

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МНОГОПОЛЮСНЫЕ ВИГГЛЕРЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИЯФ СО РАН

*В. А. Шкаруба¹, А. В. Брагин, А. А. Волков, А. И. Ерохин,
А. В. Зорин, В. Х. Лев, Н. А. Мезенцев, А. Н. Сафронов,
В. М. Сыроватин, О. А. Тарасенко, С. В. Хрущев, В. М. Цуканов*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Сверхпроводящие многополюсные вставные устройства (вигглеры и ондуляторы), используемые для генерации синхротронного излучения, значительно увеличивают поток фотонов, особенно в жесткой спектральной области. За 35 лет в ИЯФ СО РАН было создано более 25 сверхпроводящих вигглеров для ведущих центров синхротронного излучения. Была разработана криогенная система на основе криокулеров, которая позволяет автономно эксплуатировать сверхпроводящие вставные устройства без расхода жидкого гелия в течение нескольких лет. В статье представлены характеристики различных сверхпроводящих вставных устройств, созданных в ИЯФ СО РАН. Обсуждаются особенности конструкции и последние достижения в разработке магнитной и криогенной систем с жидкостным и косвенным охлаждением.

Superconducting multipole insertion devices (wigglers and undulators) used to generate synchrotron radiation significantly increase the photon flux, especially in the hard spectral region. Over 35 years more than 25 superconducting wigglers for leading centers of synchrotron radiation have been created at BINP. A cryogenic system based on cryocoolers was developed which allows autonomous operation of superconducting insertion devices without the consumption of liquid helium for several years. The article presents the characteristics of various superconducting insertion devices created at BINP. The design features and recent advances in the development of a magnetic and cryogenic system with liquid and indirect cooling are discussed.

PACS: 84.71.Ba; 41.60.Ap; 07.20.Mc

ВВЕДЕНИЕ

Вставные устройства (вигглеры и ондуляторы), устанавливаемые в прямолинейные промежутки накопителя для генерации синхротронного излучения, не влияют на орбиту пучка в остальной части накопителя. Использование сверхпроводящих вставных устройств с большим уровнем магнитного поля значительно повышает поток фотонов, особенно в жесткой спектральной области. Первый в мире сверхпроводящий 20-полюсный вигглер с магнитным полем 3,5 Тл и периодом 90 мм был создан в ИЯФ СО РАН и установлен на накопитель ВЭПП-3 в 1979 г. [1]. Начиная с 1995 г. в ИЯФ

¹E-mail: shkaruba@mail.ru

СО РАН было создано более 25 различных сверхпроводящих вставных устройств для ведущих зарубежных и российских центров синхротронного излучения. Каждое из них было оптимизировано под свою экспериментальную задачу с учетом особенностей конкретного накопителя. Криогенная система сверхпроводящих вигглеров, разработанная в ИЯФ СО РАН, позволяет работать не только без потери жидкого гелия, но и с пониженным относительно наружной атмосферы давлением. Соответствующее понижение температуры дает возможность повысить уровень магнитного поля благодаря смещению критических параметров сверхпроводящего провода. В данной статье представлены основные характеристики и особенности магнитной и криогенной систем сверхпроводящих вставных устройств, создаваемых в ИЯФ СО РАН.

1. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МНОГОПОЛЮСНЫЕ ВИГГЛЕРЫ

Вставное устройство не является основной частью магнитной структуры накопителя, и его влияние на пучок необходимо минимизировать. Основное требование к вставному устройству — компенсация нарушения орбиты вне места его установки. Условием замыкания орбиты является зануление первого и второго интегралов магнитного поля вдоль оси вставного устройства. Многополюсные вигглеры значительно повышают число генерируемых фотонов пропорционально количеству полюсов. Использование сверхпроводящих катушек повышает уровень магнитного поля на полюсах магнитной структуры при одновременном уменьшении их размеров, что дает возможность поместить большее количество магнитных полюсов на доступной длине промежутка и создать больший поток фотонов.

