

УДК 537.626:537.811:538.945

МОДЕРНИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО МНОГОПОЛЮСНОГО ВИГГЛЕРА, УСТАНОВЛЕННОГО НА НАКОПИТЕЛЕ ELETTRA

© 2019 г. С. В. Хрущев¹, *, В. А. Шкаруба¹, Н. А. Мезенцев¹, В. М. Цуканов¹,
О. А. Тарасенко¹, А. А. Волков¹, А. В. Брагин¹, В. Х. Лев¹, А. Н. Сафронов¹,
Е. Карантзоулис², Д. Занграндо² (ELETTRA)

¹ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия

²ELETTRA, Триест, Италия

*E-mail: Khruschev@mail.ru

Описывается выполненная в 2017 г. в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН работа по модернизации магнитной системы вигглера, установленного на накопитель ELETTRA в 2002 г. Модернизация коснулась, главным образом, изменения параметров сверхпроводящих катушек.

DOI: 10.1134/S0367676519020182

ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводящий вигглер, установленный на ELETTRA (Триест, Италия), был изготовлен в ИЯФ СО РАН в 2002 г. [1, 2]. В 2013 г. была произведена модернизация криостата вигглера с целью снизить расход жидкого гелия [3]. С июня 2013 по январь 2017 вигглер работал без каких-либо проблем. В январе 2017 г. при подготовке к установке ускорителя на энергию 2.4 ГэВ произошел срыв, при котором магнитная система вигглера была повреждена. Институтом ядерной физики СО РАН было предложено произвести модернизацию магнита вигглера вместо его ремонта.

Основной задачей по модернизации вигглера было изменение конструкции катушек с целью повышения надежности вигглера. Новые катушки были изготовлены со значительно уменьшенным количеством витков в обмотке. При этом изменять остальные параметры вигглера (общее количество полюсов, период, рабочее магнитное поле) не предполагали. Новая конструкция катушек позволила не только уменьшить их размеры, но также повысила надежность и существенно снизила запасенную энергию. В январе 2018 г. обновленный магнит был собран в криостате и установлен на накопительное кольцо ELETTRA. Фотография вигглера приведена на рис. 1.

ОБНОВЛЕННАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ВИГГЛЕРА

Магнитная система вигглера (как до модернизации, так и после) состоит из 49 полюсов, из которых 45 основных (с номинальным магнитным

полем), 2 – с полем 3/4 и 2 – с полем 1/4. Каждый полюс состоит из двух катушек, намотанных проводом из NbTi, расположенных симметрично сверху и снизу вакуумной камеры. Основные параметры магнитной системы вигглера до и после модернизации приведены в табл. 1.

Для изготовления модернизированной магнитной системы вигглера был использован точно такой же провод, что и для старой магнитной системы. Это позволило произвести наглядное сравнение старой и новой концепции изготовления катушек. Параметры использованного сверхпроводящего провода приведены в табл. 2.

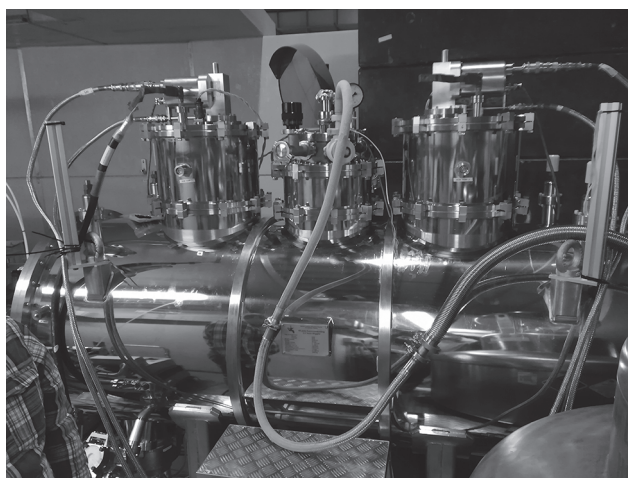


Рис. 1. Вигглер, установленный на кольце ELETTRA.

