

Научная статья

УДК 621.3.038.616

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-62-70

Неразрушающий однопролетный профилометр пучка электронов на основе ПЗС-камеры*

Максим Вадимович Тимошенко¹, Евгений Алексеевич Переведенцев²
Сергей Павлович Шерстюк³

¹⁻³Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹M.V.Timoshenko@inp.nsk.su

²E.A.Perevedent@inp.nsk.su

³S.P.Sherstyuk@inp.nsk.su

Аннотация

ПЗС-камеры просты в использовании и довольно широко распространены в оптической диагностике пучков в ускорителях элементарных частиц. Время экспозиции этих камер составляет миллисекунды, поэтому они обычно используются в накопительном режиме для наблюдения за циркулирующими пучками. Изображение с камер содержит информацию о поперечном распределении частиц в пучке и положении центра масс пучка. В данной работе на примере ПЗС-камер, установленных на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000, исследована возможность их использования в режиме однократного пролета пучка через место наблюдения. Проведена оценка интенсивности светового потока оптической части спектра синхротронного излучения пучка, экспериментально получено изображение и измерены поперечные размеры пучка в однопролетном режиме.

Ключевые слова

диагностика пучков заряженных частиц, синхротронное излучение, ПЗС-камера, ВЭПП-2000

Для цитирования

Тимошенко М. В., Переведенцев Е. А., Шерстюк С. П. Неразрушающий однопролетный профилометр пучка электронов на основе ПЗС-камеры // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 4. С. 62–70. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-62-70

* Статья написана по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Non-Destructive Single-Revolution Electron Beam Profilometer based on a CCD Camera

Maksim V. Timoshenko¹, Evgeny A. Perevedentsev²
Sergey P. Sherstyuk³

^{1,3}Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹M.V.Timoshenko@inp.nsk.su

²E.A.Perevedent@inp.nsk.su

³S.P.Sherstyuk@inp.nsk.su

Abstract

CCD cameras are easy to use and are quite widespread in the optical diagnostics of beams in particle accelerators. The exposure time of these cameras is milliseconds, so they are usually used in a cumulative mode to monitor the circulating beams. The images from the cameras contain information about the transverse distribution of particles in the beam and the position of the center of mass of the beam. In this paper, using the example of CCD cameras installed on the electron-positron collider VEPP-2000, the possibility of their use in the mode of a single beam flight through the observation site is investigated. The intensity of the luminous flux of the optical part of the synchrotron radiation spectrum of the beam was estimated and an image of the transverse distribution of particles in the beam in a single-span mode was experimentally obtained, which confirms the potential for expanding the scope of this diagnostic system. A trial signal processing was done as a demonstration of the determination of the beam parameters by the method under study.

Keywords

diagnostics of charged particle beams, synchrotron radiation, CCD camera, VEPP-2000

For citation

Timoshenko M. V., Perevedentsev E. A., Sherstyuk S. P. Non-destructive single-revolution electron beam profilometer based on a CCD camera. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 4, pp. 62–70 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-4-62-70

Введение

В Институте ядерной физики СО РАН с 2010 г. успешно функционирует электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000, набирая данные на двух детекторах КМД-3 и СНД. Особенностью и уникальностью коллайдера являются его компактность (периметр 24 м), широкий диапазон энергии 160–1000 МэВ и реализация концепции круглых пучков [1]. Ускорительный комплекс состоит из бустера БЭП, коллайдера ВЭПП-2000 и каналов перепуска между ними (рис. 1). Коллайдер работает в режиме 1×1 сгусток с поперечными размерами сгустка в местах наблюдения ~ 1 мм и длиной ~ 50 мм.

В настоящее время в канале перепуска электронов и позитронов из бустера БЭП в коллайдер ВЭПП-2000 для измерения положения пучка и поперечного распределения частиц в пучке используются сеточные вторично-эмиссионные датчики, а также датчики тока изображения для измерения интенсивности и положения пучка [2]. Первые не абсолютно прозрачны, не обладают достаточным для прецизионных измерений пространственным разрешением, а также содержат неопределенность в разделении вертикального и горизонтального размеров пучка. Вторые дают информацию только о положении центра масс пучка. Эти факторы служат причиной поиска альтернативных инструментов для однопролетной диагностики пучка с целью повышения эффективности инжекции из бустера в коллайдер.

