

# Проект дубненского электронного синхротрона

В.А. Архипов<sup>1</sup>, В.К. Антропов<sup>1</sup>, Н.И. Балалыкин<sup>1</sup>, П.Ф. Белошицкий<sup>1</sup>, О.И. Бровко<sup>1</sup>,  
А.В. Бутенко<sup>1</sup>, И.Н. Иванов<sup>1</sup>, В.Г. Кадышевский<sup>1</sup>, В.В. Калиниченко<sup>1</sup>, В.В. Кобец<sup>1</sup>,  
И.Н. Мешков<sup>1</sup>, В.Ф. Минашкин<sup>1</sup>, Н.А. Морозов<sup>1</sup>, Ю.А. Поляков<sup>1</sup>, Н.А. Русакович<sup>1</sup>,  
Н.Г. Шакун<sup>1</sup>, А.О. Сидорин<sup>1</sup>, А.Н. Сисакян<sup>1</sup>, Г.И. Сидоров<sup>1</sup>, А.П. Сумбаев<sup>1</sup>, В.И. Смирнов<sup>1</sup>,  
Е.М. Сыресин<sup>\*1</sup>, И.В. Титкова<sup>1</sup>, С.И. Тютюнников<sup>1</sup>, С.Б. Федоренко<sup>1</sup>, В.А. Швец<sup>1</sup>, М.В. Юрков<sup>1</sup>,  
П.Д. Воблый<sup>2</sup>, Г.Н. Кулипанов<sup>2</sup>, Е.В. Левичев<sup>2</sup>, Н.А. Мезенцев<sup>2</sup>, А.Н. Скринский<sup>2</sup>,  
Е.М. Шатунов<sup>2</sup>, В.А. Ушаков<sup>2</sup>,  
Н. Voer-Rookhuizen<sup>3</sup>, E. Heine<sup>3</sup>, W.P.J. Heubers<sup>3</sup>, A.P. Kaan<sup>3</sup>, F.V. Kroes<sup>3</sup>,  
L.H. Kuijjer<sup>3</sup>, J.V. v.d. Laan, J. Langelaar<sup>3</sup>, P.W.F. Louwrier<sup>3</sup>, G. Luijckx<sup>3</sup>, R. Maas<sup>3</sup>,  
G. van Middelkoop<sup>3</sup>, J.G. Noomen<sup>3</sup>, J.V. Spelt<sup>3</sup>

*1 – Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия*

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

*3 – National Institute of Nuclear Physics and High Energy Physics, Amsterdam, The Netherlands*

Проект “Дубненский Электронный Синхротрон” (ДЭЛСИ) имеет целью создание в Объединенном институте ядерных исследований источника синхротронного излучения третьего поколения. Источник ДЕЛСИ создается на базе ускорительного комплекса Института ядерной физики и физики высоких энергий (НИКНЕФ), г. Амстердам, Нидерланды.

Накопительное кольцо ДЕЛСИ будет сооружено на основе кольца “Amsterdam Pulse Stretcher” (AmPS) при существенном изменении фокусирующей системы последнего: будет уменьшен периметр кольца, повышена энергия электронов и усилена фокусировка. Все это позволит более чем на порядок уменьшить эмиттанс пучка и, соответственно, резко повысить яркость синхротронного излучения.

Принципиальным является оснащение накопителя ДЕЛСИ встроенными приборами — сверхпроводящим вигглером с полем до 10 Тесла и “вакуумным гибридным миниондулятором”. Оба прибора — оригинальная разработка ИЯФ им. Г.И. Будкера, Новосибирск. Они позволяют расширить возможности ДЕЛСИ как источника синхротронного излучения, продвинув его спектр в область жесткого рентгена и повысив яркость до уровня  $3 \cdot 10^{18}$  фотонов/сек/мм<sup>2</sup>/мрад<sup>2</sup>/0,1% ширины спектра. Это делает ДЕЛСИ источником СИ третьего поколения. Сейчас оборудование демонтировано в НИКНЕФ и привезено в ОИЯИ.

