

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 621.384.6:621.373

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ
ПРОТОТИПОВ ПОВОРОТНЫХ МАГНИТОВ
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ¹**

© 2024 г. Я. И. Горбачёв^{a,*}, В. Г. Ческидов^a, О. А. Шевченко^a,
Ш. Б. Лачынов^{a,b}, Н. А. Винокуров^{a,b}

^a*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 11*

^b*Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1*

**e-mail: Jiva-5m@yandex.ru*

Поступила в редакцию 19.12.2023 г.

После доработки 05.03.2024 г.

Принята к публикации 21.03.2024 г.

Описана методика измерений, и представлены предварительные результаты измерения параметров постоянных магнитов, используемых в энергосберегающих источниках синхротронного излучения, разрабатываемых в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера.

1. ВВЕДЕНИЕ

Источники рентгеновского излучения используются во многих областях науки и медицины. Большинству пользователей для своих задач требуется достаточно высокая интенсивность излучения в заданном диапазоне длин волн на образце или входном окне экспериментальной станции. Кроме того, обычно требуется достаточно маленькая угловая расходимость (равная поперечному размеру источника излучения, деленному на

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц "RuPAC'23", Новосибирск.

расстояние от источника до образца) излучения в каждой точке образца. Поэтому хороший источник излучения должен быть не только достаточно мощным, но и иметь небольшие поперечные размеры. В этом случае говорят, что источник имеет высокую яркость, которая определяется как мощность излучения, деленная на площадь (источника или коллимирующего отверстия) и телесный угол, в котором распространяются лучи. Сейчас самыми яркими лабораторными источниками рентгеновского излучения являются пучки высокоэнергетических электронов, проходящие через сильное поперечное магнитное поле и излучающие синхротронное излучение (СИ), а также лазеры на свободных электронах. Для создания таких источников может быть использован электронный пучок небольших (менее 0.1 мм) поперечных размеров, который циркулирует в специальном устройстве – накопителе электронов.

Учитывая тот факт, что планируемые в настоящее время источники СИ заработают через 10–20 лет, их желательно существенно изменить (усовершенствовать) по сравнению с существующими. Это возможно, если будут применены новые технические решения и технологии. Кроме того, для источника излучения, ориентированного на работу в исследовательском университете, т. е. для экспериментов в самых разных областях науки и медицины, необходимо предусмотреть возможность получения фотонов с разными энергиями – от 5 эВ для ультрафиолетового излучения в вакууме до 100 кэВ для жесткого рентгеновского излучения, и одновременной работы многих пользователей на соответствующих экспериментальных станциях. Сейчас в мире существует множество (в России всего 3) источников рентгеновского излучения, использующих накопители электронов.

В Институте Ядерной Физики им. Будкера разрабатывается концепция энергосберегающего источника синхротронного излучения. Одним из основных отличий нового источника излучения от существующих является отсутствие источников питания постоянного тока (и соответствующего водяного охлаждения) для большинства элементов магнитной системы, использующих постоянные магниты. Для проверки этого нового технического решения были разработаны прототипы поворотных магнитов. Магнитные элементы этого типа могут быть использованы для создания новых источников рентгеновского излучения и модернизации существующих накопителей электронов.

Допуски на магнитное поле в поворотных магнитах современных накопителей достаточно жесткие. Чтобы обеспечить выполнение этих допусков, было разработано устройство для измерения вектора намагниченности каждого постоянного магнита. Оно использовалось для измерения магнитных моментов всех постоянных магнитов, купленных для прототипов поворотных магнитов.

2. ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ

Постоянные магниты имеют значительный разброс намагниченности. В наших поворотных магнитах (см. рис.1) с железными полюсами в величину поля в рабочем зазоре вносят вклад несколько постоянных магнитов. Стандартное решение этой проблемы заключается в сортировке магнитов.

Рис. 1. Конструкция фокусирующего (а) и дефокусирующего (б) поворотного магнита.

Для сортировки необходимо измерить все компоненты вектора намагниченности каждого магнита, который планируется использовать в поворотном магните. После этого можно подобрать подходящий набор магнитов, чтобы обеспечить желаемую величину поля в рабочем зазоре поворотного магнита. В наших поворотных магнитах мы используем магниты NdFeB массой 2.6 кг и размерами 90×90×40 мм³ (рис. 2).

Рис. 2. Один магнитный блок.

3. КОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Стандартный метод измерения усредненной по объему намагниченности магнитного блока основан на использовании катушек Гельмгольца. В этом методе с помощью интегрирующего вольтметра измеряют интеграл напряжения, наведенного в катушке, при извлечении магнита из катушки или его повороте на 180°. Для правильного измерения катушка должна быть способна создавать магнитное поле с достаточно большой областью однородности, но само поле для измерения не требуется. Величина измеряемого интеграла пропорциональна проекции полного магнитного момента на ось катушек [1-2]:

$$\langle M_{\parallel} \rangle = \frac{1}{2V_{magnet}} \frac{I}{B_{\parallel}} \int \varepsilon(t) dt$$

где $\langle M_{\parallel} \rangle$ – продольная составляющая вектора намагниченности, усредненная по объему магнита, $\varepsilon(t)$ – напряжение, наводимое в катушке при вращении магнита, V_{magnet} – объем магнита, I/B_{\parallel} – отношение тока катушки к магнитному полю катушки, которое зависит только от геометрии катушки.