Таблица 1. Основные параметры магнитной системы вигглера до и после модернизации

	До модернизации	После модернизации
Количество полюсов	49	49
Количество основных полюсов	45	45
Количество полюсов 3/4	2	2
Количество полюсов 1/4	2	2
Период, мм	64	62.8
Толщина катушки вдоль пучка (период/2), мм	32	31.4
Число витков в слое	66 (65)	20 (19)
Число слоев 1-й секции	7	4
Общее число витков 1-й секции	459	78
Число слоев 2-й секции	7	6
Общее число витков 2-й секции	458	117
Максимально достигнутое магнитное поле, Тл	3.6	>3.7
Ток в 1-й секции, соответствующий полю 3.5 Тл, А	205	283
Ток во 2-й секции, соответствующий полю 3.5 Тл, А	476	548
Запасенная энергия на поле 3.5 Тл, кДж	235	46

Таблица 2. Параметры сверхпроводящего провода

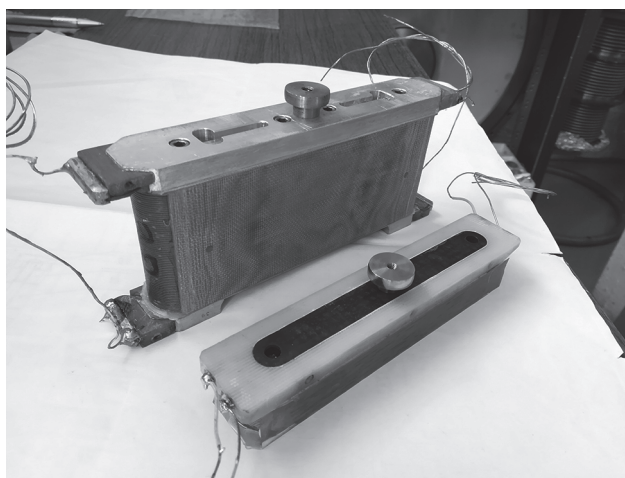
Диаметр, мм	0.85 (0.91 с изоляцией)
Отношение NbTi : Cu	0.43
Число витков NbTi	312
Критический ток модернизированной./усиленного Sc-провода, А	~360 (при 7 Тл, 4.2 К)

Основным изменением в конструкции катушек было уменьшение количества витков в слое (высоты катушки) и уменьшение количества слоев в каждой из двух секций. Такие изменения, естественно, снижают уровень магнитного поля (как в медианной плоскости, так и на обмотках) при тех же токах в обмотках. Но мы говорим о сверхпроводящих катушках, и в этом случае снижение уровня магнитного поля позволяет увеличить ток. Конечно же максимально допустимый уровень магнитного поля в обмотках все равно снижается, но этот максимум оказывается в более выгодном месте по отношению к медианной плоскости. Таким образом, расчетное поле в медианной плоскости при произведенных изменениях оказалось несколько выше имевшегося. Дальнейшее снижение количества слоев и витков в обмотках уже приводило только к снижению поля в медианной плоскости. Впервые катушки минимальной высоты были нами использованы при изготовлении вигглера для CLS (Саскатун,

Канада), который описан в работах [4, 5]. Внешний вид старой и новой катушки вигглера для ELETTRA приведен на рис. 2.

Сравнение распределения поля по вертикальной координате на внутренних поверхностях первой и второй секций обмотки старой и новой конструкции приведено на рис. 3 и 4. Приведенные графики соответствуют предварительным расчетам для поля в медианной плоскости 3.5 Тл.

