

УДК 621.384.665

А.С. МАЗМАНИШВИЛІ, Н.В. МОСКАЛЕЦ, А.А. ЩЕРБАКОВ
 Национальный Научный Центр «Харьковский Физико-Технический Институт»

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭМИССИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА ФОТОНОВ В КАНАЛЕ ВЫВОДА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАКОПИТЕЛЯ "НЕСТОР" ННЦ ХФТИ

При постановке экспериментов, связанных с использованием поляризационных свойств синхротронного излучения (СИ), представляет интерес детальный расчет спектрального углового распределения СИ и его поляризационных компонент. Учет размеров пучка показывают, что в реальных условиях излучение не будет полностью поляризованным, а форма и размеры углового распределения излучения будут искажены. Рассмотрено движение электронов в однородном магнитном поле и СИ пучка релятивистских частиц в накопителе "НЕСТОР" Национального Научного Центра «Харьковский Физико-Технический Институт» (ННЦ ХФТИ). Проанализировано влияние на формирование изображений потока квантов СИ размеров пучка электронов с энергией $E=225$ МэВ. Показано, что в формирование изображений основной вклад вносит двумерное распределение частиц по вертикали и по вертикальным колебаниям. Разработано программное обеспечение, использование которого дало возможность промоделировать процесс формирования оптических изображений потоком квантов СИ. Рассмотрено формирование изображений излучения электронов с энергией $E=225$ МэВ при изменении продольного расстояния L до плоскости регистрации. Определено, что на малых продольных расстояниях основной вклад в изображении вносит вертикальное распределение частиц. С увеличением расстояния возрастает вклад распределения частиц по вертикальным колебаниям, который для больших L становится определяющим. Проведено численное моделирование формирования изображений. Приведено семейство угловых распределений плотности потоков σ - и π -компонент поляризации, рассчитанных для одного из каналов вывода СИ накопителя "НЕСТОР". Зависимости оформлены в виде двумерных гистограмм для длины $L_{max}=300$ см, вертикальных среднеквадратичных параметров пучка и разных длин волн излучения, а также для разных дисперсий σ_L электронного сгустка. Получены размеры оптического люка, величина которых позволяет гарантированно регистрировать весь поток квантов СИ для указанных характеристик регистрации.

Ключевые слова: накопитель электронов, электронный пучок, синхротронное излучение, угловое распределение, поляризация, σ -компонента, π -компонента, формирование оптического изображения.

О.С. МАЗМАНИШВИЛІ, Н.В. МОСКАЛЕЦЬ, О.О. ЩЕРБАКОВ
 Національний Науковий Центр «Харківський Фізико-Технічний Інститут»

ПЕРЕТВОРЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЕМІСІЇ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОНІВ І МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКУ ФОТОНІВ В КАНАЛІ ВИВОДУ СИНХРОТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НАКОПИЧУВАЧА "НЕСТОР" ННЦ ХФТИ

При постановці експериментів, пов'язаних з використанням поляризаційних властивостей синхротронного випромінювання (СВ), представляє інтерес детальний розрахунок спектрального кутового розподілу СВ і його поляризаційних компонент. Урахування розмірів пучка показує, що в реальних умовах випромінювання, що поширюється в площині рівноважної орбіти, не буде повністю поляризованим, а форма і розміри кутового розподілу випромінювання будуть спотворені. Розглянуто рух електронів в однорідному магнітному полі і СВ пучка релятивістських часток в накопичувачі "НЕСТОР" Національного Наукового Центру «Харківський Фізико-Технічний Інститут» (ННЦ ХФТИ). Проаналізовано вплив на формування зображень потоку квантів СВ розмірів пучка електронів з енергією $E=225$ МеВ. Показано, що в формування зображень основний внесок вносить двовимірний розподіл часток по вертикалі і по вертикальним коливанням. Розроблено програмне забезпечення, використання якого дало можливість промоделивати процес формування оптичних зображень потоком квантів СВ. Розглянуто формування зображень