На выводах синхротронного излучения (СИ) коллайдера ВЭПП-2000 имеется 16 ПЗС-камер от компании PointGrey модели CMLN-13S2M-CS¹ с диагональю 6 мм и максимальным разрешением 1,3 мегапикселя ($4,8 \times 3,6$) мм; 1280×960 пикселей), которые используются для ре-

¹ <https://www.avsupply.com/ITM/29787/CMLN-13S2M-CS.html> (дата обращения: 17.03.2023).

гистрации оптической части спектра СИ и дают информацию о поперечном распределении частиц в циркулирующих пучках (по 8 шт. на электроны и позитроны). Учитывая, что период обращения пучка в ВЭПП-2000 равен 82 нс, что на несколько порядков меньше минимально возможного времени экспозиции камеры (0,01 мс), в таком режиме работы ПЗС-камеры дают картину, интегрированную за, как минимум, сотни оборотов.

Таблица 1

Параметры ВЭПП-2000

Table 1

Parameters of VEPP-2000

Параметр	Значение
Периметр, P	24,39 м
Энергетический диапазон, E	150–1000 МэВ
Число сгустков	1×1
Число частиц в сгустке, N	1×10^{11}
Бета-функции в месте встречи, $\beta_x = \beta_y$	8,5 см
Эмиттанс, $\epsilon_x \epsilon_y$	$1,4 \times 10^{-7}$ м·радиан
Бетатронные частоты, $\nu_x; \nu_y$	4,1; 2,1
Параметр встречи, ξ	0,1
Светимость, L	1×10^{32} см ² с ⁻¹