Для проведения правильного измерения магнит в исходном положении должен полностью поместиться в область однородности магнитного поля катушек. Для уменьшения габаритов измерительного стенда при сохранении размеров области однородности вместо катушек Гельмгольца целесообразно использовать катушки Бейкера

[3], представляющие собой четыре коаксиальные катушки одинакового диаметра, но с разным числом витков. Число витков во внешних катушках больше, чем во внутренних.

В случае идеальных бесконечно тонких катушек Бейкера между продольным положением катушек относительно центра и их радиусом имеют место следующие соотношения: $Z_{in} = \pm 0.243196 \cdot R$, $Z_{out} = \pm 0.940731 \cdot R$, соотношение токов во внутренней и внешней катушках равно 0.442391. Реальные катушки имеют конечное сечение, поэтому при их проектировании нет необходимости выполнять эти соотношения с большой точностью, но их можно использовать в качестве исходных значений. На рис. 3а представлена модель реальных катушек, созданная в программе “Radia” [4], которая использовалась для оптимизации их размеров и расчета области однородности магнитного поля. Также с помощью этой модели была получена связь между величиной намагниченности и интегралом напряжения для случая реального магнита. Размер образовавшейся области однородности можно оценить по графикам, представленным на рис. 3б, где показано относительное отклонение значения продольного поля от его значения в центре для различных значений радиуса r и продольной координаты z . Из этих графиков следует, что размер области однородности, в пределах которой относительное отклонение поля катушек не превышает $2 \cdot 10^{-3}$, позволяет целиком разместить в ней измеряемые магнит, что обеспечивает достаточную точность измерения значений намагниченности.

Рис. 3. а – Модель измерительной катушки, использованная в расчетах; **б** – расчетная однородность поля измерительной катушки.

На основе полученных в результате оптимизации размеров катушек был спроектирован измерительный стенд, 3D-модель которого представлена на рис. 4. Катушки намотаны тонкой проволокой на каркасах из стеклотекстолита. Радиус витков 250 мм, ширина намотки 10 мм, толщина – около 0,33 мм. Число витков во внешних катушках – 100, во внутренних – 44. Катушки соединены последовательно и подключены к интегрирующему вольтметру VsDC3, разработанному в ИЯФ им. Будкера СО РАН [5]. Каркасы катушек смонтированы на алюминиевом профиле, на котором также расположен поворотный стол. На столе имеются ограничители, четко фиксирующие положение магнита. Для измерения основной составляющей намагниченности магнит располагают вертикально, а для измерения поперечных составляющих – его кладут на стол горизонтально. Чтобы центр масс магнита находился как можно ближе к центру катушек, в случае вертикальной и горизонтальной его ориентации используются два разных поворотных столика, различающихся по высоте. В конструкции предусмотрена

регулировка угла поворота, которая осуществляется путем тонкой регулировки ограничителей.

Рис. 4. 3D-модель измерительного стенда.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Фотография стенда с установленным магнитом представлена на рис. 5. Положение магнита, указанное на фотографии, использовалось для измерения основной составляющей намагниченности. Для измерения поперечных составляющих магнит располагался горизонтально, измерения каждой поперечной составляющей проводились при двух положениях магнита с направлением основной составляющей намагниченности вверх и вниз, а результат усреднялся. Это сделано для того, чтобы исключить вклад в измерение основной составляющей, который может возникнуть из-за наклона плоскости стола относительно оси катушек.

Рис. 5. Фотография измерительного стенда в работе.

Для оценки погрешностей измерений сначала была проведена серия измерений с одним магнитом. В этой серии неоднократно измерялась основная составляющая намагниченности, причем в этих измерениях положение магнита время от времени менялось в продольном и поперечном направлениях в пределах 1 см. Среднеквадратичный разброс измеренных значений в этой серии составил $2 \cdot 10^{-4}$. Также было проверено, что дрейф измеренных величин при фиксированном положении магнита за несколько часов не превышает $2 \cdot 10^{-5}$, а по результатам измерений поперечных составляющих определено, что угол наклона магнита на вращающейся платформе составляет менее $1 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, установлено, что использованная методика измерений обеспечивает необходимую точность. Далее были измерены намагниченности 172 магнитов.

Для всех магнитов величина поперечных составляющих намагниченности оказалась в допустимых пределах: $\max(\Delta M_x/M_0) \leq 6 \cdot 10^{-3}$, $\max(\Delta M_y/M_0) \leq 5 \cdot 10^{-3}$. Результаты измерений основной компоненты представлены на рис. 6.

