

Научная сессия ИЯФ СО РАН

2 марта 2023

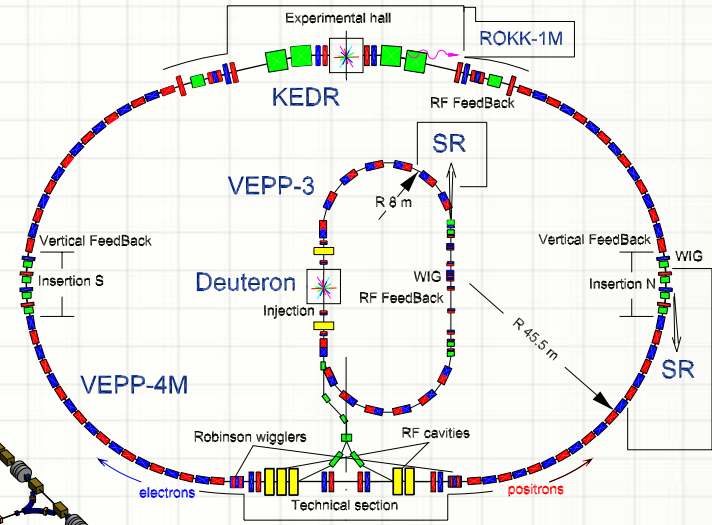
# СТАТУС КОМПЛЕКСА ВЭПП-4

П.Пиминов и команда ВЭПП-4



# УНУ ВЭПП-3/ВЭПП-4М + ВЭПП-2000

- ✓ КЕДР  $e_{\pm}$  1÷4.75 (5.2) ГэВ
- ✓ СИ ВЭПП-3  $e^-$  1.2 ГэВ 1.2 Т
- ✓ СИ ВЭПП-3  $e^-$  2.0 ГэВ 2.0 Т
- ✓ СИ ВЭПП-4М  $e^-$  1.9÷2.5 ГэВ
- ✓ СИ ВЭПП-4М  $e^-$  4.5 ГэВ 2.0 Т
- ✓ Дейтон  $e_{\pm}$
- ✓ Выведенный пучок
- ✓ Ускорительная активность



Energy	2.3	3.5	4.75	GeV
Betatron tunes	8.54/7.57			
Nat. chroms	-14/-20			
Comp. factor	0.0168			
Hor. emit.	42	100	180	nm·rad
Energy spread	3.7	6.5	7.5	$\cdot 10^{-4}$
Bunch length	4 cm			
Beam	2x2	2x2	1x1 → 2x2	
Bunch current	6	9 → 12	9 → 12	mA
Luminosity	0.5	1.2 → 2.0	0.5 → 1.4	$\cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

# Хронология

6 января 2022 - Включение комплекса. Ввод поля КЕДРа

8-14 января 2022 - Эксперименты с поляризацией при разном поле КЕДРа

15 января 2022 - КЕДР ввел поле. Начало регулярной работы на КЕДР и СИ

26 июня 2022 - Комплекс остановлен на летнюю остановку

июнь 2022 - Ремонт приёмника излучения в магните 3М2 на ВЭТПП-3

июль 2022 - постановка 3х полосковых пикапов на подъём К-500

август 2022 - Модернизирован 2ой трансформатор (★-★) ИТ ВЭТПП-3

**Летняя остановка**

22 сентября 2022 - Включение комплекса. ИК только е- на 390 МэВ. Работа на СИ, ЛПП, ВПП, ...

20 октября 2022 - Вакуумная авария на N.EU2 пластине электростатике ВЭТПП-4М

20 октября 2022 - Работа ВЭТПП-4М восстановлена

16 ноября 2022 - Затопление тоннеля ВЭТПП-4М

24 декабря 2022 - Остановка комплекса на новогоднюю остановку

**Зимняя (новогодняя) остановка**

24 января 2023 - Включение комплекса. ИК  $e_{\pm} \sim 430$  МэВ

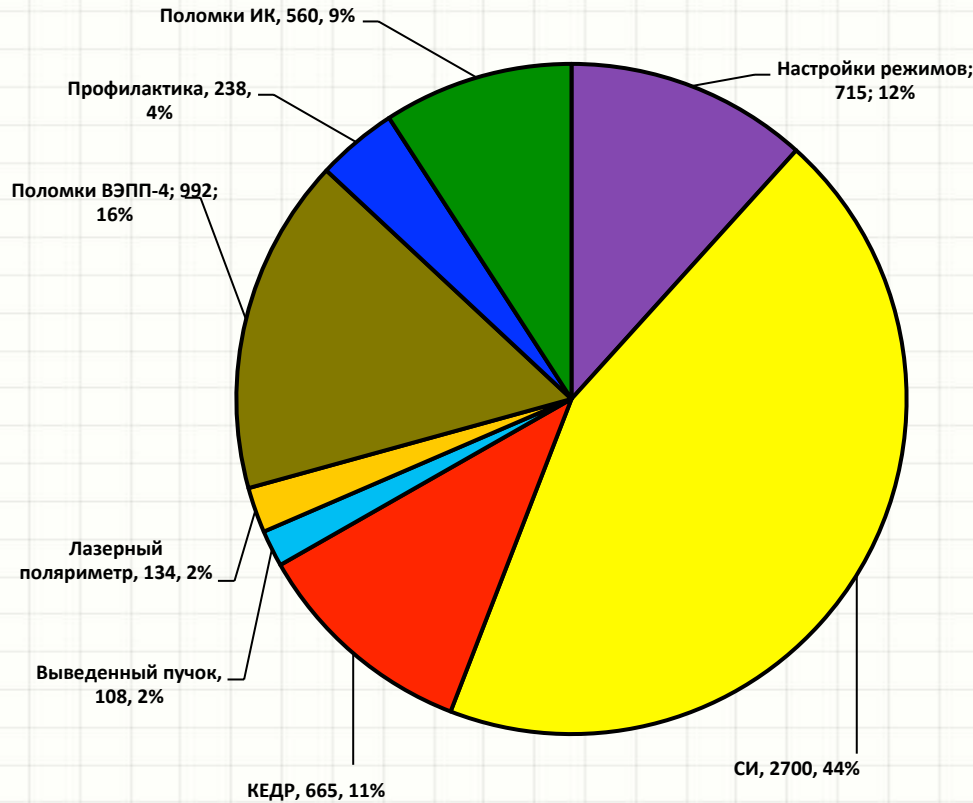
1 февраля 2023 - 14 из 20 новых генераторов электростатики ВЭТПП-4М

20 февраля 2023 - КЕДР ввел поле.

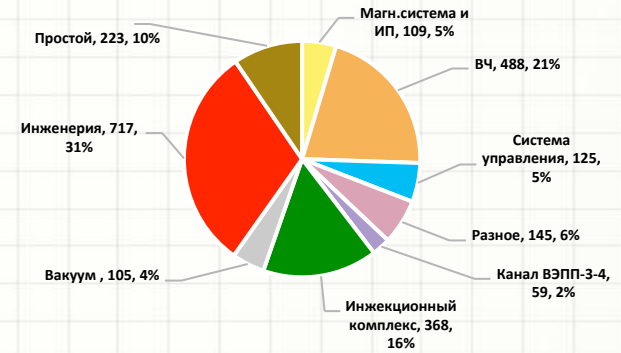
**П.Пиминов, Статус ВЭТПП-4, Научная сессия ИЯФ, 2023**