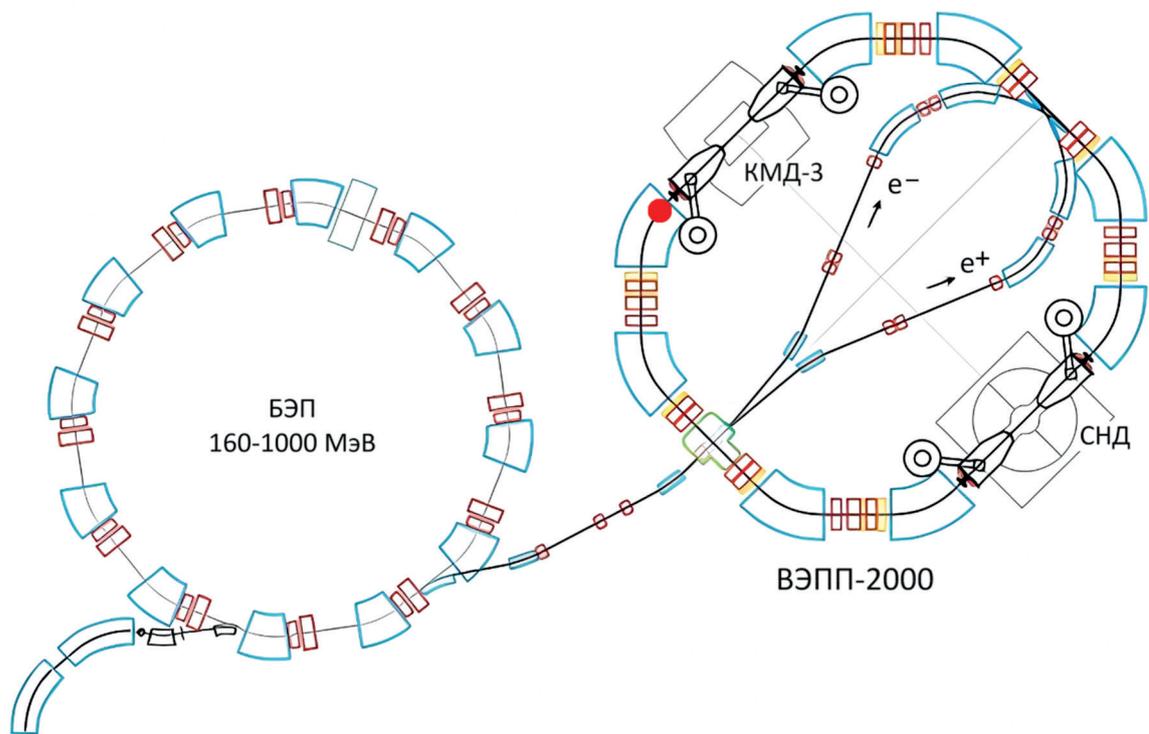


Рис. 1. Схема комплекса ВЭПП-2000. Красным кружком показана ПЗС-камера, использованная в экспериментах
 Fig. 1. VEPP-2000 complex layout. The red circle shows the CCD camera used in the experiments

В данной работе рассмотрен новый способ использования ПЗС-камеры – регистрация положения центра масс и поперечного распределения частиц внутри пучка при строго однократном пролете пучка через точку наблюдения в поворотном магните. Описаны оценка мощности СИ и экспериментальное измерение.

1. Оценка уровня сигнала

Расчет количества фотонов

Теория синхротронного излучения (свойства, спектральное и пространственное распределение, диаграмма направленности и поляризация) описаны подробно в [3]. В работе используются результаты, необходимые для оценки потока фотонов от пучка, которые детально рассмотрены в [4].

Учитывая энергетический диапазон ВЭПП-2000, рассматривается ультрарелятивистский электронный или позитронный пучок: $\gamma \gg 1$, $\beta = v/c \approx 1$, v – скорость частицы; E и m_e – энергия частицы и масса покоя электрона. Мгновенная мощность СИ, изучаемого одной частицей, определяется выражением:

$$P_\gamma = \frac{c C_\gamma E^4}{2\pi \rho^2},$$

где c – скорость света, ρ – локальный радиус кривизны орбиты равновесного движения частицы, E – энергия пучка, $C_\gamma = \frac{4\pi}{3} \frac{r_e}{(m_e c^2)^3} = 8,8460 \times 10^{-5} \frac{\text{м}}{\text{ГэВ}^3}$ [3].

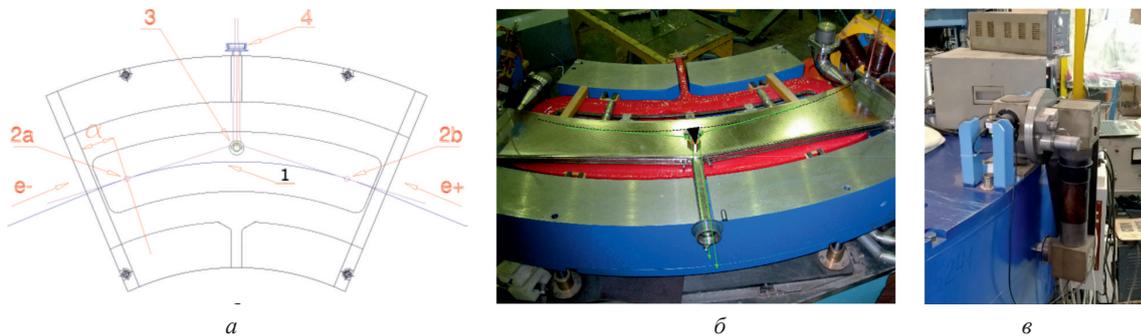


Рис. 2. Поворотный магнит ВЭПП-2000: *a* – схема вывода СИ (1 – проектная орбита; 2а, 2б – точки излучения e^+ и e^- ; 3 – медное зеркало; 4 – иллюминатор вывода СИ); *б* – магнит со снятой верхней половиной магнитопровода и его вакуумная камера; *в* – оптический тракт вне вакуумного объема

