

Выполнение 1 этапа проекта по теме
«Концептуальная разработка устройств генерации синхротронного
излучения и высокочастотной системы для национальных источников
синхротронного излучения с предельно низким эмиттансом»

Проект выполняется в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы», Соглашение о предоставлении субсидии с Минобрнауки России от 22 ноября 2017 г. № 14.616.21.0087

Целью данного этапа является анализ задач, которые должны быть решены в результате выполнения проекта в целом. Для достижения этой цели в рамках данного этапа предполагается решить следующие задачи:

- Провести первичный анализ пользовательских потребностей для формирования требований к устройствам генерации излучений;
- Предложить стратегию и инструменты выбора критических параметров устройств генерации излучения, их конструкции и принципов работы для модельных сравнений между собой и для формирования рекомендаций для пользовательских методик;
- Провести первичный анализ существующих технологий изготовления элементов высокочастотной (ВЧ) системы ее критических параметров;
- Предложить первичный список типов устройств генерации излучений, рекомендованных к установке на SSRS-4, с примерами использования таких устройств на других источниках синхротронного излучения (СИ);
- Определить основные параметры ВЧ-системы для SSRS-4, которая может быть реализована на базе существующих технологий.

В целом данный этап является стартовой точкой проекта. Именно по результатам работ первого этапа на следующем этапе возможен осознанный выбор устройств генерации излучений для реализации конкретных пользовательских методик. Кроме того, оптимальный выбор способов

реализации ВЧ-системы позволит определить основные параметры работы комплекса в целом.

1. Проведение анализа пользовательских потребностей и пожеланий для определения основных параметров устройств генерации излучения и высокочастотной системы и компонентов этих систем

Главная задача, стоящая при создании источников синхротронного излучения (СИ), — это улучшение их основной характеристики — спектральной яркости потока излучения — числа фотонов, излучаемых в единицу времени в данной спектральной полосе с единицы площади источника в единицу телесного угла. Именно спектральная яркость определяет величину полезного потока фотонов для проведения экспериментов.

При реализации тех или иных методик возникают определенные требования как к величине данного потока, так и к его спектральному составу. Данные характеристики определяются как параметрами электронного пучка, так и параметрами устройств генерации излучений. Кроме того для реализации некоторых методик необходимо обеспечить возможность плавной перестройки спектрального состава излучения в процессе сбора данных. К таким методикам относятся различные вариации XAFS-спектроскопии. В других случаях (дифракционный или рентгенофлуоресцентный анализ, рентгеноскопия и др.) энергетического сканирования не требуется, а возникает потребность в пиковой спектральной яркости на фиксированных спектральных линиях. Поэтому при выборе устройств генерации для реализации определённой методики встает вопрос выбора типа устройства генерации. В случае спектрального сканирования предпочтительно использование устройств с широким непрерывным

спектром — вигглеров; в методиках, требующих больших потоков на фиксированных линиях, предпочтительно использование ондуляторов.

Для реализации методик, использующих поляризованное излучение, также встает вопрос о выборе устройства генерации. Особый интерес представляют спиральные ондуляторы, позволяющие генерировать циркулярно-поляризованные фотоны. Кроме того, для реализации методик, основанных на использовании магнитного дихроизма (линейного и циркулярного) целесообразно использование специальных ондуляторов, позволяющих производить плавную перестройку поляризации от циркулярной до линейной и до циркулярной с другим знаком спиральности. Такие ондуляторы принято называть *APPLE II type*.

2. Разработка методов и инструментов для данного вида анализа

Так как на данной стадии разработки проекта основные параметры источника не определены, возможности рекомендаций устройств генерации сильно ограничены. Для обзора возможных подходов в дальнейшем будет принята концепция, что параметры источника близки к параметрам разработанного в настоящее время проекта ESRF-EBS (Гренобль, Франция). Предполагается, что энергия пучков будет 6 ГэВ, а проектный ток 200 мА. В случае другой величины проектного тока результирующие яркости пучков из устройств генерации могут быть пересчитаны в соответствии с линейной зависимостью. Равновесный эмиттанс, влияющий на общую величину яркости, в дальнейших расчетах предполагается равным 160 пкм рад. В случае изменения данной величины возможен пересчет абсолютных величин яркости излучения: яркость обратно пропорциональна величине эмиттанса (предполагается, что при данной и меньших величинах горизонтального

равновесного эмиттанса вертикальный эмиттанс определяется преимущественно внутривпучковым рассеянием и не связан с горизонтальным; характерная величина вертикального эмиттанса составляет несколько единиц пкм рад). Длина орбиты такой машины около 1 км, хотя эта величина не влияет на яркость. Также предполагается, что в магнитной структуре предусмотрено наличие достаточного количества прямолинейных секций с нулевой дисперсионной функцией и длинами от 3 до 5 м.