випромінювання електронів з енергією $E=225$ MeV при зміні поздовжньої відстані L до площини реєстрації. Визначено, що на малих поздовжніх відстанях основний внесок в зображенні вносить вертикальний розподіл часток в пучку. Зі збільшенням відстані зростає внесок розподілу часток по вертикальним коливанням, який для великих L стає визначальним. Проведено чисельне моделювання формування зображень. Наведено сімейство кутових розподілів щільності потоків σ - та π -компонент поляризації, розрахованих для одного з каналів виведення СВ накопичувача "NESTOR". Залежності оформлені у вигляді двовимірних гістограм для довжини $L_{max}=300$ см, вертикальних середньоквадратичних параметрів пучка та різних довжин хвиль випромінювання, а також для різних дисперсій σ_L електронного згустку. Отримано розміри оптичного люка, величина яких дозволяє гарантовано реєструвати весь потік квантів СВ для зазначених характеристик реєстрації.

Ключові слова: накопичувач електронів, електронний пучок, синхротронне випромінювання, кутовий розподіл, поляризація, σ -компонента, π -компонента, формування оптичного зображення.

A.S. MAZMANISHVILI, N.V. MOSKALETS, A.A. SHCHERBAKOV
National Scientific Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"

TRANSFORMATION OF THE EMISSION OF RELATIVISTIC ELECTRONS AND METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE PHOTON FLUX IN THE SYNCHROTRON RADIATION OUTLET OF "NESTOR" STORAGE RING NSC KIPT

When setting up experiments involving the use of the polarization properties of synchrotron radiation (SR), a detailed calculation of the spectral angular distribution of SR and its polarization components is of interest. Taking into account the size of the beam shows that in real conditions the radiation propagating in the plane of the equilibrium orbit will not be completely polarized, and the shape and dimensions of the angular distribution of radiation will be distorted. The motion of electrons in the uniform magnetic field and SR of the beam of relativistic particles in the storage ring of the "NESTOR" NSC KIPT are considered. The influence of the size of the electron beam with the energy $E=225$ MeV on the formation of images of the flux of quanta of SR is analyzed. It is shown that the main contribution to the formation of images is made by the two-dimensional distribution of particles along the vertical and vertical oscillations. A software tool has been developed, the use of which made it possible to simulate the process of forming optical images by the flux of quanta of SR. The formation of images of the radiation of electrons with an energy of $E=225$ MeV with a change in the longitudinal distance L to the registration plane is considered. It is determined that at small longitudinal distances the main contribution to the image is made by the vertical distribution of particles in the beam. With an increase in the distance, the contribution of the distribution of particles over vertical oscillations increases, which becomes decisive for large L . Numerical simulation of image formation has been carried out. The family of angular distributions of flux density for the σ - and π -components of polarization calculated for one of the SR output channels of the storage ring "NESTOR" is shown. The dependences are presented in the form of two-dimensional histograms for the length $L_{max} = 300$ cm, vertical root mean square size of the beam and different radiation wavelengths, as well as for different dispersions of the electron bunch. The dimensions of the optical window are obtained, the size of which makes it possible to reliably register the entire flux of quanta of SR for the indicated registration characteristics.

Keywords: electron storage ring, electron beam, synchrotron radiation, angular distribution, polarization, σ -component, π -component, formation optical imaging.

Постановка проблеми

Движение релятивистских электронов в магнитном поле сопровождается эмиссией квантов СИ. Это излучение обладает многими замечательными свойствами. К ним, прежде всего, относятся его воспроизводимость и метрологическая рассчитываемость [1, 2]. Задача аналитического описания свойств СИ в идеальном случае получила полное решение [3, 4]. Практическое применение СИ предполагает возможность расчета параметров потока квантов в реальных условиях.

Анализ последних исследований и публикаций

Свойства СИ изложены в значительном числе работ [1, 2]. Примеры применения потока фотонов СИ описаны в [3, 4]. В этих же работах описано исследование поляризационных свойств СИ. Конструкция и основные параметры накопителя "НЕСТОР" изложены в [5].