Fig. 2. VEPP-2000 bending magnet: *a* – SI output scheme (1 – design orbit; 2а, 2б – radiation points of e^+ and e^- ; 3 – copper mirror; 4 – SI output porthole); *б* – magnet with the upper half of the magnetic circuit removed, and its vacuum chamber; *в* – optical path outside the vacuum volume

Вывод СИ из вакуумного объема ВЭПП-2000 (рис. 2) организован во всех восьми поворотных магнитах с использованием водоохлаждаемых медных зеркал с нанесенным на них отражающим алюминиевым и защитным кремниевым покрытиями. Далее, сквозь иллюминатор вакуумного объема и оптический тракт, свет фокусируется на матрице ПЗС-камеры.

Поскольку ПЗС-камера регистрирует оптическую часть спектра СИ, рабочий диапазон длин волн λ составляет от 380 до 760 нм, что соответствует энергетическому диапазону 1,6 – 3,3 эВ.

Спектральное распределение числа фотонов, излучаемых на выделенной частоте в единицу времени:

$$\frac{d\dot{N}}{d\omega} = \frac{1}{\hbar\omega} \frac{dP(\omega)}{d\omega} = \frac{1}{\hbar\omega} \frac{P_Y}{\omega_c} S\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \approx \frac{4}{3} \frac{P_Y}{\hbar\omega\omega_c} \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{\frac{1}{3}}.$$

где ω – угловая частота излучаемого СИ, $\omega_c = \frac{3}{2}\omega_0\gamma^3$ – критическая частота ($\omega_0 = c/\rho$ – лармовская частота), ρ – радиус кривизны траектории.

Эксперимент проводился на энергии $E = 948,75$ БэВ, при этом ω_c соответствует энергии $\sim 1,4 \cdot 10^9$ эВ, тогда отношение $\frac{\omega}{\omega_c}$ составляет $\sim 10^{-3}$, что позволяет воспользоваться асимптотикой $\omega/\omega_c \ll 1$, описанной в [5].

Проинтегрировав выражение (1) по диапазону частот от ω_1 до ω_2 , получаем число фотонов, излучаемых электроном с энергией E при прохождении поворотного магнита с радиусом кривизны орбиты, равным ρ в единицу времени в указанном диапазоне частот:

$$\dot{N} = 4 \frac{P_Y}{\hbar\omega_c} \left(\left(\frac{\omega_2}{\omega_c}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{\omega_1}{\omega_c}\right)^{\frac{1}{3}} \right) \approx 1,4 \cdot 10^8.$$

Для того чтобы найти число фотонов, излученных с элемента дуги траектории, необходимо учесть соответствующий угловой размер оптической апертуры принимающего излучение детектора. Считаем, что угловая апертура равна угловому размеру медного зеркала, а остальной оптический тракт ее не ограничивает, и весь свет попадает на матрицу камеры, так как угол раствора конуса излучения $\psi_c \approx 0,828 \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^{\frac{1}{3}} \sim 3$ мрад [5] много меньше апертуры зеркала. Горизонтальная угловая апертура медного зеркала равна $\phi_a = 30,9$ мрад. При этом время излучения, попадающего в оптическую апертуру с дуги траектории, равно

$$\Delta t = \frac{L}{\beta c} = \frac{2\psi_c\rho + \phi_a\rho}{\beta c} \approx \frac{2\rho}{c} \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^{\frac{1}{3}} + \frac{\phi_a\rho}{c} = 175 \text{ нс},$$

а число фотонов, излученное одной частицей в апертуру детектора:

$$\Delta N = \Delta t \cdot \dot{N} \approx 2,49 \cdot 10^{-2}.$$

Тогда среднее число фотонов, излучаемых в оптическом диапазоне пучком интенсивностью 10 мА ($N_{part} = 5 \cdot 10^9$) на энергии эксперимента и попадающих на матрицу ПЗС-камеры за один пролет через место наблюдения камерой, равно

$$\Delta N_{\text{за 1 пролет}} = \Delta N \cdot N_{part} = 1,27 \cdot 10^8.$$

Оценка уровня сигнала ПЗС-камеры

Для грубой оценки уровня сигнала воспользуемся Стандартом определения и измерения параметров ПЗС-камер², а также частью информации из спецификации³ и паспорта⁴ используемой камеры (табл. 2).