Для получения максимального потока фотонов в требуемом спектральном диапазоне необходимо оптимизировать такие параметры магнитной структуры вигглера, как период, величину магнитного поля на полюсах и межполюсного зазора, в зависимости от энергии пучка, характеристической энергии фотонов и доступной длины прямолинейного промежутка. Для замыкания орбиты используются две пары боковых полюсов с полем $1/4$ и $3/4$ от величины основного поля. Разбиение сверхпроводящих обмоток на наружную и внутреннюю секции повышает уровень поля на $\sim 15\%$ благодаря добавлению тока на внешнюю секцию, где уровень магнитного поля ниже. Магнит вигглера состоит из двух половинок, содержащих полюса со знакопеременным полем, расположенных выше и ниже камеры накопителя. Обмотки, имеющие форму горизонтального рейстрека, намотаны отдельно и соединены последовательно. Для запитывания обмоток используются два независимых источника тока. Перераспределение токов от независимых источников между обмотками дает возможность занулять интегралы поля.

Каждый вигглер был разработан исходя из параметров конкретного накопителя и оптимизирован по спектральным характеристикам. Условно большинство сверхпроводящих многополюсных вигглеров, созданных в ИЯФ СО РАН, можно разделить на три группы [2].

1.1. Вигглеры с высоким уровнем поля (до 7,5 Тл) и длинным периодом (140–200 мм). Вигглеры с высоким уровнем поля выгодно устанавливать на источники синхротронного излучения с низкой и средней энергией электронного пучка (1–2 ГэВ). Это позволяет значительно увеличить поток фотонов в жесткой области

спектра и тем самым продлить жизненный цикл уже существующих накопителей. Большой горизонтальный угол отклонения орбиты, возникающий благодаря высокому уровню поля и низкой энергии пучка, дает возможность установки сразу нескольких каналов вывода излучения. Большая вертикальная апертура, требуемая для таких накопителей с точки зрения динамики пучка, ведет к росту как величины магнитного зазора, так и поперечного размера катушек вигглера для обеспечения требуемой однородности поля. Поэтому особенностью вигглеров с высоким уровнем поля является большая накопленная энергия, пропорциональная объему, занимаемому магнитным полем, которая составляет $\sim 0,4-0,8$ МДж. При такой величине запасенной энергии важной задачей становится обеспечение безопасного вывода энергии и защита сверхпроводящих обмоток от повреждения в случае срыва сверхпроводимости. На рис. 1 представлен внешний вид сверхпроводящего 22-полюсного вигглера с полем 7 Тл для накопителя DELTA с установленной системой защиты, основанной на цепочках последовательно соединенных холодных диодов и резисторов, шунтирующих сверхпроводящие обмотки. В табл. 1 (строки 1–4) представлены основные параметры вигглеров с высоким уровнем поля.