Цель исследования

Целью работы являлось построение математической модели распространения потока квантов СИ, испущенных электронным сгустком, получение на её основе аналитических выражений для интенсивностей потока квантов СИ заданной длины волны при выбранной геометрии регистрации, синтез алгоритмов расчета потоков и проведение моделирования продольной динамики оптических изображений в накопителе "НЕСТОР" ННЦ ХФТИ [5].

Основной материал исследования

В идеальном случае излучающая частица движется в магнитном поле по круговой равновесной орбите. На практике интенсивный поток квантов СИ эмитируется распределенным пучком электронов, проводится в канале вывода и регистрируется на выбранном базовом расстоянии в плоскости изображения (рис. 1)..

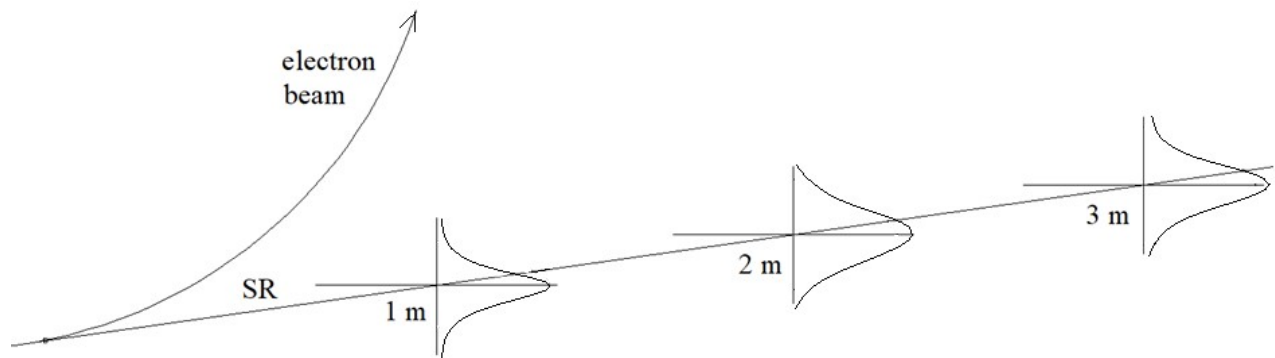


Рис. 1. Схема регистрации потока квантов СИ

Математическая модель

СИ релятивистского электрона характеризуется высокой степенью поляризации [1]. В частности, в идеальном случае под нулевым углом ($\psi=0$) к плоскости орбиты оно линейно поляризовано. Спектрально-угловые зависимости потока квантов СИ одного электрона рассчитываются в соответствии с выражениями, которые описывают плотность потока $w_\sigma(\psi)$ для σ -компоненты поляризации (в плоскости орбиты) и π -компоненты $w_\pi(\psi)$ (перпендикулярно плоскости орбиты) [1, 2].

$$\begin{aligned}
 w_\sigma(\psi) &= \frac{8\pi e_0^2 R^2 f}{3ch\lambda^3 \gamma^4} (1 + \gamma^2 \psi^2)^2 K_{2/3}^2 \left(\frac{\lambda_c}{2\lambda} (1 + \gamma^2 \psi^2)^{3/2} \right), \\
 w_\pi(\psi) &= \frac{8\pi e_0^2 R^2 f}{3ch\lambda^3 \gamma^4} \gamma^2 \psi^2 (1 + \gamma^2 \psi^2) K_{1/3}^2 \left(\frac{\lambda_c}{2\lambda} (1 + \gamma^2 \psi^2)^{3/2} \right).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь $K_{2/3}(\cdot)$ и $K_{1/3}(\cdot)$ – функции Макдональда, λ – длина волны, E – энергия электрона, e_0 – заряд электрона, R – радиус поворота магнитов, c – скорость света, h – постоянная Планка, f – частота обращения, $\gamma = E/E_0$ – релятивистский фактор, E_0 – энергия покоя электрона, $\lambda_c = 4\pi e_0^2 R f / \sqrt{3} c \hbar \gamma^3$ – критическая длина волны излучения. Полная угловая плотность составляет: $w(\psi) = w_\sigma(\psi) + w_\pi(\psi)$.