Расположение точек, характеризующих состояние сверхпроводящего провода в обмотках до и после модернизации относительно критической кривой для сверхпроводящего провода, приведено на рис. 5. Видно, что поле в медианной плоскости, со-

**Рис. 2.** Внешний вид старой и новой катушки вигглера.

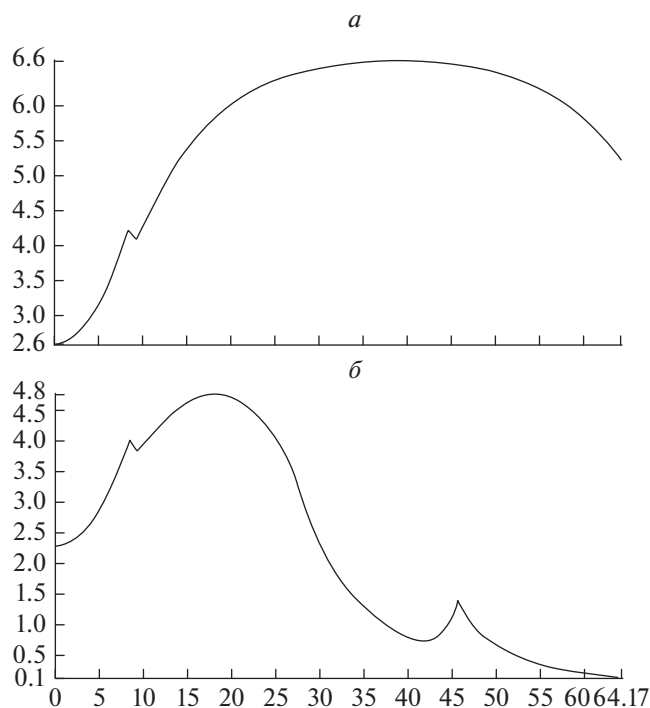


Рис. 3. Распределение поля на внутренней части обмотки первой секции относительно вертикальной координаты до (а) и после модернизации (б).

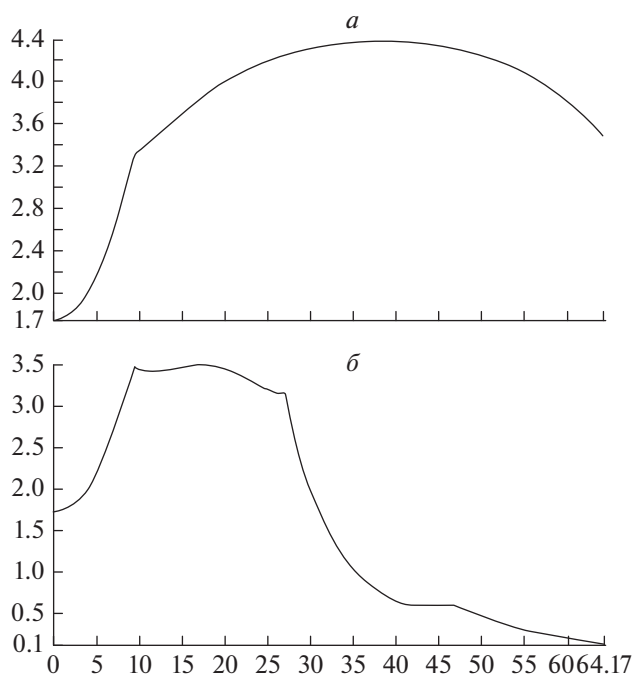


Рис. 4. Распределение поля на внутренней части обмотки второй секции относительно вертикальной координаты до (а) и после модернизации (б).