# Статистика

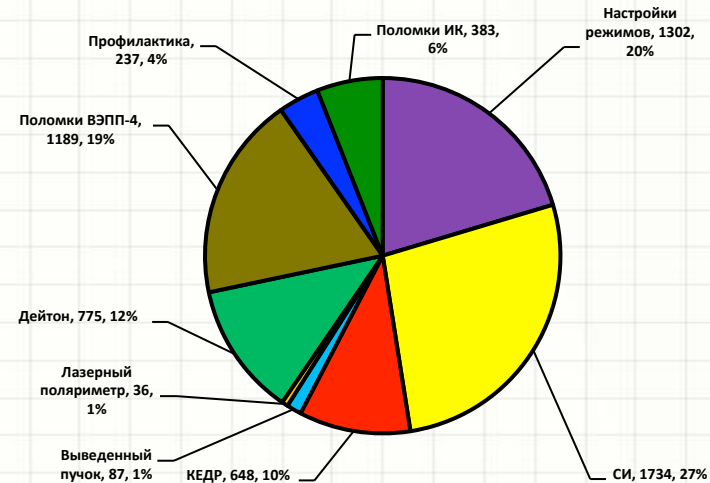
2022



## Распределение простоев и поломок

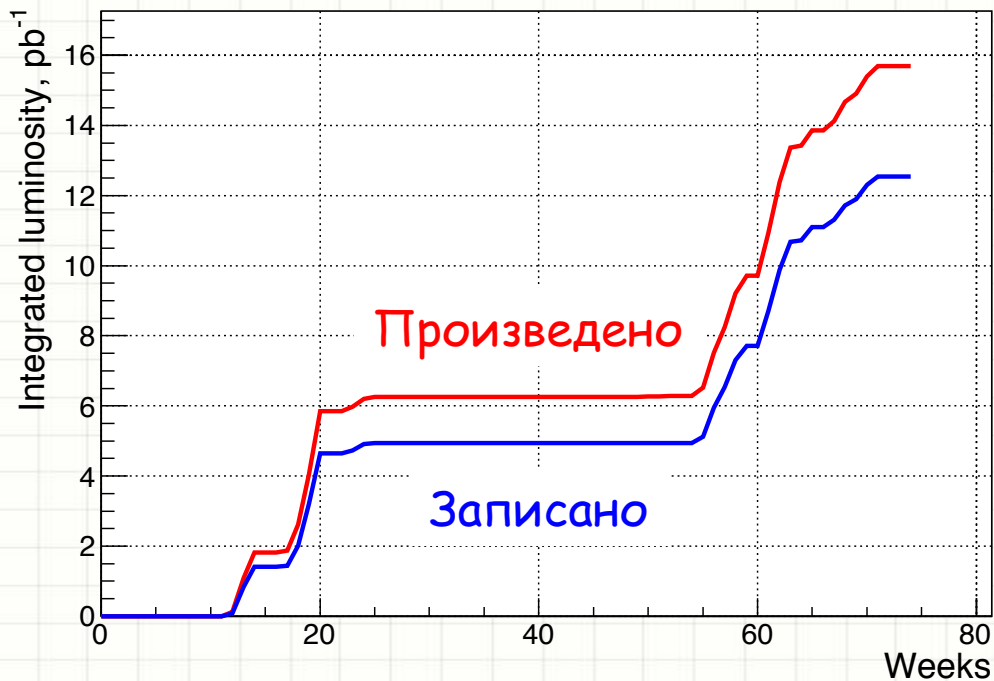


2021



# КЕДР

Набор статистики для 2х-фотонной физики на 3.5 ГэВ ~ 12.5 из 100÷200 pb<sup>-1</sup>



# Синхротронное излучение

VEPP-3, 74 m

VEPP-4M, 366 m

1.2 GeV

2 GeV

1.9 GeV

2.5 GeV

4.5 GeV

100 nm·rad

290 nm·rad

28 nm·rad

50 nm·rad

160 nm·rad

200 mA @ 1÷2 bunches

25 mA @ 1÷25 bunches

№	Станции ВЭПП-3
0-А	LIGA-технология и рентгеновская литография
0-Б	Субмикросекундная диагностика
2	Прецизионная дифрактометрия и аномальное рассеяние
3	Локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ
4	Дифрактометрия при высоких давлениях
5-А	Рентгеновская микроскопия и томография
5-Б	Дифракционное «кино»
6-А	Прецизионная дифрактометрия-2
6-Б	Люминесценция с временным разрешением
8	EXAFS-спектроскопия

№	Станции ВЭПП-4М
1	Технологическая станция СИ
10	«КОСМОС» – ВУФ и МР метрология
3	Прецизионная дифрактометрия и рефлектометрия
8-А	Жесткая рентгеноскопия
8-Б	Экстремальное состояние вещества
8-В	«Плазма»

В 2022 году на эксперименты с пучками СИ отработано:

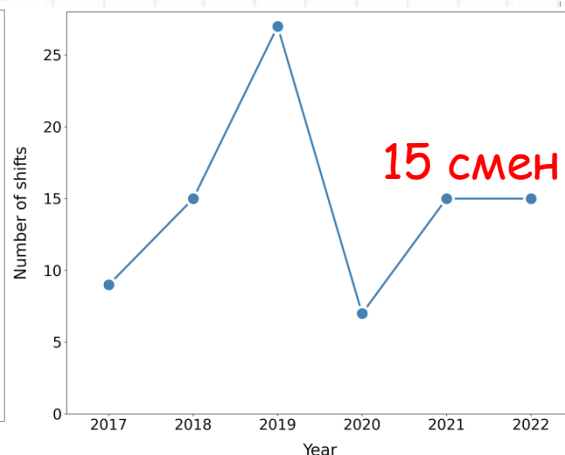
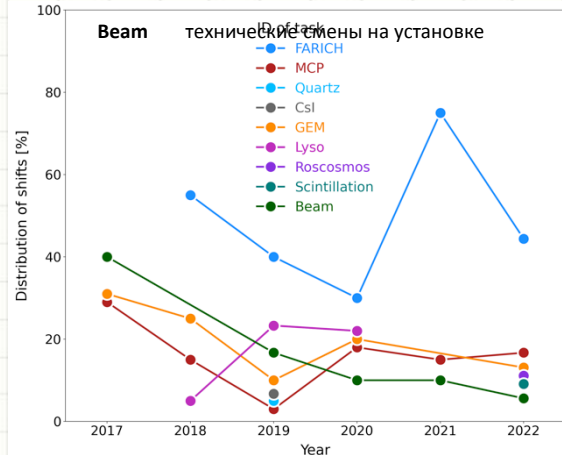
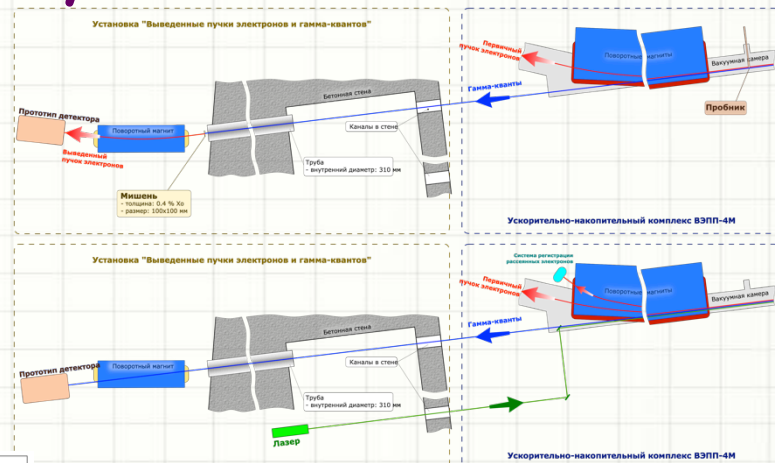
- ✓ ВЭПП-4М отработано 830 часов (около 70 смен), из них на
  - ✦ 4.5 ГэВ - 680 часов (около 57 смен)
  - ✦ 1.9÷3.5 ГэВ - 157 часов (около 13 смен)

- ✓ ВЭПП-3 отработано 1400 часов (около 120 смен), из них
  - ✦ 2 ГэВ - 1300 часов (около 110 смен)
  - ✦ 1.2 ГэВ - 60 часов (5 смен)

