

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ НАКОПИТЕЛЯ-ОХЛАДИТЕЛЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5 С НОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКОЙ ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

*В. Балакин^{а,1}, К. Астрелина^{б,2}, Д. Беркаев^б,
Ф. Еманов^в, Ю. Роговский^в*

^а Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

^б Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^в Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Внедрение новых станций датчиков положения пучка позволило на их основе начать создание программных инструментов управления и контроля накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5. Эти инструменты позволяют выполнять такие задачи, как калибровка модели накопителя-охладителя, управление его орбитой (в том числе создание локальных искажений), изучение процессов захвата пучка в кольцо после инжекции и многое другое. В данной статье представлены первичные результаты калибровки модели и измерения параметров кольца с помощью уже созданных инструментов.

New beam position monitor electronics deployment allows us to begin the creation of software instruments for monitoring and controlling Injection Complex Damping ring parameters. With these instruments we are able to calibrate ring model, control beam closed orbit (including local bumps creation), study the injected beam capture and much more. The first results of Damping ring model calibration and some parameters measurements based on existing software instruments are presented in this paper.

PACS: 29.20.Dh; 07.05.Hd; 07.05.Kf

ВВЕДЕНИЕ

Датчики положения пучка (ДПП) являются неотъемлемым инструментом контроля параметров любой ускорительной установки, позволяющим получить широкий спектр различных данных, характеризующих текущее состояние машины. Существует набор методик, позволяющих согласовать теоретическую модель ускорителя с текущей, что дает возможность контролируемо изменять параметры установки в нужном направлении.

¹E-mail: balakinvitaly@gmail.com

²E-mail: K.V.Astreлина@inp.nsk.su

Для решения такого класса задач командой инжекционного комплекса (ИК) [1] проводится разработка программных инструментов контроля и управления параметрами накопителя-охладителя (НО) ИК ВЭПП-5. Сейчас программное обеспечение находится в стадии активной разработки, но с его помощью уже стало возможным проводить ряд измерений для определения ключевых параметров ускорителя и калибровки его модели.

ПАРАМЕТРЫ НОВОГО БЛОКА ЭЛЕКТРОНИКИ ПИКАП-СТАНЦИЙ

Параметры точности пикап-станций были определены с помощью тестовых сигналов ~ 153 МГц (синусоидальный) и импульсного, длительностью 1,5 нс и частотой повторения 10,9374 МГц. Сигналы подавались одновременно на все 4 входа станции. С учетом параметров пикапов были оценены точности измерений станции непосредственно в микрометрах (таблица). Более подробное описание пикап-станций аналогичных характеристик приведено в [2].

Основные параметры пикап-станции

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых токов пучка, мА	0,5–200
Температурная зависимость измерений, мкм/°С	Менее 2
Разрешение пооборотных измерений, мкм: при токах пучка 20–100 мА при токе пучка 5 мА при токе пучка 1 мА	Лучше 4–5 ~ 20 ~ 100
Разрешение при времени измерения 100 мс, мкм: при токах пучка 20–200 мА при токах 1–200 мА	Менее 15 Менее 50
Емкость буфера для измерений, тысяч оборотов	128
Регулировка усиления каналов, дБ	28

СБОР И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Программы сбора и обработки данных с пикап-станций реализованы на языке программирования Python 3 с использованием библиотек numpy, scipy, rusx4. Организация программного обеспечения схематично представлена на рис. 1.

Алгоритм сбора данных включает в себя следующее:

- выбор необходимых для измерения текущей орбиты пикапов;
- замагничивание магнитных элементов накопителя-охладителя;
- выбор магнитных элементов, на изменение тока в которых будет сниматься отклик орбиты;
- снятие отклика орбиты на каждый магнитный элемент, компоновка итоговой матрицы отклика.