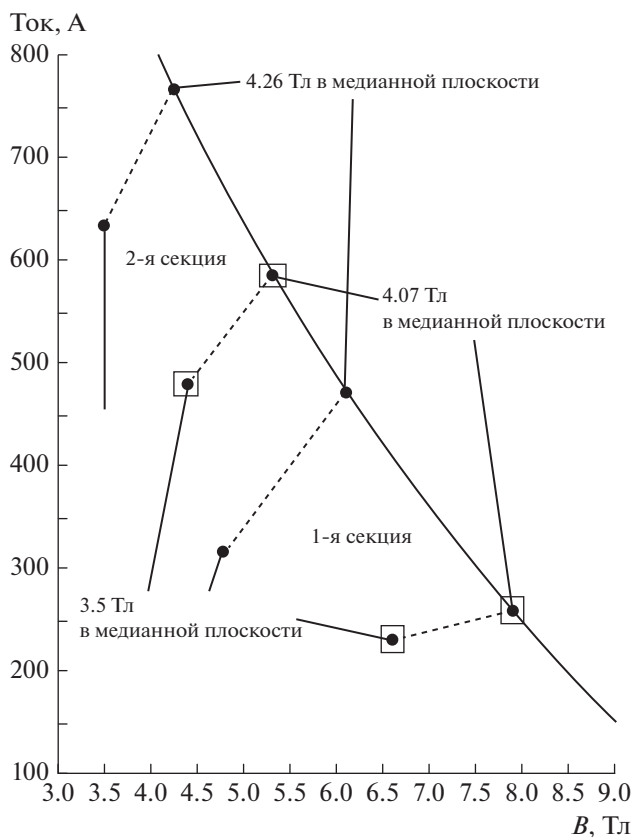


Рис. 5. Расположение точек, характеризующих состояние сверхпроводящего провода в обмотках до (◻) и после модернизации (●) относительно критической кривой для сверхпроводящего провода.

ответствующее точкам, лежащим на критической кривой короткого образца сверхпроводящего провода, выросло с 4.07 до 4.26 Тесла.

ИСПЫТАНИЯ ОБНОВЛЕННОГО МАГНИТА

Внешний вид собранного магнита приведен на рис. 6. Проведенные в погружном криостате испытания показали максимум поля заметно ниже расчетного. История срывов представлена на рис. 7. Первое испытание (срывы 1–72). Второе испытание (срывы 73–93) произведено после замены двух наиболее часто срывавшихся катушек. Видно, что это не принесло изменений. Было высказано предположение, что причиной является использовавшийся в качестве наполнителя в эпоксидный компаунд порошок оксида гадолиния с целью увеличения теплоемкости. Чтобы проверить это, были намотаны 8 дополнительных катушек с использованием ранее применявшегося оксида алюминия. Испытания только этих катушек показали магнитное поле 3.8 Тесла (срывы 94–118). Было принято решение уменьшить до 15 мм магнитный зазор, что позволили

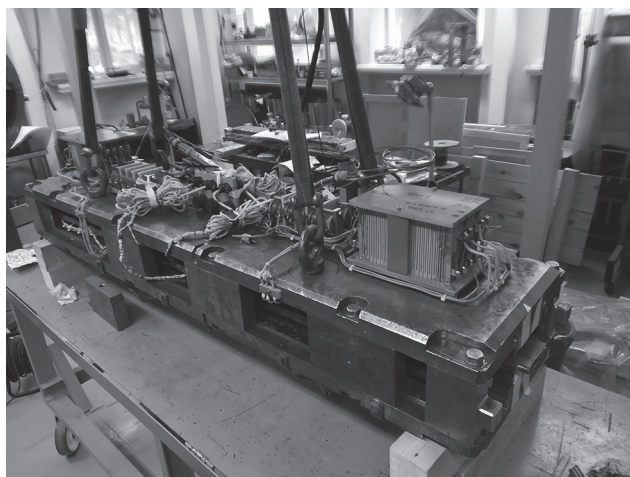


Рис. 6. Внешний вид собранного магнита.