Поток фотонов каждого из электронов характеризуется угловым распределением, ось которого совпадает с направлением движения частицы, а вершина распределения – с местом излучения. Электроны в накопителе испытывают колебания около равновесной орбиты. Эти колебания обусловлены отдачей при эмиссии квантов СИ, а также внутривидовым рассеянием и рассеянием на частицах остаточного газа. В результате частицы пучка распределены вокруг равновесной орбиты с нормальным законом в 6-мерном конфигурационном пространстве.

Рассмотрим влияние распределения частиц на свойства потока квантов СИ. На спектрально-угловые характеристики потока квантов СИ распределение в продольном направлении не оказывает влияния в силу азимутальной симметрии. По той же причине радиальное распределение частиц также не влияет на характеристики потока СИ. Для вертикального распределения частиц используем формулу:

$$\rho(y, y') = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_{y'}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{y'^2}{2\sigma_{y'}^2}\right), \quad (2)$$

где σ_y и $\sigma_{y'}$ – среднеквадратичные размеры пучка по y и y' . Имея в виду (2), рассмотрим на расстоянии L плоскость приема, перпендикулярную касательной к месту излучения на круговой орбите. Угол испускания кванта ψ , а также координаты эмиссии (y, y') и приема h в вертикальном направлении, связаны соотношением $h - \psi L = y + y'L$. Поэтому для средних угловых распределений получим:

$$\begin{aligned} W_\sigma(\beta) &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\psi \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} dy' \rho(y, y') \delta(h - y - y'L - \psi L) w_\sigma(\psi), \\ W_\pi(\beta) &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\psi \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} dy' \rho(y, y') \delta(h - y - y'L - \psi L) w_\pi(\psi), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\beta = h/L$ и $\delta(\cdot)$ – дельта-функция. В силу (2) случайные величины y и y' нормальны, случайная величина $h - \psi L$ также нормальна с математическим ожиданием ψL и дисперсией

