

УДК 537.626:538.945

## МЕТОДЫ МИНИМИЗАЦИИ МАГНИТНЫХ ИНТЕГРАЛОВ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ВСТАВНЫХ УСТРОЙСТВАХ

© 2023 г. А. В. Зорин<sup>1, 2, 3, \*</sup>, Н. А. Мезенцев<sup>1, 2</sup>, В. А. Шкаруба<sup>1, 2</sup>, В. М. Цуканов<sup>1, 2</sup>,  
А. А. Волков<sup>1, 2</sup>, О. А. Тарасенко<sup>1</sup>, П. В. Каноник<sup>1, 3</sup>, Ф. П. Казанцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
“Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук”,  
Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
“Федеральный исследовательский центр “Институт катализа имени Г.К. Борескова  
Сибирского отделения Российской академии наук”,  
Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”, Кольцово, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск, Россия

\*E-mail: a.v.zorin@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Метод магнитных измерений с помощью натянутой проволоки с постоянным током используется при производстве вставных устройств генерации синхротронного излучения. Метод позволяет измерить и минимизировать первый и второй интегралы магнитного поля вдоль траектории пучка в ускорителе. Рассмотрена проблема провисания проволоки.

DOI: 10.31857/S0367676522701162, EDN: BBSGEE

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России ведется строительство Сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ) – специализированного источника синхротронного излучения (СИ) 4-го поколения с предельно низким эмиттансом. Для генерации СИ будут применяться, в том числе, такие вставные устройства (ВУ), как сверхпроводящие вигглеры и ондуляторы [1]. Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) имеет 20-летний опыт разработки, производства, ввода в эксплуатацию, поддержки и модернизации подобных устройств [2] и участвует в поставке ВУ для СКИФ.

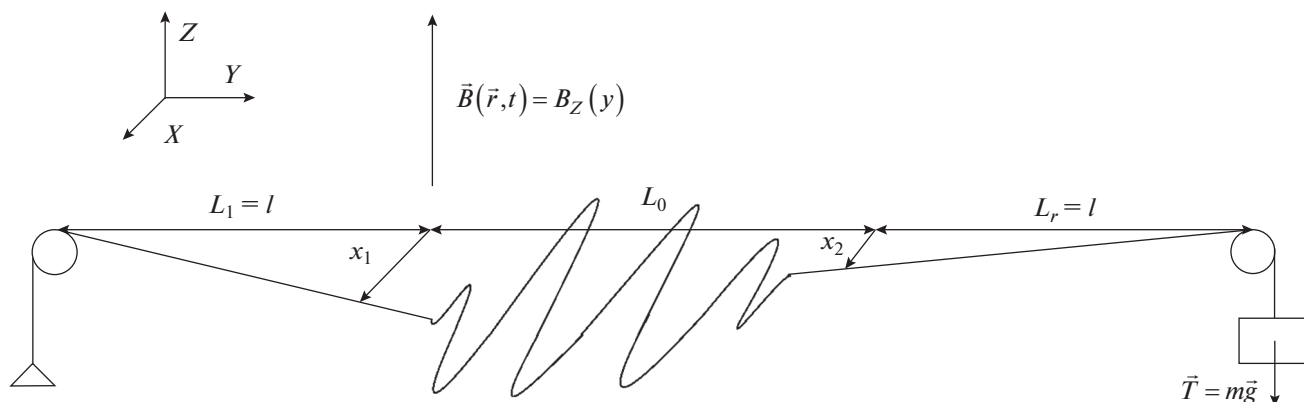
### ВСТАВНЫЕ УСТРОЙСТВА

Многополюсный вигглер или ондулятор представляет собой последовательность магнитов, создающих знакопеременное магнитное поле на участке движения электронного пучка в ускорителе. Генерация СИ происходит за счет приобретения электронами ускорения под действием силы Лоренца [3]. Как правило, при проектировании кольцевого ускорителя оставляют прямолинейные