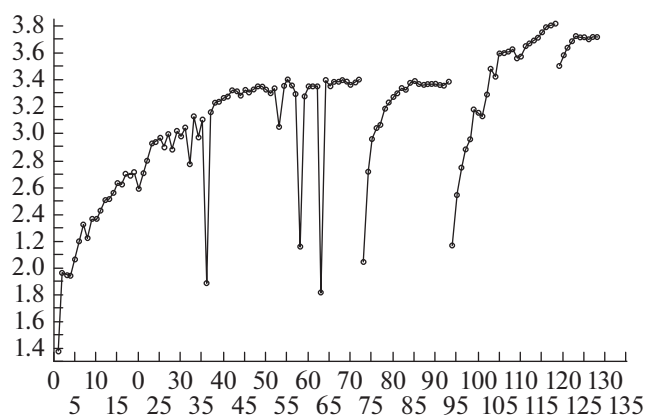


Рис. 7. История срывов.

размеры имеющейся в вигглере вакуумной камеры. Испытания с уменьшенным зазором позволили достичь поля 3.7 Тесла (срывы 119–128).

Также были проведены измерения продольного распределения магнитного поля в вигглере при помощи каретки с датчиками Холла. Путем интегрирования этих измерений были предварительно подобраны токи, соответствующие нулевым интегралам (рис. 8). Эти токи позднее были уточнены в процессе испытаний вигглера на накопителе ELETTRA.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После завершения испытаний в погружном криостате магнит был заварен в гелиевый бак и

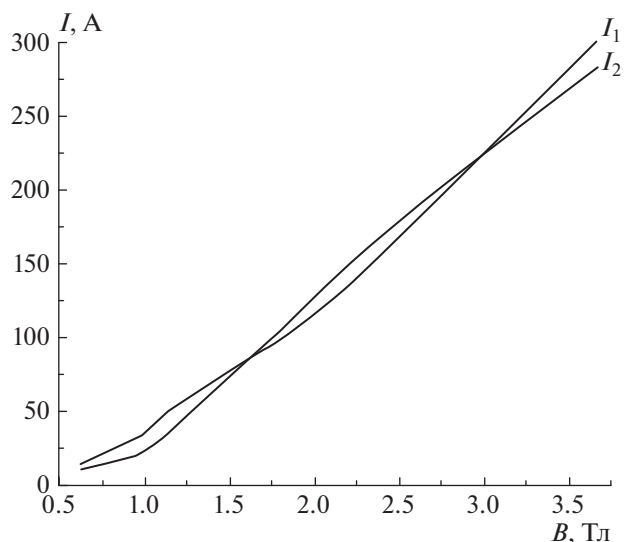


Рис. 8. Токи, соответствующие нулевым интегралам.

отправлен заказчику. На территории ELETTRA магнит был собран в собственном криостате и установлен на кольцо. Первый же подъем поля позволил достичь 3.73 Тесла. Испарение гелия при срыве подняло давление внутри гелиевого бака, но, в отличие от магнита до модернизации, выхода испаренного гелия наружу не наблюдалось, что связано с пятикратным снижением запасенной энергии. Далее, в процессе работы с пучком, были уточнены токи, соответствующие нулевым интегралам, после чего вигглер был передан заказчику. В настоящее время вигглер успешно функционирует на накопителе ELETTRA.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП “СЦСТИ” ИЯФ СО РАН, поддержанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Batnikov A., Jurba V., Khrushchev S. et al.* // Proc. of EPAC-2002. Paris. France. P. 2634.
2. *Batnikov A.M., Bekhtenev E.A., Ilyin I.V. et al.* // Proc. of SRI-2003. San Francisco. USA. V. 705. Issue 1. P. 183.
3. *Zangrando D., Bracco R., Castronovo D. et al.* // Proc. IPAC 2014. Dresden. Germany. P. 2687.
4. *Bekhtenev E.A., Khrushchev S.V., Kuper E.A. et al.* // Phys. Part. and Nucl. Lett. 2006. V. 3. Suppl. 1. P. S16.
5. *Khrushchev S.V., Kuper E.A., Lev V.H. et al.* // NIM A575. 2007. P. 38.