² EMVA Standard 1288, Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras, Release 3.1 December 30, 2016, Issued by European Machine Vision Association. URL: <https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-3.1a.pdf> (дата обращения: 17.03.2023).

³ Imaging Performance Specification, Version 1.1, Revised 9/19/2013, Point Grey Research® Inc. URL: <https://flir.app.boxcn.net/s/s4w7vdeq12i4yqwzqsfbfbifu41jlmecq/file/416895685957> (дата обращения: 17.03.2023).

⁴ Specifications, FLIR Integrated Imaging Solutions. URL: <https://flir.app.boxcn.net/s/s4w7vdeq12i4yqwzqsfbfbifu41jlmecq/file/416927555480> (дата обращения: 17.03.2023).

Таблица 2

Параметры камеры

Table 2

Parameters of camera

Параметр	Обозначение	Величина	Ед. измерения
Квантовая эффективность	η	~50	%
Темновой ток	σ_d	8,82	e^-
Емкость насыщения пикселя	$\mu_{e,sat}$	6421	e^-
Абс. порог чувствительности	$\mu_{p,min}$	14,85	фотоны
Размер пикселя ПЗС-матрицы	s_{px}	3,75	мкм
Мин. коэффициент усиления, К	1/К	0,1	e^-/ADU^5

Согласно Стандарту, число электронов, накопленных отдельным пикселем, равно $\eta\mu_p$, после чего внутренний АЦП камеры производит усиление и оцифровку сигнала пикселя и дает значение в единицах цифрового кода интенсивности пикселя изображения, равное $K\eta\mu_p$, где μ_p – число фотонов, попадающее на пиксель.

Пусть матрица однократно засвечивается потоком фотонов в количестве $N_{за\ 1\ пролет}$ с характерными параметрами $\sigma_{beam_{x,z}} \sim 0,5$ мм – для упрощения оценки будем считать пучок круглым (вертикальный и горизонтальный размеры равны).

При этом если учесть коэффициент масштабирования изображения пучка оптическим трактом и размер пикселя матрицы ПЗС-камеры, то максимум распределения числа фотонов, попадающих на один пиксель: $A \approx 10^4$ фотонов. Тогда уровень заполнения потенциальной ямы пикселя, соответствующего центру поперечного распределения частиц пучка, равен $A \cdot \eta \approx 5 \cdot 10^3$ электронов, что составляет примерно 80 % от величины уровня насыщения пикселей матрицы фотоэлектронами $\mu_{e,sat}$. Ожидаемый код интенсивности пикселя можно получить умножением этого числа на К, который для камеры является программно варьируемым (его можно увеличить).

Таким образом, приведенные оценки показывают, что профилометр на основе регистрации ПЗС-камерой СИ является перспективным неразрушающим средством однопролетной диагностики пучка с приемлемой чувствительностью. Данное утверждение проверено на практике.

2. Схема эксперимента

Для управления камерой при работе в однопролетном режиме было разработано собственное программное обеспечение на языке C++ с использованием библиотеки FlyCapture2, предоставляемой производителем. Синхронизация открытия затвора камеры с пролетом пучка осуществлялась программным способом. Время экспозиции было выбрано равным одной секунде, чтобы ее длительность заведомо охватывала момент инжекции пучка в ВЭПП-2000.

Измерения проводились с позитронным пучком при энергии пучка 948,75 МэВ, перепуски осуществлялись в пустой коллайдер, величина тока пучка составляла $I = 40$ мА. Была использована камера, отмеченная на рис. 1.

Однократный пролет был организован следующим образом: перепускаемый пучок инжектировался на равновесную орбиту ВЭПП-2000 электромагнитным кикером, затем, после прохождения части кольца, пучок выбивался ударом второго кикера. Чтобы надежно добиться

⁵ADU (analog to digital units) – единицы цифрового кода интенсивности пикселя в пространстве 16-битного изображения.

