

*На правах рукописи*

**ШКАРУБА Виталий Аркадьевич**

**СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МНОГОПОЛЮСНЫЕ  
ВИГГЛЕРЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ  
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание учёной степени**  
**доктора технических наук**

**НОВОСИБИРСК – 2017**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук

#### НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ:

МЕЗЕНЦЕВ – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.  
Николай Александрович

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ВЫСОЦКИЙ – доктор технических наук, Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» (ОАО «ВНИИКП»), г. Москва, директор научного направления, заведующий отделением.  
Виталий Сергеевич

КОЗУБ – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Протвино, начальник инженерно-физического отдела.  
Сергей Сергеевич

ШИРКОВ – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Международная межправительственная организация Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, главный инженер.  
Григорий Дмитриевич

ВЕДУЩАЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт», г. Москва.  
ОРГАНИЗАЦИЯ

Защита диссертации состоится « 22 » \_\_\_\_\_ декабря \_\_\_\_\_ 2017 г. в « 10:00 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан « 19 » \_\_\_\_\_ сентября \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А.В. Бурдаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Синхротронное излучение (СИ), генерируемое пучком заряженных частиц при прохождении участка с магнитным полем, является уникальным инструментом для исследований в различных областях – физике, материаловедении, химии, катализе, биологии, археологии, геологии. Главная задача, стоящая при создании источников СИ, это повышение спектральной яркости потока излучения – числа фотонов в единицу времени в данной спектральной полосе с единицы площади источника в единицу телесного угла. Именно спектральная яркость определяет величину потока фотонов, который взаимодействует с изучаемым образцом, и, если яркость будет недостаточна, это приведёт к ухудшению статистической точности измерений или вообще исключит возможность проведения эксперимента. Кроме того, в последнее время растёт число задач, для исследования которых требуется более жёсткий спектр излучения, вплоть до 100 кэВ.

Решение задачи увеличения яркости источника, особенно в жёсткой области спектра, можно добиваться несколькими способами. Во-первых, выгодно повышать энергию электронного пучка  $E$ , поскольку угловая расходимость СИ уменьшается как  $\theta_{SR} \sim 1/\gamma$  (где релятивистский фактор  $\gamma$  – отношение полной энергии пучка к энергии покоя:  $\gamma = E/E_0$ ) и, к тому же, средняя по спектру энергия квантов излучения  $\varepsilon_c \sim E^2$ . Так же нужно иметь электронный пучок с малым эмиттансом, чтобы увеличить число излучаемых фотонов с единицы площади. Однако улучшение этих параметров связано с коренной модернизацией всей структуры уже существующих ускорителей, что требует больших финансовых вложений. Во-вторых, можно увеличивать уровень магнитного поля  $B$  в точке излучения, так как характеристическая энергия квантов в спектре  $\varepsilon_c \sim B$ . Однако, уровень поля в обычных поворотных магнитах ограничен величиной 2 Тл, что определяется характеристиками насыщения железа. Получение же более высокого уровня поля в поворотных магнитах связано уже с использованием сверхпроводящих технологий и, опять же, требует коренной модернизации существующих ускорителей. Поэтому гораздо более гибким и экономически эффективным способом является использование, так называемых, вставных устройств (от англ. “insertion devices”), которые устанавливаются в свободные прямолинейные промежутки без вмешательства в основную магнитную структуру накопителей. Одним из видов вставных устройств являются сверхпроводящие шифтеры (от англ. “shift” – сдвигать), сдвигающие спектр излучения в коротковолновую область. Шифтер состоит из одного центрального диполя (полюса) с сильным уровнем магнитного поля и боковых полюсов с низким полем, предназначенных для компенсации искажения орбиты, произведённого центральным полюсом. Однако наиболее эффективным является использование не трёх, а многополюсных вставных устройств со знакопеременным полем, называемых вигглерами

(от англ. “wiggle” – покачивание), в которых использовались бы сверхпроводящие технологии. В этом случае можно одновременно как смещать спектр излучения в коротковолновую область, увеличивая уровень магнитного поля за счёт использования сверхпроводимости, так и повышать яркость излучения, которая прямо пропорциональна числу магнитных полюсов.

Основная проблема в эксплуатации большинства традиционных криостатов, обеспечивающих криогенные температуры на сверхпроводящих обмотках, состоит в необходимости восполнять потери жидкого гелия, что особенно критично для круглосуточно работающих источников СИ, так как вставные устройства расположены внутри биозащиты и доступ к ним обычно затруднён. Поэтому решение задачи создания надёжных криостатов для сверхпроводящих вставных устройств с минимально возможным расходом жидкого гелия и обеспечения их автономной эксплуатации в течение длительного времени (например, около года) имеет принципиальное значение. Решением этой проблемы может стать применение для охлаждения узлов криостата промышленно выпускаемых криокулеров с различными температурно-мощностными характеристиками.

Использование многополюсных сверхпроводящих вставных устройств позволяет так же продлить жизнь источникам СИ предыдущих поколений, характеристики излучения которых уже не отвечают современным требованиям. Поэтому для всех источников СИ в мире, как уже существующих, так и строящихся, задача создания автономно работающих и надёжных сверхпроводящих многополюсных вставных устройств, обладающими требуемыми спектральными характеристиками является не просто очень актуальной, а имеет принципиальное значение.

**Цели и задачи работы.** Цель данной работы – исследовать научные, технические и технологические аспекты, позволяющие решить комплексную задачу создания надёжных сверхпроводящих многополюсных вставных устройств (вигглеров), предназначенных для генерации СИ в широком спектральном диапазоне при установке их на специализированные накопители – источники СИ. Данные устройства должны отвечать специфическим задачам каждого конкретного эксперимента и удовлетворять требованиям конкретного накопителя, не ухудшая его свойства с точки зрения динамики пучка. Данные устройства должны так же обладать возможностью непрерывной автономной работы в закрытой для обслуживания радиационной зоне ускорителей в течение длительного времени (не менее года) без восполнения жидких хладагентов. Учитывая актуальность данной темы, автором были сформулированы следующие **задачи**, решение которых и является основной целью данной диссертационной работы:

1. Разработать методику расчёта оптимальной конфигурации многополюсной сверхпроводящей магнитной структуры, обеспечивающую генерацию максимально возможного потока фотонов в требуемом диапазоне, исходя из требований по величине вертикальной апертуры, а также доступного для

- размещения магнита свободного пространства и других ограничений со стороны конкретного накопителя, учитывая реальные характеристики коммерчески доступных сверхпроводников для изготовления обмоток.
2. Разработать концепцию запитывания сверхпроводящих обмоток многополюсной магнитной структуры, позволяющую настраивать конфигурацию магнитного поля таким образом, чтобы не оказывать отрицательного влияния на характеристики электронного пучка в накопителе.
  3. Разработать технологию изготовления сверхпроводящих обмоток, позволяющую стабильно получать предельно возможный уровень магнитного поля на обмотках в форме рэйстрек, исходя из характеристик доступных сверхпроводников, максимально приблизившись к току короткого образца.
  4. Разработать концепцию защиты сверхпроводящих обмоток многополосных вигглеров, надёжно защищающую обмотки от разрушения при выходе из сверхпроводящего состояния и обеспечивающую регистрацию перехода в нормально-проводящее состояние, исключающую ложные срабатывания.
  5. Исследовать возможность создания и разработать концепцию криогенной системы, обеспечивающую надёжную автономную работу сверхпроводящего вставного устройства в закрытой для обслуживания радиационной зоне ускорителей в течение длительного времени с минимально возможным расходом жидкого гелия и учитывающую дополнительную тепловую и радиационную нагрузку со стороны электронного пучка.

**Личный вклад автора.** В представленных в диссертационной работе результатах автор внёс определяющий вклад в постановку задач по созданию периодических магнитных структур на основе ниобий-титанового сверхпроводника с предельно возможным уровнем магнитного поля, оптимизированных для генерации максимального потока фотонов. Так же в ходе работы автором были проведены многочисленные эксперименты и анализ полученных результатов по изучению и устранению различных каналов притока тепла и разработка основных конструктивных решений, послуживших основой для создания криостатов на основе криокулеров, работающих с нулевым расходом жидкого гелия. В постановке отдельных задач и обсуждениях результатов работ активное участие принимали Н.А. Мезенцев, С.В. Хрущев, являющиеся соавторами ряда совместных работ. Существенная часть конструкторских работ по криогенной системе была проведена автором совместно с В.М. Сыроватыным, а по магнитной системе – совместно с В.Х. Львом, также являющимися соавторами ряда совместных работ. Фамилии других соавторов совместных исследований указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

#### **Научная новизна**

1. Впервые предложена и реализована концепция криогенной системы для сверхпроводящего вставного устройства, работающего на накопителе заря-

женных частиц, основанная на последовательном перехвате всех каналов притока тепла на ступени криокулеров с соответствующими температурами, которая позволила, в отличие от существующих систем, не только снизить расход жидкого гелия до нуля, но и стабильно получать пониженное давление до 0.3 бар в гелиевом сосуде с холодной массой около 1000 кг, несмотря на дополнительную тепловую нагрузку со стороны электронного пучка и вводимый ток для запитки магнита величиной около 1000 А.

2. Впервые предложена и реализована концепция защиты сверхпроводящего магнита, находящегося в гелиевом сосуде, от теплового воздействия со стороны электронного пучка с использованием лайнера - негерметичной медной камеры, которая в качестве отдельного конструктивного элемента вставляется внутрь гелиевой камеры и охлаждается ступенями криокулеров до температур ниже 10 К. Такая камера с температурой, близкой к температуре гелиевой камеры 4.2К, в отличие от традиционно используемых медных экранов, охлаждаемых жидким азотом, значительно уменьшает теплоприток в гелий через излучение и тепловые контакты. С другой стороны, отдельно охлаждаемый медный лайнер, имеющий высокую теплопроводность при низкой температуре, в отличие от также традиционно используемого гальванического медного покрытия, наносимого на 4 К гелиевую камеру, позволил отвести тепловую нагрузку от гелиевого сосуда со стороны электронного пучка и синхротронного излучения на ступени криокулеров.
3. Впервые предложено и реализовано техническое решение, позволяющее защитить медный лайнер от механических деформаций со стороны пондеромоторных сил, возникающих при резком уменьшении магнитного потока, пронизывающего стенки лайнера, при потере сверхпроводимости в магните. Идея состоит в одновременном уменьшении наводимых в лайнере токов за счёт использования меди с пониженной электропроводностью ( $RRR < 50$ ), изготовлении лайнера с минимальной толщиной стенок на грани технологического предела (0.5 мм), а также использовании специального пружинного элемента, возвращающего стенки лайнера в первоначальное положение. Использование тонкой стенки позволяет одновременно минимизировать магнитный зазор для получения максимального уровня магнитного поля.
4. Впервые предложена и разработана универсальная методика для оптимизации параметров сверхпроводящих многополюсных вигглеров, позволяющая получать требуемые спектральные и мощностные характеристики синхротронного излучения на основе подбора величины периода и магнитного поля на орбите при определённом магнитном зазоре и одновременном достижении максимально возможного уровня магнитного поля на обмотке, близкого к току короткого образца. В магнитах, разработанных по этой методике, в большинстве случаев был достигнут предельно возможный уровень магнитного поля на орбите пучка, соответствующий максимальному току в

обмотке на уровне 90 – 95% от тока короткого образца, что для обмоток типа рейстрек, является рекордным значением.

5. Впервые предложена и реализована схема запитки сверхпроводящих обмоток многополюсных вигглеров (в том числе и секционированных) с разделёнными токами, которая не только обеспечивает оптимальную запитку обмоток для достижения максимального уровня поля, но и позволяет настраивать интегралы магнитного поля для замыкания орбиты пучка без использования дополнительных источников тока.
6. Впервые предложена и реализована силовая схема бандажирования сверхпроводящих обмоток с использованием продольно расположенных бронзовых шпилек, которые при охлаждении магнита, создают дополнительное бандажирующее усилие за счёт разности коэффициентов теплового расширения материалов.
7. Впервые предложен и реализован метод повышения устойчивости обмоток к выходу из сверхпроводящего состояния, спровоцированного локальными сбросами электронного пучка накопителя при инъекции, состоящий в использовании в сверхпроводящих обмотках многополюсных вигглеров теплоёмких добавок в эпоксидный компаунд на основе гадолиния.