## Введение

Целью проекта ДЭЛСИ является создание в Объединенном институте ядерных исследований источника синхротронного излучения (СИ). По своим параметрам ДЭЛСИ будет представлять собой источник СИ третьего поколения. Для института это перспективное новое направление, оно дает возможность расширения существующих в ОИЯИ исследований по физике конденсированных сред, биологии и медицине, химии и геологии, проблемам экологии, а также развивает новые технологии, основанные на использовании синхротронного излучения, такие как микромеханика и литография, технология материалов и металлургия.

Источник создается на базе ускорительного комплекса НИКНЕФ [1-2]. Этот ускорительный комплекс включает в себя электронный линейный ускоритель МЕА (Medium Energy Accelerator) [2] на энергию электронов 700 МэВ и накопительное кольцо AmPS с максимальной энергией электронов 900 МэВ при токе накопленного пучка 200 мА [1]. Накопитель электронов ДЭЛСИ планируется создать на базе элементов кольца AmPS, значительно изменив его оптику и уменьшив почти в полтора раза его периметр [3-5]. Это позволяет на порядок снизить эмиттанс пучка ДЭЛСИ по сравнению с пучком AmPS и, соответственно, резко увеличить яркость

пучка как источника СИ. Планируется дополнить кольцо ондулятором с высокой яркостью и сверхпроводящим вигглером, генерирующим жесткое рентгеновское излучение. Кроме того, предполагается заметно увеличить энергию электронов в ДЭЛСИ, доведя ее до 1.2 ГэВ. Это может быть достигнуто при незначительной модификации дипольных магнитов AmPS.

Установка “миниондулятора” в накопительном кольце ДЭЛСИ увеличит яркость источника до  $3 \cdot 10^{18}$  фотон/с/мрад<sup>2</sup>/0.1% ш. п., что на 5 порядков превышает синхротронное излучение из поворотных магнитов. Использование вигглера с напряженностью магнитного поля 10 Тл [6] обеспечит генерацию жесткого рентгеновского излучения с энергией  $\gamma$ -квантов 20-50 кэВ. Все это и делает ДЭЛСИ источником синхротронного излучения третьего поколения. Для СИ из поворотных магнитов предполагается создание 10 станций, 6-8 станций будут созданы для использования СИ из вигглера и ондулятора. С их помощью планируется иметь поток СИ, близкий по яркости и спектру к излучению из поворотных магнитов в накопительных кольцах, работающих при энергии 2-3 ГэВ. Это делает проект конкурентно-способным по сравнению с источником с более высокой энергией электронов.

## 1. Структура и основные параметры ДЭЛСИ

В комплексе ДЭЛСИ электронный пучок формируется и ускоряется до энергии 800 МэВ в линейном ускорителе МЕА (табл.1).

Таблица 1: Параметры электронного линака

<b>Длина</b>	<b>м</b>	<b>200</b>
Энергия электронов	ГэВ	0.8
Пиковый ток	мА	60
Средний ток	мА	50
Средняя мощность	кВ	34
Нормализованный эмиттанс	$\pi \cdot mm \cdot mrad$	25
Длительность импульса	мкс	3.5
<b>ВЧ-параметры ускорительной секции</b>		
ВЧ-частота	ГГц	2.856
Темп ускорения	МэВ/м	5-7
Длительность импульса	мкс	0.1-3.5
Мощность резонатора	МВт	20

Ускоряющая система линака состоит из 14 ускоряющих станций, включающих СВЧ-генераторы, фидеры и ускоряющие секции. Структурно линейный ускоритель состоит из инжектора, группирователя, чоппера, предварительного группирователя энергии (пребанчера), банчера, 23 ускорительных секций и компрессора спектра энергии. Для увеличения энергии электронов с 700 до 800 МэВ планируется установить еще две запасные ускоряющие секции. В качестве усилителей СВЧ-мощности используются импульсные клистроны. Ускорительные секции А0 и А01 запитываются от клистронов VA 938 D фирмы Вариан, для остальных секций используются клистроны TH2129 фирмы Томсон.

Магнитная структура ДЭЛСИ [3-5] разработана, исходя из следующих общих требований: использование магнитных элементов накопительного кольца AmPS; достижение минимально-возможного эмиттанса при динамической апертуре, обеспечивающей эффективную инжекцию и достаточно высокое время жизни накопленных электронов; обеспечение максимальной яркости из вигглера и ондулятора. Кольцо ДЭЛСИ состоит из четырех суперпериодов. Максимальный градиент в квадрупольных линзах предполагается увеличить с 11 до 20 Тл/м. Максимальная проектная энергия электронов в ДЭЛСИ составляет 1.2 ГэВ, тогда как максимальная энергия в AmPS, была 0,9 ГэВ. Чтобы увеличить энергию электронов (поднять магнитную жесткость с 3 до 4 Тл·м), требуется некоторая модернизация дипольных магнитов.