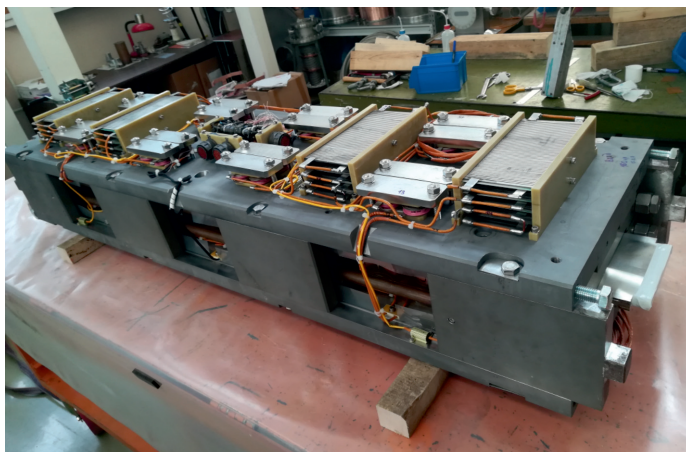


Рис. 1. Магнитная система сверхпроводящего 7-Тл вигглера для накопителя DELTA

1.2. Вигглеры со средним уровнем поля (2,5–4,2 Тл) и средним периодом (46–64 мм). Вигглеры со средним уровнем поля стали наиболее востребованными, так как спектральный диапазон генерируемых ими фотонов является наиболее используемым в экспериментах с синхротронным излучением. Благодаря более короткому периоду такие магнитные структуры могут содержать до 50 и более сверхпроводящих полюсов. При этом запасенная энергия не превышает $\sim 30-60$ кДж, и потери жидкого гелия при срыве сверхпроводимости становятся значительно ниже и даже могут иметь нулевое значение. В табл. 1 (строки 5–10) представлены основные параметры вигглеров со средним уровнем поля.

Основная задача оптимизации структуры многополюсного сверхпроводящего вигглера состоит в достижении максимально возможного уровня магнитного поля на орбите пучка при минимальной длине периода. Это дает возможность поместить

Таблица 1. Основные параметры сверхпроводящих многополюсных вигглеров ИЯФ СО РАН

№ п/п	Накопитель, год	Поле $B_{\max}/B_{\text{раб}}$, Тл (период, мм)	Магнитный зазор/апертура пучка, мм (число полюсов)	Мощность излучения, кВт (E , ГэВ; I , А)
1	BESSY-2, Германия, 2002	7,0/ 7,67 (148)	19/13 (17)	56 (1,9; 0,5)
2	КИСИ, Москва, 2007	7,5/ 7,7 (164)	19/14 (21)	36 (2,5; 0,1)
3	CAMD-LSU, США, 2013	7,5/ 7,75 (193)	25/15 (15)	17 (1,3; 0,2)
4	DELTA, Германия, 2018	7,0/ 7,25 (128)	16,5/10 (22)	17 (1,3; 0,13)
5	ELETTRA, Италия, 2002	3,5/3,7 (64)	16,5/11 (49)	8,8 (2,0; 0,2)
6	DLS, Англия, 2006	3,5/3,8 (60)	16,4/10 (49)	60 (3,0; 0,5)
7	CLS, Канада, 2007	4,0/ 4,3 (48)	13,9/9,5 (27)	12 (2,9; 0,2)
8	LNLS, Бразилия, 2009	4,1/ 4,2 (60)	18,2/14 (35)	4,45 (1,37; 0,3)
9	DLS, Англия, 2009	4,2/ 4,3 (48)	14,4/10 (49)	55 (3,0; 0,5)
10	AS, Австралия, 2012	4,2/ 4,4 (52)	15,2/10 (63)	37,5 (3,0; 0,2)
11	CLS, Канада, 2005	2,0/ 2,2 (34)	13,5/9,5 (63)	12 (2,9; 0,5)
12	ALBA, Испания, 2010	2,1/ 2,27 (30)	12,6/8,5 (119)	20 (3,0; 0,4)
13	ANKA, Германия, 2013	2,50/ 2,85 (47)	19/15 (40)	4,5 (2,5; 0,4)

большее число периодов на доступной длине прямолинейного промежутка накопителя и получить наибольший поток фотонов в требуемом спектральном диапазоне. Для повышения уровня магнитного поля на сверхпроводящем полюсе использовались следующие подходы.

1. Уменьшение величины магнитного зазора за счет утоньшения стенок вакуумных камер и расстояний между ними до технологических пределов. На рис. 2 показана конструкция магнитного зазора 15-полюсного вигглера LSU-CAMD с полем 7 Тл, где величина горизонтальной апертуры составляет ~ 200 мм, а вертикальные зазоры между элементами имеют величину $\sim 0,5$ мм на длине 2 м.