**Научная и практическая ценность.** Результатом диссертационной работы стало создание более десятка уникальных сверхпроводящих многополюсных вигглеров для генерации синхротронного излучения, перекрывающих весь необходимый для экспериментаторов спектральный диапазон и позволяющих автономно работать в условиях ограниченного доступа не только без расхода жидкого гелия, но и с пониженным давлением в гелиевом сосуде. Эти устройства позволяют не только повысить спектральную жёсткость и яркость излучения, но и управлять параметрами пучков (например, в качестве вигглера - затухателя для уменьшения эмиттанса пучка). С точки зрения теории, разработанная методика оптимизации параметров сверхпроводящих многополюсных вигглеров позволяет быстро оценить необходимые величины периода и магнитного поля с учётом требований по размеру электронного пучка и характеристик конкретного сверхпроводящего провода для получения максимального потока фотонов в требуемом спектральном диапазоне. Практическая ценность подтверждается тем, что ИЯФ СО РАН общепризнанно занимает лидирующие позиции в создании сверхпроводящих генераторов синхротронного излучения и созданные именно в ИЯФ СО РАН сверхпроводящие многополюсные вигглеры используются в качестве вставных устройств на большинстве накопителей в мире: LSU-CAMD (США), BESSY-II (Германия), ELETTRA (Италия), CLS (Канада), DLS (Англия), LNLS (Бразилия), ALBA (Испания), AS (Австралия), ANKA (Германия) и КИСИ (Москва). Дополнительным подтверждением практической ценности можно считать и то, что во многих научных статьях, посвящённые теме сверхпроводящих вставных устройств, в качестве основных примеров реализации таких

устройств приводятся ссылки на вигглеры, созданные именно в ИЯФ СО РАН.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Создан новый класс вставных устройств – сверхпроводящие многополосные вигглеры для генерации синхротронного излучения. Было разработано и реализовано более десятка уникальных сверхпроводящих вставных устройств с рекордными параметрами, как по величине магнитного поля, так и по минимальному потреблению жидкого гелия, не имеющих аналогов в мире. Спектральные характеристики излучения, генерируемого этими устройствами, перекрыли весь востребованный пользователями диапазон по энергиям квантов и успешно используются для решения исследовательских задач с помощью синхротронного излучения во многих крупнейших зарубежных и российских научных центрах: LSU-CAMD (США), BESSY-II (Германия), ELETTRA (Италия), CLS (Канада), DLS (Англия), LNLS (Бразилия), ALBA (Испания), AS (Австралия), ANKA (Германия) и КИСИ (Москва). Стало общепризнанным, что ИЯФ СО РАН занимает лидирующие позиции в создании сверхпроводящих многополосных вигглеров.
2. Предложена и впервые реализована новая концепция конструирования криостатов для сверхпроводящих магнитов на основе криокулеров, позволяющая повысить эффективность использования мощности холодильных ступеней до уровня, не только снижающего расход жидкого гелия до нуля, но и создающего пониженное относительно атмосферного давление в криогенном сосуде с соответствующим понижением температуры кипения жидкого гелия вплоть до  $\sim 3$  К. Новый подход заключается в использовании холодильных ступеней криокулеров не только для реконденсации уже испарённого гелия, но и для полного предотвращения его испарения путём последовательного перехвата всех каналов притока тепла на ступени криокулеров с соответствующими температурами. Понижение рабочей температуры позволило также увеличить величину магнитного поля, благодаря сдвигу токовой характеристики сверхпроводящего провода и, тем самым, повысить надёжность. На основе этого принципа было создано семейство криогенных вставных устройств, способных долговременно (в течение нескольких лет) автономно работать на ускорителях заряженных частиц в условиях ограниченного доступа без потребления жидкого гелия, несмотря на дополнительную тепловую нагрузку, создаваемую электронным пучком и вводимый ток для запитки магнита величиной около 1000 А, что никем в мире ещё не было продемонстрировано.
3. Предложена и разработана универсальная методика оптимизации параметров сверхпроводящих многополосных вигглеров для получения требуемых спектральных и мощностных характеристик синхротронного излучения на основе подбора величины периода и магнитного поля на орбите при определённом магнитном зазоре и одновременном достижении максимального возможного уровня магнитного поля на обмотке, определяемого техни-



ческим пределом – током короткого образца сверхпроводящего провода. Данная методика позволила оптимизировать каждое из вставных устройств под свою специфическую пользовательскую задачу с учётом конкретных особенностей данного накопителя и требований к спектру и мощности генерируемого излучения.

4. На большинстве из созданных многополюсных вигглеров был продемонстрирован реальный ток в обмотках величиной не менее, чем 90 – 95% от теоретического предела (тока короткого образца), что является рекордными параметрами для обмоток типа рейстрек и позволяет говорить о создании технологии стабильного изготовления сверхпроводящих вигглеров с большим количеством обмоток и предельно возможным уровнем магнитного поля на каждой из обмоток.
5. Обоснованы и продемонстрированы преимущества схемы расположения одиночных обмоток сверхпроводящего многополюсного вигглера в виде горизонтального рейстрека по сравнению с конструкцией типа вертикальный рейстрек для вигглеров с малым периодом и ондуляторов. В частности, показана экономическая целесообразность именно такой конструкции при необходимости замены отдельных неисправных обмоток, что особенно важно при массовом изготовлении вигглеров (например, при создании затухательных колец, используемых для уменьшения эмиттанса пучка).
6. Предложен и впервые создан конструктивный элемент криостата – медный лайнер, предназначенный для эффективной защиты жидкого гелия и сверхпроводящих обмоток от нагрева со стороны электронного пучка ускорителя и обладающий также устойчивостью к механическим деформациям, вызванным электромагнитными силами при выходе магнита из сверхпроводящего состояния. Изучены особенности лайнеров различной конструкции и выявлены конструктивные ограничения, приводящие к возможным неисправностям в работе вигглера. Выработаны практические рекомендации, которые можно применять при конструировании лайнеров для различных вставных устройств.
7. Предложены и впервые реализованы схемы подключения обмоток многополюсных вигглеров (в том числе и секционированных) с разделёнными токами, которые не только обеспечивают оптимальную запитку обмоток для достижения максимального уровня поля, но и позволяют настраивать интегралы магнитного поля для замыкания орбиты пучка без использования дополнительных источников тока и, соответственно, не увеличивая теплоприток в гелий от дополнительных тоководов.
8. Предложено и реализовано использование теплоёмких добавок в эпоксидный компаунд на основе гадолиния для повышения устойчивости обмоток многополюсных вигглеров к выходу из сверхпроводящего состояния, спровоцированного локальными сбросами электронного пучка накопителя при инжекции.

9. Обоснованы и реализованы системы защиты сверхпроводящих обмоток многополюсных вигглеров, основанные на цепочках холодных диодов и резисторов, надёжно защищающих обмотки от разрушения при выходе из сверхпроводящего состояния и обеспечивающие регистрацию перехода в нормально-проводящее состояние, исключая ложные срабатывания.

**Апробация диссертации.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинаре в Институте ядерной физики им.Будкера СО РАН и на X, XI, XII, XIII, XIX, XV, XVI, XVII, XVIII, XIX, XX Международных конференциях по использованию синхротронного излучения (Новосибирск, 1994, 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014 и 2016); XVII, VIII, XIX Международных семинарах по ускорителям заряженных частиц (Алушта, 2001, 2003, 2005); XVIII, XIX, XX, XXI, XXIII Российских конференциях по ускорителям заряженных частиц (Обнинск, 2002; Дубна, 2004; Новосибирск, 2006; Звенигород, 2008; Санкт-Петербург, 2012); ISTC-RIKEN– Российско–японском рабочем совещании по ускорительным технологиям, 2001, Япония; Международных конференциях Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI-1991, Честер, Англия; SRI-1997, Химедзи, Япония; SRI-2000, Берлин, Германия; SRI-2003, Сан-Франциско, США; SRI-2006, Тэгу, Южная Корея); Международных конференциях по ускорителям заряженных частиц (PAC-2001, Чикаго, США; PAC-2003, Портленд, США); Европейских конференциях по ускорителям заряженных частиц (EPAC-2000, Вена, Австрия; EPAC-2002, Париж, Франция; EPAC-2004, Люцерн, Швейцария); Азиатских конференциях по ускорителям заряженных частиц (APAC-2001, Пекин, Китай; APAC-2004, Кенджу, Южная Корея); Международных конференциях по ускорителям заряженных частиц (IPAC-2011, Сан-Себастьян, Испания; IPAC-2014, Дрезден, Германия; IPAC2015, Ричмонд, США; IPAC-2016, Пусан, Южная Корея); VII Национальной конференции “Рентгеновское, Синхротронное излучения, Нейтроны и Электроны для исследования наносистем и материалов. Нано-Био-Инфо-Когнитивные технологии” РСНЭ-НБИК (Москва, 2009); XIII Международной конференции по криогенной науке и технологиям (Refrigeration Science and Technology) – ITR-2014 (Прага, Чехия), XII Европейской конференции по прикладной сверхпроводимости European Conference on Applied Superconductivity (ECAS-2015), Лион, Франция.

**Публикации.** 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.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Материал работы изложен на 363 страницах и включает 301 рисунок, 26 таблиц, 1 приложение и список цитируемой литературы из 158 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дан краткий обзор способов улучшения основной характеристики источников СИ – спектральной яркости. Показано, что наиболее экономически выгодным способом повышения яркости является установка в прямолинейные промежутки накопителей многополосных сверхпроводящих вставных устройств, не требующих изменения магнитной структуры накопителя и влияние которых на пучок можно минимизировать. В этом случае можно одновременно, как смещать спектр излучения в коротковолновую область, увеличивая уровень магнитного поля за счёт сверхпроводимости, так и повышать яркость излучения, прямо пропорциональную числу полюсов. 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. Решением этой проблемы могло бы стать применение промышленно выпускаемых криокулеров с различными температурно-мощностными характеристиками. Использование многополосных сверхпроводящих вставных устройств позволяет продлить жизнь уже существующим источникам, характеристики излучения которых уже не отвечают современным требованиям. Поэтому для всех источников СИ, как уже существующих, так и строящихся, совершенствование именно вставных устройств является определяющим для развития экспериментов с СИ и задача создания автономно и надёжно работающих сверхпроводящих многополосных вигглеров с требуемыми спектральными характеристиками не просто является очень актуальной, а имеет принципиальное значение.

**В первой главе** приводится классификация существующих вставных устройств с точки зрения генерации синхротронного излучения и делается краткий обзор преимуществ, появляющихся при установке сверхпроводящих вставных устройств на накопители. К таким преимуществам, кроме повышения жёсткости спектра и увеличения общего потока фотонов, относится также возможность управлять параметрами пучка накопителя (длиной сгустка, временем затухания, энергетическим разбросом, эмиттансом). Из выражения для критической энергии фотонов  $\varepsilon_c [кэВ]$ :

$$\varepsilon_c = 0.665 \cdot B \cdot E^2 \quad (1)$$

можно заключить, что для увеличения спектральной жёсткости излучения можно увеличивать энергию пучка  $E [ГэВ]$ , однако это будет связано с коренной модернизацией всей структуры уже существующих установок, что требует больших финансовых вложений. Следовательно, экономически выгодно идти по пути повышения уровня магнитного поля  $B [Тл]$  в точке излучения. Поэтому наиболее оправдано использование электромагнитных

устройств, работающих на основе сверхпроводимости, которые позволяют получать максимально высокий уровень магнитных полей.

Вставное устройство не является основной частью магнитной структуры, поэтому необходимо минимизировать влияние его магнитного поля на орбиту пучка. Механические погрешности и разбалансировка токов в обмотках приводят к тому, что угол и смещение, на которые отклоняется орбита пучка при прохождении вставного устройства длиной  $L$ , могут иметь некоторые ненулевые значения  $\delta\theta$  и  $\delta x$ :

$$\delta\theta = \frac{1}{B\rho} \int_{-L/2}^{L/2} B_z(s) ds = \frac{I_{first}}{B\rho}, \quad (2)$$

$$\delta x = -\frac{1}{B\rho} \int_{-L/2}^{L/2} s B_z(s) ds = \frac{I_{second}}{B\rho} \quad (\text{при условии, что } I_{first} = 0), \quad (3)$$

где  $\rho$  – радиус орбиты, а  $B\rho$  – магнитная жёсткость, пропорциональная энергии пучка и определяющая степень отклонения его траектории при воздействии магнитного поля.

Поэтому обязательным условием для замыкания орбиты пучка, движущегося в магнитном поле вставного устройства, является равенство нулю первого и второго интегралов поля:

$$I_{first} = \int_{-L/2}^{L/2} B_z(s) ds = 0, \quad (4)$$

$$I_{second} = \int_{-L/2}^{L/2} s B_z(s) ds = 0. \quad (5)$$

Критерий для оценки качества компенсации магнитного поля вставного устройства, с точки зрения влияния на пучок накопителя, можно получить, принимая во внимание бетатронную частоту  $\nu_x$  и бета-функцию  $\beta_x$  в месте установки вигглера и сравнивая величину ошибок, вносимых вигглером с размерами естественного эмиттанса пучка  $\varepsilon_x$ :

$$\delta\theta < 2 \sin(\pi\nu_x) \sqrt{\varepsilon_x / \beta_x}, \quad (6)$$

$$\delta x < 2 \sin(\pi\nu_x) \sqrt{\varepsilon_x \cdot \beta_x}. \quad (7)$$

Если эти условия выполняются, то искажения орбиты в горизонтальном направлении при включении вигглера будут меньше размера пучка электронов и не будут влиять на пучок.

Очевидно, что наиболее эффективно использовать не трёхполюсные шифтеры, а многополюсные магниты со знакопеременным периодическим полем, что позволяет одновременно, как смещать спектр излучения в коротковолновую область, увеличивая уровень магнитного поля за счёт сверхпроводящих технологий, так и повышать яркость излучения, которая прямо про-

порциональна числу магнитных полюсов. Первый в мире 20 - полюсный сверхпроводящий вигглер с полем 3.5 Тл и периодом 9 см был создан в ИЯФ СО РАН и установлен на накопитель ВЭПП-3 в 1979 году.

В разделе 1.2 был проведён анализ состояния развития сверхпроводящих вставных устройств в мире к началу 2000-х годов. В частности было отмечено, что интерес в мире к «обычным» шифтерам, только сдвигающим спектр синхротронного излучения в коротковолновую область, уже был, по большей части, удовлетворён и назрела реальная потребность в создании именно многополюсных вигглеров, дающих значительный выигрыш по потоку фотонов, который пропорционален количеству полюсов. Поэтому в ряде крупнейших центров СИ несколько специализированных групп начали заниматься проблемой получения экстремально высоких магнитных полей в сверхпроводящих многополюсных вигглерах, однако не везде были достигнуты желаемые результаты. В частности, уровень реально достигнутого поля нередко был ниже запланированного и, при этом, абсолютная величина поля не превышала ~6 Тл. Кроме того, реальная величина расхода гелия редко была меньше ~2л/ч, что подразумевало остановку работа накопителя для заправки хладагентами, в лучшем случае, не реже чем раз в несколько дней. Учитывая, что источники СИ предназначены для работы в непрерывном режиме и остановки для профилактических работ планируются на них заранее за несколько месяцев вперёд, такой расход гелия становился уже абсолютно неприемлемым с точки зрения эффективной работы накопителей. Таким образом, комплексная проблема создания многополюсных вставных устройств с максимально высоким потоком фотонов за счёт достижения предельно возможного уровня магнитного поля и оптимизации параметров магнитной структуры, а также задача уменьшения расхода жидкого гелия до приемлемых значений, позволяющих непрерывную эксплуатацию сверхпроводящих вигглеров, по крайней мере, в течение нескольких месяцев, стала более чем актуальной.

