2.2 мТл соответственно.

Из результатов, приведенных на рис. 3, 4, 7, можно сделать вывод о том, что рассчитанные значения индукции магнитного поля и ее однородности практически совпадают с экспериментальными данными.

Кроме измерений в центре системы вдоль Z-координаты (т.е. вдоль линии 1 на рис. 2 ($x = 0$ мм, $y = 0$ мм, $z = -40 \dots +40$ мм)) были проведены измерения распределения индукций магнитного поля в двух плоскостях ($-10, +10$ мм по Y-координате) между полюсами магнита. Результаты измерения показали, что градиент индукции магнитного поля в рабочем объеме $80(Z) \times 40(X) \times 20(Y)$ мм не превышает 2 %. Результаты измерений показаны в табл. 2.

Табл. 2. Распределения индукций магнитного поля в двух плоскостях (–10, +10 мм по Y -координате) между полюсами магнита

Координаты измерений			Разброс значений индукции ΔB_y
$x = 0$	$y = 0$	$z = -40 \dots +40$	1%
$x = 0$	$y = +10$	$z = -40 \dots +40$	2%
$x = 0$	$y = -10$	$z = -40 \dots +40$	2%

Как видно из табл. 2, градиент Y -составляющей магнитной индукции поля в рабочей области $80 \times 40 \times 20$ мм — около 2%, что несколько отличается от теоретически рассчитанных значений. Это связано с погрешностью измерений, отсутствием строгого входного контроля применяемых магнитомягких материалов, а также определенной погрешностью расчетов и сборки электромагнита.

Величина индукции поля вне магнита на расстоянии 120 мм от края ярма вдоль Z -координаты

при $y = 0$, $x = 0$ составляет 4.4 мТл, что позволяет сохранить направление поляризации проходящего нейтронного пучка, т.к. величина индукции магнитного поля плавно спадает. Для того чтобы избежать изменения направления индукции магнитного поля и сохранить поляризацию проходящего нейтронного пучка, создавалось дополнительное, так называемое ведущее, магнитное поле порядка 50–60 мТл.