2. Эффективное использование токонесущей способности сверхпроводящих проводов. На рис. 3 представлено расположение рабочих точек, соответствующих току в критических областях обмоток, относительно нагрузочных кривых используемых

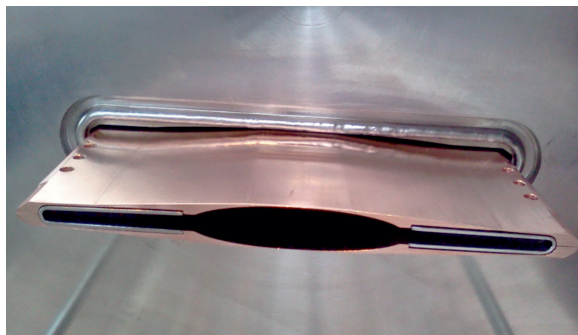


Рис. 2. Конструкция вакуумной камеры 7-Тл вигглера LSU-CAMD

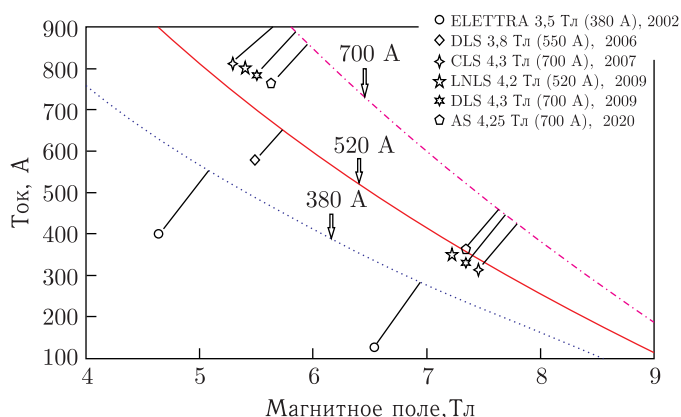


Рис. 3. Расположение рабочих точек обмоток относительно нагрузочных кривых Nb-Ti-проводов

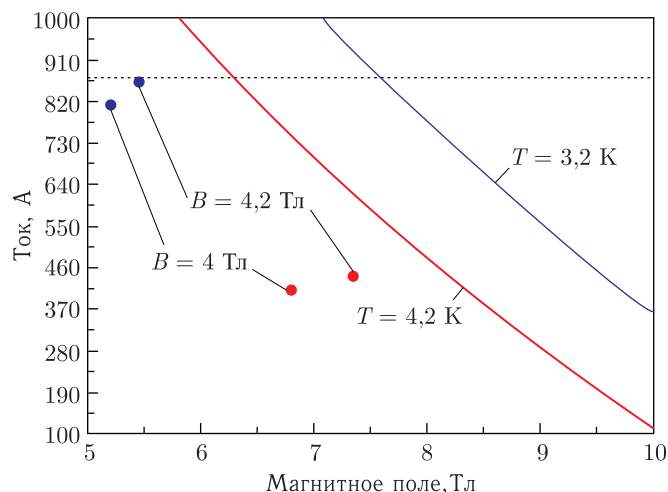


Рис. 4. Смещение нагрузочной кривой Nb-Ti-провода при температуре 3,2 К и соответствующий сдвиг рабочих точек с 4 до 4,2 Тл

сверхпроводящих Nb-Ti-проводов для нескольких вигглеров. Можно заметить, что рабочие токи в обмотках достигают $\sim 90\text{--}95\%$ от тока короткого образца.

3. Увеличение токнесущей способности сверхпроводящего провода при понижении рабочей температуры до $\sim 3\text{ К}$ приводит к смещению токовых параметров используемого Nb-Ti-провода на несколько десятков ампер и позволяет увеличить уровень магнитного поля, как представлено на рис. 4.