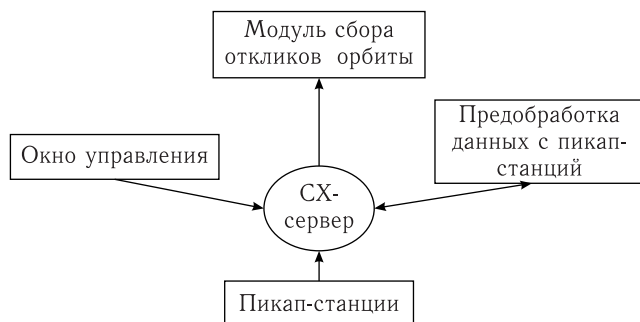


Рис. 1. Схема работы программного обеспечения

Помимо данного базового цикла возможно также отдельно снимать отклик орбиты на варьирование других параметров установки, например задающего генератора ВЧ-системы, что в итоге позволяет измерить дисперсионные функции накопителя в местах расположения ДПП.

Измеренные отклики орбиты и матрица откликов используются в дальнейшем для калибровки теоретической модели с помощью программы Elegant [3]. После калибровки модели на ее основе можно рассчитать, например, какое смещение орбиты необходимо выполнить, чтобы проводить пучок в кольце ближе к центрам квадруполей. После применения сингулярного разложения матрицы откликов (SVD) [4] и обращения полученных унитарных матриц можно рассчитать необходимое изменение токов корректоров для реализации рассчитанных смещений орбиты. Более подробно процесс калибровки модели ускорителя описан ниже.

ИЗМЕРЕНИЕ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ

Реализация сбора и обработки данных с новых пикап-станций позволила получать поворотные данные о положении пучка, что может быть использовано для измерения рабочей точки машины.

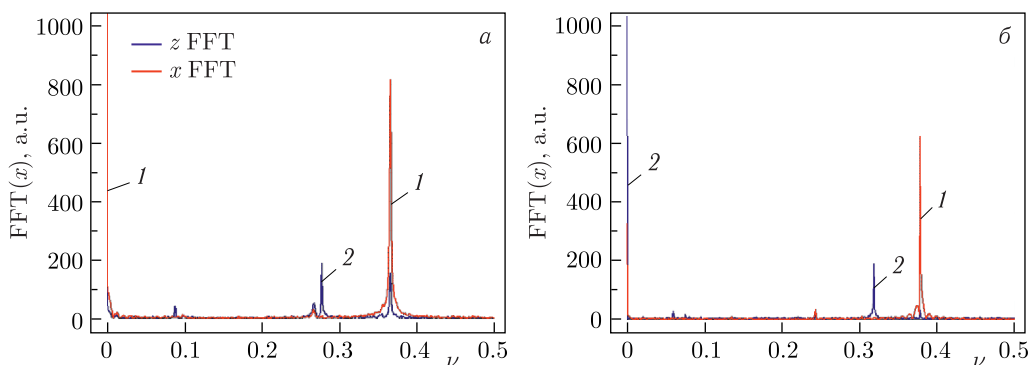


Рис. 2. Спектр бетатронных колебаний ν для электронов (а) и позитронов (б). Красным цветом (1) обозначен спектр горизонтальных колебаний, синим (2) — вертикальных

На рис. 2 показаны спектры бетатронных колебаний для двух режимов работы. Рабочие точки машины: $\nu_x = 4,367$ и $\nu_y = 2,72$ для электронов и $\nu_x = 4,38$, $\nu_y = 2,683$ для позитронов.

ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ПО ОТКЛИКАМ

1) Калибровка оптической модели. По измерению матрицы отклика смещения замкнутой орбиты можно найти поправки к оптической модели НО. Чаще всего искажения возникают из-за смещения магнитных элементов со своих проектных позиций. Сравнивая измеренные данные с модельной матрицей отклика на изменение токов в коррекционных обмотках, можно определить источники искажений орбиты.