**Во второй главе** рассмотрены особенности проектирования многополюсных сверхпроводящих вигглеров. С точки зрения генерации излучения, основными параметрами периодической магнитной структуры являются уровень магнитного поля на орбите  $B_0$  и период магнитной структуры  $\lambda_0$  при доступном межполюсном зазоре  $g$ , как показано на Рис.1 и Рис. 2. Можно показать, что для двумерного случая, когда магнит неограничен в поперечном направлении  $x$  на пучок на оси магнита будет воздействовать только вертикальная составляющая поля периодического вида:

$$B_z(s, z) = B_0 \cosh(k_0 z) \cos(k_0 s), \quad \text{где } k_0 = 2\pi/\lambda_0, \quad (8)$$

$$B_0 = B_p / \cosh(\pi \frac{g}{\lambda}) - \text{максимальное поле на оси пучка,} \quad (9)$$

$B_p$  – максимальное поле на поверхности полюса при  $z = g/2$  и  $s = 0$ .

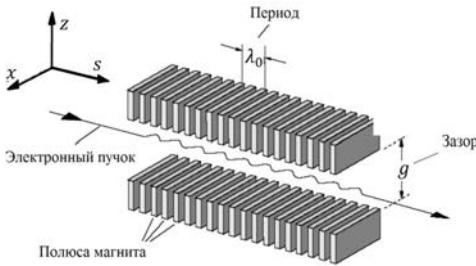


Рис.1. Общий вид периодической магнитной структуры с периодом  $\lambda_0$  и магнитным зазором  $g$  в координатах  $\{x, s, z\}$ .

Для численного представления магнитных структур, в которых поле  $B_0$  на медианной плоскости создаётся периодически изменяющимися магнитными полями, создающимися полюсами, расположенными с некоторым межполюсным зазором вдоль этой плоскости, принято использовать формулу Халбаха (Halbach), которая была предложена для описания периодической структуры из постоянных магнитов и в общем виде выглядит как:

$$B_0 = a \cdot e^{\left[ b \cdot \left( \frac{g}{\lambda_0} \right) + k \cdot \left( \frac{g}{\lambda_0} \right)^2 \right]} \quad (10)$$

Здесь значения эмпирических коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $k$  зависят от конкретной конструкции магнитной структуры. В частности, для сверхпроводящего многополюсного вигглера поле, период и зазор связаны между собой следующим соотношением:

$$B_0 = \frac{B_p}{\cosh\left(\pi \frac{g}{\lambda_0}\right)} \approx B_p \cdot e^{\left[ -\pi \left( \frac{g}{\lambda_0} \right) - 2.2 \left( \frac{g}{\lambda_0} \right)^2 \right]} \approx B_p \cdot e^{-\pi \frac{g}{\lambda_0}} \quad (11)$$

Из анализа выражения (9) можно сделать вывод, что максимальное поле на оси быстро затухает с увеличением магнитного зазора. Этот эффект хорошо виден на Рис. 3, где представлена зависимость отношения величины максимального поля на орбите к полю на поверхности магнитного полюса  $B_0/B_p$  от соотношения магнитного зазора и периода магнитной структуры  $g/\lambda_0$ . Этот график позволяет оценить возможности проектируемой конструкции конкретного сверхпроводящего вставного устройства с точки зрения максимального использования свойств данного сверхпроводящего провода для получения требуемых параметров поля и периода. В частности можно сделать вывод, что при зафиксированном поле на обмотке (определяется в основном токонесящими параметрами провода) для увеличения поля на орбите пучка

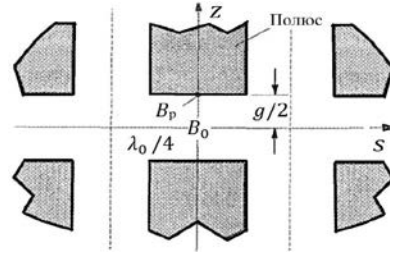


Рис.2. Параметры, характеризующие магнитное поле в периодической магнитной структуре.

выгодно либо уменьшать зазор, либо увеличивать период, либо делать это одновременно.

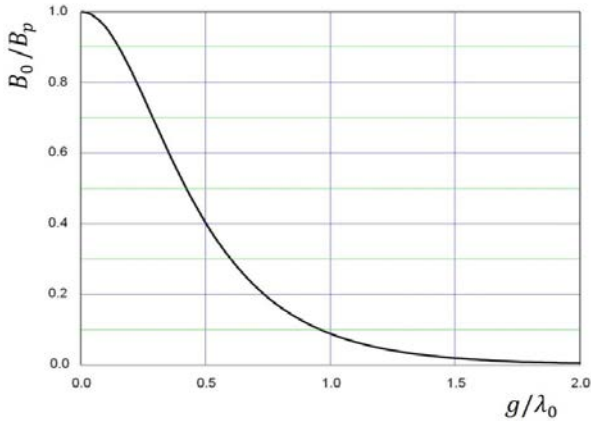


Рис.3. Зависимость отношения величины максимального поля на орбите к полю на поверхности магнитного полюса  $B_0/B_p$  от соотношения магнитного зазора и периода магнитной структуры  $g/\lambda_0$ .

Использовать упрощённую формулу (11) можно с некоторыми ограничениями. В отличие от постоянных магнитов, в которых величина поля на поверхности совпадает с полем внутри магнита, в сверхпроводящей обмотке существует область с максимальным полем, уровень которого ограничивает величину тока в обмотке, согласно критическим характеристикам данного провода. Соотношение максимального тока и магнитного поля в этой области обмотки можно принять как критический параметр для оценки теоретически доступного уровня поля в данной обмотке. Только после этого уже можно пересчитать какую величину будет иметь поле  $B_p$  на поверхности обмотки, которое, вообще говоря, только приблизительно характеризует всю обмотку как источник, создающий поле на орбите. Правильнее рассматривать поле в интересующей точке на орбите пучка как суперпозицию полей, создаваемых каждым отдельным проводником обмотки. Поэтому использовать формулу (11) можно только для предварительной оценки с точностью, не лучшей ~10%. Также нужно учитывать, что в этом выражении предполагается, что увеличивая период и раздвигая полюса вдоль орбиты пучка, полюса остаются неизменными по форме обмотки и числу витков в ней. На самом деле, при раздвижке катушек образующееся между ними пространство логично заполнять дополнительными витками провода, либо корректировать размер самого железного ядра. Поэтому точные данные по распределению магнитного поля в зазоре и на обмотке можно получить только после расчётов на трёхмерных программах.

Как следует из формулы (11), для увеличения уровня максимального поля  $B_0$  необходимо уменьшать величину межполюсного зазора  $g$ , приближая, тем самым, обмотки, создающие магнитное поле  $B_p$ , поближе к оси магнита.

Однако возможность уменьшать зазор ограничивается требованиями к вертикальной апертуре вакуумной камеры в данном месте накопителя, необходимой для свободного пролёта пучка. Эти требования формулируются исходя из соображений хорошего времени жизни электронного пучка и условий инжекции, во время которой размеры, занимаемые пучком в камере максимальны. Кроме того, с точки зрения влияния электронного пучка, приближение вакуумной камеры к медиане увеличивает нагрев стенок камеры токами отражения, тем самым, увеличивая тепловую нагрузку на криогенную систему вигглера и увеличивая испарение жидкого гелия. Поэтому выбор оптимального технического решения и способа размещения вакуумной камеры для пролёта пучка внутри межполюсного зазора и величины этого зазора всегда является результатом компромисса между необходимым уровнем поля и технологическими возможностями по изготовлению камеры, а так же общей надёжностью и работоспособностью вигглера.

С точки зрения «потребительских» свойств, величину периода  $\lambda_0$  при фиксированной полной длине вигглера, которая обычно жёстко ограничивается доступным местом в прямолинейном промежутке накопителя, необходимо выбирать из соображений максимальной плотности потока фотонов в необходимом энергетическом диапазоне. При заданных параметрах накопителя, таких как энергия  $E$ , ток  $I$ , длина промежутка  $L$  для постановки вигглера и определённой энергии квантов излучения  $\varepsilon$  для получения потока фотонов в требуемом для проведения эксперимента диапазоне, необходимо провести оптимизацию на максимум спектрального потока фотонов таких параметров многополюсного вигглера, как периода  $\lambda_0$  и максимального поля на полюсе  $B_p$  при доступном межполюсном зазоре  $g$ . Спектральный поток фотонов, излучаемых электронным пучком с энергией  $E$  из области с уровнем магнитного поля  $B_0$  на данной энергии квантов  $\varepsilon$ , выражается через универсальную спектральную функцию  $S(y)$ :

$$S(y) = \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} \cdot y \cdot \int_y^{\infty} K_{5/3}(x) dx = \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} \cdot G_1(y) = 0.6202 \cdot G_1(y), \quad (12)$$

где  $K_{5/3}$  - модифицированная функция Бесселя 2 рода, а  $G_1(y)$  – другая запись универсальной спектральной функции:

$$G_1(y) = y \cdot \int_y^{\infty} K_{5/3}(x) dx \quad (13)$$



Параметр  $y = \varepsilon/\varepsilon_c = \lambda_c/\lambda$  – отношение между данными энергиями квантов  $\varepsilon$  и длинами волн  $\lambda$ , которые связаны между собой соотношением  $\lambda[A^\circ] = 12.4/\varepsilon[\text{кэВ}]$ , и критическими значениями  $\varepsilon_c$  и  $\lambda_c$ , делящих полную спектральную мощность на две равные части. Критическая длина волны выражается через величину магнитного поля  $B_0$  на орбите и энергию электронов  $E$  следующей практической формулой:

$$\lambda_c[A^\circ] = \frac{186.4}{B_0[\text{кГс}] \cdot E[\text{ГэВ}]^2} \quad (14)$$

Воспользовавшись выражениями (14) для критической длины волны и (9), связывающим поле  $B_0$  на орбите с полем  $B_p$  на обмотке, и учитывая, что количество полюсов, укладываемых на общей длине магнитной структуры, определяется как  $(L/\lambda_0) \cdot 2$ , преобразуем выражение (12) для спектрального потока из одного полюса применительно к многополюсным сверхпроводящим вигглерам, в зависимости от периода  $\lambda_0$  и поля на обмотке  $B_p$ :

$$F(\lambda_0, B_p) = \frac{L \cdot 2}{\lambda_0} \cdot S\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) = \frac{L \cdot 9\sqrt{3}}{\lambda_0 \cdot 8\pi} \left[ \frac{186.4}{B_p} \cdot \frac{1}{E^2 \lambda} \int_{\lambda_c/\lambda}^{\infty} K_{5/3}\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) d\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) \right] \cdot \cosh\left(\pi \frac{g}{\lambda_0}\right) \quad (15)$$

Исследование поведения функции (15) показывает, что:

- при уменьшении периода поле на орбите быстро падает и поток фотонов падает;
- при увеличении периода поле на орбите возрастает и поток фотонов проходит через максимум, однако затем опять падает, благодаря уменьшению числа полюсов;
- увеличение поля на полюсе позволяет уменьшать период и увеличивать плотность потока фотонов.

Существуют также и дополнительные факторы, которые могут повлиять на выбор основных параметров вигглера (величины поля и периода), которые нужно принимать в расчёт при проектировании многополюсного вигглера в реальных условиях конкретного накопителя:

- ограничения по величине общей мощности и плотности излучения, которые должны соответствовать оборудованию канала вывода излучения;
- требования, накладываемые к углу раствора излучения по горизонтали: маленький угол для ограничения мощности, падающей на стенки вакуумной камеры или, наоборот, большой угол для расположения нескольких станций вывода излучения;

– ограничение по мощности ускоряющего резонатора для компенсации потерь на излучение.

Основной задачей при разработке сверхпроводящего многополюсного вставного устройства является достижение максимально возможной величины поля  $B_p$  на обмотке полюса. Для этого необходимо провести оптимизацию геометрии обмоток и распределения плотности тока для максимально эффективного использования характеристик сверхпроводящего провода, не допуская преждевременного выхода на критический режим по величине тока в самых напряжённых по полю областях обмотки. При этом необходимо учитывать нелинейные эффекты насыщения железа, так как при росте уровня поля все более дальние от сверхпроводящей обмотки области железа переходят в насыщенное состояние. Особенностью расчётов является учёт того, что часть железа полюсов и магнитопровода практически всегда находится в насыщенном состоянии, в отличие от обычных «тёплых» электромагнитов, где стараются не превышать уровень поля, соответствующий насыщению железа.

Ещё одной особенностью является то, что, в отличие от обычных электромагнитов, где геометрия магнитного поля формируется железом, в сверхпроводящих магнитах, где железный сердечник является насыщенным, на первый план выходит точность укладки витков обмотки, создающих поле, что накладывает жёсткие ограничения на технологию изготовления полюсов. Нужно отметить также, что, даже для вигглеров с относительно невысоким уровнем поля на орбите (2 – 2.5 Тл), небольшая величина поля в критических точках сверхпроводящей обмотки должна компенсироваться высоким уровнем тока. То есть величина поля и тока на обмотке должны находиться как можно ближе к критическим параметрам, так как именно это и является мерой эффективности правильно спроектированной магнитной системы и «нагруженности» выбранного сверхпроводящего провода.

В настоящее время промышленностью производятся несколько типов сверхпроводящих проводов: Nb-Ti, Nb<sub>3</sub>Sn и ВТСП (высокотемпературные сверхпроводники).

Nb<sub>3</sub>Sn – хрупкое интерметаллическое соединение, которое разрушается при деформации растяжением 0.2-0.5%. К тому же, при изготовлении обмоток из Nb<sub>3</sub>Sn требуется термическая обработка при температуре ~700 С° в течение 300 часов в вакууме или инертном газе. Трудности работы с таким хрупким материалом приводят к тому, что его рационально использовать только для получения экстремально высоких магнитных полей величиной более 10 Тл.

Несмотря на значительный прогресс в разработке ВТСП проводников, использование их для изготовления сверхпроводящих многополюсных магнитных систем с такими же параметрами, которые были достигнуты на низкотемпературных сверхпроводниках, является в настоящее время все ещё не-

оправданным, не только из-за высокой стоимости, и по ряду технических и технологических причин.