П.Пиминов, Статус ВЭПП-4, Научная сессия ИЯФ, 2023

# Выведенный пучок

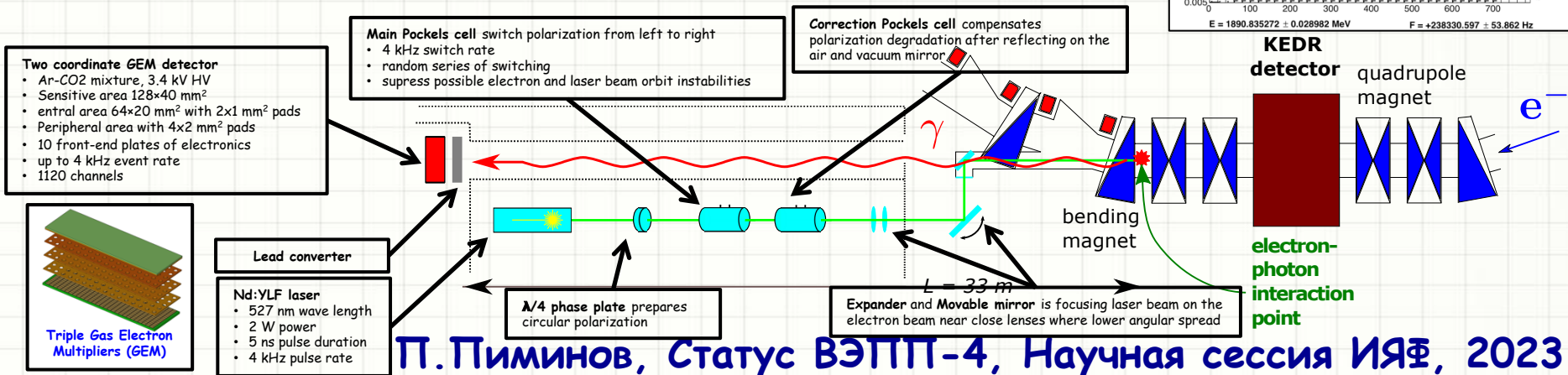
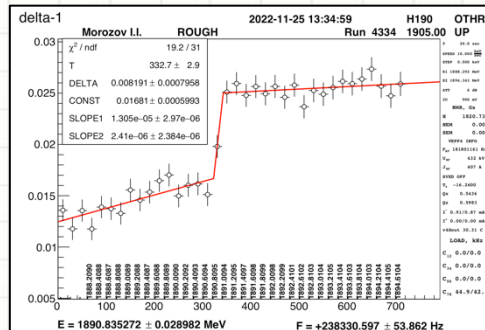
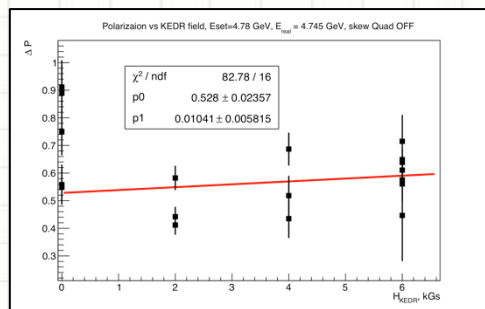
- FARICH** прототип системы идентификации частиц на основе регистрации черенковских колец
- MCP** приборы на основе МКП для время пролетных систем с предельным временным разрешением
- Quartz** исследование компоненты черенковского света в зависимости от угла входа частиц в кварцевую пластину
- CsI** прототип калориметра на чистых кристаллах CsI
- GEM** исследования координатных детекторов на основе ГЭЯ
- Lyso** эксперименты с кристаллами LYSO с целью измерения временного разрешения и черенковской компоненты
- Roscosmos** исследование прототипа порогового черенковского детектора для Роскосмоса
- Scintillation** исследование вероятности сцинтилляционного излучения в аэрогелях с добавкой циркония



Диапазон энергий	100÷3500 МэВ
Точность определения энергии	1.8% (>1000 МэВ)
Скорость счета	70÷100 Гц

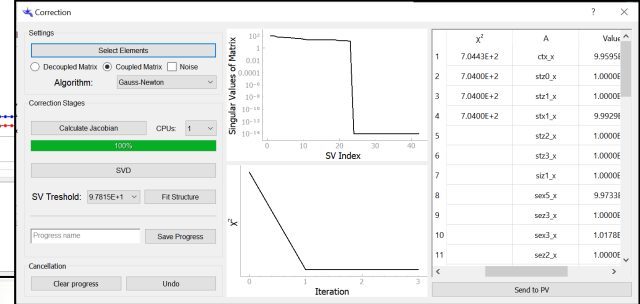
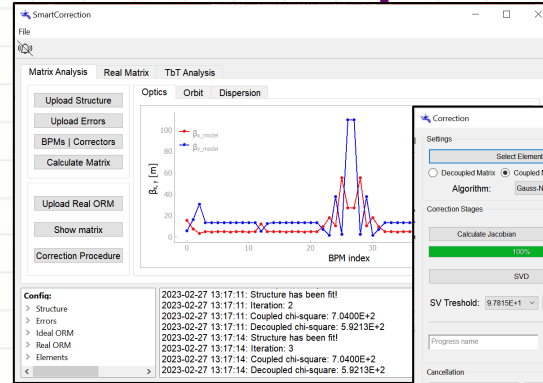
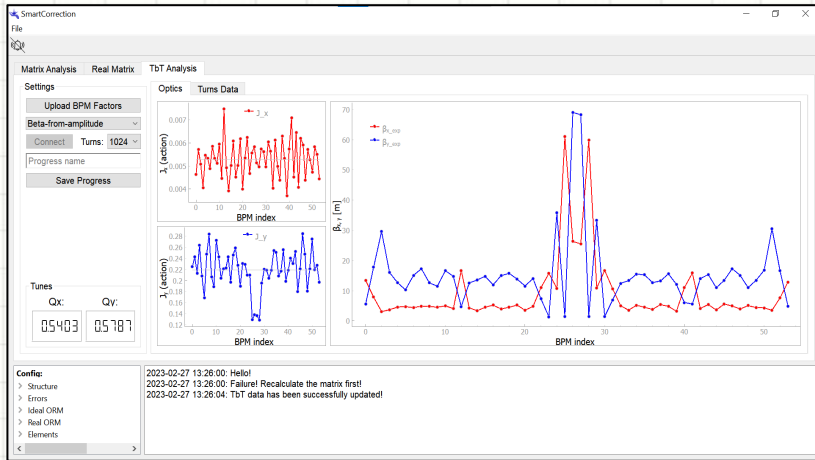
# Лазерный поляриметр

- ✧ Не обнаружено заметного влияния на степень поляризации пучка (на энергии 4.75 ГэВ) магнитного поля КЕДР (6 кГс), а также скью-квадруполей (SEQ2, NEQ2, SEQ3, NEQ3) и октуполей NEOQ, SEOQ.
- ✧ Настроен режим работы деполаризатора (пластины технического прожеутка) при котором деполаризация происходит на основной спиновой линии.
- ✧ В пике  $\Upsilon(1S)$  выполнено 25 калибровок энергии. Точность калибровки 20=30 кэВ.
- ✧ Точность «попадания» на нужную энергию от «ускорения до ускорения» ~ 0.5 МэВ.
- ✧ Температурный дрейф энергии после ускорения и релаксации ведущего поля ~ 200 кэВ. Для эксперимента по измерению массы  $\Upsilon(1S)$  требуется температурная стабилизация.
- ✧ Выполнено 6 калибровок энергии на  $E=3.5$  ГэВ.
- ✧ Изготовлен новый узел вывода лазерного излучения с охлаждаемым водой зеркалом. Начата установка на ВЭТПП-4М.
- ✧ После годового перерыва восстановлена работа тушевского поляриметра с новой системой сбора данных на основе электроники CAEN VME. Выполнено 6 калибровок энергии  $E=1.9$  ГэВ.
- ✧ Отремонтированы (течь по вакууму) пластин электростатики, которые используются для деполаризатора, на входе в северное полукольцо. Симметрично расположенные северные и южные пластины деполаризаторов планируются использовать для определения ширины спиновой линии на энергии  $\Upsilon(1S)$  резонанса с использованием «встречного» одновременного сканирования селективными деполаризаторами на двух поляризованных сгустках. Ширина спиновой линии важна для эксперимента по измерению массы  $\Upsilon(1S)$ . Расчёты предсказывают ширину линии 40=80 кэВ.