$$\sigma_L^2 = \sigma_{y'}^2 + \sigma_y^2 / L^2. \quad (4)$$

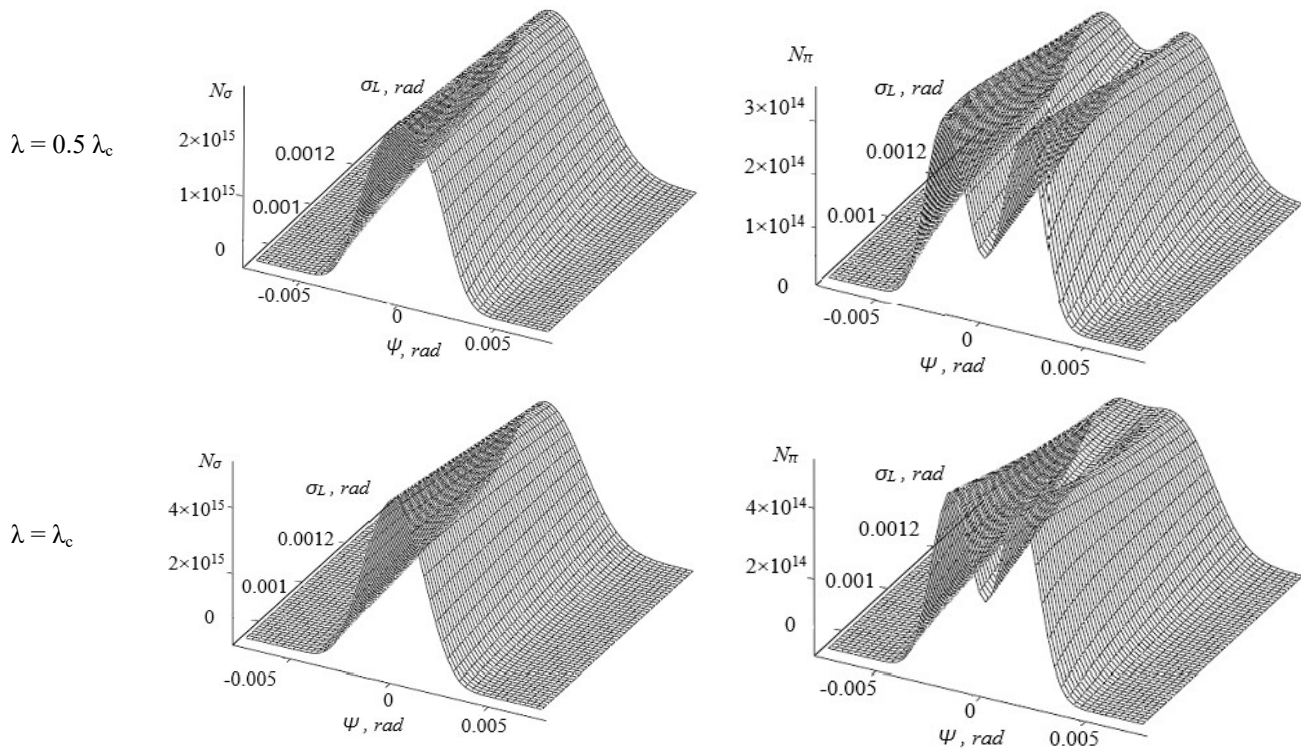
Выражения (3) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned}
 W_{\sigma}(\beta) &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{d\psi}{\sqrt{2\pi\sigma_L}} \exp\left[-\frac{(\beta-\psi)^2 L^2}{2\sigma_L^2}\right] w_{\sigma}(\psi), \\
 W_{\pi}(\beta) &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{d\psi}{\sqrt{2\pi\sigma_L}} \exp\left[-\frac{(\beta-\psi)^2 L^2}{2\sigma_L^2}\right] w_{\pi}(\psi).
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Из (5) следует, что формирующаяся оптическая картина является сверткой нормальной плотности частиц в пучке с угловым распределением, описывающим эмиссию квантов СИ. Дисперсия результирующего углового распределения $\langle \beta^2 \rangle$ растет с увеличением L на $\sigma_L^2 = \sigma_y^2 + \sigma_y^2 / L^2$. Для достаточно больших L она будет определяться лишь распределением частиц по направлениям вертикальных колебаний. Распределение для σ -компоненты поляризации, в силу своей унимодальности, более устойчиво к такому влиянию. Угловой спектр π -компоненты поляризации имеет два симметричных максимума, поэтому его деформация и уширение в силу (5) оказываются более заметными.

Численные результаты

На основе выражений (5) разработано программное обеспечение, которое дает возможность рассчитать все необходимые характеристики потоков квантов СИ обеих поляризаций, прошедших выбранное расстояние.