Следовательно, исходя из характеристик существующих сверхпроводников, для уровня магнитного поля на орбите, соответствующего величине поля на обмотке, не превышающего  $\sim 9$  Тл, выгодно использовать провода из Nb-Ti сплава. Но режим его использования по уровню поля на обмотке и плотностям тока должен приближаться к току короткого образца. Поэтому во всех представленных в данной работе многополюсных сверхпроводящих периодических магнитных структурах были использованы именно Nb-Ti сверхпроводники с различными критическими параметрами и сечением.

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

В разделе 3.1 представлены вигглеры с *экстремально высоким уровнем поля* ( $7 - 7.5$  Тл) и *длинным периодом* ( $140 - 200$  мм), которые выгодно использовать на источниках СИ с низкой и средней энергией электронов ( $1 - 2.5$  ГэВ). В этом случае не только увеличивается поток фотонов, но и сдвигается спектр излучения в область высокоэнергетичных квантов, позволяя проводить эксперименты, ранее не доступные на источниках с такими параметрами и продлевая жизненный цикл относительно старых источников СИ. К тому же широкий горизонтальный угол излучения, получаемый благодаря невысокой энергии пучка при большом уровне поля и длинном периоде вигглера, позволяет установить сразу нескольких каналов вывода излучения. В Таблице 1 представлены параметры трёх вигглеров такого типа.

В разделе 3.1.1 представлен результат оптимизации параметров магнитной структуры на примере 17-полюсного вигглера с полем 7 Тл для источника СИ BESSY-II с энергией электронов  $E = 1.9$  ГэВ и соответствующей энергией квантов всего  $\varepsilon_c \sim 5$  кэВ, на котором возникла необходимость в проведении экспериментов с потоком фотонов  $5 \cdot 10^{12}$  фотонов / (сек  $\cdot 0.1\% \Delta\lambda/\lambda$ ) на энергии фотонов  $\varepsilon \sim 60$  кэВ и при максимальной интенсивности излучения на энергии фотонов не менее  $\varepsilon \sim 14$  кэВ. Для генерации требуемого потока квантов необходимо было разместить как можно больше полюсов с максимально возможным полем на доступной длине 1.2 м. Выбор величины поля именно на уровне  $\sim 7$  Тл на орбите пучка определялся тем, что при оптимально подобранных токах поле на сверхпроводящей обмотке приближалось к  $\sim 8$  Тл, что является предельно возможным для Nb-Ti провода. Для создания более высоких полей необходимо было бы использовать уже Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводник.

Таблица 1. Характеристики вигглеров с высоким полем и длинным периодом.

Источник СИ, Энергия, расположение, год	BESSY-II, 1.9 ГэВ, Германия, 2002	Сибирь-2, 2.5 ГэВ, Москва, 2007	CAMD-LSU, 1.3 ГэВ, США, 2013
Магнитное поле, Тл	7.0 (7.67)	7.5 (7.7)	7.5 (7.75)
Число полюсов (осн. + бок.)	13 + 4	19 + 2	11+4
Период, мм	148	164	193.4
Зазор магн.(для пучка), мм	19 (13)	19 (14)	25.2 (15)
Крит. энергия, кэВ	16.8	31	8.53
Параметр К	~97	~115	~136
Мощность, кВт (ток пучка, А)	56 (0.5А)	36 (0.1 А)	17 (0.2 А)
Запасённая энергия, кДж	450	500	850

При допустимой вертикальной апертуре для пучка не менее 13 мм, величина магнитного зазора, была минимизирована до конструктивно возможных 19 мм. Число основных полюсов зависит от периода вигглера  $\lambda_0$  как:

$$N_0 = \frac{L}{\lambda_0} \cdot 2 - N_{side}, \text{ где } N_{side} - \text{ количество боковых полюсов, предназначенных}$$

для выравнивания орбиты (две пары полюсов с уровнем поля 1/2 и 3/4 от уровня основного поля). Учитывая, что характеристическая энергия квантов

$$\varepsilon_c = 12.4 \cdot \frac{B_0 \cdot E^2}{186.4} = 12.4 \cdot \frac{70[\text{кГс}] \cdot 1.9[\text{ГэВ}]^2}{186.4} \approx 16.8[\text{кэВ}] \text{ (соответствующая длина вол-}$$

$$\text{ны } \lambda_c = \frac{12.4}{\varepsilon_c} = \frac{12.4}{16.8} = 0.74[\text{А}^\circ]) \text{ и, воспользовавшись для оптимизации количе-}$$

ства периодов вигглера  $\lambda_0$  с полем на орбите  $B_0 = 7T_l$ , нахождением максимума функции (15), получим зависимость, показанную на Рис. 4. Из графика видно, что максимум функции соответствует периоду ~14.8 см, что соответствует 13 основным и 4 корректирующим полюсам. При уменьшении периода поле  $B_0$  в медианной плоскости снижается и плотность потока падает. При увеличении периода поле в медианной плоскости возрастает, но при этом уменьшается и количество полюсов  $N_0$ , помещающихся на заданном промежутке и, следовательно, плотность потока фотонов так же уменьшается.

На Рис. 5 для сравнения приведены плотность потоков квантов излучения для диапазона энергий от 0.1 до 100 кэВ для трёх различных вставных устройств, генерирующих синхротронное излучение на источнике BESSY-II: 40-полюсного 2 Тл ондулятора на постоянных магнитах, трёхполюсного 7 Тл шифтера и описываемого здесь 17-полюсного 7 Тл вигглера. Для наглядности здесь же показана рабочая точка с соответствующим потоком фотонов на энергии  $\varepsilon \sim 60\text{кэВ}$ , откуда видно, что поток вырос на  $10^3$ , по сравнению с

ондулятором, и на  $10^1$ , по сравнению с шифтером. Очевидно, что получение требуемого потока фотонов с такой энергией было возможно в данном случае только при использовании оптимизированного на требуемые параметры многополюсного вигглера.

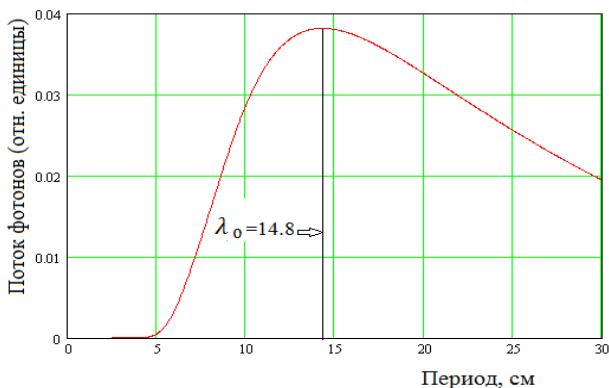


Рис. 4. Поток фотонов с  $\lambda_c = 0.74[A^\circ]$  из вигглера с полем  $B_0 = 7Tл$ , в зависимости от периода  $\lambda_0$ .

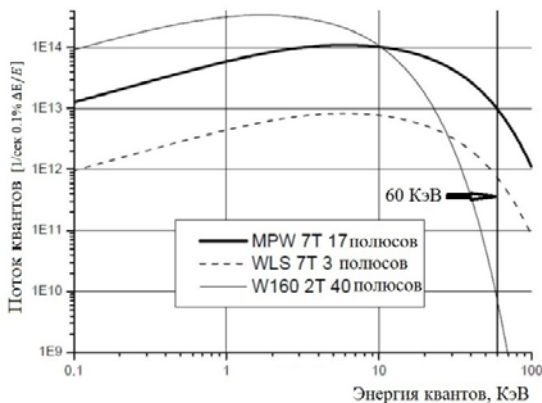


Рис. 5. Спектральный поток фотонов 17-полюсного 7Тл вигглера BESSY-II.

Основная задача состояла в создании сверхпроводящего магнитного полюса, создающего на орбите поле 7 Тл при межполюсном зазоре 19 мм и длине 74 мм, равной половине периода. Для увеличения уровня поля был использован сердечник, добавляющий в насыщенном состоянии поле  $\sim 2$  Тл. Сердечник имеет форму горизонтального рейстрека, который обеспечивает поперечную однородность поля для подавления сектупольной компоненты, приводящей к уменьшению динамической апертуры и зависимости частот бетатронных колебаний от смещения пучка в горизонтальном направлении.

Полус намотан из сверхпроводящего провода диаметром 0.92 мм с токоне-сущей способностью 380 А в поле 7 Тл. Обмотка разбита на внутреннюю секцию, запитанную меньшим током (находится в большем магнитном поле) и наружную секцию с большим током (расположена в области меньшего поля), что позволило увеличить уровень поля на орбите на ~15%. Такое разбиение даёт дополнительную возможность занулять интегралы поля, перерас-пределяя токи между секциями. На Рис. 6 показано расположение рабочих точек, характеризующих состояние сверхпроводящего провода во внутренней и наружной секциях, относительно критической кривой провода. Обмотки были изготовлены методом «мокрой» намотки с пропиткой эпоксидным компаундом ЭД-20 с наполнителем  $Al_2O_3$ . Бандажирование осуществлено с помощью продольных бронзовых шпилек, добавляющих давление на обмотки, благодаря разности коэффициентов теплового расширения материалов. Для защиты магнита при потере сверхпроводимости обмотки были разбиты на группы с безопасной выделяемой энергией (~30 – 50 кДж), шунтированные цепочками холодных диодов с резисторами. Так как все катушки связаны большой взаимной индуктивностью, то магнитный поток при переходе обмоток в нормальное состояние перебрасывается в соседние полюса и энергия равномерно перераспределяется по всему магниту. Так как напряжение на резисторах появляется только при открывании диодов, что происходит лишь при реальной потере сверхпроводимости, использование сигналов с резисторов исключает ложные срабатывания при регистрации перехода в нормально-проводящее состояние. На Рис. 7 для примера показан внешний вид системы защиты обмоток 15-полюсного 7.5 Тл вигглера CAMD-LSU, имеющего запас-ённую энергию ~850 кДж.

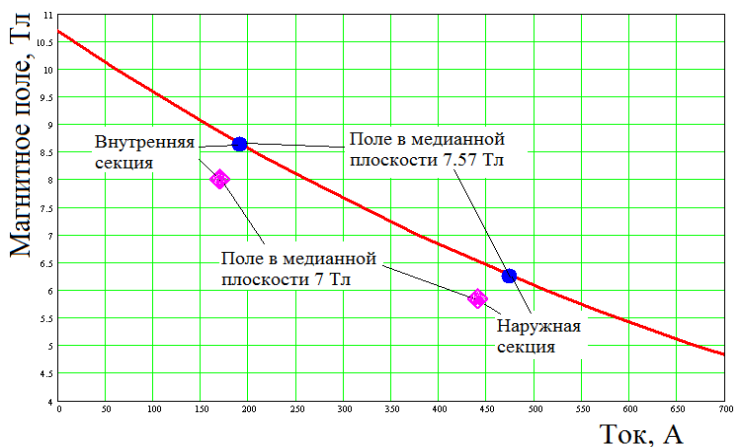


Рис. 6. Нагрузочная кривая провода и рабочие точки внутренней и наружной секций, соответствующие уровню поля 7.57 Тл и 7 Тл в медианной плоскости.

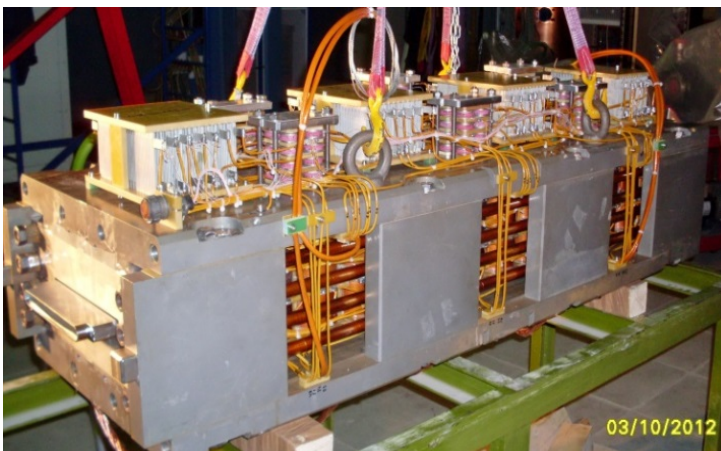


Рис. 7. Система защиты обмоток 15-полюсного 7.5 Тл вигглера CAMD-LSU с запасённой энергией ~850 кДж.

В разделе 3.2 описываются вигглеры *со средним уровнем поля (3.5 – 4.2 Тл) и небольшим периодом (48-60мм)*, представленные в Таблице 2, которые оказались наиболее востребованы, благодаря удачному сочетанию этих параметров и типичных характеристик современных источников СИ. При создании этой группы вставных устройств основной целью было достижение максимально возможной (при соответствующем сочетании остальных оптимизируемых параметров) величины магнитного поля. Для решения этой задачи использовались следующие подходы:

1. Уменьшение до технологического предела вертикальных зазоров между апертурой для пучка и величиной магнитного зазора. Из Рис.8 и Рис. 9, где показаны для сравнения сечения межполюсного зазора на первом 3.5 Тл вигглере ELETTRA и на 4.2 Тл вигглере CLS, видно, что магнитный зазор уменьшился на ~ 3 мм с 17 мм до 14 мм. Воспользовавшись выражением (11) можно оценить, что такая оптимизация зазоров при периоде  $\lambda_0 \approx 50$  мм даёт

$$\text{прирост поля } \sim 20\%: \frac{\Delta B}{B} = e^{-\frac{\Delta g}{\lambda_0}} - 1 = e^{-\frac{3[\text{мм}]}{50[\text{мм}]}} - 1 \approx 0.207 .$$

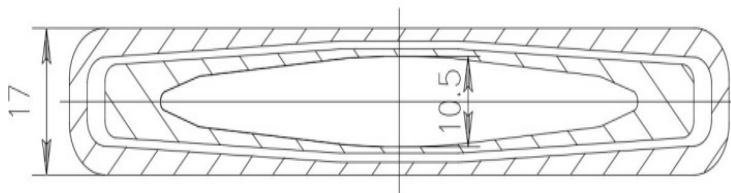


Рис.8. Сечение межполюсного зазора вигглера ELETTRA.