Для сравнения устройств генерации излучений, основанных на разных принципах, и технологий создания в дальнейшем (когда это не оговаривается отдельно) для простоты будут рассмотрены яркости устройств с длинами в 3 м. Если длины реальных устройств отличаются от этой величины, то яркости будут меняться линейно от длины устройств в случае вигглеров или квадратично в случае ондуляторов.

2.1. Сверхпроводящие вигглеры

Для многих экспериментов требуется жёсткий спектр излучения, вплоть до 200 кэВ.

Для повышения жёсткости квантов излучения необходимо увеличивать уровень магнитного поля в точке излучения. Наиболее гибким и экономически эффективным способом решения этой задачи, не требующим глубокой модернизации магнитной структуры накопителя, является установка в свободные прямолинейные промежутки накопителя сверхпроводящих многополюсных вигглеров и ондуляторов. В этом случае интенсивность излучения из последовательно расположенных полюсов с чередующимся направлением магнитного поля суммируется под данным углом из разных полюсов. Таким образом, 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.

Каждое такое вставное устройство предназначается для генерации излучения с заранее заданными свойствами, зависящими как от конкретной исследовательской задачи, так и от характеристик накопительного кольца, таких как энергия электронов и ток пучка, размеры вакуумной камеры, особенности магнитной структуры. Поэтому при проектировании каждого такого вставного устройства необходимо сделать оптимальный выбор таких параметров, как величина магнитного поля, число полюсов и величина магнитного зазора, чтобы обеспечить максимально возможный поток фотонов в требуемом диапазоне и, в то же время, не ухудшить характеристики электронного пучка накопителя. Таким образом, для разработки окончательной конструкции каждого вставного устройства, предназначенного для конкретного эксперимента, необходимо будет провести процесс оптимизации многих параметров. Однако, для первичной оценки был проведён анализ возможных конструкций исходя из современных технических и технологических возможностей. В результате анализа базовых параметров пучка SSRS-4, разработанных на основе варианта “Present lattice” проекта ESRF, было предложено использовать на выбор несколько групп сверхпроводящих многополюсных вставных устройств для генерации излучения. Каждая из этих групп предназначена для генерации излучения в своей спектральной области, но в целом, адаптируя параметры этих устройств под конкретную задачу и характеристики накопителя, можно обеспечить перекрытие всего необходимого энергетического диапазона излучения, необходимого для проведения экспериментов. Конструкция этих вставных устройств основана на конструкции сверхпроводящих многополюсных вигглеров, разработанных в ИЯФ СО РАН и успешно работающих на многих накопителях мира в качестве генераторов синхротронного излучения. Окончательные параметры

вставных устройств могут быть определены только после детальной проработки всего проекта накопителя SSRS-4

В общем можно отметить следующие моменты.

1. Ввиду высокой энергии электронов спектры всех устройств достаточно жесткие (100 кэВ и выше), что позволяет реализовывать наиболее востребованные методики.
2. Сильнополевые сверхпроводящие вигглеры могут представлять интерес только для реализации методик требующих очень жесткого спектра (до 1 МэВ). В остальных случаях среднеполевые и низкополевые вигглеры более предпочтительны ввиду существенно большей яркости.
3. Среднеполевые сверхпроводящие вигглеры представляют интерес для реализации методик с энергией фотонов свыше 100 кэВ.
4. Для всех методик, не требующих сканирования по энергии и энергий фотонов свыше 100 кэВ на машинах подобного класса предпочтительно использовать ондуляторы.

Таким образом, пользователи могут произвести начальный выбор устройств, отвечающих их требованиям для дальнейшей оптимизации.

2.2. Высокочастотная система

Технические требования, предъявляемые к ВЧ системе, и, соответственно, ее конфигурация определяются параметрами пучка в накопителе. ВЧ система должна обеспечить компенсацию радиационных потерь энергии электронов, достаточный размер сепаратрисы (энергетический акцептанс) и не приводить к развитию неустойчивостей в движении сгустков. ВЧ система состоит из резонаторов, генераторов (усилителей мощности) и электроники управления / синхронизации.

