

Precise Measurements of Magnetic Field Parameters of the Multipoles for the SLS Storage Ring

L. Rivkin^{a)}, Ch. Vollenweider^{a)}, J.A. Zichy^{a)}, V.N. Korchuganov^{b)}, S.F. Mikhailov^{b)},
I.N. Churkin^{* b)}, A.G. Steshov^{b)}, E.P. Semenov^{b)}, A.B. Ogurtsov^{b)}, O.B. Golubenko^{b)},
E.I. Antohin^{b)}, V.V. Demenev^{b)}

a) Paul Scherrer Institute, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland

b) Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

The multipoles for SLS Storage Ring having very hard requirements to the manufacture and the alignment of the multipoles relative to the ideal axes were manufactured and magnetic measured by BINP. The Rotating Coil Systems (at BINP and PSI) for the precise magnetic measurements are described in the paper. The main RCS parameters and main statistic results of the magnetic measurements are discussed.

1. Introduction

The specialized synchrotron radiation source SLS (Swiss Light Source) is built at PSI (Paul Scherrer Institute, Switzerland). The SLS system consists of the 2.4 GeV electron storage ring 288 m in circumference, the booster synchrotron with the circumference of 270 m for the same energy and the linear accelerator for an electron energy of 100 MeV. The SLS was designed with the main aim ([1] – [3]) to reach a very high brightness of the SR sources, perhaps at the expense of the maximal possible number of these sources. Source quality (brightness) is determined mainly by the electron beam quality (small emittance). Hence, the SLS was optimized with the aim to obtain minimal horizontal emittance for assigned dimensions of the ring.

The storage ring consists of 12 sectors, 4 girders in each. The magnetic system of the storage ring contains 36 dipoles, 174 quadrupole lenses and 120 sextupole lenses, installed with a high precision on the 48 girders differing in length and set of elements.

A feature of the SLS are very hard requirements to the magnetic field non-linearity at the equilibrium orbit restricting the dynamical aperture of the storage ring and, as a sequence, the electron lifetime. This leads, in own turn, to harder requirements to the accuracy of manufacture and alignment of the magnetic system elements near the ideal axis (377,000 mm and 15,000 mm relative to horizontal and vertical girder base surfaces). Groups of 5 to 8 multipoles are installed with high accuracy on the girders over the base surfaces.

BINP manufactured 8 types of multipoles (narrow and wide quadrupoles 200, 320 and 440 mm in length and narrow and wide sextupoles 200 mm in length) for the storage ring.

The measurement system shall perform the measurement accuracy of the magnetic field harmonics relative to the main harmonic not worse than $2 \cdot 10^{-4}$ for the quadrupoles and $5 \cdot 10^{-4}$ for the sextupoles, of the multipole magnetic axis position of $\pm 10 \mu\text{m}$ and of roll angle of the multipole of $\pm 0.35 \text{ mrad}$.

2. Rotating Coil System

A special stand for magnetic measurements based on "Rotating Coil System"[4] was made at BINP for the SLS multipole parameters measurements. A similar system was made and delivered to the SLS (PSI) to carry out the final magnetic measurements of the multipoles before their installation on the ring. Two special girders for RCS have $\sim 5 \mu\text{m}$ accuracy of the base surfaces.

Position of the magnetic axis, roll angle and harmonic coefficients of the serial multipoles were measured by RCS. The measurement coil was calibrated on the basis of a multipole prototype magnetic field map measured with the set of the 11 Hall probes at different currents. The magnetization curve and the magnetic strength of serial multipoles were measured with Hall probes locating in the multipole center.

The coil inserted into the magnet aperture is rotated round the ideal axis. The measurement coil consists of four independent sections, each containing 8 turns made on multi-layer foiled textolite. Two coil sections have the outer size R and length L/2 each, other two coils have the outer size R/2 and the same lengths. Connecting the sections of the full and half radius by the subtraction scheme, one can compensate the multipole main harmonic component of the signal and increase the measurement accuracy for the rest harmonics. The measurements by left and right coil sections allow obtaining the longitudinal roll angle of the multipole.

The coil is rotated with the help of the step motor SigPositec with a 1:10 reducer and the angle encoder ROD-250. The 8-channel 12-digit ADC picks up the signals of the coils by with a minimal measurement time of 10 $\mu\text{sec}/\text{channel}$. The coil position is controlled with the help of the angle encoder (accuracy of 0.3 μrad) and the signal from the coil arrives through the amplifier/commutator to the ADC.