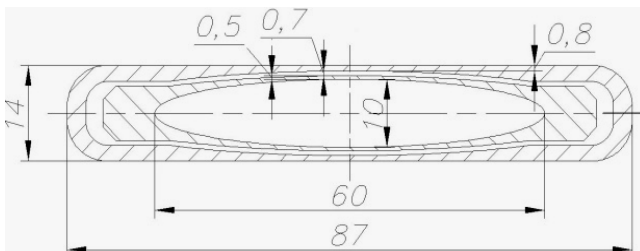


Рис.9. Сечение межполюсного зазора вигглера CLS.

Таблица 2. Параметры вигглеров со средним полем и небольшим периодом.

Источник СИ, Энергия, расположение, год	ELETTRA, 2 ГэВ, Италия, 2002	DLS, 3 ГэВ, Англия, 2006	CLS, 2.9 ГэВ, Канада, 2007	LNLS, 1.37 ГэВ, Бразилия, 2009	DLS, 3 ГэВ, Англия, 2009	AS, 3 ГэВ, Австралия, 2012
Магнитное поле, Тл	3.5 (3.7)	3.5 (3.8)	4.0 (4.3)	4.1 (4.2)	4.2 (4.3)	4.2 (4.4)
Число полюсов (осн.+бок.)	45 + 4	45 + 4	25 + 2	31 + 4	45 + 4	59 + 4
Период, мм	64	60	48	60	48	52
Зазор магнитный (для пучка), мм	16.5 (11)	16.4 (10)	13.9 (9.5)	1 8.2 (14)	14.4 (10)	15.2 (10)
Крит. энергия, кэВ (длина волны, Å)	9.3 (1.33)	21 (0.59)	23 (0.54)	5 (2.48)	25 (0.49)	25 (0.49)
Параметр К	21	19.6	19	18	18.8	18.8
Мощность, кВт (ток пучка, А)	8.8 (0.2)	60 (0.5)	12 (0.2)	4.45 (0.3)	55 (0.5)	37.5 (0.2)
Запаса́нная энергия, кДж	240	70	20	60	25	70
Расход гелия, л/ч	0.45	<0.05	<0.05	<0.05	<0.03	<0(0.7 бар)

2. Использование прогресса в производстве Nb-Ti провода, величина тока в котором выросла для провода с диаметром 0.92 мм со стандартных 360 А в поле 7 Тл в начале 2000-х годов до рекордных 700 А на сегодняшний день. На Рис. 10 представлены реально достигнутые рабочие точки на обмотках нескольких вигглеров, относительно нагрузочных кривых использованных проводов. Можно утверждать, что для всего набора проводов были получены предельные параметры по величине поля, так как большинство рабочих точек находятся на удалении не более ~10 % от критической кривой, что для обмоток в форме рэйстрек, имеющей длинные плоские участки, является рекорд-



ным результатом. Исключение составляет вигглер ELETTRA, в котором расчёт рабочих параметров обмоток был произведён не оптимально.

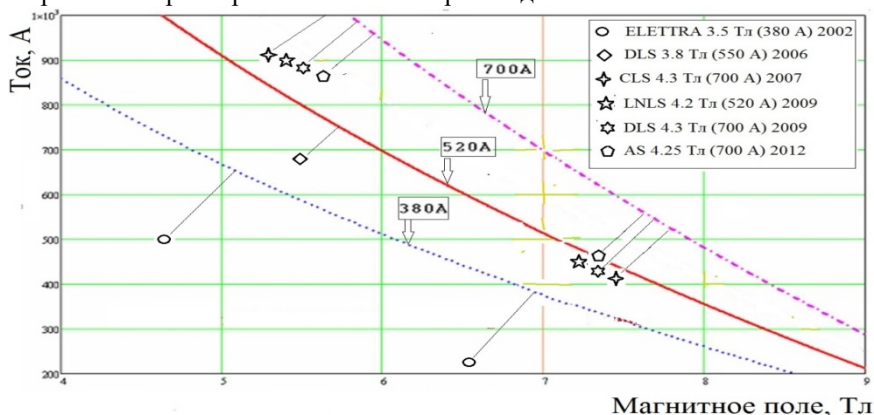


Рис. 10. Расположение рабочих точек на обмотках вигглеров относительно нагрузочных кривых использованных сверхпроводящих проводов.

3. Использование прогресса в производстве криокулеров, в которых холодильная мощность на второй 4 К ступени возросла с начала 2000-х годов с первоначальных 0.5 Вт до 1.5 Вт. Одновременное совершенствование криогенной системы вигглеров путём перехвата теплопритоков на ступени криокулеров позволило получать пониженное остаточное давление в гелиевом сосуде до 0.4 бар и соответствующее падение температуры, позволившее поднять уровень максимального магнитного поля за счёт смещения токовых характеристик проводов. На Рис. 11 показано, что для провода с номинальным током 700 А в поле 7 Тл, при переохлаждении его до температуры 3.2 К можно поднять токи на обеих секциях на несколько десятков ампер.

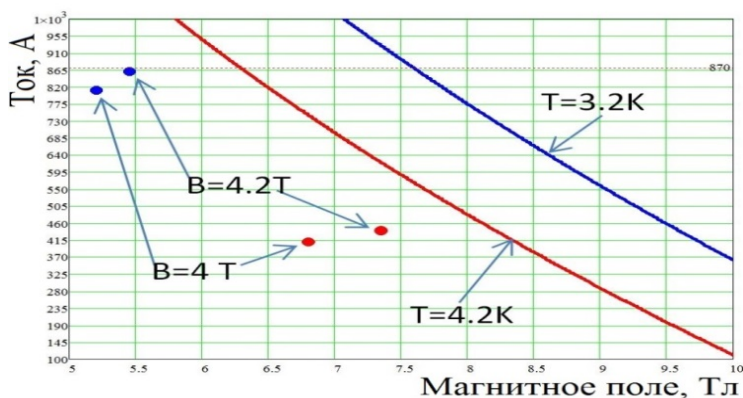


Рис. 11. Смещение токовой характеристики сверхпроводящего провода при переохлаждении до 3.2 К

4. Повышение устойчивости сверхпроводящего состояния в обмотках методом внешнего легирования добавками в компаунд оксисульфида гадолиния ( $Gd_2O_3S$ ), теплоёмкость которого имеет резко выраженный пик на температуре  $\sim 5$  К, позволило решить проблему преждевременной потери сверхпроводимости при инъекции пучка в накопитель CLS. Эксперименты показали, что катушки, в которых использовался  $Gd_2O_3S$ , переходят в нормальное состояние в несколько раз реже, чем катушки из традиционно используемого  $Al_2O_3$ .

В разделе 3.3 описаны вигглеры с коротким периодом (30-34 мм) и низким уровнем поля (2 – 2.2 Тл), представленные в Таблице 3.

Таблица 3. Параметры вигглеров с низким полем и коротким периодом

Источник СИ, Энергия расположение, год	CLS, 2.9 ГэВ, Канада, 2005	ALBA, 3 ГэВ, Испания, 2010	АНКА, 2.5 ГэВ, Германия, 2013
Магнитное поле, Тл	2 (2.2)	2.1 (2.27)	2.5 (2.85)
Число полюсов (осн.+бок.)	61+2	117+2	36+4
Период, мм	34	30	47
Зазор магнитный (для пучка), мм	13.5 (9.5)	12.6 (8.5)	19 (15)
Крит. энергия, кэВ (длина волны, $\text{Å}$ )	12.4 (1.01)	13.1 (0.94)	15.5 (0.79)
Параметр К	6.5	6	12
Мощность, (ток пучка, А), кВт	12 (0.5 А)	20 (0.4)	4.5 (0.2)
Токи в обмотках, А	800	430	540+460
Крит. ток провода в поле 7 Тл	520 А (диам.0.9 мм)	230 А (диам.0.55 мм)	520 А (диам.0.9 мм)
Запасённая энергия, кДж	15	19	30
Расход гелия, л/ч	0	0	0

Особенностью таких вигглеров является то, что, например, для поля  $B_0 = 2$  Тл и периода  $\lambda_0 = 3.4$  см, коэффициент ондуляторности имеет значение  $K = 0.934 \cdot 2[\text{Тл}] \cdot 3.4[\text{см}] = 6.35$ , что автоматически приближает его спектр излучения к спектру ондулятора на низких энергиях фотонов. Однако для вигглера CLS понадобилось, наоборот, нарушить интерференционную картину в излучении установкой между катушками разнотолщинных прокладок в псевдослучайном порядке для нарушения регулярности их расположения. Результат искусственного нарушения упорядоченности представлен на Рис. 12.

При проектировании 119-полюсного вигглера ALBA с магнитным полем 2.1 Тл, который вплотную приближается по своим параметрам к ондуляторам,

была исследована возможность использования магнитной структуры типа вертикальный рейстрек, которая безальтернативно используется во всем мире при создании сверхпроводящих ондуляторов и близких к ним по размерам магнитных структур. Было показано, что полюса в виде горизонтального рейстрека, несмотря на недостаток в виде большого числа контактов между обмотками, имеют даже в этом случае преимущество перед вертикальным рейстреком, так как, благодаря более короткому проводу в обмотке, имеют меньшую накопленную энергию и индуктивность, а также позволяют использовать двухсекционные обмотки для повышения поля на  $\sim 15\%$  и допускают быструю замену сгоревшей катушки. К тому же существует технология холодной сварки Nb-Ti проводов, позволяющая получать стабильные сопротивления на уровне  $\sim 10^{-12} - 10^{-13}$  Ом, что даже при токе  $\sim 1000$  А даёт теплоприток в гелий, не превышающий  $\sim 1$  мВт.

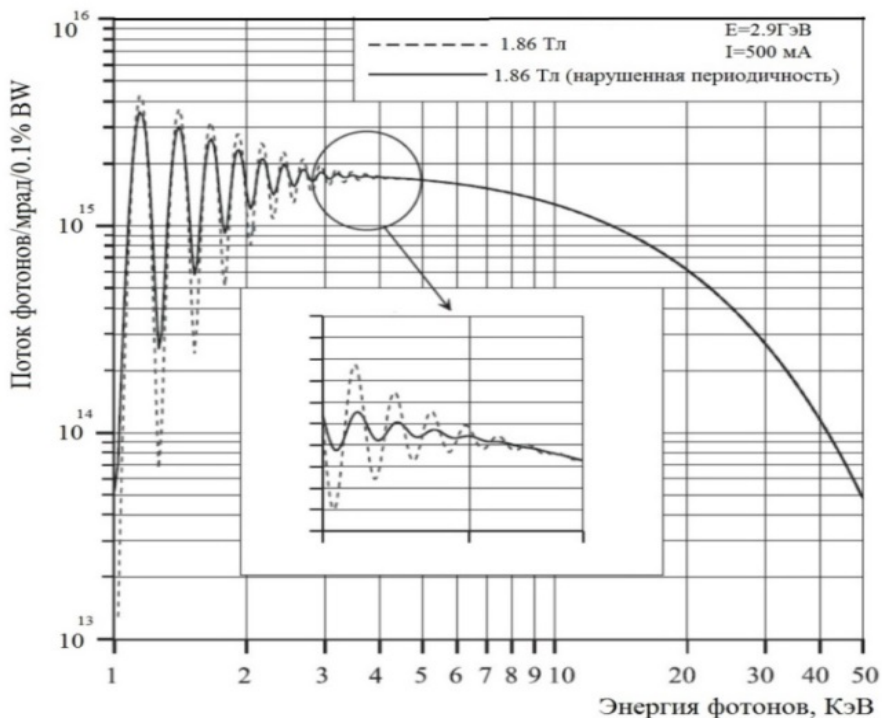


Рис. 12. Спектральный поток фотонов 2 Тл 63-полюсного вигглера CLS с коэффициентом ондуляторности  $K \sim 6$  и нарушенной периодичностью.

**В четвертой главе** рассмотрены этапы совершенствования криогенной системы сверхпроводящих вигглеров, направленные на достижение нулевого расхода жидкого гелия. При этом типичный на начало 2000-х годов расход гелия для такого рода устройств составлял  $\sim 2.5$  л/ч. Для решения этой зада-

чи, ставшей одной из ключевых для данной работы, был предпринят ряд последовательных шагов по исследованию и выявлению всех возможных каналов притока тепла в криостат и поиску способов их устранения. При этом сама концепция криогенной системы не просто подвергалась непрерывным изменениям, но и проходила каждый раз проверку на реальных устройствах, работающих на накопителях в качестве генераторов СИ. В результате этих исследований была создана целая серия сверхпроводящих вигглеров, каждый из которых отличался от предыдущего, в том числе и более совершенной криогенной системой.

В разделе 4.2.1 было предложено использовать в качестве материала для подвески гелиевого сосуда внутри криостата ленту из кевларовой нити, обладающей низкой теплопроводностью и экстремально высокой механической прочностью. Так, прочность на разрыв у кевлара выше, чем у металлов и составляет 2760 МПа (аналогичная характеристика у стали равна 700 МПа). Это позволило минимизировать сечение ленты и радикально снизить теплопритоки в жидкий гелий. В частности, при общей массе гелиевого сосуда вместе с магнитом  $\sim 1200$  кг, каждая из четырёх основных ленточных подвесок имеет сечение  $\sim 6$  мм<sup>2</sup> и величина теплопритока по оценке сверху не превышает  $\sim 10$  мВт, что позволило практически исключить приток тепла по подвескам из общего баланса теплопритоков в жидкий гелий.

В разделе 4.3 было предложено, отказавшись от традиционного применения жидкого азота для охлаждения теплового экрана, использовать промышленно выпускаемые криокулеры с двумя холодильными ступенями с температурами 60 К и 20 К. Это позволило поместить в криостат уже два тепловых экрана и, тем самым, существенно снизить приток тепла через излучение на внутренний сосуд с жидким гелием. Так, мощность излучения, попадающая на гелиевый сосуд, покрытый 10 слоями многослойной суперизоляции и окружённый экраном с температурой 20 К, снизился до  $\sim 0.00023$  Вт, что в  $\sim 250$  раз меньше, чем при одном экране с температурой 80 К. Приток тепла через излучение на внутренний 20 К экран с наружного 60 К экрана составил всего  $\sim 0.05$  Вт, а приток снаружи на 60 К экран с 30 слоями суперизоляции стал равен 8 Вт. При этом мощность соответствующих ступеней криокулера составляет обычно  $\sim 40$  Вт на первой 60 К ступени и  $\sim 10$  Вт на второй 20 К ступени, что даёт хороший запас устойчивости такой криогенной системе.