В качестве базовых параметров пучка SSRS-4 приняты параметры, соответствующие варианту “Present lattice” проекта ESRF. Для SSRS-4 рассмотрена ВЧ система, работающая на частоте 178.672 МГц, что соответствует 503-ой гармонике частоты обращения.

Конфигурация ВЧ системы SSRS-4 определяется, в значительной степени, следующими условиями:

- потери на синхротронное излучение (СИ) в дипольных магнитах составляют 2.5 МэВ/оборот, а во вставных устройствах – до 0.5 МэВ/оборот, таким образом полные максимальные потери на СИ составляют 3 МэВ/оборот;
- максимальный ток пучка в накопителе составляет 200 мА;

Следовательно, ВЧ система должна обеспечить передачу в пучок до 600 кВт мощности для компенсации радиационных потерь.

- достаточным представляется размер сепаратрисы (энергетический акцептанс) $\Delta E/E = 0.02 \div 0.03$ (в жестких магнитных структурах вряд ли можно обеспечить выживаемость частиц с большими отклонениями по энергии);

Выбрано значение энергетического акцептанса $\Delta E/E = 3.45\%$. Для обеспечения такой величины $\Delta E/E$ требуется полное ускоряющее напряжение, равное 4 МВ.

- для обеспечения стабильного движения сгустков пучка с током 200 мА необходимо сильное демпфирование высших мод (ВМ) резонаторов.

Рассмотрен вариант ВЧ системы SSRS-4 на основе биметаллических резонаторов, разработанных в ИЯФ СО РАН и успешно работающих в

различных лабораториях мира. В качестве источника ВЧ мощности рассмотрен усилитель, выполненный по каскадной схеме с тетродом ТН781 в выходном каскаде и твердотельным (транзисторным) предварительным усилителем.

2.2.1. Резонаторы SSRS-4

В ИЯФ СО РАН разработана конструкция ускоряющих резонаторов УКВ диапазона для использования в составе источников СИ и лазеров на свободных электронах. Резонаторы изготавливаются из биметалла (8 мм меди и 7 мм нержавеющей стали), получаемого с помощью диффузионной сварки. Высокочастотные токи текут по внутренней медной поверхности. Диски резонатора соединяются с обечайкой сваркой по нержавеющей стали, что обеспечивает вакуумную плотность. Кроме того, усадки швов, возникающие в процессе сварки, обеспечивают усилие, необходимое для хорошего электрического контакта в местах соединений внутренней медной поверхности. В результате резонаторы имеют высокую собственную добротность ($\sim 40\,000$). Корпус резонатора интенсивно охлаждается водой – в наружном нержавеющей слое биметалла выполнены многочисленные каналы водяного охлаждения, а толстый внутренний медный слой позволяет отвести выделяющееся в стенках резонатора тепло к ближайшим каналам без больших температурных градиентов по поверхности резонатора. Такая конструкция позволяет получать в непрерывном режиме достаточно высокие значения напряжения на ускоряющем зазоре резонатора (~ 1 МВ без учета коэффициента пролета).

Биметаллические резонаторы работают в составе новосибирского ЛСЭ, ускорителя исследовательского центра KAERI (Ю.Корея), специализированного источника СИ Сибирь-2 (Курчатовский институт, г. Москва), накопительного кольца лаборатории DFELL (США).

2.2.2. Резонаторы новосибирского ЛСЭ

В составе ВЧ-системы новосибирского ЛСЭ используются 19 биметаллических резонаторов: 1 одиночный резонатор-группирователь в инжекторе и 9 сдвоенных ускоряющих секций – 1 в инжекторе и 8 в микротроне ЛСЭ. Резонаторы имеют по два тюнера для перестройки частот ВМ. Тюнеры ВМ слабо влияют на частоту основной моды. Тюнеры ВМ в принципе позволяют перестроить частоты ВМ таким образом, чтобы наводимые пролетающими электронными сгустками напряжения высших мод не оказывали существенного влияния на динамику пучка.

Резонаторы инжектора ускорителя КАЕРИ и большого накопителя (БН) Курчатовского института Сибирь-2 имеют аналогичную конструкцию и близкие параметры. В БН Курчатовского института установлены 3 биметаллических резонатора. После модернизации системы ВЧ питания и повышении ВЧ мощности усилителя каждого резонатора до 200 кВт Сибирь-2 должна устойчиво работать с током электронов до 300 мА на энергии 2.5 ГэВ. При этом ускоряющее напряжение каждого резонатора составит до 900 кВ. Устойчивое движение сгустков будет обеспечиваться настройкой частот ВМ и системой обратной связи.