Рис. 6. Распределение основной составляющей намагниченности для 172 магнитов

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные технологии позволяют изготавливать магниты произвольной формы с достаточно малым разбросом параметров, что дает возможность использовать их в поворотных магнитах для энергосберегающих синхротронов. Однако, несмотря на

достаточно высокое качество изготовления, контроль параметров магнитов является важным этапом сборки поворотных магнитов. Для измерения параметров в зависимости от выбранной формы магнитов может потребоваться модификация стандартных методов измерения или разработка новых. Рассмотренный в статье метод измерения намагниченности обеспечивает точность, достаточную для изготовления поворотных магнитов для энергосберегающего синхротрона.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы исследований № 075-15-2021-1359.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Martin D., Benz M.* // IEEE Trans. Magn. 1972. V. 8. № 1. P. 35.
2. *Trout S.R.* // IEEE Trans. Magn. 1988. V. 24. № 4. P. 2108.
3. *Barker J.R.* // J. Sci. Instrum. 1949. V. 26. № 8. P. 273.
4. *Chubar O., Elleaume P., Chavanne J.* // J. Synchrotron Rad. 1998. V. 5. № 3. P. 481.
5. *Batnikov A., Pavlenko A., Shickov D., Vagin P.* // Proc. of RuPAC. 2012. P. 617.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Конструкция фокусирующего (**а**) и дефокусирующего (**б**) поворотного магнита.

Рис. 2. Один магнитный блок.

Рис. 3. а – Модель измерительной катушки, использованная в расчетах; **б** – расчетная однородность поля измерительной катушки.

Рис. 4. 3D-модель измерительного стенда.

Рис. 5. Фотография измерительного стенда в работе.

Рис. 6. Распределение основной составляющей намагниченности для 172 магнитов.