В разделе 4.4 отмечено, что, переходя на охлаждение экранов криокулерами с температурами 60 К и 20 К, логично было использовать и другие промышленно выпускаемые криокулеры с температурами 4 К и 60 К. Поэтому было предложено интегрировать в конструкцию криостата ещё два криокулера с 4 К ступенью непосредственно для охлаждения гелия. Предполагалось, что если поместить в объем с гелием холодный теплообменник с температурой, близкой к 4 К, то газообразный гелий будет конденсироваться на холодной поверхности и стекать обратно в гелиевый сосуд в виде капель жидкости. Применение именно двух 4К криокулеров определялось балансом мощности

в криостате, так как в начале 2000-х годов коммерчески доступные модели имели холодильную мощность, не превышающую 0.5 Вт, а расчётная величина теплопритоков в гелий составляла  $\sim 1$  Вт. Такая конструкция позволила уменьшить расход жидкого гелия до уровня  $< 1$  л/час при температуре второй ступени  $\sim 3.3$  К. Однако такой режим работы соответствовал использованию всего лишь  $\sim 20\%$  холодильной мощности и составлял 0.2 Вт вместо 1Вт. Иными словами, так как не был обеспечен эффективный механизм по отбору мощности от испарённого гелия, то холодильная головка работала в «недогруженном» режиме и испарённый гелий беспрепятственно выходил из гелиевого сосуда наружу криостата. Для создания условий, при которых максимально возможная тепловая нагрузка от испарённого гелия подводилась бы ко второй 4 К ступени криокулера для реконденсации в жидкость, были испытаны несколько теплообменников различной конструкции. В том числе, для уменьшения конвективных потоков газа теплообменники были заключены в отдельный объем с отверстиями для притока газа и воронку для стекания жидкости. Однако получить расход меньший, чем,  $\sim 0.9$  л/ч, не удалось. Поэтому следующим логическим шагом было исследование возможности снижения доли теплопритока, связанного с элементами ввода тока, в которых использовалась общепринятая в то время концепция оптимизированного медного токоввода, охлаждаемого парами гелия, испарённого теплом от самого токоввода. При этом расчётный расход гелия от токовводов составлял  $\sim 0.87$  л/ч при двух парах токовводов по 150А, что лишало смысла любые действия, направленные для снижения теплопритоков.

В разделе 4.5 было предложено использовать в разрыве цепи ввода тока вставки из ВТСП токовводов, которые к тому времени уже стали серийно выпускаться промышленностью. Например, приток тепла на пару токовводов с номинальным током 250 А фирмы CryoSaver оставлял всего 57 мВт при температуре «тёплого» конца 64 К, что радикально снижало расчётные теплопритоки в жидкий гелий. Использование ВТСП токовводов позволило уменьшить расход до уровня  $\sim 0.5$  л/ч. Однако и этот результат оставался значительно выше расчётного. Было сделано предположение, что в центральной горловины гелиевого сосуда, в котором были расположены токовводы, возможно образование «паразитных» газовых потоков, переносящих тепло в жидкий гелий. Для устранения возможности такого теплообмена были внесены многочисленные изменения, не давшие, однако, заметного эффекта.

В разделе 4.6 было предложено исключить из баланса теплопритоков долю, определяемую протеканием тока через токовводы и изучить возможность использования режима замороженного тока, замыкая ток, протекающий через сверхпроводящую обмотку, непосредственно внутри криостата, отключив его от наружного источника питания. Предполагая заранее, что замороженный ток будет неизбежно затухать с некой постоянной времени, зависящей от остаточного сопротивления несверхпроводящих контактов, соединяющих обмотки между собой, в конструкции была заранее предусмотрена си-

стема подкачки тока для компенсации потерь на затухание. Для точного измерения уровня поля было использовано несколько датчиков ЯМР расположенных в различных точках магнита. Было обнаружено, что при использовании раздельных цепей запитывания обмоток (а такая схема даёт возможность для увеличения максимального поле на  $\sim 15\%$  и настройки интегралов поля) наличие взаимной индуктивности и, соответственно, перекачки энергии между цепями требует постоянной компенсации и, следовательно, увеличивает нагрев и расход гелия, который составил в таком режиме 0.4 – 0.6 л/ч. Причём особенно критичным этот эффект оказался именно для многополюсных вигглеров, так как затухание тока на большом количестве контактов (до нескольких сотен) значительно увеличивает скорость спада поля и вынуждает увеличивать частоту включения подкачки тока.

В разделе 4.6.5 описано использование системы механического размыкания токовводов в режиме замороженного тока. Было обнаружено, что даже после непосредственного механического разрыва токовводов испарение гелия уменьшалось не скачком, а плавно, и только при расстоянии размыкания  $\sim 8$  мм расход снижался до  $\sim 0.12$  л/ч. Таким образом, даже после полного механического размыкания контакта, продолжался интенсивный теплообмен между разорванными частями токовводов через газообразный гелий и передаваемая мощность при этом была сравнима с мощностью замкнутого контакта. Наблюдаемое значительное снижение расхода подтвердило предположение о том, что, что именно по токовводам, находящимся в газе, поступает в жидкий гелий та основная часть тепла, которая реально определяет величину испарения гелия в криостате. Следующим действием, направленным на уменьшение расхода гелия, стала замена обоих криокулеров с мощностью 0.5 Вт на второй 4К ступени на более мощные криокулеры, имеющие мощность 1 Вт. При этом никаких других изменений в конструкции криостата не производилось, так как оба типа криокулеров имели одинаковые присоединительные размеры и отличались только мощностью второй ступени. Однако расход гелия в криостате уменьшился при этом очень незначительно, несмотря на удвоение общей холодильной мощности. Так, при замкнутых наружных токовводах, расход упал всего до 0.35 л/ч с первоначальных 0.45 л/ч, а при разомкнутых токовводах с 0.2 л/ч до 0.1 л/ч. Таким образом, расход снизился всего на 0.1 л/ч, что соответствует увеличению холодильной мощности, используемой на реконденсацию, всего на 0.07 Вт, хотя добавка составила величину 1 Вт. Таким образом, эффективность отбора мощности от криокулеров на реконденсацию составила всего  $\sim 7\%$ . Найти достаточно убедительное объяснение такому эффекту не удалось и, ввиду того, что точный учёт процессов теплообмена, происходящего между различными частями токовводов, находящихся в газовой среде с большими градиентами температур, оказался довольно затруднительным и любое дальнейшее продвижение в этом направлении потребовало бы длительных проверок, было принято радикальное ре-

шение вообще отказаться от традиционного способа размещения тоководов в охлаждающем газе и перенести их в охранный вакуум криостата.

В разделе 4.7 описан первый опыт размещения тоководов в защитном вакууме, при котором магнит запитывался током через три последовательно соединённых токовых элемента: латунный стержень с тепловым перехватом на экран 60К, отводящим мощность  $\sim 7$  Вт; ВТСП токовод с перехватом тепла в месте соединения на экран 20 К мощностью  $\sim 3$  Вт; дополнительный ВТСП токовод, подводящий ток непосредственно к магниту. При этом криокулер со ступенью 4 К не был использован. Общий расчётный теплоприток в гелиевый объем, с учётом двух тоководов с током 300 А, оценивался как 0.235 Вт, что соответствовало испарению 0.329 л/час. При испытании криостата измеренное распределение температур и потоков мощности хорошо совпало с предсказанными значениями и, что самое главное, реальный расход жидкого гелия, который составил  $\sim 0.33$  л/час совпал, наконец, с расчётным значением. В качестве следующего логического шага было предложено осуществлять перехватывание всего оставшегося потока тепла, все ещё поступающего в гелий от 20 К ступени криокулера через ВТСП тоководы, используя для этого уже криокулер не с 20 К, а с более холодной 4 К ступенью.

В разделе 4.8 была сформулирована новая концепция проектирования криостата, состоящая в полном перехвате всех каналов притока тепла в жидкий гелий на соответствующие холодильные головки с температурами 60 К, 20 К и 4 К посредством тоководов необходимого сечения, расположенных в нужных местах. Коренное отличие от предыдущего подхода, когда предпринималась попытка повысить эффективность использования холодильной мощности криокулеров для реконденсации уже испарённого гелия, состояло в применении этой мощности уже для того, чтобы вообще предотвращать испарение жидкого гелия. При этом те элементы криостата, которые определяют основной приток тепла в гелий (тоководы), теперь размещались в защитном вакууме и потоки тепла по ним и распределение температур могли быть достаточно точно рассчитаны.

В разделе 4.8.1 была предложена идея создания блока тоководов в виде единого узла на основе криокулера с 4К ступенью, размещённого в защитном вакууме криостата. При этом было предложено осуществлять охлаждение всех элементов ввода тока не через контакты с медными экранами, а конструктивно расположить все токоподводящие части непосредственно на корпусе самого криокулера и, тем самым, минимизировать длины теплосъёмных контактов и, следовательно, градиенты температур. Ввод тока производился через комбинацию латунного и ВТСП тоководов, соединённых последовательно и имеющие теплоперехваты на 60 К и 4 К ступени. Использование блока тоководов, конструкция которого представлен на Рис.13, позволило впервые достигнуть расхода жидкого гелия, близкого к  $\sim 0$  л/ч.

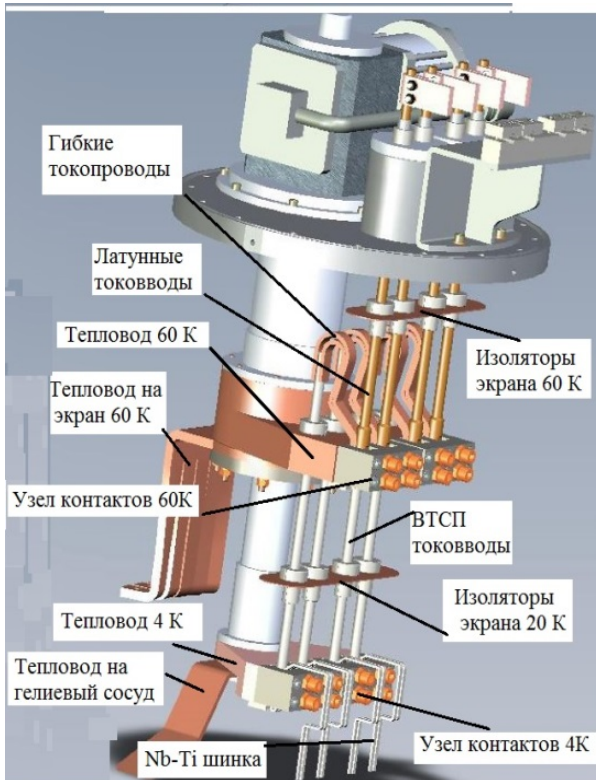


Рис. 13. Конструкция блока токовводов.

В разделе 4.9 было предложено, в связи с достижением теплового баланса с расходом гелия, близким к нулю и появившейся возможностью выделять с большей чувствительностью эффекты, связанные с реконденсацией гелия, продолжить исследования по повышению эффективности теплообмена гелия с 4 К ступенью криокулера. Для этого был использован новый теплообменник в виде массивного полированного медного стержня, покрытого гальваническим способом слоем золота, помещённый в гелиевый сосуд и охлаждаемый со стороны защитного вакуума медным тепловодом от 4 К ступени. Это позволило не только получить нулевой расход гелия, но и, переохладив гелий до температуры  $\sim 3.3$  К, получить пониженное остаточное давление в герметизированном гелиевом сосуде на уровне 0.4 бар, несмотря на дополнительную тепловую нагрузку со стороны электронного пучка и тока величиной около 1000 А, вводимого для запитки магнита. На Рис. 14 показана копия экрана программы управления таким вигглером в рабочем состоянии.



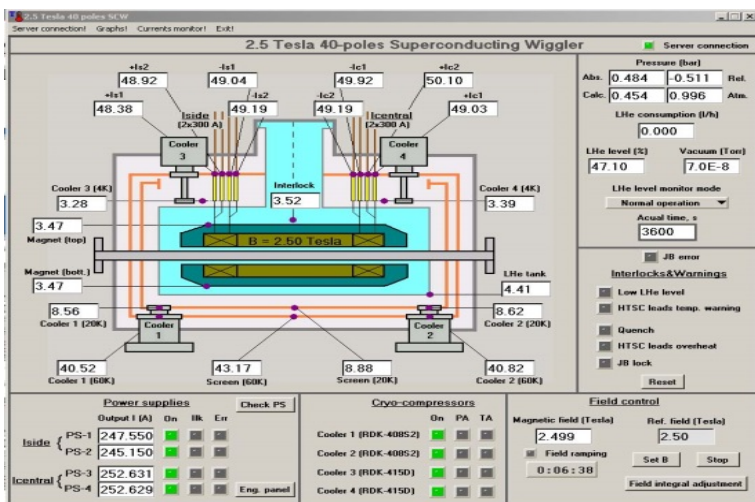


Рис. 14. Поведение основных параметров сверхпроводящего вигглера с нулевым расходом гелия (копия экрана программы управления).

В разделе 4.11 представлена окончательная конструкция криостата с нулевым расходом жидкого гелия, внешний вид которого и функциональная схема представлены на Рис.15 и Рис.16, соответственно.



Рис. 15. Внешний вид криостата 7.5 Тл 15-полюсного вигглера LSU-CAMD.

В Таблице 4 приведён полный баланс теплопритоков в криостат, откуда можно заключить, что холодильная мощность криокулеров на всех ступенях заведомо превышает соответствующие притоки тепла. Это не только значительно повышает надёжность криогенной системы, особенно при работе в

условиях накопителя, но и повышает ресурс работы криокулеров. Можно отметить также, что общая холодильная мощность 4 К ступеней превышает тепловыделения в ~ 3 раза и избыточная мощность идёт, соответственно, на переохлаждение гелиевого сосуда с магнитом внутри и понижение давления в сосуде. Это даёт возможность не только увеличить надёжность работы магнита, но и повысить уровень магнитного поля за счёт улучшения токовых характеристик сверхпроводника.