1.3. Вигглеры с низким уровнем поля (2–2,5 Тл) и коротким периодом (30–47 мм). В спектре излучения короткопериодных вигглеров в области низкой энергии фотонов появляются гармоники, характерные для излучения ондулятора. Так, например, 119-полюсный вигглер с полем 2,1 Тл и периодом 30 мм для накопителя ALBA имеет параметр ондуляторности $K \sim 6$. В этих устройствах была также ис-

пользована концепция горизонтального рейстрека, как и для вигглеров с длинным периодом. Преимущество такого подхода состоит в уменьшении длины использованного провода и снижении индуктивности и накопленной энергии в 3–4 раза. Благодаря применению технологии холодной сварки давлением, обеспечивающей остаточное сопротивление контакта $\sim 10^{-12}$ Ом, даже при нескольких сотнях контактов между катушками выделяемая в них мощность не превышает 1 мВт при токе в обмотках ~ 1000 А. В табл. 1 (строки 11–13) представлены основные параметры вигглеров с коротким периодом.

2. КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА С НУЛЕВЫМ РАСХОДОМ ГЕЛИЯ

Основной концепцией криостата сверхпроводящего вигглера, разработанного в ИЯФ СО РАН, является полный перехват всех теплопритоков в гелиевый сосуд и отведение тепла на соответствующие ступени криокулеров для предотвращения испарения жидкого гелия [3]. На рис. 5 схематично представлена конструкция криостата с нулевым расходом гелия. Гелиевый сосуд с магнитом окружен двумя медными экранами с температурой 60 и 20 К. Четыре 60-К ступени криокулеров с общей мощностью ~ 180 Вт охлаждают внешний 60-К экран. Наружный экран и гелиевый сосуд покрыты многослойной экранно-вакуумной изоляцией, и приток тепла через излучение снаружи не превышает 0,01 мВт. Медные теплопроводы, установленные в критических точках криостата, перехватывают потоки тепла на соответствующие ступени криокулеров с температурой 60, 20 и 4 К. Приток тепла по кевларовым подвескам гелиевого сосуда не превышает 10 мВт. Две головки криокулеров Sumitomo SRDK-415 являются основой блоков ввода тока, расположенных в защитном вакууме криостата. Блок ввода тока состоит из оптимизированных латунных тоководов, соединенных с ВТСП тоководами, постоянно подключенных к обмоткам магнита через керамические изоляторы на корпусе гелиевого сосуда. Тепло, приходящее снаружи и выделяемое от тока в латунных тоководах, перехватывается в месте их соединения