промежутки, в которые и устанавливают ВУ. При отсутствующем или выключенном ВУ траектория пучка в прямолинейном промежутке представляет собой отрезок горизонтальной прямой. Изменение траектории при работе ВУ на выходе прямолинейного промежутка можно описать двумя величинами: углом и смещением в каждой плоскости (горизонтальной и вертикальной). Легко показать, что они пропорциональны, соответственно, первому и второму интегралу магнитного поля по перемещению вдоль оси  $Oy$  (1, 2), рис. 1. Таким образом, при настройке ВУ требуется минимизировать и измерить первый и второй интегралы магнитного поля [4]. В случае ВУ на основе электромагнитов (в том числе сверхпроводящих) настройка осуществляется путем изменения тока в специальных корректирующих катушках.

$$I_1^x = \int_0^L B_z(y) dy, \quad (1)$$

$$I_2^x = \int_0^L dy \int_0^y B_z(y') dy'. \quad (2)$$



**Рис. 1.** Схема измерительной системы. Если магнитное поле имеет только вертикальную компоненту  $B_z$ , а провисание отсутствует, то проволока искривляется только в горизонтальной плоскости  $XY$ .

### СИСТЕМЫ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Известно несколько типов систем магнитных измерений. Датчик Холла измеряет магнитное поле, что позволяет получить максимум информации о поле, а не только вычислить магнитные интегралы. Недостатком такой системы является большое время сканирования (40 мин для двухметрового магнита), нестабильность параметров датчика в случае сверхпроводящих устройств из-за быстрого изменения температуры. Движущиеся контуры, генерирующие ЭДС по закону Фарадея, позволяют измерить одновременно лишь один интеграл (в зависимости от формы контура); их применяют для измерения постоянных магнитов с большим зазором. Натянутая вдоль траектории движения электронного пучка проволока с током наилучшим образом подходит для измерения сверхпроводящих ВУ с точки зрения геометрических размеров системы, так как внутренняя высота измерительной камеры современных ВУ может составлять 5 мм и менее. В свою очередь, в зависимости от формы тока такая система делится на несколько разновидностей. Метод импульсного тока является альтернативой методу с датчиком Холла, но предъявляет очень высокие требования к качеству проволоки (постоянству толщины, отсутствию эллипсности, примесей). Метод резонансной раскачки позволяет одновременно измерять множество интегралов, что актуально для ондуляторов, но чрезвычайно чувствителен к способу закрепления концов проволоки. Настоящая статья посвящена методу постоянного тока [5, 6], который является простым и эффективным для измерения двух магнитных интегралов и некоторых других характеристик магнитного поля.

На рис. 1 показана система измерений натянутой проволокой с постоянным током. Проволока опирается на ролики, находящиеся на одной высоте на расстоянии  $L_w$  друг от друга, и натягивает-

ся с помощью груза массы  $m$  с силой  $T = mg$ . На расстоянии  $L_l$  от левого ролика, максимально близко от левого края измерительной камеры, расположен датчик положения проволоки, измеряющий ее смещение  $x_1$  вдоль оси  $Ox$  при включении постоянного тока  $I$  в проволоку. Аналогичный датчик, измеряющий смещение  $x_2$ , расположен на расстоянии  $L_r$  от правого ролика. Расстояние между датчиками (длина измерительной камеры) –  $L_0$  ( $L_w = L_l + L_0 + L_r$ ), в этом промежутке расположен измеряемый магнит длиной  $L_m$ . Пусть  $L_r = L_l = l$ ;  $x_1, x_2 \ll l$ ; магнитное поле имеет только вертикальную компоненту и зависит только от координаты  $y$  ( $B(x, y, z, t) = B_z(y)$ ,  $y$  лежит внутри  $L_m$ ); пренебрежем провисанием проволоки. В таком случае известно [5], что  $X$ -компонента первого интеграла магнитного поля пропорциональна сумме смещений  $x_1$  и  $x_2$ , а второго – их разности (3, 4). При наличии компоненты магнитного поля  $B_x$   $Z$ -компоненты магнитных интегралов определяются аналогичным образом через смещения по оси  $Z$ .