не более одного пролета пучка через точку наблюдения камерой, были дополнительно включены квадрупольные линзы, расположенные после использованной камеры по ходу пучка. Однократность пролета контролировалась электростатическими пикапами.

Таким образом, часть кольца коллайдера ВЭПП-2000 становится продолжением канала перепуска из бустера БЭП.

3. Обработка экспериментально полученного изображения

Тепловой шум отдельных пикселей матрицы является случайным, также имеется большое число «горячих» пикселей. Оба фактора можно нивелировать, применив медианный фильтр (в данной работе применялся фильтр с окном 5). В отфильтрованном снимке рассмотрен фрагмент кадра вблизи изображения пучка (рис. 3), сделаны преобразование осей в масштаб системы координат пучка и аппроксимация двумерной функцией Гаусса в системе отсчета пучка – выражение (2).

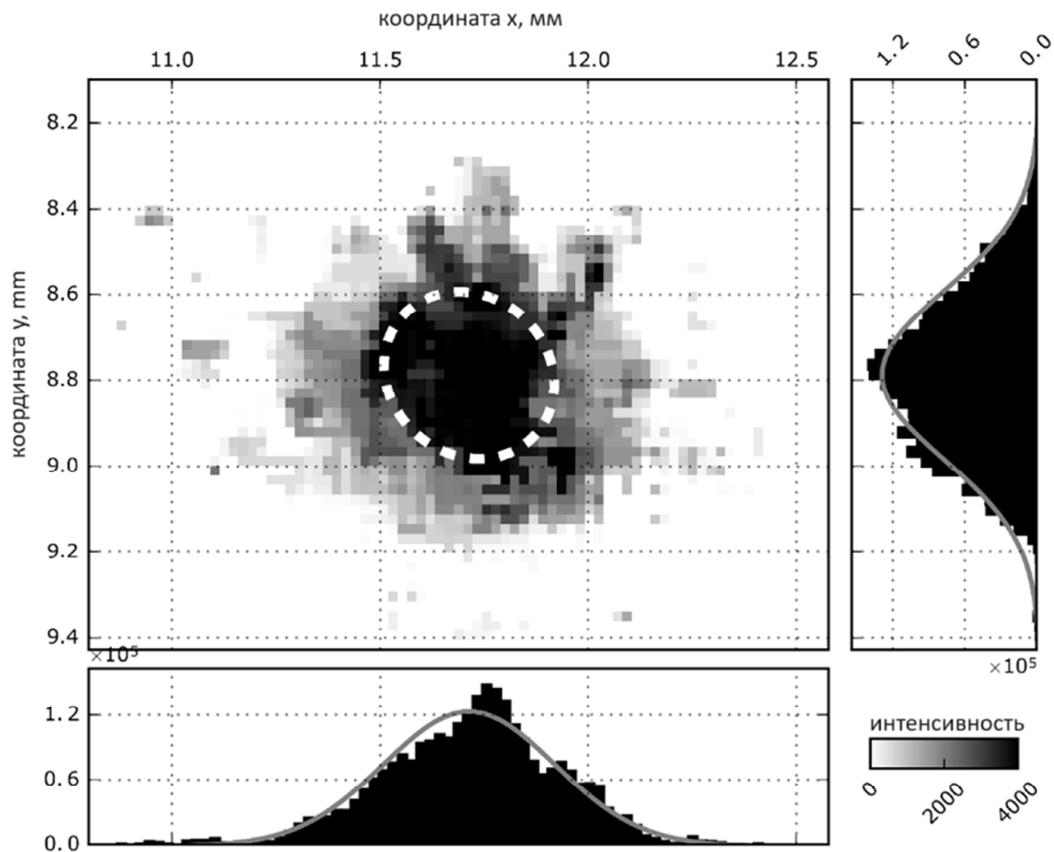


Рис. 3. Сегмент кадра вблизи изображения пучка
Fig. 3. A segment of the frame near the beam image

$$f(u, v) = A \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{(u-u_0)^2}{\sigma_u^2} + \frac{(v-v_0)^2}{\sigma_v^2} \right)}, \quad (2)$$