Вектор смещений магнитных элементов находится из решения системы линейных уравнений [5]

$$V_k = -\frac{dV_k}{dS_n} \Delta S_n,$$

где $V_k = (RM_{\text{meas}} - RM_{\text{model}})_{ij}$ — все элементы матрицы разности между измеренной и моделированной матрицами отклика. Рассчитав матрицу производных V_k от смещений и наклонов магнитных элементов и вычислив псевдообратную, получаем вектор смещений

$$S_n = -\left(\frac{dV_k}{ds_n}\right)^{-1} (RM_{\text{meas}} - RM_{\text{model}}).$$

При измерении на НО использовались 15 пикапов и варьировались значения в 36 корректорах. Для каждого магнитного элемента производился поиск ошибок выставки по четырем параметрам (x, x', y, y') — смещения и углы наклона по каждой из координат.

На рис. 3 показаны оптические функции калиброванной модели накопителя для электронов и позитронов.

2) Дисперсия. Как было упомянуто выше, изменение ВЧ в резонаторе накопителя позволяет вычислить значение дисперсионной функции в местах расположения ДПП. Изменение частоты обращения на равновесной орбите смещает уже накопленный

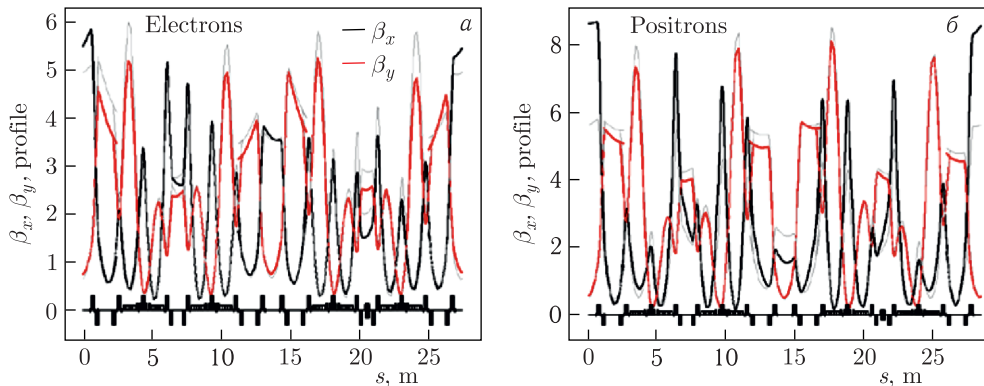


Рис. 3. Модельная оптика для электронов и позитронов в НО после первичной калибровки

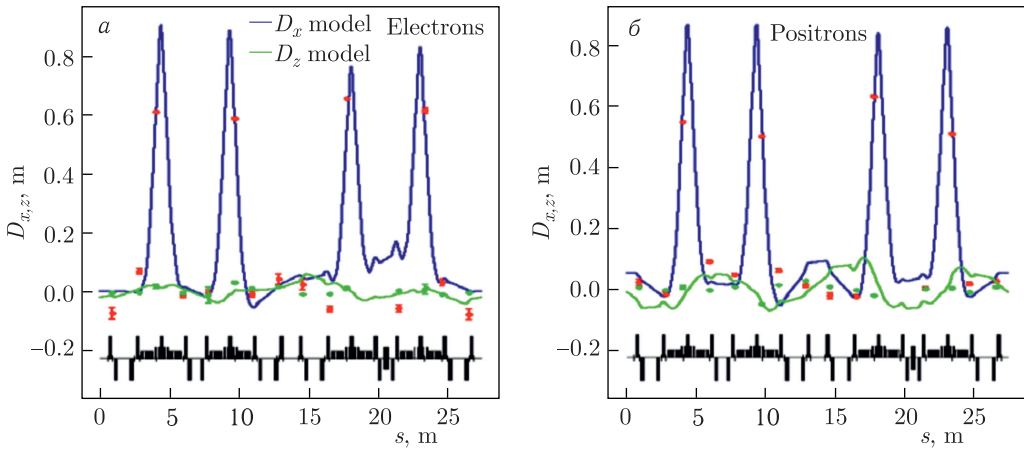


Рис. 4. Дисперсионные функции НО для электронов (а) и позитронов (б)