# SmartCorrection - метод обратных матриц



## Особенности ПО:

- Python
- MAD-X
- Взаимодействие с EPICS
- Автоматизация коррекции
- Высокая производительность
- Универсальность
- Онлайн-мониторинг

Данные с датчиков

ПО

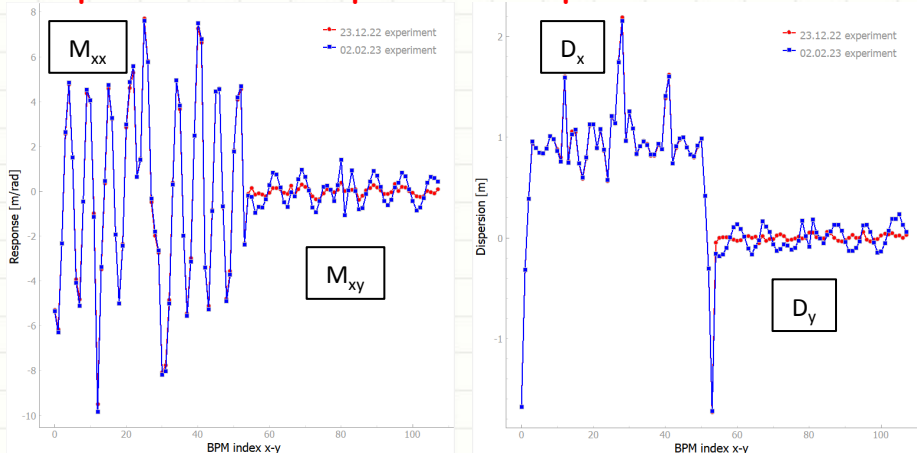
Управление магнитными элементами

$$M^{ij} = \frac{dx^j}{d\theta^i}, \quad M^{\text{exp}} = \begin{pmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{yx} & M_{yy} \end{pmatrix}$$

Анализ матрицы откликов

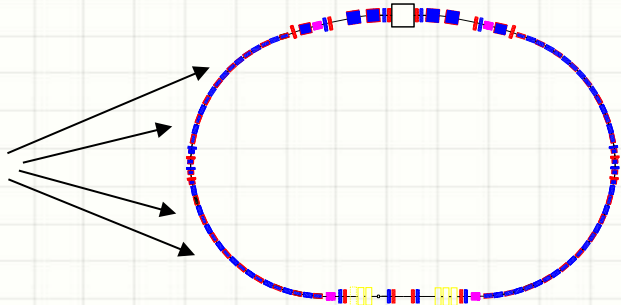
# SmartCorrection vs Закоротки

## Сравнение матриц с закороткой и без неё



Эксперимент	$\chi^2$ (coupled)	$\chi^2$ (decoupled)
23.12.22 (до)	166	54
02.02.23 (закоротка)	290	58
09.02.23 (после)	166	56

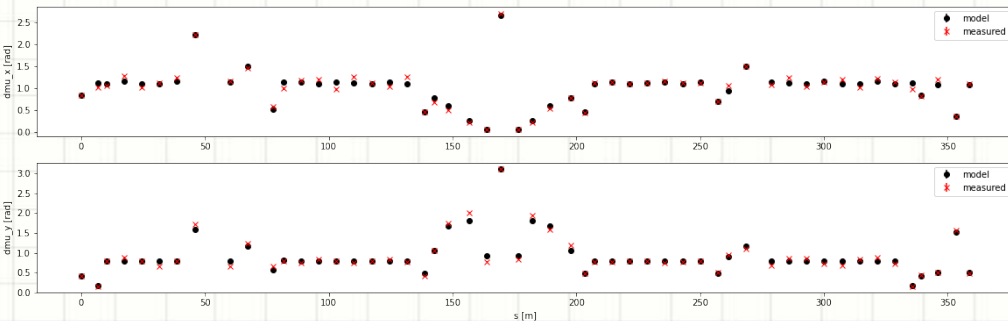
Подгонка показала распределенную skew компоненту в S-полукольце



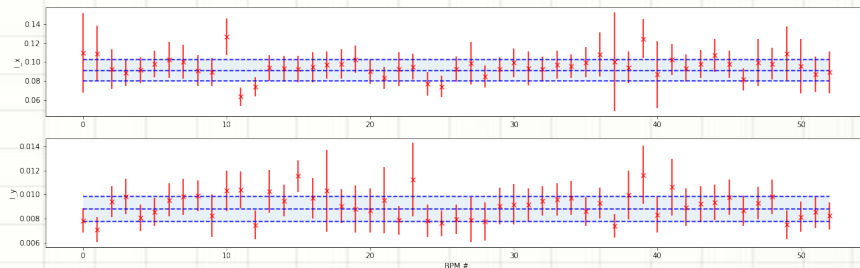
# Измерение оптики по набегу фаз

Восстановление оптических функций из пооборотных когерентных колебаний пучка с помощью FFT

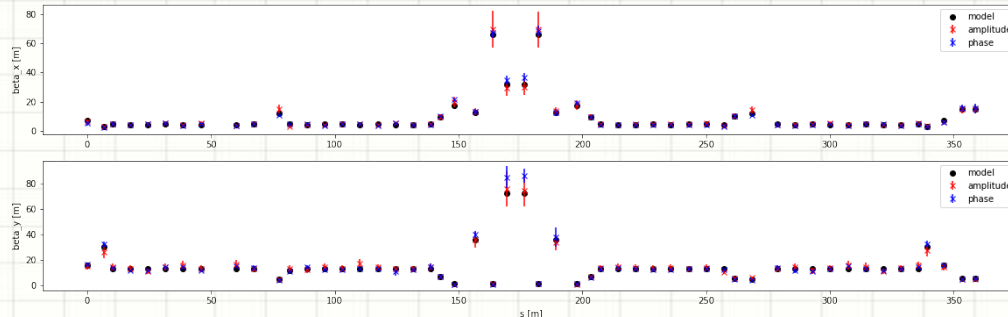
## Набег фаз между соседними датчиками



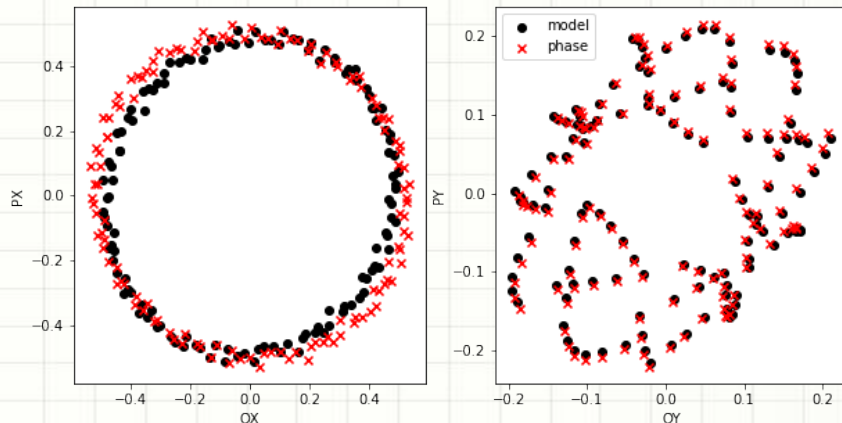
## Действие



## Сравнение бета функции из амплитуды и фазы (несколько комбинаций с отбраковкой)



## Нормализованные фазовые траектории



# Измерение связанной оптики

Восстановление оптических функций из поворотных когерентных колебаний пучка с помощью FFT

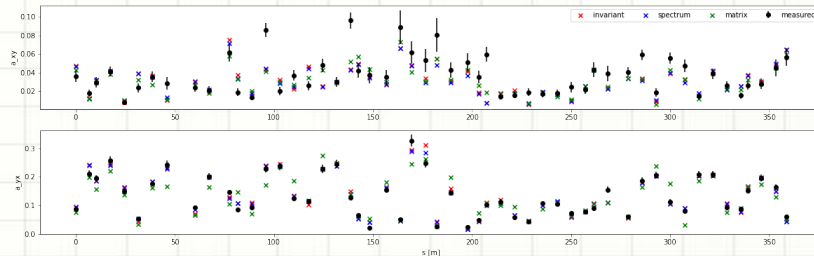
Используется три метода:

- подгонка нормализующей матрицы на основе инвариантов,
- подгонка нормализующей матрицы на основе спектров,
- подгонка матрицы оборота.