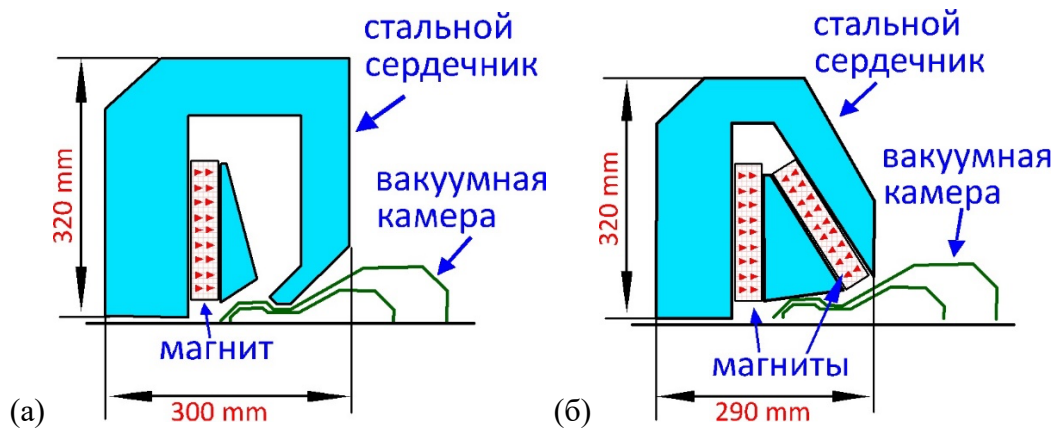


Рис.1

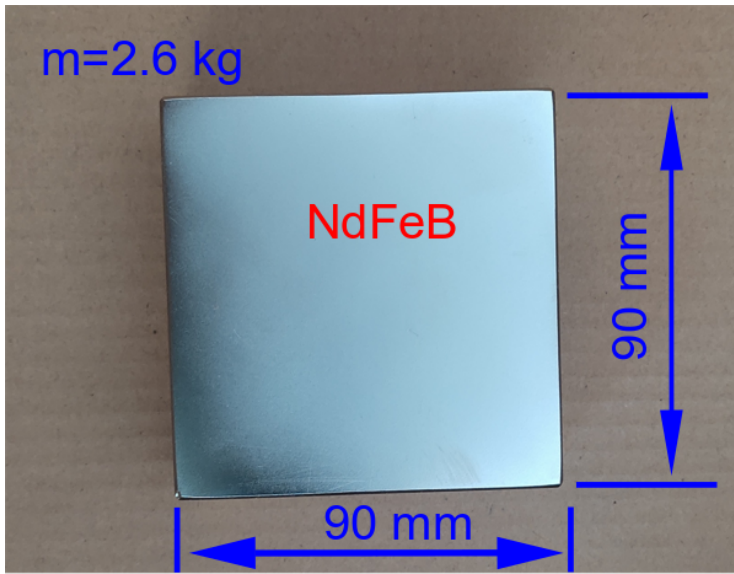


Рис.2

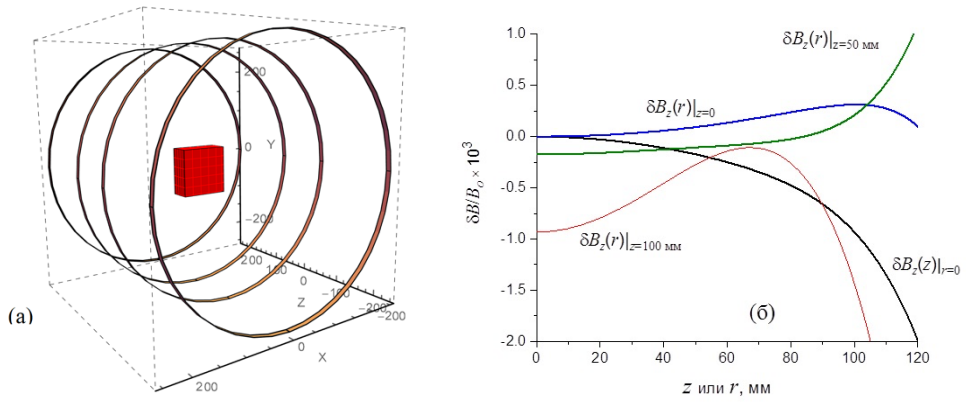


Рис.3

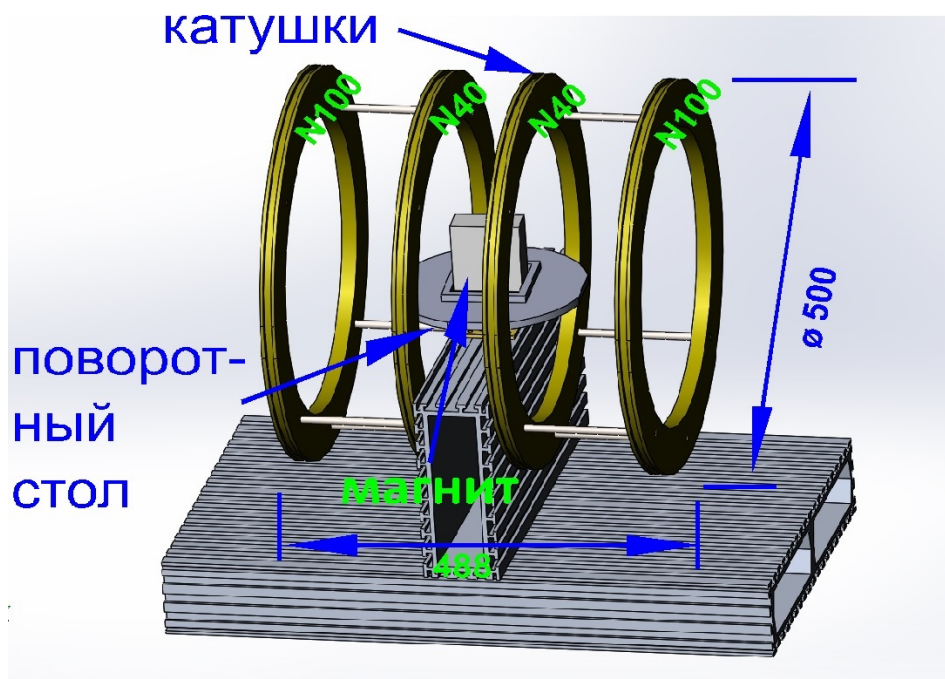


Рис.4

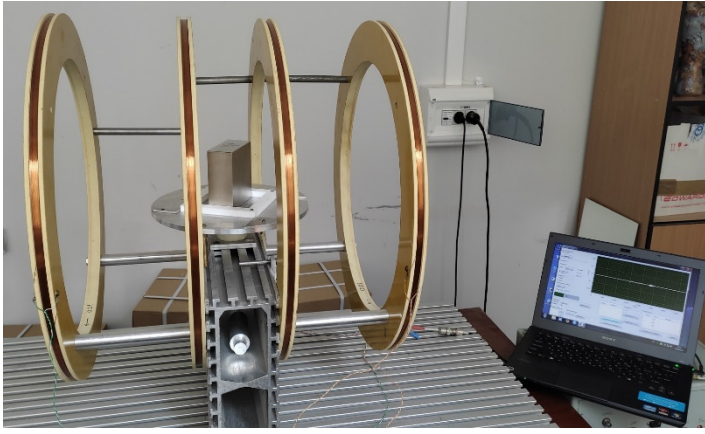


Рис.5

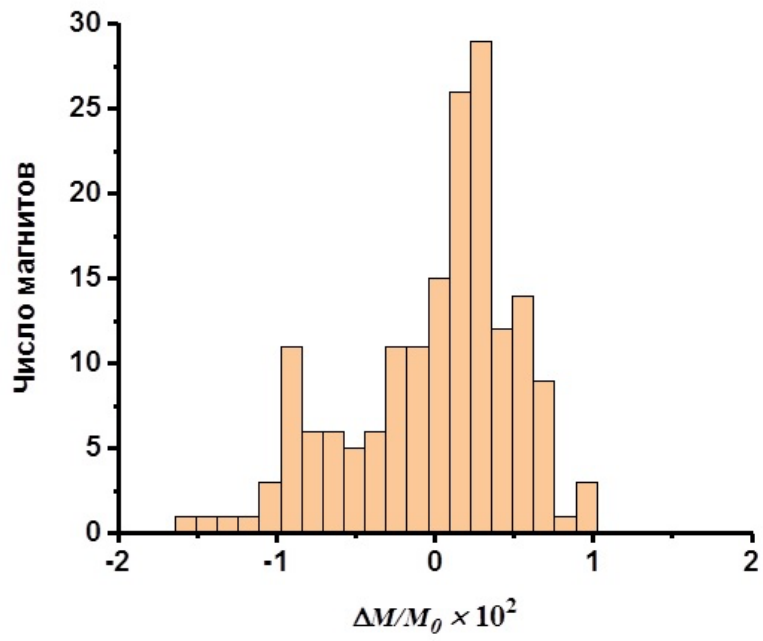


Рис. 6

Для связи с авторами:

Горбачёв Ярослав
Jiva-5m@yandex.ru
Шевченко Олег

O.A.Shevchenko@inp.nsk.su
Винокуров Николай
N.A.Vinokurov@inp.nsk.su
Ческидов Владимир
V.G.Tcheskidov@inp.nsk.su
Лачынов Шамиль
lachinov1997@mail.ru

Для переводчика:

UDC 621.384.6:621.373

Ya. I. Gorbachev, V. G. Tcheskidov, O. A. Shevchenko
Budker institute of nuclear physics SB RAS
11 Lavrentiev Prospect, 630090, Novosibirsk, Russia

S. B. Lachynov, N. A. Vinokurov,
Budker institute of nuclear physics SB RAS
11 Lavrentiev Prospect, 630090, Novosibirsk, Russia

Novosibirsk state university
1 Pirogova Str., 630090, Novosibirsk, Russia

Jiva-5m@yandex.ru

MEASUREMENT OF PERMANENT MAGNETS PARAMETERS FOR PROTOTYPES OF BENDING MAGNETS OF AN ENERGY-SAVING SYNCHROTRON RADIATION SOURCE

A concept of an energy-saving synchrotron radiation source is being developed at the Budker INP. One of the main differences between the new radiation source and the existing ones is the absence of DC power supplies and water-cooled coils for most elements of the magnetic system that use permanent magnets. To test this new technical solution prototypes of bending magnets were designed and are being manufactured. The permanent magnets used in these bends have to meet certain requirements. Therefore, one has to measure magnetization and do sorting of the magnets before installing them in the bends. In this paper we describe the

measuring technique and present the preliminary results of measurement of permanent magnets parameters.

Introduction

X-ray sources are used in many fields of science and medicine. Most users require sufficient radiation intensity for their tasks in a given wavelength range on the sample or the entrance window of the experimental station. In addition, a small angular divergence (equal to the transverse size of the radiation source divided by the distance from the source to the sample) of radiation at each point of the sample is usually required. Therefore, a good radiation source should not only be powerful enough, but also have small transverse