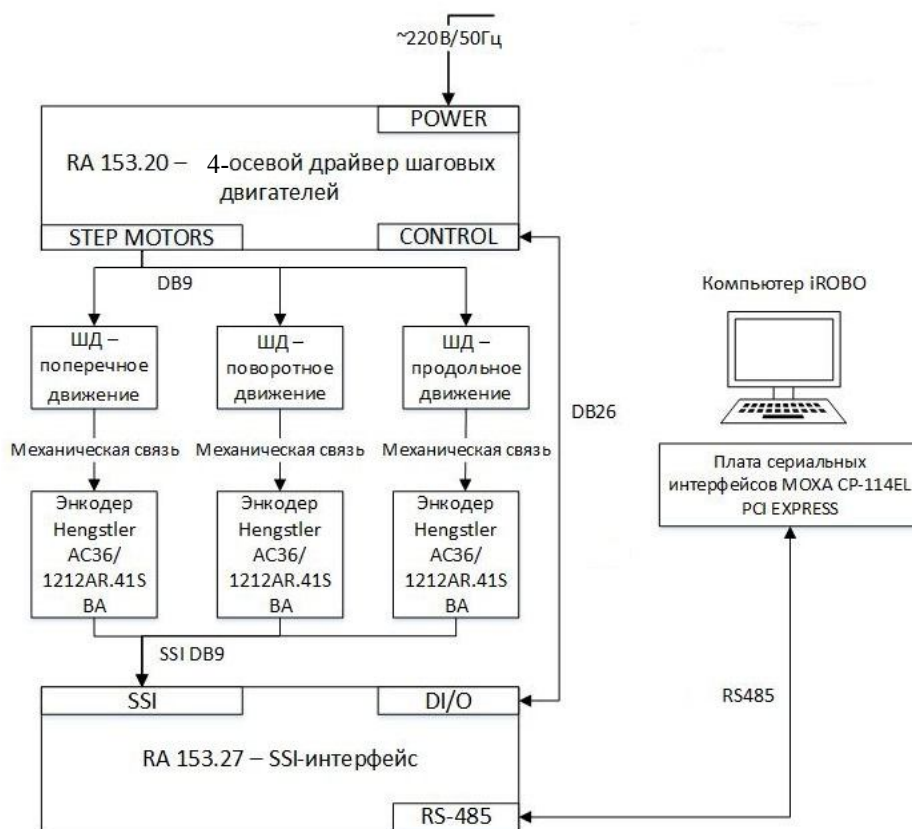


Рис. 8. Схема управления юстировочным устройством узла образца с электромагнитом

ЮСТИРОВКА ИССЛЕДУЕМОГО ОБРАЗЦА В ПОЛЕ МАГНИТА

Узел образца РПН включает в себя не только электромагнит, но также юстировочное устройство, на котором установлены электромагнит и держатель исследуемого образца (см. Приложение, рис. П1,б, поз. 3). Юстировочное устройство, на котором размещается электромагнит, необходимо для точной юстировки исследуемого зеркального образца, находящегося в магнитном поле электромагнита. Юстировочное устройство имеет три оси перемещения. Две оси линейного перемещения с точностью определения положения 0.05 мм и поворот с точностью угла положения 1'. Движение юстировочного устройства осуществляется с помощью шаговых двигателей FL57STH56-2006A (линейное перемещение) и FL42STH47-1206B (поворотное движение). Достаточно большой вес электромагнита и точность перемещения требуют обратной связи для контроля положения. Схема управления юстировочным устройством узла образца представлена на рис. 8. Для этих целей используются абсолютные датчики угла поворота Hengstler AC36/1212AR.41SBA. Управление юстировочным устройством осуществляется с помощью контроллера Ch-SSI SENSOR INTERFACE RA153.27 посредством драйвера Ch-STEP MOTOR DRIVER RA153.20.

В Приложении на рис. П2 наряду с другими узлами показан узел образца рефлектометра поляризованных нейтронов РПН с электромагнитом. Рефлектометр поляризованных нейтронов РПН в ближайшем будущем будет установлен на нейтроноводе "НЗ" реактора ИР-8 Национального исследовательского центра "Курчатовский институт".

ВЫВОДЫ

На основе проведенных расчетов разработан и создан электромагнит для узла рефлектометра поляризованных нейтронов. Особенностью данного электромагнита явились повышенные требования к величине (200 мТл) и однородности магнитного поля. В результате эти требования с успехом реализованы, что было подтверждено результатами измерений.

Авторы благодарят Р.П. Дмитриева и Е.Н. Медведева за творческий подход при техническом создании электромагнита. В.Г. Сыромятникова за постоянные консультации при проектировании электромагнита и плодотворное обсуждение полученных результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.607.21.0194 от 26.09.2017 г., RFMEFI60717X0194.

ПРИЛОЖЕНИЕ

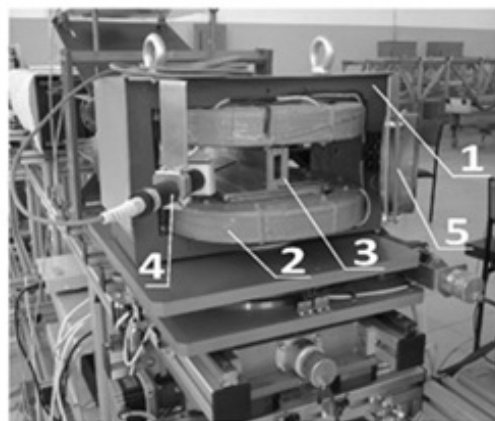
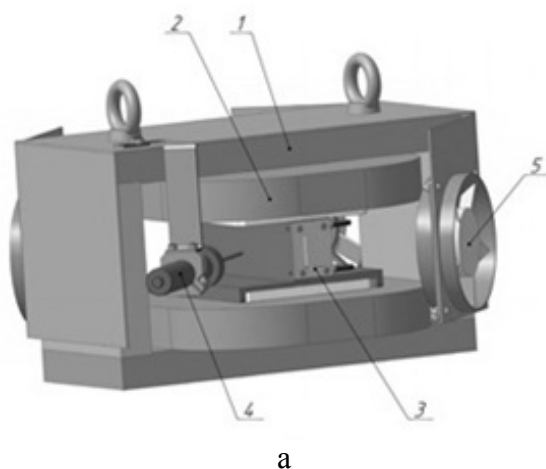


Рис. П1. Электромагнит узла образца РПН: 3D-модель электромагнита (а); изготовленный электромагнит (б).

1 — магнитопровод, 2 — катушка, 3 — держатель образца, 4 — измеритель магнитной индукции ВВ0105.2А, 5 — вентилятор ВВ-2



Рис. П2. Узел образца с электромагнитом рефлектометра поляризованных нейтронов РПН

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасик В.Р. Физика и техника сильных магнитных полей. М.: Наука, 1964. 244 с.
2. Balasoiu M., Kirilov A.S., Kutuzov S.A., Smirnov A.A., Kappel W., Cios M., Cios A., Kuklin A.I. Magnetic system for small-angle neutron scattering investigation at YUMO instrument of nanomaterial // Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 2008. E14-2008-193.
3. Осинская Ю.В., Петров С.С., Покоев А.В., Рунов В.В. Исследование методом малоуглового рассеяния нейтронов магнитоупругого эффекта в бериллиевой бронзе при старении в магнитных полях // Физика твердого тела. 2010. Т. 52, № 3. С. 486–488.
4. Глушкова Т.И., Дьячков М.В., Колхидашвили М.Р., Савельева Т.В., Соловей В.А., Сумбатьян А.А., Сыромятников В.Г., Ульянов В.А., Хахалин С.И. Электронное

обеспечение рефлектометра поляризованных нейтронов реактора ИР-8. Препринт ПИЯФ 3021, г. Гатчина, 2018. 46 с.