Конструкция биметаллических резонаторов допускает прогрев при температуре 300-350°C как в процессе стендовых испытаний, так и после установки на место в кольцо накопителя. Это позволяет получить в резонаторе высокий вакуум ($p \sim 10^{-11}$ торр).

2.2.3. Резонатор DFELL

Для накопительного кольца лаборатории DFELL (Duke Free Electron Laser Laboratory, Durham, NC, USA) был разработан вариант

биметаллического резонатора с демпфированием (подавлением) ВМ. Это был второй резонатор, поставленный Институтом в лабораторию DFELL, поэтому ему присвоено обозначение Duke-2.

Высшие моды подавляются с помощью специальной нагрузки. Нагрузка, состоящая из ВЧ-поглотителей, расположена внутри вакуумной камеры, которая в этом месте представляет собой трубу диаметром 700 мм, соединенную с резонатором через отверстие в его торцевой стенке. Эта труба представляет собой круглый запердельный волновод для ускоряющей моды, так что нагрузка, расположенная на достаточном расстоянии, не влияет на величину добротности основной моды. Частота отсечки волновода меньше резонансной частоты наиболее низкочастотной ВМ. Поэтому все ВМ распространяются по трубе к нагрузке и, соответственно, существенно подавляются. На противоположной (относительно нагрузки) торцевой стенке изнутри сделан выступ, размеры которого рассчитаны так, чтобы частота основной моды была равна 178.5 МГц.

В качестве поглощающего материала для нагрузки высших мод выбрана выпускаемая в России, г. Фрязино, ООО НПП «Старт» проводящая керамика КТ-30. Состав керамики: TiO₂ – 30%, А-995 – 70% (Al₂O₃ – 99.8%, MgO – 0.2%).

Конструкция нагрузки и материал поглотителей позволяют прогреть резонатор в сборе до 300-350°C и получить в резонаторе высокий вакуум ($p \sim 10^{-11}$ торр).

2.2.4. Резонаторы SSRS-4

Для SSRS-4 рассмотрен вариант ВЧ системы на основе биметаллических резонаторов с подавлением ВМ. В качестве первого приближения взят резонатор Duke-2.

Обсуждение вариантов с различным числом резонаторов приводится ниже, после описания усилителей мощности.

2.2.5. Усилители мощности SSRS-4

Для питания резонаторов SSRS-4 требуются усилители УКВ диапазона с выходной мощностью >100 кВт, работающие в непрерывном режиме. Для питания биметаллических резонаторов в ИЯФ СО РАН разработана модульная конструкция усилителей мощности на основе электровакуумных усилительных тетродов. Конструкция позволяет собирать генераторы на необходимую мощность из стандартизованных блоков. В мощных выходных каскадах используются как отечественные тетроды ГУ-101А (производства ОАО «Светлана», г. С.-Петербург), так и импортные – ТН781 (производства компании THALES, Франция). Вначале в выходном каскаде использовались тетроды ГУ-101А, затем, после небольшой доработки, в каскад были установлены тетроды ТН781. С тетродом ТН781 выходная мощность 1-модульного каскада может составлять ~ 150 кВт.

Для питания ускоряющих резонаторов инжектора новосибирского ЛСЭ и резонатора Duke-2 используются усилители с одномодульными выходными каскадами (с тетрами ГУ-101А в ИЯФ и ТН781 в DFELL), а для питания резонаторов БН Сибирь-2 – усилители с 2-х-модульными выходными каскадами (с тетрами ТН781).

В качестве предварительного усилителя до настоящего времени использовались 2-х-каскадные усилители на тетрах ГУ-92А. В 2017 г. было принято решение заменить ламповые каскады усилителей, питающих ускоряющие резонаторы инжектора новосибирского ЛСЭ, транзисторными. Транзисторные усилители разработаны ООО «Триада-ТВ» (г. Новосибирск) в соответствии с техническим заданием ИЯФ и должны быть изготовлены и установлены в инжектор в первой половине 2018 г.

