

Отзыв  
официального оппонента на диссертацию Шкарубы Виталия  
Аркадьевича «Сверхпроводящие многополюсные вигглеры для генерации  
синхротронного излучения», представленной на соискание учёной степени  
доктора технических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков  
заряженных частиц и ускорительная техника.

Диссертация Шкарубы В.А. посвящена разработке и созданию нового класса сверхпроводящих систем: сверхпроводящих многополюсных вигглеров, устанавливаемых на накопители заряженных частиц для генерации синхротронного излучения (СИ). Использование таких устройств позволяет значительно повысить спектральную яркость потока фотонов, которая является главной характеристикой любого источника СИ. С точки зрения эксплуатации таких устройств, принципиальное значение имеет проблема создания криогенных систем с минимально возможным расходом жидкого гелия, обеспечивающих их автономную работу в течение длительного времени. Таким образом, проблема создания автономно работающих сверхпроводящих многополюсных вигглеров, обладающих требуемыми спектральными характеристиками, является безусловно актуальной.

Научная новизна работы Шкарубы В.А. так же не вызывает сомнений. Отмечу главные элементы новизны:

- Впервые создан новый класс вставных устройств – сверхпроводящие многополюсные вигглеры для генерации синхротронного излучения с рекордными параметрами по величине магнитного поля и потреблению жидкого гелия, не имеющих аналогов в мире;
- Впервые реализована концепция конструкции криостата на основе криокулеров, состоящая в последовательном перехвате притоков тепла на ступени криокулеров. Более того, должен сказать, что часть работы, посвященная разработке криогенных систем, произвела на меня самое большое впечатление.
- Впервые разработана универсальная методика оптимизации параметров сверхпроводящих многополюсных вигглеров для получения требуемых спектральных и мощностных характеристик СИ на основе подбора величины периода и максимально возможного уровня магнитного поля при определённом магнитном зазоре;
- Впервые предложен и реализован конструктивный элемент криостата – медный лайнер для защиты жидкого гелия и сверхпроводящих обмоток от нагрева со стороны электронного пучка, обладающий также устойчивостью к механическим деформациям;
- Впервые предложены и реализованы схемы подключения обмоток многополюсных вигглеров с разделёнными токами, которые позволяют оптимально запитывать обмотки для повышения уровня поля и настраивать интегралы поля без использования дополнительных источников тока.

Достоверность полученных результатов так же очевидна и подтверждается прежде всего тем, что более десятка созданных при непосредственном участии автора сверхпроводящих многополюсных вигглеров успешно используются для генерации синхротронного излучения на многих источниках СИ в мире. Фактически это является главной заслугой автора: все проведенные исследования и разработки были доведены до реальных изделий и их поставок в крупнейшие лаборатории СИ по всему миру. В результате ИЯФ им. Г.И. Будкера и Россия являются признанными мировыми лидерами в этом классе физических устройств.

Практическая ценность работы заключается в том, что созданные вигглеры, перекрывающие весь необходимый для экспериментаторов спектральный диапазон излучения, способны автономно работать в условиях ограниченного доступа внутри биозащиты накопителей без расхода жидкого гелия. Кроме того, использование таких устройств позволяет продлить жизнь источникам СИ предыдущих поколений, характеристики излучения которых уже не отвечают современным требованиям, а также управлять параметрами пучков (например, в качестве вигглера – затухателя для уменьшения эмиттанса пучка). Результаты работы могут быть использованы при разработке сверхпроводящих многополюсных вигглеров и ондуляторов с требуемыми характеристиками для различных научных центров.

Основные работы автора хорошо известны специалистам. Они неоднократно доложены на международных и российских конференциях, семинарах. По теме диссертации опубликовано 67 печатных работ. Из них 47 в рецензируемых научных журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus и РИНЦ, а также 20 в трудах российских и международных научных конференций.

Работа состоит из введения, шести глав и заключения.

Во введении дан краткий обзор способов улучшения основной характеристики источников СИ - спектральной яркости и показано, что наиболее выгодна для этого установка в прямолинейные промежутки накопителей многополюсных сверхпроводящих вставных устройств. Отмечена специфика работы существующих сверхпроводящих вставных устройств, требующих остановки работы накопителя для пополнения запаса жидкого гелия. В связи с этим обоснована актуальность создания криостатов с минимальным потреблением жидкого гелия, допускающих автономную эксплуатацию в течение очень длительного времени.