где u и v – система координат, ориентированная по полуосям эллипса $\frac{(u-u_0)^2}{\sigma_u^2} + \frac{(v-v_0)^2}{\sigma_v^2} = 1$ (штрихованная линия уровня на рис. 3). θ является углом между полуосями эллипса и осями натуральной системы координат (для данного случая он равен 57°):

$$u = x \cos(\theta) + y \sin(\theta),$$

$$v = -x \sin(\theta) + y \cos(\theta).$$

Параметрами подгонки являются σ_u и σ_v – поперечные размеры пучка. Для данного эксперимента они оказались равны 210 ± 20 и 190 ± 20 мкм соответственно. Это несколько меньше расчетных значений, если принимать для оценки размеров пучка его эмиттанс в бустере и структурные функции точки наблюдения в коллайдере.

Амплитуда $A = 5750$ единиц кода интенсивности пикселя из 65535.

Заключение

Результатом данной работы стало подтверждение на примере коллайдера ВЭПП-2000 возможности использования ПЗС-камеры для регистрации СИ электронного или позитронного пучка высокой энергии при однократном пролете через место наблюдения.

Экспериментально продемонстрировано, что ПЗС-камера пригодна в качестве системы однопролетной диагностики поперечного распределения частиц и положения пучка в электрон-позитронных циклических машинах, а также, потенциально, в транспортных каналах при условии организации в них выводов СИ и достаточной мощности излучения. При этом ПЗС-камера является недорогим и компактным прибором относительно специализированных для подобных задач стролируемых электронно-оптических преобразователей.

Список литературы

1. **Shwartz D. et al.** Round Colliding Beams at VEPP-2000 with Extreme Tuneshift // *Proc. eeFACT2018*, Hong Kong, China. P. 34–40.
2. **Berkaev D. et al.** Beam Measurement System of VEPP-2000 Injection Channels // *Proc. of the ICALEPCS2009*, Kobe, Japan, paper TUP032. P. 155–157.
3. **Wiedemann H.** Particle Accelerator Physics. Springer Cham, 2015.
4. **Шерстюк С. П.** Исследование размеров пучка при инжекции в накопитель: Выпускная квалификационная работа на соискание степени бакалавра / НГУ, науч. рук. Е. А. Переведенцев. Новосибирск, 2022.
5. **Hofmann A.** The Physics of Synchrotron Radiation. N. Y.: Cambridge University Press, 2004.

References

1. **Shwartz D. et al.** Round Colliding Beams at VEPP-2000 with Extreme Tuneshift, in *Proc. eeFACT2018*, Hong Kong, China, pp. 34–40.
2. **Berkaev D. et al.** Beam Measurement System of VEPP-2000 Injection Channels, in *Proc. ICALEPCS2009*, Kobe, Japan, paper TUP032, pp. 155–157.
3. **Wiedemann H.** Particle Accelerator Physics. Springer Cham, 2015.
4. **Sherstyuk S. P.** Study of beam sizes during injection into a storage ring: Final qualifying work for a bachelor's degree, NSU, supervisor E. A. Perevedentsev. Novosibirsk, 2022. (in Russ.)
5. **Hofmann A.** The Physics of Synchrotron Radiation. N. Y., Cambridge University Press, 2004.

Информация об авторах

Максим Вадимович Тимошенко, младший научный сотрудник

Евгений Алексеевич Переведенцев, ведущий научный сотрудник

Сергей Павлович Шерстюк, старший лаборант

Information about the Authors**Maksim V. Timoshenko**, Junior Researcher**Evgeny A. Perevedentsev**, Leading Researcher**Sergey P. Sherstyuk**, Senior Laboratory Assistant

*Статья поступила в редакцию 15.09.2023; одобрена после рецензирования 08.11.2023;
принята к публикации 11.12.2023*

*The article was submitted 15.09.2023; approved after reviewing 08.11..2023;
accepted for publication 11.12.2023*