Таблица 2: Параметры AmPS и ДЭЛСИ.

Накопитель электронов	Параметр	AmPS	ДЭЛСИ
Энергия электронов	ГэВ	0.9	1.2
Энергия инжекции	ГэВ	0.7	0.8
Периметр	м	211.76	140.546
Радиус поворотных магнитов	м	3.3	3.3
Длинная прямолинейная секция	м	32	7.2
Короткая прямолинейная	м		5.6
Горизонтальное бетатронное число		8.3	9.58
Вертикальное бетатронное число		7.214	3.56
Коэффициент расширения орбиты		$2.7 \cdot 10^{-2}$	$4.8 \cdot 10^{-3}$
Гор. натуральная хроматичность		-9.39	-21.3
Верг. натур. хроматичность		-9.51	-17.5
Ток инжекции	мА	10	10
Ток накопленных электронов	мА	250	300
Горизонтальный эмиттанс	нм	160	11.1
ВЧ-частота	МГц	476	476
Номер ВЧ-гармоники		336	223
ВЧ-напряжение	кВ	350	350
Длина банча	мм	15	8.67
Число: Диполей		32	32
Квадруполей		68	64
Секступолей		32	48

Структура прямолинейных участков кольца в значительной степени определяется требованием максимальной яркости СИ из ондулятора и вигглера. Длина дрейфовых промежутков прямолинейных участков равна соответственно 7.2 и 5.3 м. Для оптимизации СИ из вигглера обе бета-функции в нем должны быть достаточно малыми  $\beta_z = 1.5$  м и  $\beta_y = 2$  м в центре. Динамическая апертура, вычисленная с использованием программы MAD, равна  $74\sigma_x$  и  $56\sigma_y$ . Для частиц с отклонением по импульсу  $|\Delta p| = 1\%$  динамическая апертура изменяется незначительно, она равна  $50\sigma_x$  и  $48\sigma_y$ .

## 2. Синхротронное излучение

Параметры синхротронного излучения из поворотных магнитов ДЭЛСИ приведены в табл.3 для электронного пучка с током 0.3 А, эмиттансом 10 нм и  $\beta_x/\beta_y = 12.5/1.2$  м. Мини-ондулятор длиной 2.5 м и 150 периодами решетки (табл.3), установленный в прямолинейной секции накопителя ДЭЛСИ, позволит получить яркость, соответствующую источнику СИ третьего поколения, на пять порядков выше яркости СИ из поворотных магнитов. Для генерации СИ с энергией фотонов 20-50 кэВ в прямолинейной секции ДЭЛСИ планируется установить сверхпроводящий вигглер с магнитным полем до 10 Тл (табл.3) [6].

Таблица 3: Параметры СИ из дипольных магнитов, ондулятора и сверхпроводящего вигглера.

СИ	Параметр	Дип. магнит	Ондулятор	Вигглер
Энергия электронов	ГэВ	1.2	1.2	1.2
Энергия инжекции	ГэВ	0.7		1.2
Критическая энергия	кэВ	1.16		8.6
Энергия фотонов на 1 гармонике	кэВ		0.58	
Поток СИ	Фотон/(с·мрад·0.1% ш.п.)	$7 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{13}$
Яркость СИ	Фотон/(с·мм <sup>2</sup> ·мрад <sup>2</sup> ·0.1% ш.п.)	$2 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{14}$
Плотность мощности СИ	Вт/мрад <sup>2</sup>	2.8	310	181
Линейная плотность мощности	Вт/мрад	2.4		542
Мощность СИ	кВт	16.6	0.17	6.9