В первой главе дан обзор современных сверхпроводящих вставных устройств с точки зрения их использования для увеличения спектральной яркости и спектральной жёсткости излучения. Автором обосновано применение именно многополюсных вставных устройств, позволяющих одновременно, как смешать спектр излучения в коротковолновую область, увеличивая уровень магнитного поля за счёт использования

сверхпроводимости, так и повышать яркость излучения, которая прямо пропорциональна числу магнитных полюсов. На многополюсные вигглеры, созданных к началу 2000-х годов уровень достигнутого поля не превышал ~ 6 Тл и расход гелия был неприемлемо высоким (~2 л/ч). Поэтому автором были сформулированы задачи, решение которых и явилось основной целью данной работы: создание многополюсных вигглеров с максимально высоким потоком фотонов за счёт достижения предельно возможного уровня магнитного поля и оптимизации параметров магнитной структуры, а также уменьшение расхода гелия до значений, позволяющих непрерывную эксплуатацию вигглеров в течение нескольких месяцев.

Во второй главе рассмотрены особенности проектирования многополюсных сверхпроводящих вигглеров, основными параметрами которых является уровень магнитного поля на орбите (определенный максимальным полем, достигнутым на сверхпроводящей обмотке) и период магнитной структуры при доступной величине межполюсного зазора. При этом максимально возможное поле на полюсе достигается оптимизацией параметров сверхпроводящей обмотки. Соотношение, связывающее основные параметры такой структуры показывает, что величина поля на орбите резко спадает с ростом магнитного зазора, поэтому для увеличения поля на орбите пучка следует либо уменьшать зазор, либо увеличивать период, либо делать это одновременно.

Была отработана технология изготовления обмоток, позволившая стабильно достигать токи в обмотке до 90-95 % от тока короткого образца, что является рекордом для обмоток типа рейстрек, хотя и не является рекордом сам по себе. Хорошо известны сверхпроводящие магниты устойчиво работающие на уровнях больше 90-95% критического тока, причем в довольно сложных, полевых условиях.

В третьей главе представлены конкретные примеры реализации многополюсных сверхпроводящих вигглеров для различных центров синхротронного излучения в мире, каждый из которых был оптимизирован под свою специфическую пользовательскую задачу с учётом особенностей конкретного накопителя и требований к спектру генерируемого излучения. Эти устройства можно условно разделить на три отдельные группы:

Вигглеры с высоким уровнем поля (7–7.5 Тл) и длинным периодом (140 – 200 мм), применение которых на источниках с низкой и средней энергией не только увеличивает поток фотонов, но и сдвигается спектр в жёсткую область.

Спектральные характеристики вигглеров со средним уровнем поля (3.5 – 4.2 Тл) и небольшим периодом (48-60мм) оказались наиболее востребованы, благодаря удачному сочетанию этих параметров и типичных характеристик современных источников СИ. При создании каждого из них шёл постоянный прогресс в сторону повышения уровня поля за счёт уменьшения магнитного зазора до технологического предела, использования

прогресса в токовых характеристиках Nb-Ti проводов и в увеличении мощности криокулеров.

Особенностью вигглеров с коротким периодом (30-34 мм) низким уровнем поля (2 – 2.2 Тл) является то, что спектр излучения из них приближается к спектру ондулятора на низких энергиях фотонов. Было показано, что даже при таких малых размерах полюсов, обмотки в виде горизонтального рейстрека имеют преимущества перед вертикальным рейстреком, который безальтернативно используется во всем мире при создании сверхпроводящих ондуляторов и близких к ним по размерам магнитных структур.

В четвертой главе рассмотрены этапы совершенствования криогенной системы сверхпроводящих вигглеров, направленные на достижение нулевого расхода жидкого гелия и заключающиеся в исследовании и выявлении всех возможных каналов притока тепла в криостат и поиску способов их устранения. В результате этих исследований была создана серия сверхпроводящих вигглеров, каждый из которых отличался от предыдущего, в том числе и более совершенной криогенной системой. Применение кевларовых подвесок снизило приток тепла до 10 мВт. Замена одного азотного экрана двумя экранами, охлаждаемыми криокулерами с температурами 20К и 60К, совместно с использованием криогенной суперизоляции, позволила подавить притоки тепла через излучения до пренебрежимо малого значения и уменьшить расход гелия до 0.9 л/ч. Переход от оптимизированных медных токовводов к ВТСП токовводам в газе позволил снизить испарение гелия до 0.5 л/ч. Исследование режимов замороженного тока и размыкания токовводов с использованием подкачки тока показало нецелесообразность их использования для снижения расхода гелия на многополюсных вигглерах. Была предложена новая концепция криостата, состоящая в полном перехвате всех каналов притока тепла на соответствующие холодильные головки с температурами 60К, 20К и 4К посредством тепловодов необходимого сечения, расположенных в оптимальных местах.

Должен сказать, что именно эта часть работы, по моему мнению, является несомненным достижением автора. Именно тщательная проработка и реализация криогеники и позволили достичь столь впечатляющих успехов в разработках многополюсных вигглеров и внедрения их по всему миру и является наиболее сильной стороной работы.