sizes. In this case, the source is said to have a high brightness, which is defined as the radiation power divided by the area (of the source or collimating hole) and by the solid angle in which the rays travel. Now the brightest laboratory sources of X-rays are high-energy electron beams passing through a strong transverse magnetic field and emitting so-called. synchrotron radiation (SR), as well as free electron lasers. To create such sources, an electron beam with small (less than 0.1 mm) transverse sizes can be used, which circulates in a special device - an electron storage ring.

Taking into account the fact that the currently planned sources of SR will work in 10 - 20 years, it is desirable to significantly change (improve) them in comparison with the existing ones. This is possible if new technical solutions and technologies are applied. In addition, for a radiation source oriented to work with a research university, i.e., for experiments in very different fields of science and medicine, it is necessary to provide the possibility of obtaining photons with different energies - from vacuum ultraviolet (5 eV) to hard X-ray (100 keV) and the simultaneous work of many users at the respective experimental stations. Now in the world there are many (in Russia - only 3) X-ray sources using electron storage rings.

One of the main differences between the new radiation source and the existing ones is the absence of direct current power supplies (and corresponding water cooling) for most elements of the magnetic system that use permanent magnets. Pilot bending magnets were designed to test this new technical solution. Magnetic elements of this type can be used to create new X-ray sources and upgrade existing electron storage rings.

The tolerances for magnetic field in bending magnets of modern storage rings are rather tight. To meet them, the device for measurement of magnetization vector of each piece of permanent magnet was developed. It was used to characterize all permanent magnets, bought for the bending magnet prototypes.

Permanent magnets

The permanent magnets have significant spread of magnetization. In our bending magnets (see Fig.1) with iron poles, several permanent magnets contribute to the value of field in the working gap. Therefore, the standard solution of this problem is sorting of magnets.