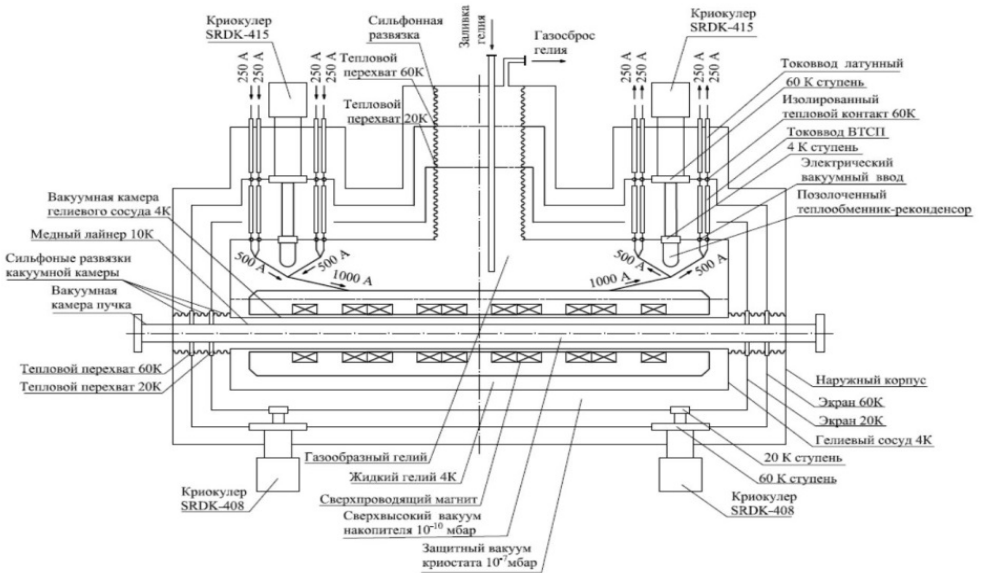


Рис. 16. Функциональная схема криостата сверхпроводящего многополюсного вигглера на основе криокулеров с нулевым расходом гелия.

Таблица 4. Баланс теплопритоков в криостат с нулевым расходом гелия.

	Наружный экран 60К, Вт	Внутренний экран 20К, Вт	Гелиевый сосуд 4К, Вт
Тепловое излучение	8	0.05	0.0002
Центральная горловина	2.5	0.3	0.06
Сильфоны вакуумной камеры	5.3	0.25	0.04
Система подвесок	0.5	0.1	0.01
Токовводы (теплопроводность)	50	0	0.3
Нагрев токовводов током	50	0	0.3
Измерительные провода	5	0.1	0.01
Лайнер	10	10	0.2
Общий приток	<b>131.3</b>	<b>10.8</b>	<b>0.92</b>
Охлаждающая мощность	<b>180</b> (при 50 К)	<b>15</b> (при 20 К)	<b>3</b> (при 4.2 К)

**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. Наиболее критическим узлом такого криостата является межполюсной зазор, который, с одной стороны, нужно минимизировать для увеличения поля, а с другой, увеличивать для уменьшения влияния пучка. Поэтому при выборе конкретной конструкции важнейшей задачей было оценить величину мощности нагрева камеры.

Предотвратить нагрев синхротронным излучением позволяет правильный выбор геометрии камеры. При этом мощность излучения зависит линейно от среднего тока пучка  $I_0 [A]$  и не зависит от количества и длины сгустков:

$$P_{SR} = \frac{eI_0}{10^3 6\pi\epsilon_0} \frac{\gamma^4}{R} [Bm/мрад] \quad , \quad (16)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума, а  $R [m]$  радиус поворота электронного пучка в магните. Типичная величина мощности СИ из поворотных магнитов составляет десятки Вт/мрад, а из вигглера с высоким полем может доходить до нескольких кВт/мрад.

Для учёта нагрева камеры токами изображения спектр электронного сгустка со среднеквадратичной длиной  $\sigma_b [m]$  можно представить в виде ряда гармоник с угловой частотой  $\omega_0$ , кратной частоте резонатора, и соответствующими амплитудами  $a_n$ , а ток сгустка выразить как:

$$I_{FSum}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) [A] \quad , \quad (17)$$

где  $a_n = 2I_0 e \frac{n^2 \sigma_b^2 \omega_0^2}{2c^2} [A]$  и  $c$  – скорость света. (18)

Отметим, что количество гармоник в спектре более короткого сгустка будет больше, чем в спектре более длинного сгустка. Поэтому нагрев камеры токами изображения от более короткого пучка будет сильнее, благодаря большему числу гармоник, при этом частоте каждой гармоники будет соответствовать своё поверхностное сопротивление камеры.

При криогенных температурах и высоких частотах проявляется аномальный скин-эффект, при котором длина свободного пробега электронов в материале камеры увеличивается и часть из них покидает толщину скин-слоя, который, в свою очередь, уменьшается с ростом частоты гармоники. Соответствующее уменьшение электропроводности, благодаря потере электронов, приводит к увеличению нагрева камеры. Если предположить, что на всех частотах спектра, представляющих сгусток, поверхностное сопротивление имеет величину, определяемую аномальным скин-эффектом, то величина погонной мощности, выделяемой в камере на длине  $L$  выражается как:

$$\frac{P}{L} = \Gamma \left( \frac{5}{6} \right) \frac{3^{1/6}}{8\pi^2 (2\pi)^{1/3}} \frac{C_M (\mu c)^{2/3} (\rho \lambda)^{1/3}}{r \sigma_b^{5/3}} \frac{I_0^2}{M} [Bm/M], \quad (19)$$

где  $\Gamma\left(\frac{5}{6}\right) = 1.2288$  – Гамма-функция,  $C_M$  – длина накопителя,  $\mu$  – магнитная проницаемость материала камеры накопителя,  $\rho$  – электрическое сопротивление материала камеры,  $c$  – скорость света,  $M$  – полное число сгустков,  $r$  – радиус вакуумной камеры, а произведение  $\rho \lambda$  является характеристикой металла. Можно заметить, что мощность здесь зависит от среднего тока пучка как  $\propto I_0^2$ , в отличие от нагрева синхротронным излучением, что даёт возможность диагностировать конкретный механизм нагрева вакуумной камеры от электронного пучка.

Аномальный эффект приводит к тому, что поверхностное сопротивление камеры будет падать при охлаждении на гораздо меньшую величину, чем предполагалось бы с учётом только классического скин-эффекта. Причём аномальный эффект проявляется при криогенных температурах именно у сверхчистых металлов (например, у меди с  $RRR = 100$  и алюминия с  $RRR = 3000$ ), которые потенциально могли бы быть использованы для изготовления камеры, что лишает их преимущества перед обычной «плохой» медью с  $RRR = 10$ . В разделе 5.1.2.2 был обоснован выбор именно меди с соответствующей  $RRR$  в качестве материала для изготовления камеры для пучка.

В разделе 5.2 был обоснован выбор величины и конкретной компоновки межполюсного зазора, как компромисс между величиной поля и нагревом камеры. Было показано (с учётом отрицательного опыта компоновки других конкурирующих сверхпроводящих вставных устройств), что оптимальным техническим решением является удаление из межполюсного зазора такого элемента, как «тёплая» вакуумная камера и использование для разделения защитного вакуума криостата и высокого вакуума накопителя «холодной» вакуумной камеры гелиевого сосуда, соединённой сифонами с камерой накопителя. При этом вся тепловая нагрузка со стороны пучка (до  $\sim 20 - 30$  Вт) переходит с «тёплой» камеры на отдельную негерметичную медную камеру (лайнер), отделённую зазором от гелия и охлаждаемую с обеих сторон криокулерами со ступенью 20 К, как показано на Рис. 17.

В разделе 5.4 описано, как была решена проблема механической деформации, возникавшей в стенках лайнера под действием вихревых токов от резкого затухания поля при потере сверхпроводимости в магните. Идея состояла в одновременном уменьшении наводимых на лайнере токов за счёт использования меди с пониженной электропроводностью ( $RRR < 50$ ), изготовления лайнера с минимальной толщиной стенок на грани технологического предела ( $\sim 0.5$  мм), а также использовании специального пружинного элемента, возвращающего стенки лайнера в первоначальное положение.

Предложенная компоновка криостата позволила, получив выигрыш по величине поля, не только оставить расход гелия на уровне, не превышающем расход с тёплой вакуумной камерой, но и достигнуть нулевого расхода и пониженного давления в гелиевом сосуде.

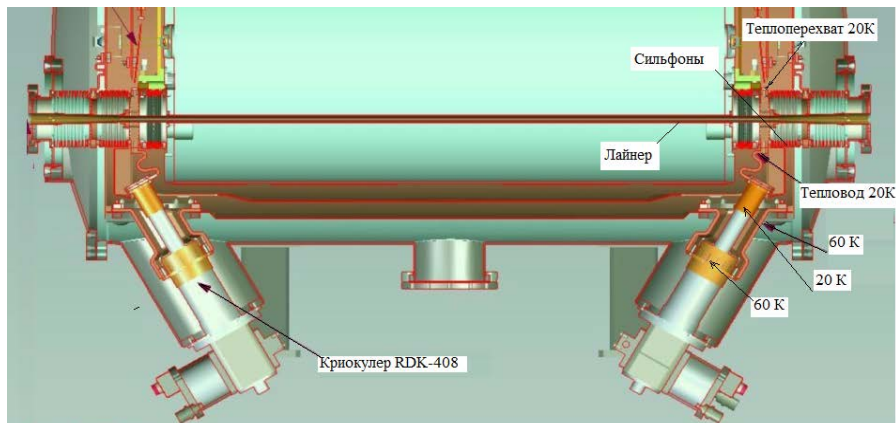


Рис. 17. Схема охлаждения лайнера 20 К ступенями криокулеров.

**В шестой главе** дан прогноз развития сверхпроводящих многополюсных вставных устройств, предполагающий создание сверхпроводящих ондуляторов на основе безжидкостных криостатов с косвенным охлаждением.

**В заключении** приведены основные результаты работы:

- 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 имеющими аналогов в мире;
- впервые реализована новая концепция конструкции криостата на основе криокулеров, состоящая в последовательном перехвате притоков тепла на ступени криокулеров, что снизило расход гелия до нуля и создало пониженное давление в гелиевом сосуде, позволяющее автономно работать без потребления жидкого гелия, несмотря на дополнительную нагрузку от электронного пучка и вводимый ток  $\sim 1000$  А для запитки магнита;
- 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;

- неоднократно продемонстрирован стабильный уровень тока на обмотках многополюсных вигглеров не менее 90-95% от тока короткого образца, что является рекордным для обмоток типа рейстрек;
- обоснованы и продемонстрированы преимущества схемы расположения обмоток в виде горизонтального рейстрека, по сравнению с вертикальным рейстреком для вигглеров с малым периодом и ондуляторов;
- 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;
- впервые предложено и реализовано использование теплоёмких добавок на основе гадолиния для повышения устойчивости обмоток многополюсных вигглеров к выходу из сверхпроводящего состояния, спровоцированного локальными сбросами электронного пучка при инъекции;
- впервые обоснованы и реализованы системы защиты сверхпроводящих обмоток многополюсных вигглеров в виде цепочек холодных диодов и резисторов, обеспечивающие надёжную регистрацию перехода в нормально-проводящее состояние, исключающее ложные срабатывания.

Таким образом, можно утверждать, что была достигнута основная цель данной диссертационной работы и в результате комплексных расчётных и экспериментальных исследований была решена крупная научная проблема: создан новый класс вставных устройств - многополюсные сверхпроводящие вигглеры для генерации синхротронного излучения в широком спектральном диапазоне, автономно работающие на накопителях в условиях ограниченного доступа в течение нескольких лет с нулевым расходом жидкого гелия.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. Kulipanov G.N., ... Shkaruba V.A. et al. Development of superconducting compact storage ring for technical purposes in the USSR // RSI, 63, 1992, p.731-736.
2. Grudiev A.V., ... Shkaruba V.A. et al. Superconducting 7.5 Tesla wiggler for PLS // NIM, Vol. A359, No.1-2 (1995), p.101-106.
3. Borovikov V.M., ... Shkaruba V.A. et al. Power supply and quench protection system for a superconducting 7.5 Tesla wiggler // NIM, A359, (1995), p.107-109.
4. Borovikov V.M., ... Shkaruba V.A. et al. Proposal of superconducting 7 Tesla wiggler for LSU-CAMD // NIM, Vol. A405, No.2, 3 (1998), p.208-213.
5. Bekhtenev E.A., ... Shkaruba V.A. et al. Measurement of magnetic field characteristics of wigglers with the current strained wire method // NIM, Vol. A405, No.2,3 (1998), p.214-219.