В пятой главе описывается использование лайнера для защиты гелия от нагрева пучком. Особенностью криостатов для вставных устройств является неизбежный нагрев вакуумной камеры от взаимодействия с электронным пучком и с синхротронным излучением. Было показано, что оптимальным техническим решением является удаление из межполюсного зазора «тёплой» вакуумной камеры и перенос тепловой нагрузки со стороны пучка (до ~20-30 Вт) на отдельную негерметичную медную камеру (лайнер), отделённую

зазором от гелиевой камеры и охлаждаемую с обеих сторон криокулерами со ступенью 20К. В итоге удалось повысить уровень поля благодаря уменьшению зазора и при этом уменьшить приток тепла в гелий.

В шестой главе дан прогноз развития сверхпроводящих многополюсных вставных устройств, который, по мнению автора, будет идти в направлении создания сверхпроводящих ондуляторов на основе безжидкостных криостатов с косвенным охлаждением. Нельзя не согласиться с этим утверждением автора, тем более что это в последние годы является основным трендом в производстве сверхпроводящих магнитов для исследовательских целей.

В заключении адекватно представлены основные результаты работы.

Конечно, столь объемная работа не может обойтись без недостатков. Отмечу наиболее важные из них.

1. Главным недостатком является огромный объем диссертации в 363 страницы. Большинство глав страдает излишним многословием и могли бы быть заметно сокращены. Например, непонятно, зачем в главе 2 так подробно и дотошно разбираются всем хорошо известные и очевидные свойства низкотемпературных сверхпроводников. Достаточно было бы просто ссылок на известные исследования.

Понятно стремление автора к дотошности, но все-таки такой огромный объем делает весьма тяжелым и чтение, и понимание диссертации.

2. Создалось впечатление, что автор незнаком с ранними работами по защите сверхпроводящих магнитов секционированием с резисторами и диодами и поэтому декларирует этот метод как новый. Хотя такие методы были предложены еще в конце 80-х годов в ФИАН им. П.Н. Лебедева и опубликованы в Трудах ФИАН том 205 еще в 1991г. Но даже если считать, что Труды ФИАН – трудно найти, и можно пропустить, то метод защиты сверхпроводящих магнитов секционированием с диодами в Большом Адронном Коллайдере автор, работающий в области ускорительной техники, обязан был упомянуть и дать соответствующую ссылку!

3. То же следует сказать про использование высокотеплоемких добавок в обмотки магнитов. Автор справедливо ссылается на работы В.Е. Кейлина и это заслуга автора в использовании этого метода в реальных магнитах для повышения их устойчивости. Но новым этот метод назвать нельзя. А вот первые эксперименты и статистическое подтверждение успешности такого метода (стр. 146 рис. 106) – действительно полезны. Хотя конечно один такой эксперимент скорее качественный, чем количественный.

4. Есть некоторые небрежности в оформлении диссертации, например:

- На стр.22 ссылка на рисунок 11 является на самом деле ссылкой на рисунок 1;

- На стр. 44 в формуле (2.13) должен быть корень квадратный из трёх, а не кубический;

- На стр.300 в тексте перед формулой (5.14) радиус вакуумной камеры обозначен, как “а”, а в самой формуле, как “г” .

5. В печатной версии автореферата – некоторые рисунки неразборчивы, хотя скорее это вина типографии, а не автора.

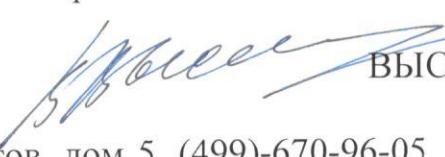
Отмеченные недостатки не снижают в целом высокий уровень работы. Приведенные замечания скорее являются рекомендациями и пожеланиями по дальнейшей работе в данном направлении. Оценивая работу в целом, следует положительно отметить огромный объем работы, выполненный автором в разработке методов и технологий по созданию сверхпроводящих многополюсных вигглеров. Результатом работы является создание нового направления в экспериментальной физике, что является одним из основных требований для докторских диссертаций.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, можно сделать заключение, что диссертация В.А.Шкарубы является законченной научно-квалификационной работой, в которой, на основании проведенных автором исследования и разработок создано новое направление в экспериментальной физике. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвинутые для публичной защиты. Она свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации приводятся сведения о практическом использовании научных результатов, полученных автором.

Принимая во внимание вышеизложенное, считаю, что диссертация Шкарубы В.А. отвечает требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности по специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Отзыв составил доктор технических наук, Директор научного направления – заведующий Отделением сверхпроводящих проводов и кабелей Всероссийского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института кабельной промышленности:

 ВЫСОЦКИЙ В.С.

111024, г. Москва, шоссе Энтузиастов, дом 5, (499)-670-96-05, (985)-766-26-34; vysotsky@ieee.org

Подпись В.С. Высоцкого удостоверяю

Ученый секретарь Научно-технического совета ОАО «ВНИИКП»,

Ученый секретарь аспирантуры ОАО «ВНИИКП»

Старший инженер



НЕДАЙХЛИБ Т.А.