пучок пропорционально изменению равновесной энергии [6]:

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta T}{T} = -\frac{\Delta(\Pi/\beta c)}{\Pi/\beta c} = -\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi} - \frac{1}{\gamma^2} \frac{\Delta E}{E}\right) x_p = D_x \frac{\Delta E}{E}.$$

На рис. 4 представлены результаты измерений горизонтальной и вертикальной дисперсии для электронного и позитронного режимов работы накопителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества новой электроники пикап-станций — уменьшение шума, запись большого количества оборотов (128 тыс.), автоподстройка момента измерения при пролете пучка через ДПП, лучшее разрешение — позволили приступить к разработке программных инструментов, дающих больше возможностей для качественной настройки параметров кольца накопителя-охладителя инжекционного комплекса. На сегодня созданы программы, позволяющие проводить измерения основных электронно-оптических параметров НО, производить калибровку расчетной модели.

Сочетание возможностей системы управления и системы измерения положения пучка в НО с помощью датчиков положения позволяет создавать новые инструменты управления орбитой и оптикой в накопителе-охладителе и перепускных каналах. В настоящее время продолжается разработка инструмента корректировки орбиты по измеренной матрице откликов (описание методики можно найти в [7]), планируется использование разработок для формирования локальных искажений орбиты накопителя и перестройки энергии кольца с сохранением орбиты пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maltseva Yu. I., Andrianov A. V., Astrelina K. V., Balakin V. V., Batrakov A. M., Belikov O. V., Berkaev D. E., Blinov M. F., Bolkhovityanov D., Butakov A., Bykov E. V., Dikansky N. S., Emanov F. A., Frolov A. R., Gambaryan V. V., Gorchakov K., Gusev Ye. A., Karnaeov S. E., Karpov G. V., Kasaev A. S., Kenzhebulatov E., Kiselev V. A., Klushev S.,

- Kondakov A. A., Koop I., Korenev I. E., Kot N. Kh., Kozak V. R., Krasnov A. A., Krutikhin S. A., Kuptsov I. V., Kurkin G. Y., Lebedev N. N., Levichev A. E., Logatchov P. V., Murasev A. A., Muslivets V., Nikiforov D. A., Novikov An. A., Ottmar A. V., Pavlenko A. V., Pivovarov I. L., Rashchenko V. V., Rogovsky Yu. A., Samoylov S. L., Sazonov N., Shwartz D. B., Skrinsky A. N., Starostenko A. A., Starostenko D. A., Tribendis A. G., Tsyganov A. S., Vasichev S. S., Vasiliev S., Yudin V. D., Zemlyansky I. M., Zhuravlev A. N.* VEPP-5 Injection Complex Performance Improvement for Two Collider Operation // Proc. of RuPAC-2018, Protvino, Russia, Oct. 1–5; <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUZMH02>.
2. *Bekhtenev E. A., Karpov G. V., Piminov P. A.* A Beam-Position Monitor System at the VEPP 4M Electron–Positron Collider // Instr. Exp. Techn. 2017. V. 60, No. 5. P. 679–685.
 3. *Borland M.* Elegant: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation. Advanced Photon Source LS-287. 2000.
 4. *Голуб Дж., Ван Лоун Ч.* Матричные вычисления. М.: Мир, 1999.
 5. *Safranek J.* Experimental Determination of Storage Ring Optics Using Orbit Response Measurements // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 388. P. 27.
 6. *Perevedentsev E. A.* Linear Beam Dynamics and Beyond. BINP Preprint. 2001. 2 p.
 7. *Романов А. Л.* Настройка орбиты и электронно-оптической структуры накопителя ВЭПП-2000 методом матриц откликов. Дисс. . . канд. физ.-мат. наук. 2011.