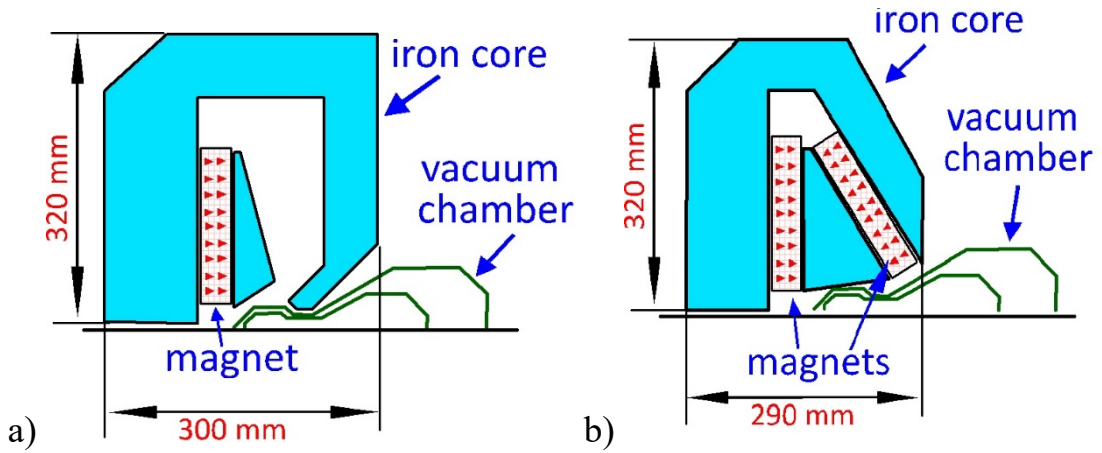


Figure 1. Focusing (a) and defocusing (b) bending magnet design.

To make the sorting one has to measure all components of magnetization vector for each magnet which is planned to be used in bending magnet. After that one can choose a right set of magnets to provide a desirable value of field in the working gap of a bending magnet. In our bending magnets we use NdFeB magnets with mass 2,6 kg and dimensions $90 \times 90 \times 40 \text{ mm}^3$ (Fig. 2).

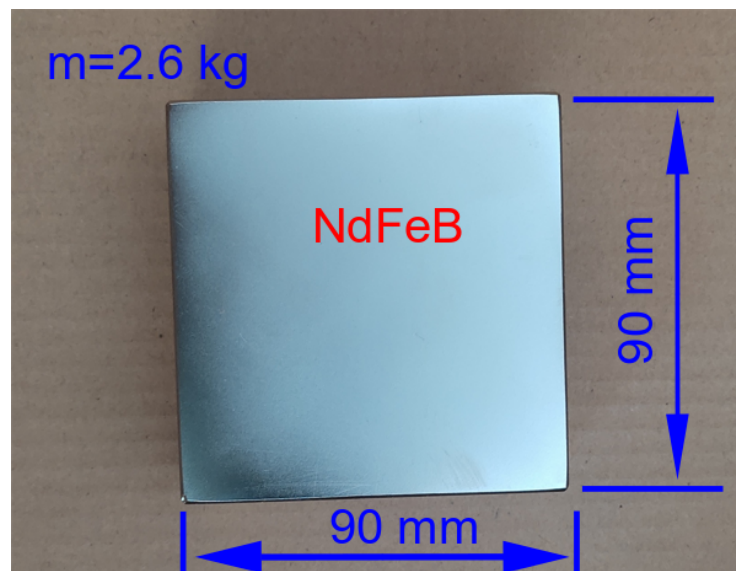


Figure 2. One magnet block.

Design of the measuring stand

The standard method for measuring the volume-averaged magnetization of the magnet block is based on the use of Helmholtz coils. In this method, using an integrating voltmeter, the integral of the voltage induced in the coil is measured when the magnet is removed or rotated by 180 °. For correct measurement the coil has to be capable of creating magnetic field with large enough homogeneity region but the field itself is not required for the measurement. The value of the measured integral is proportional to the projection of the total magnetic moment on the axis of the coils [1-2]:

$$\langle M_{\parallel} \rangle = \frac{1}{2V_{magnet}} \frac{I}{B_{\parallel}} \int \varepsilon(t) dt$$

where $\langle M_{\parallel} \rangle$ is longitudinal component of the magnetization vector averaged over magnet volume, $\varepsilon(t)$ is voltage induced in the coil during rotation of the magnet, V_{magnet} is the magnet volume, I/B_{\parallel} is ratio of the coil current to the coil magnetic field which depends only on the coil geometry.

To carry out a correct measurement, the magnet in its initial position has to be completely placed in the homogeneity region of the magnetic field of the coils. To reduce the dimensions of the measuring stand while maintaining the dimensions of the homogeneity region, instead of Helmholtz coils, it is advisable to use Baker coils [3], which are four coaxial coils of the same diameter, and the number of turns in the external coils is greater than in the internal ones.