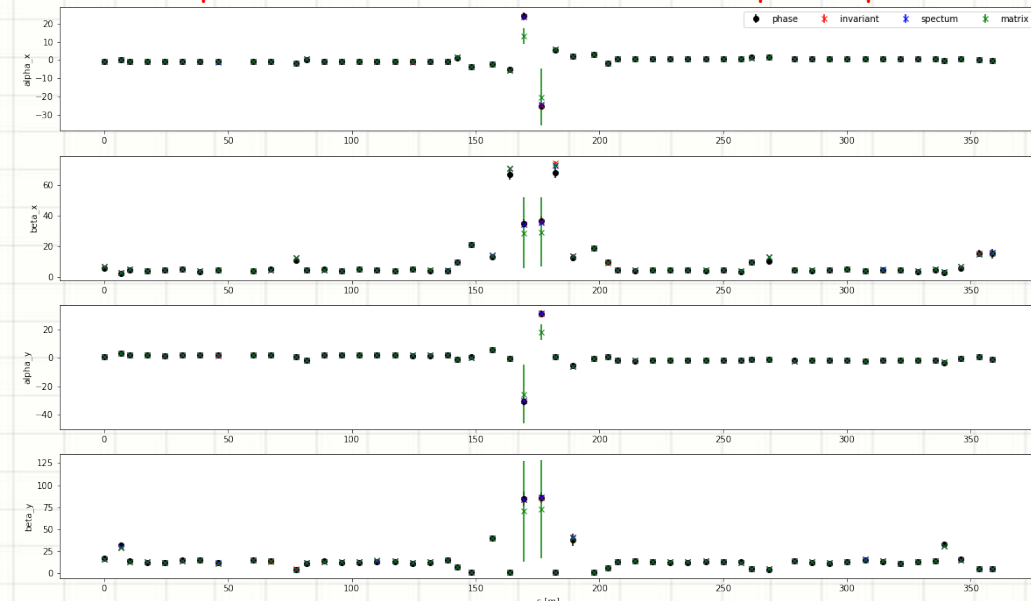
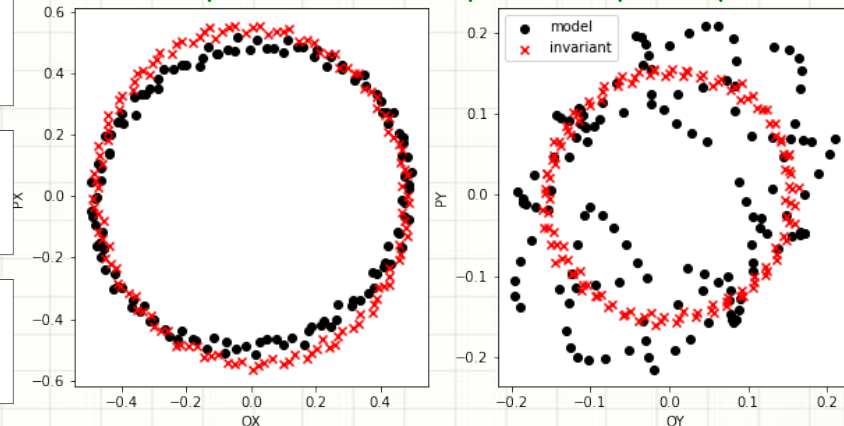
Все методы используют импульс, который вычисляется по нескольким парам в линейном приближении.

Сравнение с методом на основе измерения фаз

Восстановленные связанные амплитуды



Нормализованные фазовые траектории

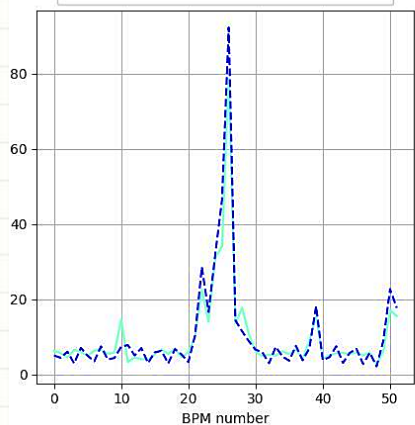


# МІА - Модельно (не)зависимый анализ

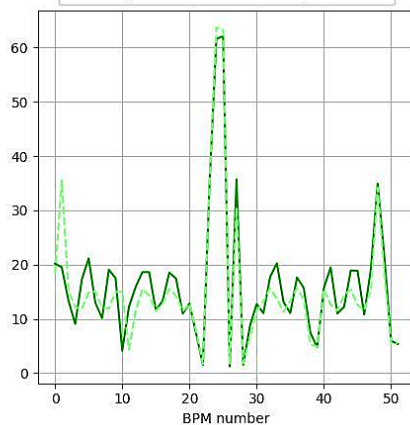
## Восстановление оптических функций из пооборотных когерентных колебаний пучка с помощью FFT & SVD

- Из записанных горизонтальных и вертикальных координат пучка в ускорителе за несколько тысяч оборотов, путем несложных математических операций (SVD), определяются пространственно-временные бетатронные моды колебаний.
- На  $a$ -ом пикапе можно записать матрицу  $Z^a$ , состоящую из 4-х бетатронных мод; элементы матрицы  $Q = Z^{aT} \cdot J \cdot Z^a$  будут являться инвариантами вдоль кольца. Выражая  $Z^b$  на  $b$ -ом пикапе через транспортную матрицу  $R^{ab}$ , находятся соотношения между  $Q$  и  $R^{ab}$ .
- Подставляя в выражения для  $Q$  рассчитанную из модели транспортную матрицу между соседними пикапами, определяются инварианты  $Q$ . Если в поведении найденных инвариантов присутствуют "выбросы", это свидетельствует о наличии возмущения магнитной структуры. Таким образом определяется местоположение ошибок структуры ускорителя относительно его идеальной модели.
- Через найденные пространственные бетатронные моды колебаний также рассчитываются бета-функции и бетатронная связь.
- Одним из главных преимуществ данного метода является скорость, т. к. снятие пооборотных измерений занимает всего лишь несколько секунд, как и отработка самого алгоритма расчетов.

— Betx from track    - - - Betx from MADX

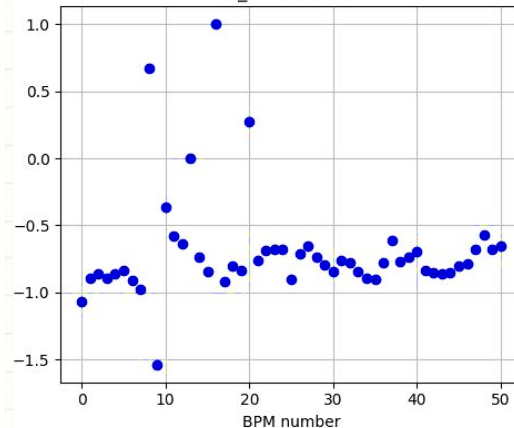


— Bety from track    - - - Bety from MADX

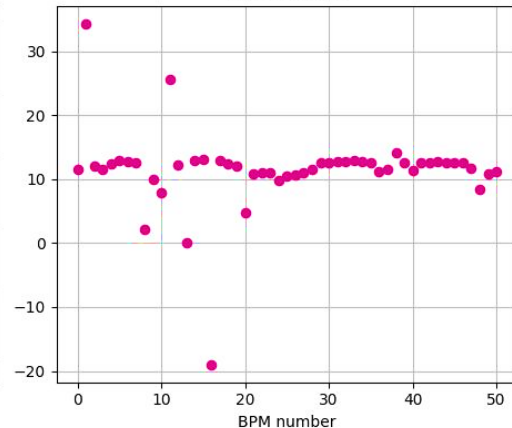


Сравнение горизонтальных (левый график) и вертикальных (правый график) бета-функций, полученных из эксперимента (зеленая и голубая линии) с расчетом MADX для структуры режима H190 (синий и светло-зеленый пунктир).

Q\_12 invariant



Q34 invariant

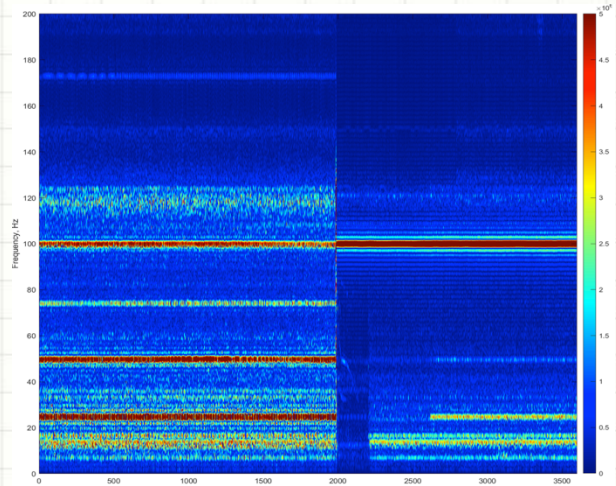
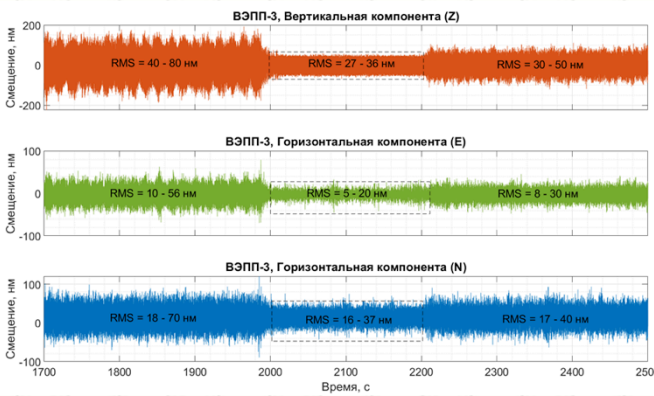
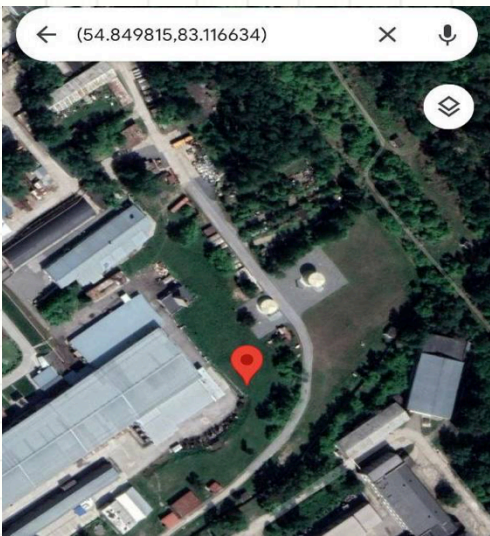