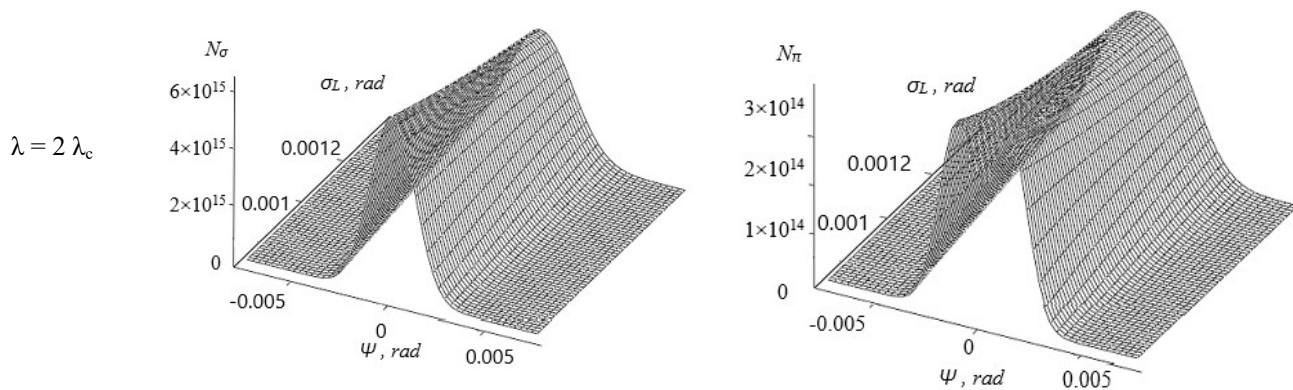


Рис. 2. Семейство угловых распределений плотности потоков σ -компоненты (слева) и π -компоненты (справа) поляризации синхротронного излучения при энергии электронов $E=225$ МэВ и длин волн $\lambda = 0.5 \lambda_c$, $\lambda = \lambda_c$, $\lambda = 2 \lambda_c$, соответственно

Приведем некоторые результаты расчета распределений оптического изображения компонент СИ в генераторе "НЕСТОР" электронов с энергией $E=225$ МэВ [5].

На рис. 2 приведено семейство угловых распределений плотности потоков σ - и π -компонент поляризации, рассчитанных для одного из каналов вывода СИ. Зависимости оформлены в виде двумерных гистограмм для длины $L_{\max}=300$ см и разных длин волн излучения, а также для разных дисперсий σ_L электронного сгустка. Для выбранной длины L при $\lambda_c = 2.45 \times 10^{-6}$ см диапазон значений полярного угла β составил $|\beta| \leq 10$ мрад. Видно, что при $L_{\max}=300$ см и вертикальном размере приемного окна $H = 6$ см осуществляется практически полная регистрация квантов σ - и π -компонент на выбранных длинах волн СИ. Для больших длин волн квантов СИ захват при неизменном размере приемного окна H будет менее эффективен в связи с соответствующим увеличением среднеквадратического угла распределений $w_\sigma(\psi)$ и $w_\pi(\psi)$, при этом наличие двух максимумов в распределении π -компоненты становится выраженным.

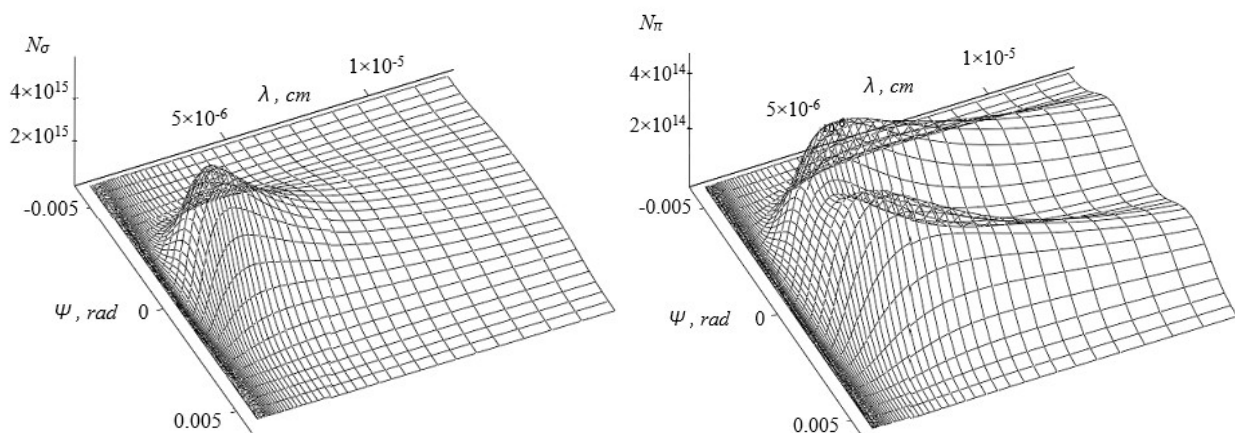


Рис. 3. Семейство зависимостей угловых распределений плотности потоков σ -компоненты (слева) и π -компоненты (справа) для разных длин волн СИ при энергии электронов $E=225$ МэВ

Перестройку оптических изображений можно видеть на рис. 3. На нем показана зависимость угловых распределений потока квантов СИ от длины волны λ излучения на длине $L_{\max}=300$ см. Параметры электронного пучка выбраны для одного из каналов вывода. Можно видеть, что с увеличением длины волны λ угловые распределения потока квантов принимают устойчивую форму, вид которой, в основном, определяется распределением вертикальных колебаний частиц в пучке.