$$I_1^x = \frac{T}{\mu} (x_1 + x_2), \quad (3)$$

$$I_2^x = \frac{TL_w}{2\mu} (x_1 - x_2). \quad (4)$$

Для улучшения точности получившейся измерительной системы следует увеличивать ее чувствительность, а для этого можно уменьшать натяжение и увеличивать ток. При неизменном материале проволоки для увеличения тока требуется увеличивать площадь поперечного сечения проволоки. Это приводит к увеличению погонной плотности проволоки и ее провисанию. Таким образом, существенной проблемой является выбор проволоки (материал, толщина), силы тока и силы натяжения. Помимо провисания, необходимо учесть жесткость пучка, эффект фокусиров-

Таблица 1. Характеристики использованных проволок

Материал	Диаметр, мкм	Натяжение, Н	Ток, А
NbTi	300	73	5
Л63	200	4	2
Л63	300	18	3
БрБ2	200	37	2
Cu	400	20	5

ки [5] и требования к точности измерений, которые зависят от характеристик измеряемого ВУ, а не проволоки. Проволока без тока не должна взаимодействовать с магнитным полем; на практике это не всегда так, вероятно, из-за примесей в проволоке. Минимальная толщина проволоки связана с используемым датчиком положения; в нашем случае это 200 мкм для лазерного микрометра Metralight microXY. Как следствие, не существует одной лучшей проволоки; для каждого конкретного ВУ характеристики измерительной системы, в том числе материал и толщину проволоки, следует подбирать индивидуально.

На практике нами были испробованы следующие проволоки: сверхпроводящий NbTi-провод; проволока из бериллиевой бронзы БрБ2; проволока из латуни Л63; медный провод (табл. 1). Механические флуктуации положения проволоки за 1 мин составляют не более  $\pm 3$  мкм при установке датчиков на отдельных опорах и не более  $\pm 7$  мкм при установке датчиков на корпусе сверхпроводящего ВУ (увеличение флуктуаций связано с вибрацией ВУ из-за криокулеров и вакуумных насосов). При настройке интегралов их значения не превышают  $10^{-5}$  Тл · м для  $I_1$  и  $10^{-5}$  Тл · м<sup>2</sup> для  $I_2$ , что соответствует сумме и разности отклонений проволоки до 10 мкм. При измерении интегралов во время подъема и опускания поля их значения (за исключением области малых полей, обычно до 0.5–1.0 Тл, где играет роль остаточная намагниченность) не превышают  $10^{-4}$  Тл · м и  $10^{-4}$  Тл · м<sup>2</sup>. Это типичные значения для сверхпроводящих вигглеров.

Провисание проволоки ограничивается в первую очередь высотой измерительной камеры: провисание не может быть больше этой величины на длине камеры  $L_0$ . В реальности, однако, поле ВУ зависит от координаты  $z$  (рис. 2), особенно при удалении от центра по оси  $Ox$ , что требуется, например, для измерения секступольной компоненты магнитного поля. Можно ввести понятие медианной плоскости — это плоскость, на которой магнитное поле ВУ имеет только компоненту  $Z$ ; в идеальном случае она является горизонтальной и расположенной посередине между полюсами. Практический алгоритм поиска медианной плоскости приведен в [5]. Алгоритм подразумева-

ет перемещение проволоки в вертикальной плоскости, что накладывает более жесткие требования на провисание. Известно, что кривая провисания описывается цепной линией, являющейся нелинейной; провисание на длине магнита  $L_m$  отличается от провисания на длине измерительной камеры  $L_0$  непропорционально отношению  $L_m/L_0$ . Для большинства сверхпроводящих вигглеров приемлемым провисанием на длине  $L_m$  (1–2 м) является 0.5 мм, в некоторых случаях до 1.5 мм.

### СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ОНДУЛЯТОР

В настоящее время в ИЯФ СО РАН разрабатывается сверхпроводящий ондулятор, имеющий множество особенностей по сравнению с производимыми ранее сверхпроводящими вигглерами. В частности, из-за наличия пассивных полюсов, сдвига активных полюсов в верхней и нижней половинах магнита [7] и особой конфигурации корректирующих катушек на концах ондулятора возникает существенное поле  $B_y$ , взаимодействующее с негоризонтальными участками проволоки и искажающее результаты измерений  $X$ -компонент магнитных интегралов. Была поставлена задача уменьшить провисание на длине  $L_m = 2$  м до 0.1 мм, что невозможно с используемыми ранее проволоками при сохранении приемлемой точности измерений.

Было предложено использовать составную проволоку. В качестве токоведущей части взят однопроволочный медный провод сечением

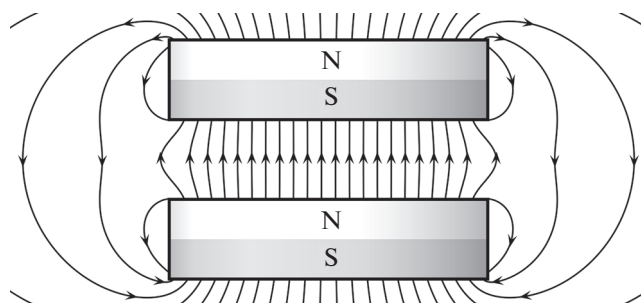
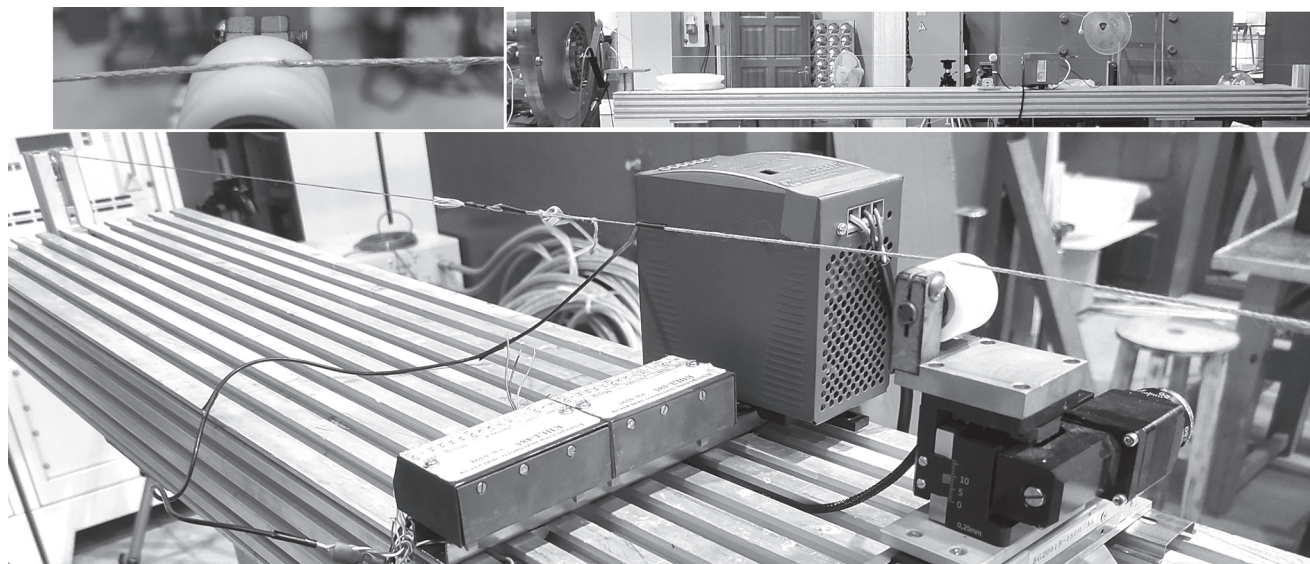


Рис. 2. Силовые линии магнитного поля одной пары катушек без учета магнитопровода.