Поведение инвариантов вдоль кольца ВЭПП-4. Экспериментальные данные, режим H190. Выявлены возмущения в южной части кольца. В северном полукольце коллайдера также присутствуют искажения магнитной структуры, которые, однако, существенно меньше.

# Измерение вибраций

В течении недели были проведены микросейсмические измерения в поле, вблизи здания ускорительного комплекса, а также в здании ускорителя, который располагается на глубине несколько метров под землей.

Для записи использовались трехканальные сейсмические регистраторы «SCOUT», укомплектованных низкочастотными геофонами с повышенной чувствительностью «GS-ONE LF» (5 Гц, 100.4 В/м/с). Для корректного анализа низкочастотной составляющей сигналов (ниже 5 Гц), на этапе обработки производилась процедура частотной коррекции записей к значению 1 Гц.



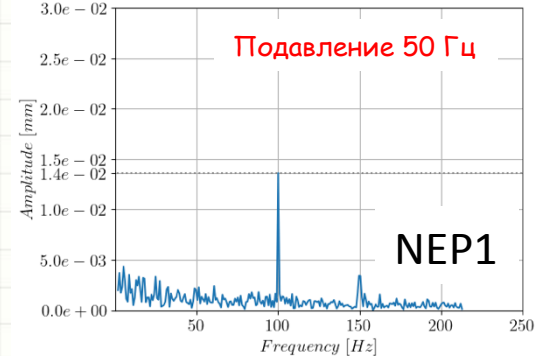
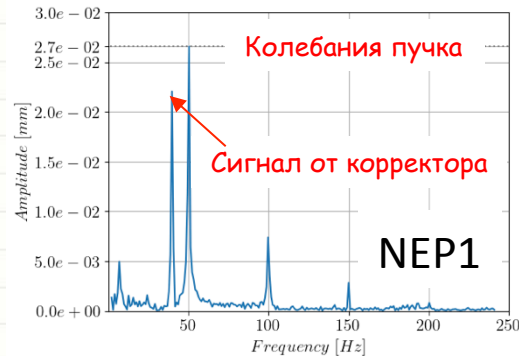
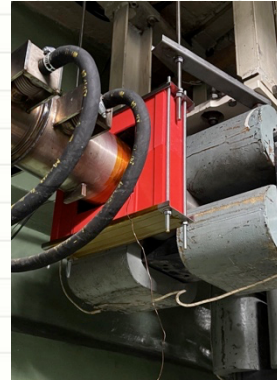
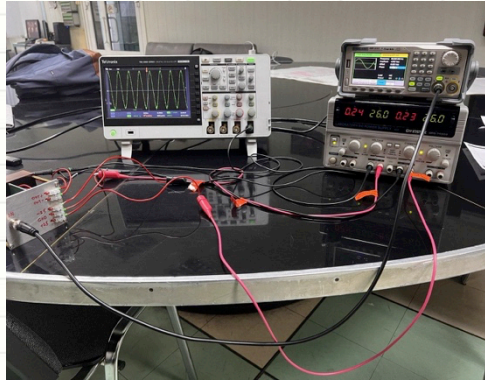
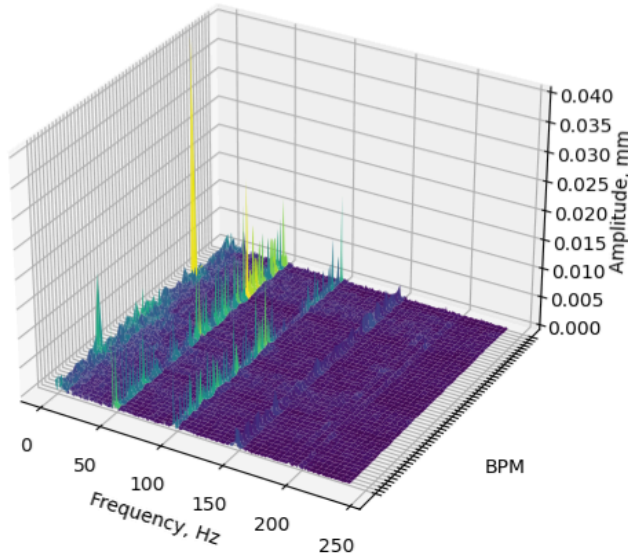
Спектрограмма показывает, что во время работы комплекса определяющую часть в вибрационный шум вкладывают трансформаторы источников питания. После выключения большей части оборудования спектр практически очищается от частот кратных сетевым.

В один из моментов записи произошла просадка напряжения сети и выключились некоторые источники питания магнитов (сигнал обведен черным прямоугольником).

# Быстрый корректор

Работа направлена на создание системы быстрой стабилизации орбиты для ВЭПП-4М, отработки методов коррекции и повышения качества экспериментов на комплексе, а также подготовки к работе на накопителе ЦКП СКИФ

Амплитуда тока	3 А
Амплитуда поля	24 Гс
Интервал поля	375 Гс·см
Магнитная длина	15.6 см
Кол-во витков	100
Материал сердечника	Ferrite
Апертура	100 мм
Полоса пропускания	0÷30 кГц

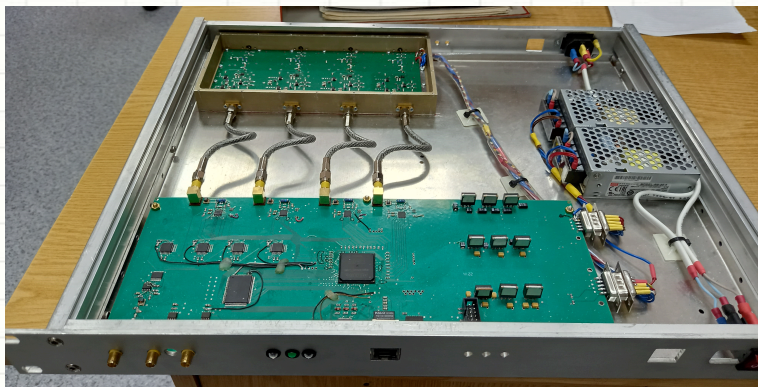


# Новая диагностика пучка

## Новая пикап-станция 180 МГц

Основные отличия нового блока от существующих блоков электроники.

- ✓ За каждый оборот регистрируются сигналы в каждой из 222 сепаратрис ВЭПП-4, что достигнуто за счет работы АЦП на частоте ВЧ 181.8 МГц.
- ✓ Возможность измерять положения пучка с приемлемой точностью при малых токах пучка ( $\sim 100$  мкА).



Разрешение для тока пучка ( $I > 1$  мА)

$2 \div 3$  мкм

Разрешение для тока пучка ( $I = 100$  мкА)

$\sim 10$  мкм

Разрешение пооборотных измерений для тока пучка ( $I > 1$  мА)

$10 \div 15$  мкм

Разрешение пооборотных измерений для тока пучка ( $I = 100$  мкА)

$< 50$  мкм

Аналоговая полоса частот

$\sim 210$  МГц

## Новый блок электроники для датчиков среднего тока пучка ВЭПП-3 и ВЭПП-4М

Основные особенности нового блока электроники датчиков среднего тока пучка.