НИИ "Курчатовский институт"-ПИЯФ, Гатчина

Контакты: Гилев Александр Георгиевич,
alexandrgilev@mail.ru

Материал поступил в редакцию 7.12.2018

THE ELECTROMAGNET FOR A POLARIZED NEUTRON REFLECTOMETER SAMPLE OF THE IR-8 REACTOR OF NRC "KURCHATOV INSTITUTE"

A. G. Gilev, V. A. Ulyanov, S. I. Kalinin, M. V. D'yachkov, G. E. Shmelev

NRC "Kurchatov Institute" — PNPI, Gatchina, Russia

The electromagnet for a polarized neutron reflectometer (RPN) sample node is developed and manufactured for installation on the N3 neutron guide of the IR-8 reactor in the NRC "Kurchatov Institute". The results of the calculation and the experimental data of measurements of the magnetic parameters of the electromagnet created for the node of the polarized neutron reflectometer sample are presented. A special feature of this electromagnet is the increased requirements for the magnitude (200 mT) and the magnetic induction homogeneity (the maximum deviation of the direction of the induction vector from the vertical is no more than 2%), as well as compactness. The estimated characteristics of the magnet are confirmed by the results of experimental measurements: the calculated values of magnetic field induction and its homogeneity almost coincide with the experimental data.

Keywords: electromagnet, magnetic field induction uniformity, reflectometer of polarized neutrons

Fig. 1. The curve of ARMCO alloy magnetization

Fig. 2. General view of the calculated magnetic system

Fig. 3. The calculated distribution of the Y-component of the magnetic field induction in the working area along line 1 in the Fig. 2 ($x = 0$ mm, $y = 0$ mm, $z = -40 \div 40$ mm)

Fig. 4. The distribution of the magnetic field by the planes

Fig. 5. Assembly drawing of the electromagnet node of a polarized neutron reflectometer sample

Fig. 6. A scheme for measuring the magnitude of the magnetic field induction, as well as controlling the current of the electromagnet node of a polarized neutron reflectometer sample

Fig. 7. The measured distribution of the Y-component of the magnetic field induction in the working area along line 1 in Fig. 2 ($x = 0$ mm, $y = 0$ mm, $z = -40 \div 40$ mm)

Fig. 8. The control circuit of the adjustment device of the sample electromagnet node

Table 1. The main characteristics of the magnet wire

Table 2. The distribution of magnetic field inductions in two planes ($-10, +10$ mm along the Y-coordinate) between the poles of a magnet

Annex (fig. II1). Electromagnet node of the polarized neutron reflectometer sample. a) is a 3D model of an electromagnet, б) is a manufactured electromagnet. 1— magnet wire, 2 — coil, 3 — sample holder, 4 — magnetic induction meter HB0105.2A, 5 — BH-2 fan

Annex (fig. II2). Polarized neutron reflectometer sample with an electromagnet node

REFERENCES

1. Karasik V.R. *Fizika i tekhnika sil'nyh magnitnyh poley* [Physics and equipment of strong magnetic fields]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 244 p. (In Russ.).
2. Balasoiu M., Kirilov A.S., Kutuzov S.A., Smirnov A.A., Kappel W., Cios M., Cios A., Kuklin A.I. Magnetic system for small-angle neutron scattering investigation at YUMO instrument of nanomaterial. *Joint Institute for Nuclear Research*, Dubna, 2008. E14-2008-193.

3. Osinskaya Yu.V., Petrov S.S., Pokoev A.V., Runov V.V. [Research by method of low-angle dispersion of neutrons of magnetoplastic effect in beryllium bronze when aging in magnetic fields]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the solid state], 2010, vol. 52, no. 3, pp. 486–488. DOI: 10.1134/S1063783410030121 (In Russ.).
4. Glushkova T.I., Dyachkov M.V., Kolhidashvili M.R., Sa-

velyeva T.V., Solovey V.A., Sumbatyan A.A., Syromyatnikov V.G., Ulyanov V.A., Hahalin S.I. *Elektronnnoe obespechenie reflektometra polyarizovannykh neytronov reaktora IR-8* [Electronic providing the reflectometer of the polarized IR-8 reactor neutrons]. Gatchina, Preprint PIYAF 3021, 2018. 46 p. (In Russ.).

Contacts: *Gilev Aleksandr Georgievich*,
alexandrgilev@mail.ru

Article received by editing board on 7.12.2018