Выводы

В работе получены аналитические выражения для интенсивности потока квантов СИ заданной длины волны при выбранной геометрии регистрации. Изучено влияние двумерного распределения частиц по вертикали и по вертикальным колебаниям на формирование изображений потока квантов СИ. Показано, что формирующаяся оптическая картина является сверткой нормальной плотности частиц в пучке с угловым распределением, описывающим эмиссию квантов. С помощью разработанного программного обеспечения промоделирован процесс формирования оптических изображений потоком квантов СИ. Для выбранного расстояния L , а также параметров пучка с вертикальным среднеквадратичным размером σ_y и среднеквадратичным размером $\sigma_{y'}$ вертикальных колебаний, приведено семейство угловых распределений, представленных в виде двумерных гистограмм.

Список использованной литературы

1. Тернов И.М., Михайлин В.В. Синхротронное излучение. Теория и эксперимент. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 219–250 с.
2. Брук Г. Циклические ускорители заряженных частиц. Москва: Атомиздат, 1970. 311 с.
3. Кулипанов Н.А., Скринский А.Н. Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы. *Успехи Физических Наук*. 1977. том 20 с. 559. URL: <https://dx.doi.org/10.1070/PU1977v020n07ABEH005444>
4. Королев Ф.М., Куликов О.А., Яворов А.М. Исследование поляризационных свойств синхротронного излучения электронов высоких энергий. *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. 1962. Том 43. с.1652–1656.
5. Bulyak E., Gladkikh P., Karnaukhov I., et al. Compact X-ray source based on Compton backscattering. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2002. Vol. 487. Issue 3. P. 241–248. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016890020200904X?via%3Dihub>

References

1. Ternov, I.M. & Mihaylin, V.V. (1986). *Sinhrotronnoe izluchenie. Teoriya i eksperiment*. Moskva: Energoatomizdat.
2. Bruk, G. (1970). *Tsiklicheskie ukoriteli zaryazhennyih chastits*. Moskva: Atomizdat.
3. Kulipanov, N.A., & Skrinский, A.N. (1977). *Ispolzovanie sinhrotronного izlucheniya: sostoyanie i perspektivy*. *Uspehi Fizicheskikh Nauk*. **20**, 559. URL: <https://dx.doi.org/10.1070/PU1977v020n07ABEH005444>
4. Korolev, F.M., Kulikov, O.A., & Yavorov, A.M. (1962). *Issledovanie polyarizatsionnyih svoystv sinhrotronного izlucheniya elektronov vyisokih energiy*. *Zhurnal Eksperimentalnoy i Teoreticheskoy Fiziki*. **43**, 1652–1656.

5. Bulyak, E., Gladkikh, P., Karnaukhov, I. et al. (2002). Compact X-ray source based on Compton backscattering. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. **487**, 3, 241–248. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016890020200904X?via%3Dihub>

Мазманишвили Александр Сергеевич – д.ф-м.н., профессор, старший научный сотрудник НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. E-mail: mazmanishvili@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0373-0626

Москалец Наталия Витальевна – инженер-исследователь 1 кат. ННЦ ХФТИ, E-mail: kovalyova@kipt.kharkov.ua, ORCID: 0000-0002-2163-9116

Щербаков Александр Александрович – к.ф-м.н., старший научный сотрудник, начальник лаборатории ННЦ ХФТИ. E-mail: shcherbakov@kipt.kharkov.ua, ORCID: 0000-0001-6504-2090.