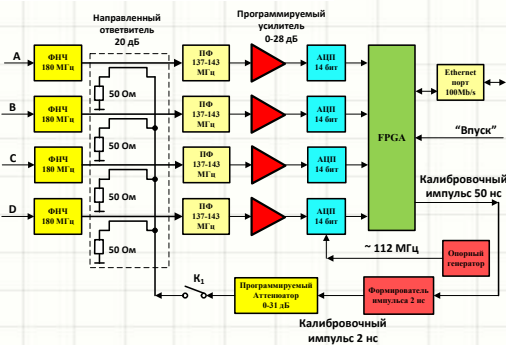
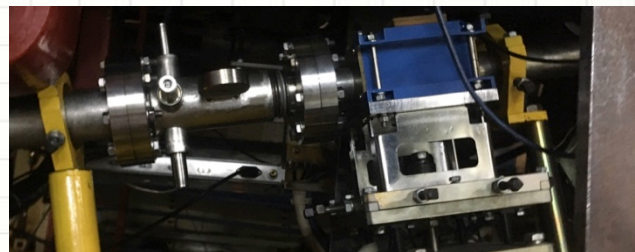
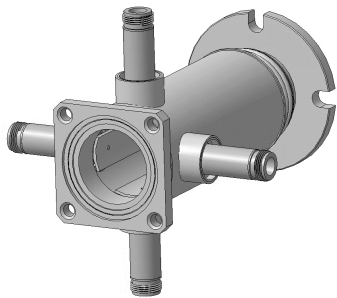
- ✓ Вся обработка сигналов от датчика тока пучка выполняется в цифровом виде в FPGA, в том числе синхронное детектирование сигнала второй гармоники частоты перемагничивания колец.
- ✓ «Сшивание» полос магнитного компаратора и трансформатора тока (пояса Роговского) также выполняется в цифровом виде в FPGA, что позволяет добиваться оптимальной формы импульсных сигналов тока пучка.
- ✓ Связь с блоком осуществляется через сеть Ethernet, через него можно управлять блоком и получать из блока результаты измерений.
- ✓ Наличие на передней панели разъема, через который можно посмотреть в аналоговом виде напряжение от датчика тока, пропорциональное току пучка, в полосе  $\sim 10$  кГц. Данный сигнал получается из цифрового сигнала путем преобразования его с помощью ЦАП.
- ✓ EPICS software

Из блока в цифровом виде можно получать различные типы данных:

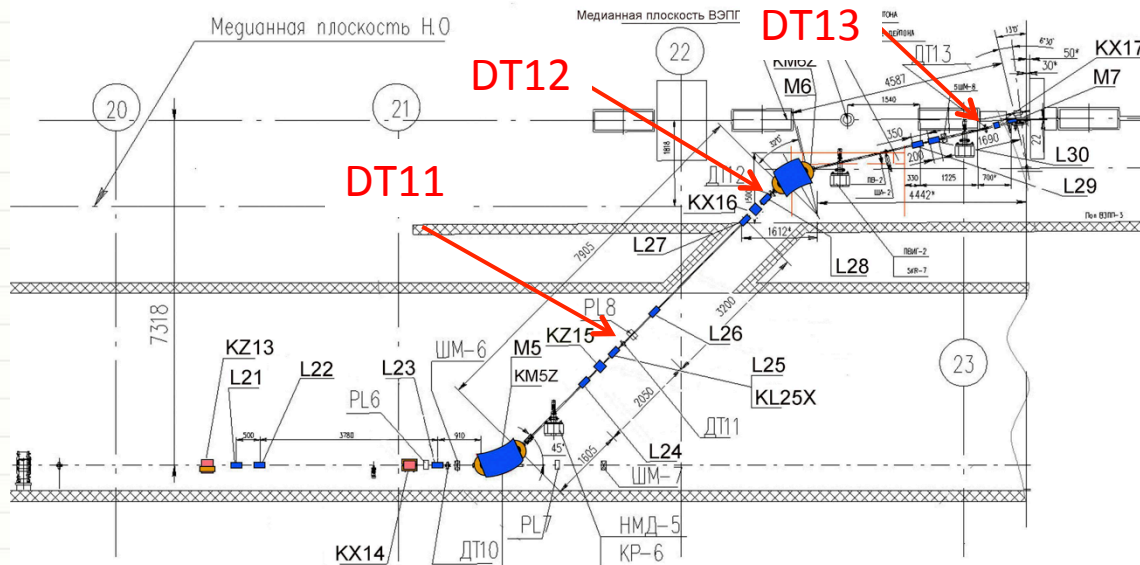
- ✧ медленные данные - результаты с частотой  $1 \div 10$  Гц (данная частота может регулироваться);
- ✧ быстрые данные - «осциллограммы» с полосой  $\sim 10$  кГц.



# Полосковые пикапы К-500

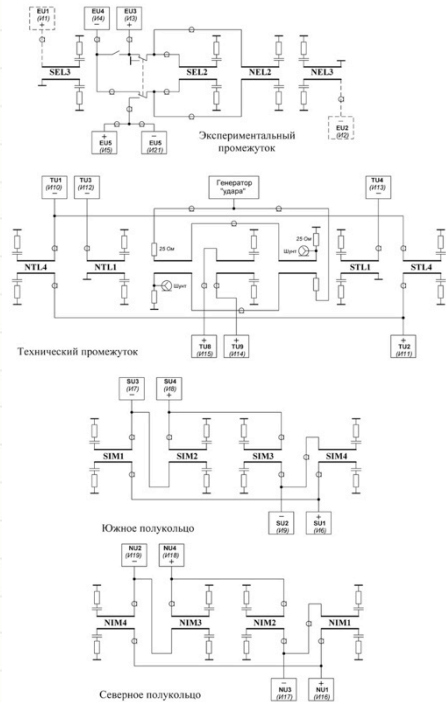


НО ИК

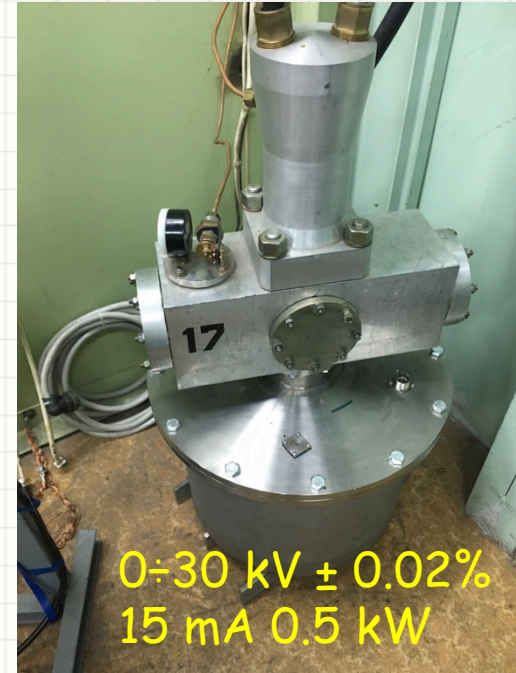


ВЭПП-3

# Модернизация электростатики



Запущено - 14 из 20

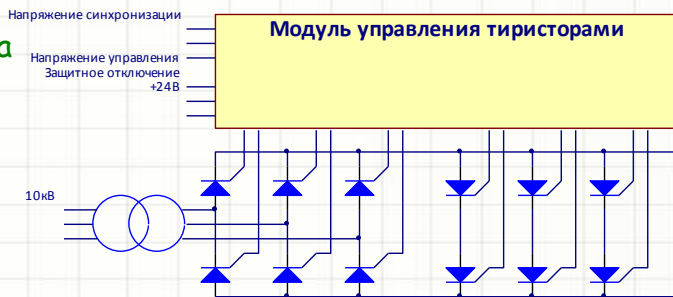
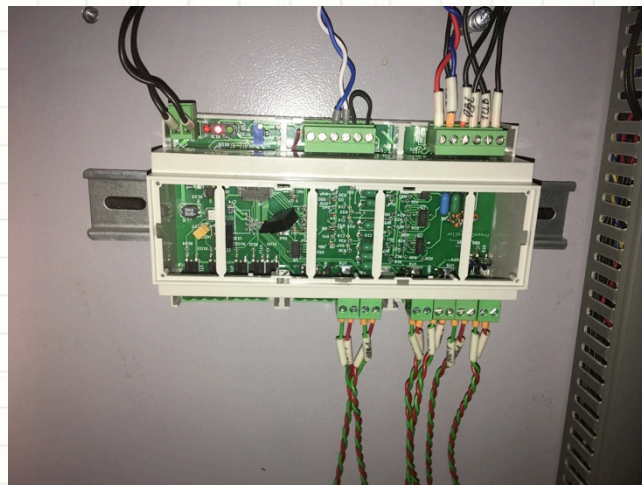


# Новая электроника ИТТ ВЭППП-3/4М

Новый модуль управления тиристорами встраивается в существующую схему электроники управления источником без глобальных изменений существующих цепей — используется существующая система синхронизации, выход согласован с существующей схемой поджига тиристоров и т.д. Модернизация электроники позволит улучшить характеристики по выходным пульсациям и повысить надежность работы.