Для SSRS-4 рассматривается усилитель, выполненный по каскадной схеме с тетрами ТН781 в модулях выходного каскада и твердотельными (транзисторными) предварительными усилителям (отдельный предусилитель для каждого модуля выходного каскада). Выходная мощность и конфигурация усилителя зависят от числа резонаторов. При $N_{cav} = 8$ для питания 1-го резонатора требуется 122.8 кВт. Такая мощность может быть получена от усилителя с одномодульным выходным каскадом. При $N_{cav} = 6$ для питания 1-го резонатора требуется 181.7кВт. Для этого нужен усилитель с 2-х-модульным выходным каскадом. В первом случае в резонаторе рассеивается 36.7 кВт, во втором – 65.2 кВт. Уменьшение числа резонаторов до 4 нецелесообразно, т.к. мощность потерь в стенках становится слишком большой (146.6 кВт).

Очевидным недостатком резонатора Duke-2 является его большой габаритный размер в осевом направлении (3.162 м по фланцам шиберов). Для сокращения длины возможно объединение пары резонаторов в секцию с общей нагрузкой, что позволит «сэкономить» ~1.3 м. При этом длина секции из 2-х резонаторов составит ~ 5 м, что, при $N_{cav} = 6$ или 8 потребует, соответственно, 15 или 20 м в прямолинейном участке. Для сокращения суммарной длины резонаторов требуется оптимизация конструкции нагрузки ВМ. Эта работа может быть выполнена на следующем этапе, после определения структуры кольца и доступного для размещения резонаторов места.

2.2.6. Электроника управления/синхронизации ВЧ системы

SSRS-4

Система управления должна выполнять следующие функции:

- Регулирование ускоряющих напряжений резонаторов по амплитуде и фазирование ускоряющих напряжений между собой.

- Автоматическая подстройка резонаторов по частоте.
- Формирование синхронизирующих сигналов для осуществления точной инжекции сгустков в накопительное кольцо при последовательном заполнении сепаратрис.
- Защита мощных элементов ВЧ системы и персонала в нештатных ситуациях.

Система управления может быть выполнена аналогично работающей системе БН Сибирь-2. ВЧ система имеет задающий генератор частоты обращения. Умножитель частоты на 503 вырабатывает сигналы для возбуждения радиочастотных каналов.

Каждый радиочастотный канал ВЧ системы имеет линейный усилитель мощности, питающий один резонатор. Каждый усилитель возбуждается независимо от предусилителя, имеющего регулируемый каскад, в котором выполняется регулировка сигнала по амплитуде и по фазе. Стабилизация регулирования осуществляется с помощью цепей обратной связи по сигналу с датчика напряжения резонатора.

Следящая система управляет серводвигателем, подстраивающим резонансную частоту резонатора для компенсации дестабилизирующих факторов. Схемы блокировки и защиты осуществляют безопасное штатное включение в рабочий режим, выключение ВЧ системы и защиту мощных элементов и персонала в нештатных ситуациях

Для контроля и управления ВЧ системой в автоматическом режиме по заданной программе имеется необходимое количество каналов ЦАП, АЦП, входных и выходных регистров.

2.3. Выводы

В результате выполнения работ по этапу 1 определены технические требования к ВЧ системе на основе анализа конфигурации SSRS-4 и параметров пучка в накопителе. В качестве базовых параметров пучка SSRS-4 приняты параметры, соответствующие варианту “Present lattice” проекта ESRF. Для SSRS-4 рассмотрена ВЧ система, работающая на частоте 178,672 МГц, что соответствует 503-ой гармонике частоты обращения. Для оценки параметров ВЧ системы использован одномодовый резонатор Duke-2, разработанный ИЯФ СО РАН для лаборатории DFELL (США).

3. Формирование списка устройств генерации излучений и определение их параметров

Ниже приведены различные типы устройств генерации излучения с пояснением основных особенностей.

3.1. Многополюсные вигглеры с экстремально высоким уровнем поля (7...7,5 Тл) и длинным периодом (140...200 мм)

Вставные устройства с высоким уровнем поля выгодно использовать не только для увеличения потока фотонов, но и для сдвига спектра излучения в область высокоэнергетичных квантов. К тому же высокий уровень магнитного поля и длинный период приводят к значительному угловому отклонению электронного пучка, что позволяет использовать широкий

горизонтальный угол излучения для установки сразу нескольких каналов вывода излучения.

3.2 Многополюсные вигглеры со средним уровнем поля (3,5...4,2 Тл) и небольшим периодом (48...60 мм)

Вигглеры со средним уровнем поля и небольшим периодом предназначены для генерации излучения с самым востребованным спектральном диапазоне, подходящем для большинства экспериментов.