In the case of ideal infinitely thin Baker coils, the following relations hold between the longitudinal position of the coils relative to the center and their radius: $Z_{in} = \pm 0.243196 \cdot R$, $Z_{out} = \pm 0.940731 \cdot R$, the ratio of currents in the internal and external coils is 0.442391. Real coils have a finite cross-section, so when designing them there is no need to carry out these relationships with great accuracy, but they can be used as starting values. Figure 3a shows a model of real coils created in the code “Radia” [4], which was used to optimize their sizes and calculate the region of magnetic field homogeneity. Also, using this model, the relationship between the magnitude of magnetization and the voltage integral for the case of a real magnet was obtained. The size of the resulting homogeneity region can be estimated from the graphs presented in Fig. 3b, which shows the relative deviation of the longitudinal field value from its value at the center for different values of the radius r and longitudinal coordinate z . From these graphs and the description of the magnetization measurement procedure presented below, we can conclude that for all initial positions of the magnet that are used for measurements, the magnet is entirely located in the homogeneity region, within which the relative deviation of the field of the coils does not exceed $2 \cdot 10^{-3}$, which ensures sufficient accuracy of measured magnetization values.

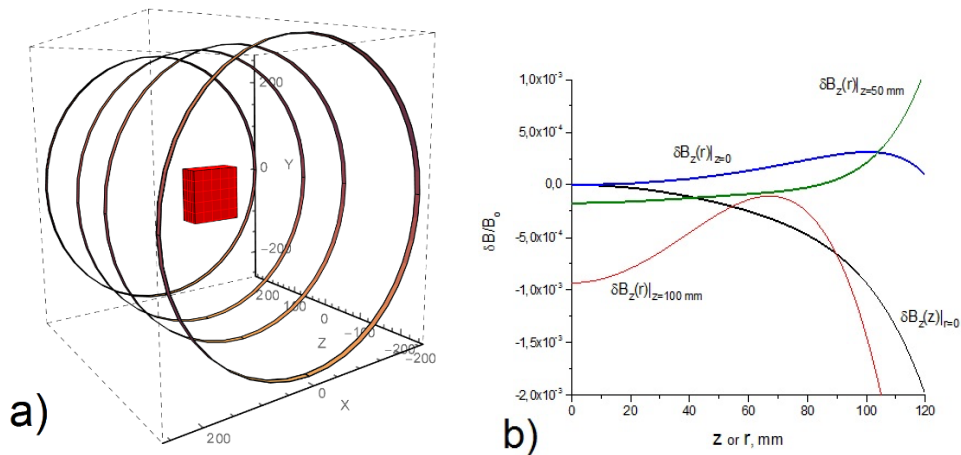


Figure 3. a) Measuring coil model used in calculations. b) Calculated homogeneity of the measuring coil field.

Based on the dimensions of the coils obtained as a result of optimization, a measuring stand was designed, the 3D model of which is presented in Fig. 4. The coils are wound with thin wire on frames made of fiberglass. The radius of the coils is 250 mm, the winding width is 10 mm, and the thickness is about 0,33 mm. The number of turns in the external coils is 100, in the internal ones – 44. The coils are connected in series and connected to an integrating voltmeter VsDC3, developed at the Budker INP SB RAS [5]. The coil frames are mounted on an aluminum profile, on which a turntable is also located. There are limiters on the table that clearly fix the position of the magnet. To measure the main component of magnetization, the magnet is placed vertically, and to measure the transverse components, the magnet is placed horizontally on the table. In order to ensure that the center of mass of the magnet is as close as possible to the center of the coils, in the case of vertical and horizontal orientation of the magnet, two different tables are used that differ in height. The design provides for adjustment of the angle of rotation, which is carried out by finely adjusting the limiters.

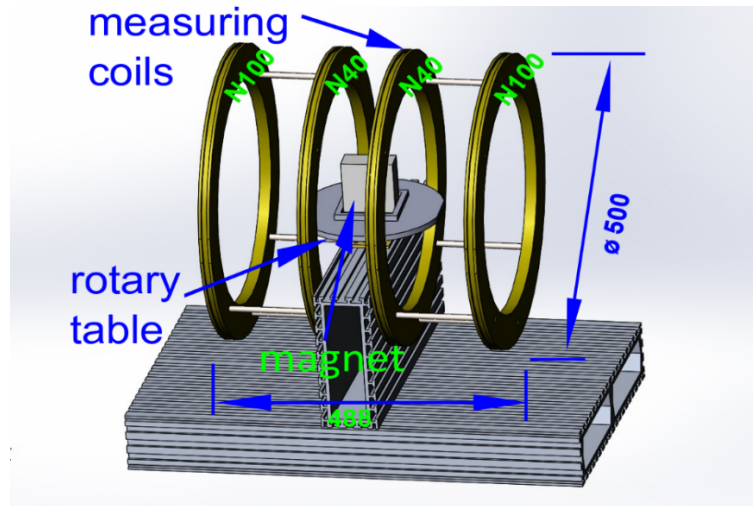


Figure 4. 3D model of a measuring stand.

Results of measurements

A photograph of the stand with an installed magnet is shown in Fig. 5. The position of the magnet shown in the photograph was used to measure the main component of magnetization. To measure the transverse components, the magnet was positioned horizontally, and measurements of each transverse component were performed at two positions of the magnet with the main magnetization component directed up and down, and the result was averaged. This was done in order to exclude the contribution to the measurement of the main component, which may arise due to the inclination of the table plane relative to the axis of the coils.