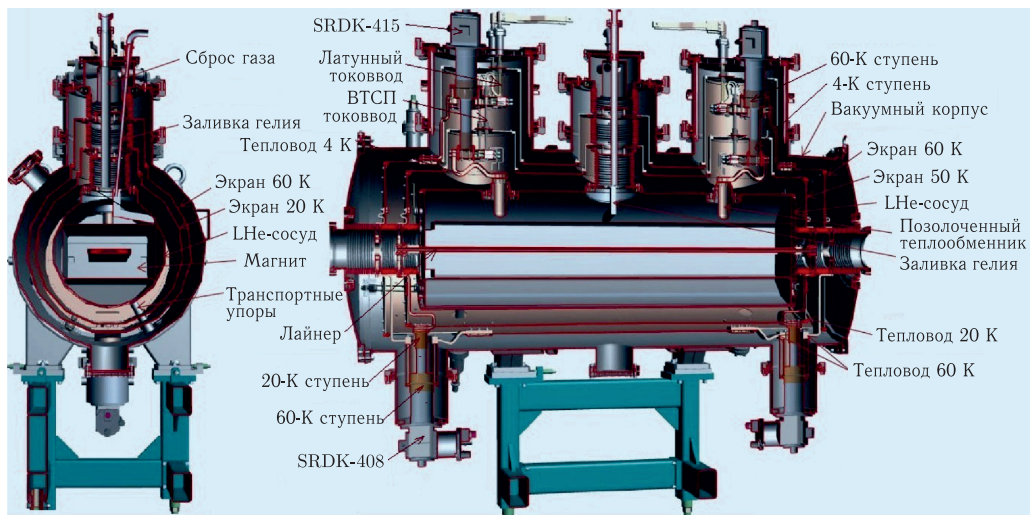


Рис. 5. Криогенная система сверхпроводящего вигглера с нулевым расходом гелия

Таблица 2. Тепловой баланс криостата вигглера с нулевым расходом гелия

Источник нагрева	Тепловая нагрузка на ступени криокулера, Вт		
	60 К	20 К	4 К
Тепловое излучение	8	0,05	0,0002
Центральная горловина	2,5	0,3	0,06
Сильфоны камеры	5,3	0,25	0,04
Система подвесок	0,5	0,1	0,01
Токовводы (теплопроводность)	50	0	0,3
Токовводы (нагрев током)	50	0	0,3
Сигнальные провода	5	0,1	0,01
Лайнер	10	10	0,2
Полный приток тепла	131,3	10,8	0,92
Холодильная мощность	180 (50 К)	15 (20 К)	3 (4,2 К)

с ВТСП токовводами и отводится на 60-К ступени криокулеров. Ступень с температурой 4 К перехватывает оставшееся тепло с ВТСП токовводов и одновременно охлаждает гелиевый сосуд через позолоченный теплообменник. Приток тепла в гелий по теплопроводности токовводов составляет $\sim 0,3$ Вт. Нагрев от протекающего тока добавляет еще $\sim 0,3$ Вт. При использовании четырех пар токовводов ток запитки магнита составляет ~ 1200 А.

Дополнительная тепловая нагрузка на криогенную систему со стороны токов изображения электронного пучка и синхротронного излучения может достигать нескольких десятков ватт. Поэтому вертикальную апертуру вакуумной камеры необходимо, с одной стороны, увеличивать для снижения нагрева камеры, а с другой стороны, уменьшать для увеличения уровня магнитного поля. Магнитный зазор был уменьшен удалением из него вакуумной камеры с комнатной температурой. Поэтому камерой для пролета пучка являются стенки гелиевого сосуда. Тепловую нагрузку на жидкий гелий (~ 20 Вт) перехватывает лайнер — негерметичная медная камера, охлаждаемая с обоих концов 20-К ступенями криокулеров Sumitomo SRDK-408.

Тепловой баланс криостата (табл. 2) показывает, что холодильная мощность на всех ступенях криокулеров превышает соответствующую тепловую нагрузку. При этом мощность 4-К ступеней превышает притоки тепла в ~ 3 раза. Избыточная мощность используется для переохлаждения жидкого гелия до температуры ~ 3 К, что дает возможность повышать уровень магнитного поля за счет смещения нагрузочных характеристик Nb-Ti-сверхпроводника. Соответствующее понижение давления до $\sim 0,3$ бар в герметизированном гелиевом сосуде относительно наружной атмосферы позволяет избежать потерь гелия наружу при срыве сверхпроводимости.

3. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ВИГГЛЕРЫ С КОСВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Размещение сверхпроводящего магнита непосредственно в защитном вакууме криостата позволяет избавиться от еще одного элемента внутри магнитного зазора — вакуумной камеры гелиевого сосуда — и еще повысить уровень магнитного поля. В этом случае внутри магнитного зазора размещается только вакуумная камера для