3.3. Многополюсные вигглеры с коротким периодом (30...34 мм) и низким уровнем поля (2...2,2 Тл)

Особенностью вигглеров с коротким периодом и невысоким уровнем поля является то, что форма спектра излучения из таких периодических магнитных структур приближается на низких энергиях квантов к спектру ондулятора, в котором начинает наблюдаться интерференционная картина.

3.4. Сверхпроводящие ондуляторы

Перспективным направлением развития сверхпроводящих вставных устройств являются сверхпроводящие ондуляторы. Принципиальным отличием по сравнению с вигглерами является спектр излучения; в частности, вводится такой параметр, как фазовая ошибка. В настоящее время в мире не существует ни одного действующего полноразмерного сверхпроводящего ондулятора, есть лишь несколько коротких прототипов. В ИЯФ СО РАН ведётся работа по созданию такого устройства

3.5. Ондуляторы на постоянных магнитах

Ондуляторы на постоянных магнитах позволяют добиться высокой яркости и жесткости генерируемого излучения при существенно меньшей стоимости по сравнению со сверхпроводящими ондуляторами. Кроме того, возможности настройки и функционирования ондуляторов при комнатных температурах позволяет получить заметно меньшую фазовую ошибку и улучшить надежность работы.

К недостаткам стоит отнести существенные трудности в регулировании уровня поля и соответственно K -параметра, что затрудняет реализацию методик требующих прецизионного сканирования по энергии квантов.

В ИЯФ СО РАН имеется большой опыт создания ондуляторов на постоянных магнитах. В частности, был создан прототип ондулятора для европейского рентгеновского лазера на свободных электронах, который может представлять интерес для проекта SSRS-4. Ондулятор имеет длину 5 м, пиковое поле достигает значения 1 Т при периоде 30 мм.

3.6 Спиральные ондуляторы

Для реализации некоторых пользовательских методик возникает необходимость циркулярно поляризованных фотонов. Для генерации таких фотонов могут быть использованы спиральные ондуляторы. Одним из возможных вариантов такого ондулятора может быть ондулятор разработанный и созданный для проекта RHIC-BNL. Ондуляторы в данном проекте используются в системе когерентного электронного охлаждения пучков тяжелых ионов, но могут быть применены и для простой генерации циркулярно поляризованный фотонов на источнике СИ SSRS-4.

3.7. ВЫВОДЫ

С точки зрения выбора устройств генерации СИ наибольшим потенциалом для машины с предельно малым эмиттансом представляют сверхпроводящие ондуляторы обеспечивающие рекордную яркость для циклических машин в достаточно жестком диапазоне спектра (до 100 кэВ).

Для реализации методик XAFS-спектроскопии (с необходимостью сканирования по энергии фотонов) целесообразно использовать сверхпроводящие вигглеры с коротким периодом и относительно низким полем. Стоит отметить, что при выборе окончательных параметров таких устройств стоит учитывать, что при достаточно низком параметре K характер излучения может частично приобретать ондуляторный характер, что нарушает спектральную однородность.

Для реализации методик в жесткой рентгеновской области (и даже в области гамма-спектроскопии, т.е. когда энергия квантов может достигать нескольких МэВ) возможно использование длиннопериодных сильнополевых вигглеров.

Выбор ондуляторов со спиральной или изменяемой поляризации в целом определяется исключительно из пользовательских потребностей, поэтому окончательный выбор конструкций и принципов реализации таких устройств должен быть произведен после определения основных научных задач, которые планируется решать на комплексе.

Заключение

Запланированные на первый этап работы в целом выполнены. Предложены варианты реализации и параметры различных устройств генерации излучений для обеспечения пользовательских потребностей и обеспечения аналитических методик необходимым потоком фотонов.

Окончательный выбор конфигурации устройств генерации должен осуществляться в соответствии со списком данных методик и параметрами станций, реализующих эти методики, в особенности с учетом способа монохроматизации спектра. Данный выбор должен быть произведен на втором этапе, также на втором этапе должны быть проведены патентные исследования для конкретных схем реализации.

Окончательный выбор основных параметров высокочастотной системы также должен быть проведен на следующем этапе. Основным не определенным параметром является рабочая частота. Предлагаемая ИЯФ величина составляет 180 МГц в то время как иностранный партнер, опираясь на собственный опыт реализации проекта ESRF-EBS предлагает основные решения для частоты 350 МГц. Оба варианта имеют преимущества и недостатки и основной выбор должен быть осуществлен после моделирования параметров внутривидеопучкового рассеяния и Тушековского времени жизни пучка с учетом предлагаемой магнитной структуры и величины проектного тока пучка.