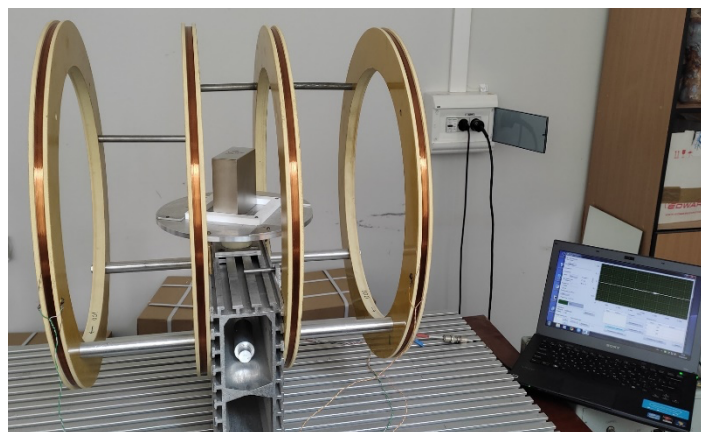


Figure 5. Photograph of the measuring stand in operation.

To estimate the measurement errors, a series of measurements with one magnet was first performed. In this series, the main component of magnetization was repeatedly measured, and in these measurements the position of the magnet changed from time to time in the longitudinal and transverse directions within 1 cm.

The r.m.s. spread of the measured values in this series was $2 \cdot 10^{-4}$. It was also verified that the drift of the measured values at a fixed position of the magnet over several hours does not exceed $2 \cdot 10^{-5}$, and from the results of measurements of the transverse components it was determined that the angle of inclination of the rotating platform is less than $1 \cdot 10^{-3}$. Thus, it was established that the measurement technique used provides the necessary accuracy. Next, the magnetizations of 172 magnets were measured.

For all magnets, the magnitude of the transverse magnetization components turned out to be within the acceptable limits: $\max(\Delta M_x/M_0) \leq 6 \times 10^{-3}$, $\max(\Delta M_y/M_0) \leq 5 \times 10^{-3}$. The results of measurements of the main component are presented in Fig. 6.

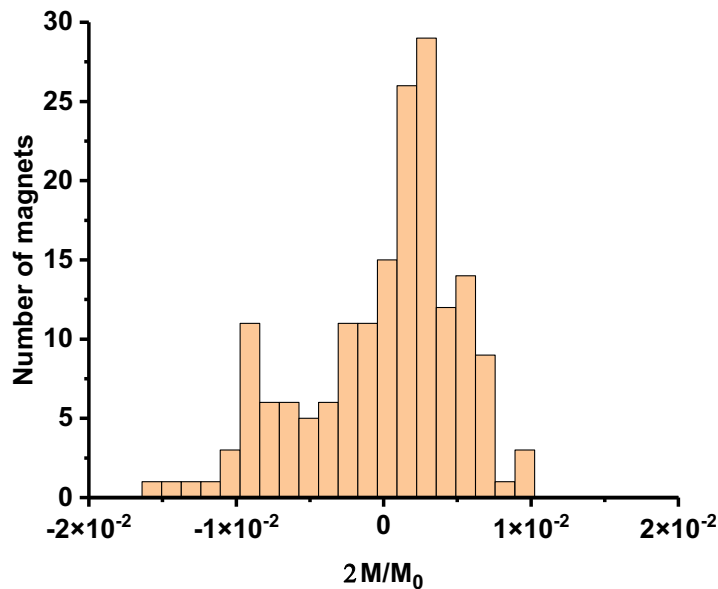


Figure 6. Distribution of the main component of magnetization for 172 magnets

Conclusion

Modern technologies make it possible to produce magnets of arbitrary shape with a sufficiently small spread of parameters, which makes it possible to use them in bending magnets for energy-saving synchrotron. However, despite the fairly high quality of manufacturing, monitoring the parameters of the magnets is an important step in assembling the bending magnets. To measure parameters, depending on the chosen form of magnets, it may be necessary to modify standard measurement methods or develop new ones.

The magnetization measurement method discussed in this article provides an accuracy sufficient for the manufacture of a bending magnets for the energy-saving synchrotron.

Acknowledgments

The work was supported by research program No. 075-15-2021-1359 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

References

- [1] Martin D., Benz M. // IEEE Trans. Magn. 1972. V. 8. No 1. P. 35–41.
- [2] Trout S.R. // IEEE Trans. Magn. 1988. V. 24. No 4. P. 2108.
- [3] Barker J. R. // J. Sci. Instrum. 1949. V. 26. No 8. P. 273.
- [4] Chubar O., Elleaume P., Chavanne J. // J. Synchrotron Rad. 1998. V. 5. No 3. P. 481.
- [5] Batrakov A., Pavlenko A., Shickov D., Vagin P. // Proc. of RuPAC 2012, P. 617.