Изготовлены две прототипные платы модуля фазового управления. Работа модулей проверена на источнике ИТТ ВЭППП-4М, с током нагрузки до 2 кА (на «тромбон»). Выявлена не достаточность параметров выходного фильтра. Расчетная частота среза фильтра  $\sim 62$  Гц, частота выходных пульсаций 300 Гц (сдвига на  $30^\circ$  между выпрямителями нет). Для обеспечения наилучших параметров источника требуется доработка фильтра — необходимо увеличить емкость конденсатора фильтра примерно в 4,5 раза (сейчас емкость фильтра каждой половины источника 0,066 Ф).

Ожидаемое окончание работ — лето 2023

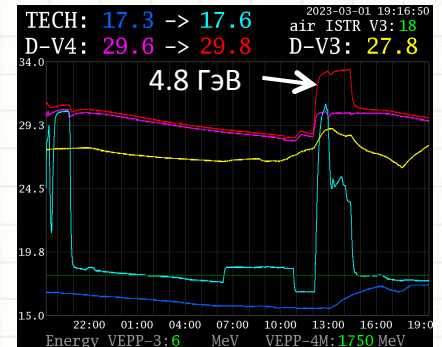
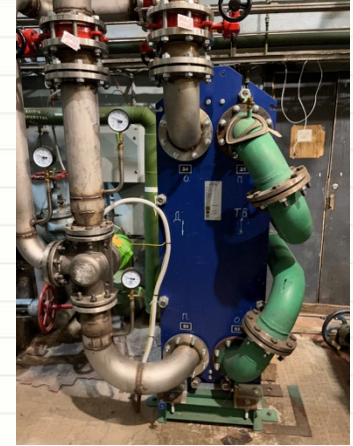


# Модернизация системы охлаждения

Кондиционер для воздушного охлаждения ВЧ ВЭТПП-4М



Новый пластинчатый теплообменник (1 МВт!?)  
дистиллята ВЭТПП-4М с автоматизированной системой  
термостабилизации



П.Пиминов, Статус ВЭТПП-4, Научная сессия ИЯФ, 2023

# Публикации

1. R.B. Appleby et al. **Focus point on high-energy accelerators: advances, challenges, and applications** // European Physical Journal Plus, 2023, 138(1), 12
2. A.V. Bukhtiyarov et al. I.N. **Synchrotron Radiation Facility Siberian Circular Photon Source (SRF SKIF)** // Crystallography Reports, 2022, 67(5), pp. 690-711
3. V.E. Blinov, et al. **Resonant depolarization technique at VEPP-4M in Novosibirsk** // European Physical Journal Plus, 2022, 137(6), 717
4. E.A. Kozryev et al. **Results from low energy e+e- facilities of Budker Institute of Nuclear Physics** // Revista Mexicana de Fisica. - 2022. - Vol. 3, Is. 3 : 19th International conference on hadron spectroscopy and structure in memoriam Simon Eidelman (HADRON 2021), Mexico City, 26-31 July 2021. Art.nr 0308007. - Bibliogr.: 25 ref. - DOI 10.31349/SuplRevMexFis.3.0308007
5. M. Xiaochao et al. **Beam diagnostics for linear accelerator of SKIF synchrotron light source** // Journal of Instrumentation. - 2022. - Vol. 17, Is. 4. - Art.nr T04001. - Bibliogr.: 17 ref. - DOI 10.1088/1748-0221/17/04/T04001.
6. O.V. Anchugov et al. **Magnet for Beam Extraction from the Booster into the Booster-Nuclotron Beamline of the NICA Complex** // Instruments and Experimental Techniques. - 2022. - Vol. 65, Is. 3. - P. 474-481. - Bibliogr.: 5 ref. - DOI 10.1134/S0020441222040029
7. A.V. Burdakov et al. **The thermal outgassing rate of materials used in high-vacuum systems** // Instruments and Experimental Techniques. - 2022. - Vol. 65, Is. 3. - P. 519-523. - Bibliogr.: 10 ref. - DOI 10.1134/S0020441222030137.
8. А. А. Еманов и др. **Изучение сейсмических воздействий на площадку строительства ЦКПт СКИФ** // Опубликовано в "ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ", ISSN: 0132-2826 eISSN:2311-9586. Т.49, №3, с. 5-38, 2022
9. Д. В. Дорохова и др. **Моделирование связи колебаний и ее коррекция в СКИФ** // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра», "Письма в ЭЧАЯ", в 2023 г., том 20, вып. 1
10. В. Анашин и др. **Вакуумная система источника синхротронного излучения ЦКПт СКИФ** // Материалы 29-й научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», Электровакуумные технологии, Москва, 2022. УДК: 621.52 ISBN: 978-5-6048852-1-5
11. Е.Б. Левичев и др. **Проект создания синхротронного источника поколения 4+ ЦКПт СКИФ в р.п. Кольцово Новосибирской области: общая информация и статус реализации** // В сборнике Технологическая СКИФ. Том 1. Экспериментальные станции первой очереди и Лабораторный комплекс. 2022. ISBN 9785906376411
12. А.В. Акимов и др. **Динамика пучка в накопителе** // В сборнике Технологическая инфраструктура СКИФ. Том 2. Ускорительный комплекс. 2022. ISBN 978-5-906376-42-8
13. А.В. Акимов и др. **Инжектор** // В сборнике Технологическая инфраструктура СКИФ. Том 2. Ускорительный комплекс. 2022. ISBN 978-5-906376-42-8
14. А.В. Акимов и др. **Основные системы накопителя** // В сборнике Технологическая инфраструктура СКИФ. Том 2. Ускорительный комплекс. 2022. ISBN 978-5-906376-42-8

+ публикации в коллаборации: КЕДР - 1, Дейтон - 1, СНД - 2, BES-III - 10, ...

а также дипломы студентов

1. И. Ульев **Расчет и моделирование постоянного септум-магнита для впуска в накопительное кольцо комплекса СКИФ** (рук. И. Окунев), НГТУ ФТФ 6 курс
2. А. Монастырный. **Измерение медленных колебаний замкнутой орбиты пучка на ВЭПП-4М** (рук. Г. Баранов), НГТУ ФТФ 4 курс
3. Н. Чепурной. **Определение параметров связи бетатронных колебаний электронного пучка в коллайдере ВЭПП-4М с помощью пооборотных измерений положений пучка** (рук. А. Богомяков), НГУ 4 ФФ курс
4. О. Белова О. **Исследование влияния широкополосного дипольного корректора на динамику пучка в ВЭПП-4М** (рук. К. Карюкина), НГУ 4 ФФ курс

и диссертации

1. Г. Баранов. **Многополюсный гибридный вигглер для генерации жёсткого интенсивного синхротронного излучения на накопителе ВЭПП-4М**. Диссертация кандидата физико-математических наук.

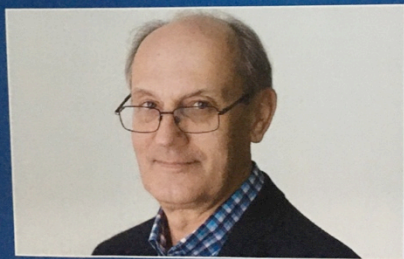
в Объединённой лаборатории 1-3 (сектора 1-31, 1-32, 1-33): 26 научных сотрудников, из них 4 доктора наук, 16 кандидатов, 17 инженеров, 21 лаборантов, из них 2 мобилизованных, 9 аспирантов, 10 студентов и 1 член-корреспондент РАН

**П.Пиминов, Статус ВЭПП-4, Научная сессия ИЯФ, 2023**

# Спасибо за внимание

## ПОЗДРАВЛЯЕМ!

На Общем собрании РАН  
заместитель директора по  
научной работе ИЯФ СО  
РАН д.ф.-м.н. Евгений  
Борисович ЛЕВИЧЕВ



избран  
членом-корреспондентом РАН!

Поздравляем

Дарью Вячеславовну  
Дорохову

(сектор 1-33) с присуждением  
премии Правительства РФ  
в 2022 году!