### 3. Перспективы ДЭЛСИ как источника СИ четвертого поколения

Линейный ускоритель ДЭЛСИ обладает потенциальными возможностями ускорять электроны до энергии 1 ГэВ и обеспечить среднюю мощность несколько десятков кВт. Это позволяет создать на базе линейного ускорителя лазер на свободных электронах, обеспечивающий излучение в широком диапазоне длин волн 50-0.2 мкм (табл.4) [8]. Реализация SASE схемы [7] с параметрами, близкими к параметрам ЛСЭ для TESLA DESY, позволит обеспечить генерацию мягкого рентгеновского излучения (табл.4). При энергии электронов 1 ГэВ минимальная длина волны будет составлять 5 нм. Варьируя энергию электронов на выходе из линака, можно обеспечить генерацию излучения в диапазоне длин волн 200-5 нм с импульсной яркостью  $10^{29} - 10^{30}$  фотон/с/мм<sup>2</sup>/мрад<sup>2</sup>/ 0.1% ш.п., соответствующей источникам СИ четвертого поколения.

Создание на базе ДЭЛСИ источника СИ четвертого поколения главным образом связано с модернизацией инжекционной системы линейного ускорителя, установкой компрессора банчей и созданием ондуляторов для ЛСЭ.

Таблица 4: Параметры лазера на свободных электронах ДЭЛСИ.

Лазер на свободных электронах	Параметр	ИК	УФ	SASE
<b>Параметры электронного пучка</b>				
Энергия электронов	МэВ	10-80	150-200	300-1000
Пиковый ток	А	30-50	30-50	500-2500
Заряд банча, пК				1
Нормализованный среднеквадратичный эмиттанс	$\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	20-30	20-30	2
Длительность микроимпульса	псек	10	10	0.3-1
Интервал между банчами	нсек	30-60	30-60	100
Среднеквадратичный разброс энергии	%	1	1	0.3-0.1
Количество банчей				50
Частота повторения, Гц		10-50	10-50	100
<b>Ондулятор</b>				
Длина ондулятора	м	2-3	3-4	15-20
Период	см	3-4	3-5	2.8-4
Максимум магнитного поля	Т	0.5-0.8		0.5-1
<b>Излучение</b>				
Длина волны	нм	10-1	2-0.2	5-100
Ширина полосы	%	0.1-1	0.1-1	0.5-1
Пиковая мощность	ГВт			0.3-3
Средняя мощность	Вт	0.1-1	0.1-1	3-10
Максимальная яркость	Фотон/(с·мм <sup>2</sup> · мрад <sup>2</sup> · 0.1% ш.п.)			$10^{29} - 10^{30}$
Средняя яркость	Фотон/(с·мм <sup>2</sup> · мрад <sup>2</sup> · 0.1% ш.п.)			$10^{21} - 10^{22}$

### Заключение

Создание источника СИ третьего поколения в Дубне позволит значительно обогатить научную программу ОИЯИ и даст возможность расширить экспериментальные исследования в области физики конденсированных сред и атомной физики, в биологии и медицине, в химии и геологии, а также развить новые технологии на базе СИ. Реализация этого проекта представляет значительный интерес для научного сообщества и промышленности стран-участников ОИЯИ.

## Список литературы

- [1] Luickx G., Bijeveld J.H.M., Boer Rookhuizen et al. PAC, Chicago, 1989.
- [2] Kroes F.B. LINAC96 Conference, Geneva, 1996.
- [3] Архипов В.А., Антропов В.К., Балалыкин Н.И. и др. Проект Дубненского электронного синхротрона. – В сб.: Международное рабочее совещание “Синхротронный источник ОИЯИ: перспективы исследований”, Дубна, 2000, с.13.
- [4] Titkova I.V., Arhipov V.A., Antropov V.K. et al. EPAC, Vienna, 2000, p.702.
- [5] Titkova I., Beloshitsky P., Meshkov I., Syresin E. Magnet Lattice of the Synchrotron Radiation Source DELSY. EPAC, Vienna, 2000, p.708.
- [6] Grudiev A.V., Durba V.N., Kulipanov G.N. et al. NIM, A359 (1995), 101.
- [7] A VUV Free Electron Laser at the TESLA Test Facility: Conceptual Design Report, DESY Print TESLA-FEL 95-03, Hamburg, DESY, 1995.
- [8] Meshkov I.N., Saldin E.L., Schneidmiller E.A., Syresin E.M., Yurkov M.V. “Perspective of DELSY for the Fourth Generation SR Facility”. EPAC, Viena, 2000.