6. Borovikov V., ... Shkaruba V. et al. Superconducting 7 Tesla wiggler for LSU CAMD // Journal of Synchrotron Radiation (1998), Vol. 5, Part 3, p.440-442.
7. Borovikov V., ... Shkaruba V. et al. Magnetic measurement system for high field magnets // Journal of Synchrotron Radiation (1998), Vol. 5, Part 3, p.382-385.
8. Ando A., ... Shkaruba V. et al. Proposal of the high magnetic field super-conducting wiggler for slow positron source at SPring-8 // Journal of Synchrotron Radiation (1998), Vol. 5, Part 3, p.360-362.
9. Fedurin M., Kulipanov G., Mezentsev N., Shkaruba V. Superconducting high-field three-pole wigglers in Budker INP // NIM A 448 (2000), p.51-58.
10. A.Batnikov, ... V.Shkaruba et al. Control and data acquisition systems for high field superconducting wigglers. Proc.of 7th International conference of Synchro-tron Radiation Instrumentation, Berlin, 2000 // NIM A 467 (2001), p.202-205.
11. V.M.Borovikov, ... V.A.Shkaruba et al. Superconducting 7 Tesla Wave Length Shifter for BESSY-II. Proc.of 7th International conference of Synchrotron Radiation Instrumentation, Berlin, 2000 // NIM A 467 (2001), p.181-184.
12. A. Batnikov, ... V. Shkaruba et al. Magnetic measurements of the 10T Superconducting Wiggler for the SPring-8 storage ring. Proc.of 7th Intern. conf. of Synchrotron Radiation Instr., Berlin, 2000 // NIM A 467 (2001), p.190-193.
13. V.M.Borovikov, ... V.A.Shkaruba et al. Precise NMR measurement and stabiliza-tion system of magnetic field of superconducting 7 Tesla wavelength shifter. Proc.of 7th International conference of Synchrotron Radiation Instrumentation, Berlin, 2000 // NIM A 467 (2001), p.198-201.
14. V.M.Borovikov, ... V.A.Shkaruba et al. System of NMR Measurement and stabiliza-tion of magnetic field in superconducting wiggler at BESSY-II. Proc.of EPAC-2000 (Vienna, Austria), p.2474-2476.
15. M.G. Fedurin, M.V. Kuzin, N.A. Mezentsev, V.A. Shkaruba, Status of the activity on fabrication and application of high-field superconducting wavelength shifters at Budker INP, //NIM A470 (2001), p. 34-37.
16. А.М.Батраков, ... В.А.Шкаруба и др. Сверхпроводящие сильнополевые виг-глеры и шифтеры в ИЯФ СО РАН // Вопросы атомной науки и техники. Серия ядерно-физические исследования, (Материалы 17 международного семинара по ускорителям заряженных частиц, Алушта, 2001), N3, с. 59-61.
17. А.М.Батраков, ... V.A.Shkaruba et al. Superconducting wave length shifters and multi-pole wigglers developed in Budker INP. Proc. of APAC –2001, Beijing, China, p.251-253.
18. D.Berger, ... V.Shkaruba et al. A superconducting 7 T multipole wiggler for BESSY-II synchrotron radiation source. Proc of PAC-2001, Chicago, p. 2450-2452.
19. Kuzin M.V., ... Shkaruba V.A et al. Superconducting wavelength shifters and multipole wigglers developed in Budker INP. Proc. of the ISTC-RIKEN Work-shop Accelerator Technologies, October 2-3, 2001.- Hirosawa, 2001, p.61-64.
20. Borovikov V.M., ... Shkaruba V.A. et al. Superconducting 7T wavelength shifter for BESSY-II. Proc. Of the 7th Intern. Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2000), Berlin, Germany, August 21-25, 2000 /Ed. By W.Gudat, P.Zimmermann/. - Amsterdam, North- Holland, 2001, Pt.I. - p.181-184.

21. Batrakov A., ... Shkaruba A V. et al. Superconducting wiggler for the SPRING-8 storage ring. Proc. of the 7th Intern. Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2000), Berlin, Germany, August 21-25, 2000 /Ed. By W.Gudat, P.Zimmermann/. - Amsterdam, North-Holland, 2001, Pt.I. - 190-193.
22. Batrakov A., ... Shkaruba V. et al. Control and data acquisition systems for high field superconducting wigglers. Proc. Of the 7th Intern. Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2000), Berlin, Germany, August 21- 25, 2000 /Ed. By W.Gudat, P.Zimmermann/. - Amsterdam, North-Holland, 2001, Pt.I. -p.202-205.
23. Шкаруба В.А., Сверхпроводящий трехполосный генератор синхротронного излучения с полем 7.5 Тл и фиксированной точкой излучения: автореф. Диссертация. ... канд. техн. наук: 01.04.20, Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника / ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2001, 177 с.
24. D.Berger, E.Weihreter, N.Mezentsev, V.Shkaruba, A superconducting multipole 7 T wiggler for BESSY-II: main challenges and first field measurements. Proc. of EPAC-2002, Paris, France, p.2595-2597.
25. A.Batrakov, ... V.Shkaruba et al. A Superconducting 3.5 T multipole wiggler for the ELETTRA storage ring. Proc. of EPAC-2002, Paris, France, p.2634-2636.
26. A.M.Batrakov, ... V.A.Shkaruba et al. Construction and tests of the 49-pole 3.5T superconducting wiggler for Elettra storage ring. Proc. of SRI-2003, San Francisco, USA, Volume 705, Issue 1, pp. 183-186
27. S.V.Khrushev, ... V.A.Shkaruba et al. 7 Tesla 17-pole superconducting wiggler for BESSY-II. Proc. of XVIII International Workshop on Charged Particle Accelerations. (Alushta - 2003).
28. K.Soutome, ... V.Shkaruba et al. A generation of high-energy synchrotron radiation with 10-T superconducting wiggler installed in the SPring-8 storage. Proc. of PAC-2003, Portland, USA, p.250-252.
29. Бехтенов Е., ... Шкаруба В. и др. Измерение интегралов магнитного поля в многополосном вигглере. 18 Конф. по ускор. зарядж. частиц (RUPAC-2002), ГНЦ РФ ФЭИ им.А.И.Лейпунского.- Сб. докл., Обнинск, 2004, 2, с.544-546.
30. Khruchev S.V., Kuzin M.V., Mezentsev N.A., Miginsky E.G., Repkov V.V., Shkaruba V.A., Tsukanov V.M. Tesla 17-pole superconducting Wiggler for BESSY- II // Problems of atomic science and technology, Ser.Nucl.Phys.Inv., 2004,1, p.80-82.
31. E.Weihreter, ... V.Shkaruba et al. A 7T wiggler for BESSY-II: Implementation and commissioning results. Proc. of EPAC-2004, Lucerne, Switzerland, p.324-326.
32. S.V.Khrushev, ...V.A.Shkaruba et al. 9 Tesla Superbend for BESSY-2. Proc. of the 3rd APAC-2004, Korea, 356- 358.
33. K.V. Zolotarev, ... Shkaruba et al. High magnetic field superconducting magnets fabricated in Budker INP for SR generation. Proc.of RuPAC XIX, Dubna -2004, p.40-44.
34. A.M.Batrakov, ... V.A. Shkaruba et al. Nine tesla superconducting bending magnet for BESSY-II // NIM A543 (2005), p.35-41.
35. S.V. Khrushev, ... V. Shkaruba et al. 3.5 Tesla 49-pole superconducting wiggler for DLS . Proc.of RuPAC XX, Novosibirsk -2006, p.398-400.



36. E.Bekhtenev, S.Khrushchev, N.Mezentsev, E.Miginsky, V.Shkaruba, V.Tsukanov, The main test results of the 3.5 Tesla 49-pole superconducting wiggler for DLS. Proc.of RuPAC XX, Novosibirsk -2006, p.404-406.
37. S.V. Khrushchev, E.A., ... V.A. Shkaruba et al. Superconducting 63-pole 2T wiggler for Canadian Light Source. Proc. of XIX Intern. Workshop on Charged Particle Accelerations. (Alushta - 2005), // Problems of Atomic Science and Technology, 2006, N2, p. 172-174.
38. E.A.Bekhtenev, ... V.A. Shkaruba et al. Magnetic measurement of the 63-pole 2 Tesla superconducting wiggler for Canadian Light Source. Proc. of XIX International Workshop on Charged Particle Accelerations. (Alushta - 2005), //Problems of Atomic Science and Technology, 2006, N2, p. 175-177.
39. Е.А. Бехтенов, ... В.А. Шкаруба и др. Сверхпроводящий многополюсный вигглер для канадского центра синхротронного излучения // Письма в жур-нал "Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2006, т. 3, N7, с.33-41.
40. E.A.Bekhtenev, ...V.A. Shkaruba et al. A Multipole Superconducting Wiggler for Canadian Light Source // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2006, Vol. 3, Suppl. 1, p.S16–S21, 2006.
41. Е.А.Бехтенов, ... В.А.Шкаруба и др. Система магнитных измерений сверхпроводящих многополюсных вигглеров // Поверхность (2006), 12, с.23-26.
42. А. М. Batrakov, ... V. A. Shkaruba et al. Superconducting Insertion Devices for Light Sources at Budker INP. Proc.of 9 Conf. SRI-2007, Vol.879, pp. 305-310.
43. S.V. Khrushchev, ... V.A. Shkaruba et al. Superconducting 63-pole 2T wiggler for Canadian Light Source // NIM A575 (2007), p.38-41.
44. A.Valentinov, ... V.Shkaruba et al. First results of SIBERIA-2 storage ring operation with 7.5 T superconducting wiggler. Proc. of RuPAC 2008, Zvenigorod, Russia, p.185-187.
45. S.Khrushchev, ...V.Shkaruba et al. 27-Pole 4.2T wiggler for biomedical imaging and therapy beamline at the Canadian light source // NIM A603 (2009), p. 7-9.
46. S.V. Khrushchev, V.H. Lev, N.A. Mezentsev, E.G. Miginsky, V.A. Shkaruba, V.M. Tsukanov. Optimization of wigglers side poles // NIM A603 (2009), p.19-21.
47. Мезенцев Н.А., Шкаруба В.А., Обзор сверхпроводящих вставных устройств для генерации СИ. 7 Нац. конф. "Рентген., Синхротрон. излучения, Ней-троны и Электронны для исследований наносистем и материалов. Нано-Био-Инфо-Когнитивные технологии" РСНЭ-НБИК 2009, 16-21 ноября 2009, с.549.
48. Лев В.Х., ... Шкаруба В.А. et al. Сверхпроводящий 119-полюсный вигглер с полем 2.1 Т и периодом 30 мм для накопителя ALBA. 18 Международная конф. «СИ-2010», книга тезисов.- Новосибирск ИЯФ СО РАН, 2010.- с.23.
49. S.V. Khrushchev, ... V.A. Shkaruba et al. Superconducting 119-pole wiggler for ALBA light source. Proc. of IPAC-2011, San Sebastian, Spain, p.3304-3306.
50. Волков А.А., ... Шкаруба В.А. и др. Сверхпроводящий 119-полюсный вигглер с полем 2.1 Т и периодом 30 мм для накопителя ALBA // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2012, N5, с.1-10.
51. A.Volkov A., ... V.Shkaruba et al. Superconducting 119-Pole wiggler with 2.1T field and 30mm period length for the ALBA storage ring // Journal of Surface Inv.: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2012. Т. 6. № 3. С. 379-387.

52. Bragin A.V., ... Shkaruba V.A. et al. Indirect cooled superconductive wiggler magnet. RuPAC 2012. Proc. 23rd Russian Particle Accelerator Conf. p.140- 142.
53. D.Zangrando, ... V.Shkaruba et al. The ELETTRA 3.5 T superconducting wiggler refurbishment. Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, p.2687-2689.
54. Khrushchev S., ... Shkaruba V. et al. Superconducting multipole wigglers: state of art. Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, 4103-4106.
55. Mezentsev N., ... Shkaruba V. et al. Superconducting Multipole Wigglers: Magnetic and Cryogenic Systems. 13th Cryogenics Intern. Conf.: Refrigeration Science and Technology. Prague, CZECH REPUBLIC, 2014, Issue 1, pp.81-87.
56. A. A. Volkov, ... V. A. Shkaruba et al. The Superconducting 15-Pole 7.5 Tesla Wiggler in the LSU CAMD Storage Ring // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2015, Vol. 79, No. 1, p.53-59.
57. А. А. Волков, ... В. А. Шкаруба и др. Сверхпроводящий 15-полюсный вигглер с полем 7.5 Тл для накопителя LSU-CAMD // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2015, том 79, № 1, с. 62–68.
58. S. V. Khrushchev, V. A. Shkaruba et al. Zeroing Magnetic Field Integrals for Wigglers and Undulators with Even Numbers of Poles // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2015, Vol. 79, No. 1, p.44-48.
59. А. А. Волков, ... В. А. Шкаруба и др. Особенности зануления интегралов магнитного поля в вигглерах и ондуляторах с четным числом полюсов // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2015, том 79, № 1, с. 52–58.
60. R. S. Amin, ... V. Shkaruba et al. A preliminary report from Louisiana State University CAMD storage ring operating with an 11 pole 7.5 Tesla wiggler. Proc. of IPAC2015, Richmond, VA, USA, - S.I. : JACoW, 2015. - P. 1682-1685.
61. Khrushchev S., ... Shkaruba V. et al. Magnetic system of the high field superconducting multipole wiggler for LSU CAMD. Proc. of 12 European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS-2015), Lyon, France, IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2016.- Volume:26, Issue:3, p.7389339.
62. A. Bragin, ... V. Shkaruba et al. Test results of a CLIC damping wiggler prototype // IEEE Transactions on Appl. Supercond.2016, Vol.26, Issue:4, p.4102504.
63. A. Bernhard, ... V.A.Shkaruba et al. A CLIC damping wiggler prototype at ANKA: commissioning and preparation for a beam dynamics experimental program. Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea. p.2412-2415.
64. A.Bragin, ... V.Shkaruba et al. Superconducting solenoid for superfast THz spectroscopy. SRF-2016, //Physics Procedia 84 (2016) 82-85.
65. A.Bragin, ... V.Shkaruba et al. Superconducting 72-pole indirect cooling 3 Tesla wiggler for CLIC dumping ring and ANKA image beamline. SRF-2016, // Physics Procedia 84 (2016) 54-61.
66. S.Khrushchev, ... V.Shkaruba et al. Performance of Nitrogen Heat Tubes in Cooling Down of Superconducting Magnets. SRF-2016, // Physics Procedia 84 (2016) 90-95.
67. S.Khrushchev, ... V.Shkaruba et al. The research of the superconducting undulator prototype with neutral poles and features of the magnetic field distribution in it. SRF-2016, // Physics Procedia 84 (2016) 62-66.

ШКАРУБА Виталий Аркадьевич

**Сверхпроводящие многополюсные вигглеры  
для генерации синхротронного излучения**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

---

Сдано в набор 25.08.2017 г.  
Подписано в печать 29.08.2016 г.  
Формат 60x90 1/16 Объем 2.6 усл. печ.л., 2.1 уч.-изд.л.  
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 5

---

Обработано на РС и отпечатано  
на роталпринте ИЯФ СО РАН,  
*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*