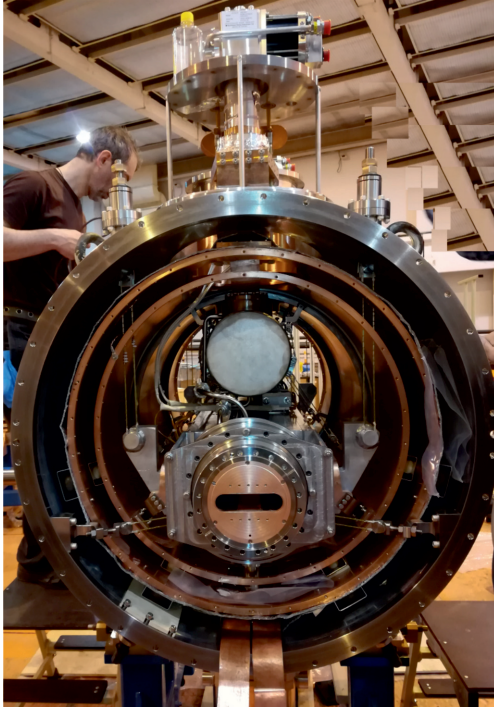


Рис. 6. Сверхпроводящий 3-Тл вигглер с косвенным охлаждением в процессе сборки на КИСИ (Москва)

лем 3,5 Тл и периодом 48 мм, основанных на принципе косвенного охлаждения, были созданы ИЯФ СО РАН для накопителя КИСИ (Москва) в 2019 г. (рис. 6) [5].

пролета пучка, охлаждаемая с обоих концов 20-К ступенями криокулеров, которая защищает сверхпроводящие обмотки магнита от нагрева. Охлаждение магнитной системы производится циркуляцией жидкого гелия, размещенного в отдельном сосуде, по охлаждающим каналам магнита. Основанный на принципе косвенного охлаждения 72-полюсный сверхпроводящий вигглер был создан ИЯФ СО РАН в качестве прототипа вигглера-затухателя для проекта CLIC [4]. Величина магнитного поля составила ~ 3 Тл при магнитном зазоре 17 мм, апертуре камеры для пучка 13 мм и периоде 51,4 мм. Предварительное захолаживание осуществлялось термосифонными азотными тепловыми трубками, соединяющими магнит массой ~ 700 кг с 60-К ступенями криокулеров и позволяющими отводить от магнита мощность ~ 100 Вт. При достижении температуры ~ 64 К азот в трубках превращался в лед и теплообмен автоматически прекращался. Такая схема позволила охладить магнит до рабочих температур за ~ 4 дня. Еще два сверхпроводящих 54-полюсных вигглера с максимальным полем

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Семейство сверхпроводящих вставных устройств, созданных в ИЯФ СО РАН для генерации синхротронного излучения, учитывающих параметры каждого накопителя и оптимизированных для генерации фотонов с требуемыми спектральными характеристиками, успешно применяется в ведущих исследовательских центрах для решения широкого спектра задач с использованием синхротронного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Artamonov A. S., Barkov L. M., Baryshev V. B., Bashtovoy N. S., Vinokurov N. A., Gluskin E. S., Kornukhin G. A., Kulipanov G. N., Mezentsev N. A., Pindiurin V. F., Skrinisky A. N., Khorev V. M. First Results on the Work with a Superconducting "Snake" at the VEPP-3 Storage Ring // Nucl. Instr. Meth. 1980. V. 177, No. 1. P. 239–246.

2. *Khrushchev S., Mezentsev N., Lev V., Shkaruba V., Syrovatin V., Tsukanov V.* Superconducting Multipole Wiggler: State of Art // Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, 2014. P. 4103–4106.
3. *Mezentsev N., Shkaruba V., Syrovatin V.* Superconducting Multipole Wiggler: Magnetic and Cryogenic Systems // Proc. of the 13th Cryogenics IIR Intern. Conf.: Refrigeration Science and Technology, Prague, 2014. Iss. 1. P. 81–87.
4. *Bragin A., Gusev Ye., Khrushchev S., Mezentsev N., Shkaruba V., Syrovatin V., Tarasenko O., Tsukanov V., Volkov A., Zolotarev K., Zorin A.* Superconducting 72-Pole Indirect Cooling 3 Tesla Wiggler for CLIC Dumping Ring and ANKA Image Beamline // SRF-2016. Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 54–61.
5. *Valentinov A., Korchuganov V., Ushakov V., Khrushchev S., Mezentsev N., Shkaruba V., Tsukanov V.* New Superconducting Wiggler for KSRS // Proc. of RuPAC-2018, Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. P. 407–409.