**Рис. 3.** Система натяжения составной проволоки. Токоведущий медный провод выходит из кевларового чулка между роликами. Ролик, установленный на моторизованных подвижках, испытывает минимальную нагрузку.

1 мм<sup>2</sup>, что позволяет использовать ток более 10 А в долгосрочном режиме. Провод помещен в кевларовый чулок, выдерживающий натяжение более 300 Н. В связи с увеличившимися механическими нагрузками изменена система натяжения проволоки (рис. 3): по краям добавлена вспомогательная пара роликов, на которую приходится почти вся нагрузка; при этом внутренние ролики, которые и определяют положение проволоки с помощью моторизованных 2-координатных подвижек, испытывают нагрузку менее 10 Н.

Полученная система была испытана при измерениях сверхпроводящего ондулятора с максимальным полем 1.2 Тл. Экспериментально было обнаружено, что настройка интегралов с помощью проволоки с постоянным током возможна лишь в диапазоне 0.72–0.87 Тл. Компьютерное моделирование подтвердило, что при больших полях данный метод неприменим даже с нулевым провисанием из-за различных положений медианной плоскости в соседних парах полюсов. Магнитные измерения сверхпроводящего ондулятора были завершены с помощью серии измерений датчиками Холла при разных положениях по оси  $Oz$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко описаны различные системы магнитных измерений вставных устройств генерации синхротронного излучения. Подробно рассказано о системе измерений с помощью натянутой проволоки с постоянным током. Обсуждается проблема провисания проволоки. Обобщается опыт использования различных проволок в ИЯФ СО РАН при производстве сверхпроводящих виг-

глеров. Предлагается модификация системы с помощью составной проволоки и дополнительных роликов. Обновленная система опробована при измерениях сверхпроводящего ондулятора.

Работа выполнена в рамках Соглашения с Минобрнауки России № 075-15-2021-1359 и частично при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (проект № FWUS-2021-0004).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорин А.В., Мезенцев Н.А., Золотарев К.В., Шкаруба В.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 2. С. 168; Zorin A.V., Mezentsev N.A., Zolotarev K.V., Shkaruba V.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 2. P. 121.
2. Gluskin E., Mezentsev N. Superconducting wigglers and undulators: Synchrotron light sources and free-electron lasers. Accelerator physics, instrumentation and science applications. Cham: Springer Nature. 2020. P. 935.
3. Bogomyagkov A.V., Karyukina K.Y., Levichev E.B. // Tech. Phys. 2016. V. 61. P. 119.
4. Khrushchev S., Mezentsev N., Lev V. et al. // Proc. IP-AC2014 (Dresden, 2014). P. 4103.
5. Mezentsev N., Tsukanov V., Zorin A. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 67.
6. Bekhtenev E., Dementiev V., Fedurin M. et al. // Nuclear Instrum. Meth. Phys. Res. A. 1998. V. 405. P. 214.
7. Mezentsev N.A., Khrushchev S.V., Shkaruba V.A. et al. // Proc. RuPAC2016 (St. Petersburg, 2016). P. 21.

**Magnetic integrals minimization methods for superconducting insertion devices**

**A. V. Zorin<sup>a, b, c, \*</sup>, N. A. Mezentsev<sup>a, b</sup>, V. A. Shkaruba<sup>a, b</sup>, V. M. Tsukanov<sup>a, b</sup>, A. A. Volkov<sup>a, b</sup>,  
O. A. Tarasenko<sup>a</sup>, P. V. Kanonik<sup>a, c</sup>, F. P. Kazantsev<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

<sup>b</sup> *Synchrotron Radiation Facility-Siberian Circular Photon Source "SKIF", Boreskov Institute of Catalysis  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Koltsovo, 630559 Russia*

<sup>c</sup> *Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Russia*

*\*e-mail: a.v.zorin@inp.nsk.su*

Stretched wire with direct current magnetic measurements method is used for producing synchrotron radiation generation insertion devices. The method allows to measure and to minimize the first and the second magnetic field integrals. The paper focuses on the wire sag problem.