3. Basic theory of RCS measurements

The radial measurement coil rotates in the multipole aperture around the ideal axis and measures the voltage (U) induced on it from the θ component of the magnetic field.

$$B = B_\theta = \sum_n (-A_n \cdot \text{Sin}(n\theta) + B_n \cdot \text{Cos}(n\theta)) \cdot r^{n-1},$$

$$U = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(\int B \cdot dS)}{dt} = -L \cdot \frac{d}{dt} \sum_n (-A_n \cdot \text{Sin}(n\theta) + B_n \cdot \text{Cos}(n\theta)) \cdot \frac{R^n}{n},$$

where B_n, A_n are the normal and skew components of the magnetic field, L – the coil length.

The system under consideration worked with the use of stepwise rotation of the coil. When the coil rotates, the voltage induced over the coil is read inside one step. The total number of the signal readings is ~ 4000 at each angle step, the angle step $2d\theta \sim 5^\circ$, and number of steps is 85 in standard measurement cycle. The voltage signal obtained is subjected to integration and the resulting value corresponds to the rotation angle $\theta+d\theta$. After the interpolation of the angle dependence with a cubic spline, the function is expanded at the normalization radius of 28 mm by Fast Fourier Transform method on harmonics (B_n, A_n), which reflect the magnetic field properties. The subtraction scheme of coil sections connection improves the measurement accuracy of the higher magnetic field components.

Coordinates of the multipole magnet axis are determined from the low-order coefficients of the harmonic expansion (A_1, B_1 and B_2 for the quadrupoles and A_2, B_2 and B_3 for the sextupoles). The vertical position of the magnet axis was a determined subject to the temperature correction for a temperature of 24°C taking into account the temperature fields of the RCS at the mechanical alignment and magnetic measurements as well as to the temperature at which the mechanical jig height was measured.

The roll angle was determined from the main signal:

$$\varphi_q = \text{arctg} \frac{A_2}{B_2}, \quad \varphi_s = \text{arctg} \frac{A_3}{B_3}.$$

4. Measurement accuracy

The measurements are under influence of the time dependence of the processes occurring at the measurement time and the mechanical accuracy of manufacture and adjustment of the elements of the Rotating Coil System:

Mechanical accuracy of manufacture of the RCS elements:

- mechanical jigs ($\pm 1-2 \mu\text{m}$ for the axis position)
- shaft diameters ($\pm 1.5 \mu\text{m}$ for the axis position)
- rollers and shafts of the measurement coil ($\pm 2 \mu\text{m}$)
- mechanical level ($\sim 0.05 \text{ mrad}$).

Accuracy of alignment of:

- coil's supports ($\pm 1.5 \mu\text{m}$ for the axis position)
- slit dowel on the girder ($\pm 2 \mu\text{m}$ for the horizontal axis position)
- level on the measurement coil (total error at calibration $\sim 0.1 \text{ mrad}$).

Equipment operation accuracy:

- measurement of temperature ($\sim 0.1^\circ$ gives $\pm 1 \mu\text{m}$ for the vertical axis position)
- angle encoder ($0.3 \mu\text{rad}$)
- nonlinearity of the amplifier (10^{-5})
- measurement of the main signal by the 12-digit ADC ($\sim 5 \cdot 10^{-4}$) for roll angle

Time instabilities during measurement cycle:

- mechanical vibrations of coil ($10 \mu\text{m}$ vibration gives an error of $0.2 \cdot 10^{-4}$ for the harmonic coefficients and of $\pm 0.6 \mu\text{m}$ for the axis position).
- of the power source ($\sim 10^{-4}$ gives an error of $\sim 0.2 \cdot 10^{-4}$ for the harmonic coefficients and of $\pm 0.3-0.6 \mu\text{m}$ for the multipole axis position)
- of the multipole temperature (heating/cooling can give the roll angle change of from 0.3 to 0.5 mrad at 5-10 degrees change).

Main parameters of Rotating Coil System are shown in Table 1.

Table 1. Main parameters of Rotating Coil System.

	Reproducibility	Accuracy	Sensitivity
Harmonic coefficients	$\pm 0.5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0.5 \cdot 10^{-4}$	$0.3 \cdot 10^{-4}$ - quadrupoles $0.5 \cdot 10^{-4}$ - sextupoles
Axis position	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 10 \mu\text{m}$	$1 \mu\text{m}$
Roll angle	0.05 mrad	$\pm 0.35 \text{ mrad}$	0.03 mrad

5. Statistical data on the magnetic measurements of SLS multipoles

The measurement results show compliance of the multipole parameters with the assigned requirements and good agreement of the magnetic measurements performed at BINP and SLS. Table 2 presents the average values and standard deviations of the magnet axis positions and roll angles for multipole types. A small systematic difference in the BINP and SLS measurements of the vertical axis displacement is probably explained with the distinctive feature of the mechanical assignment of the nominal axis (differences in the nominal sizes of the RCS elements and girders).

Table 3 lists main harmonic coefficients of the magnet fields for the multipole types. The obtained harmonic coefficients satisfy the requirements of SLS multipoles because of the main symmetric coefficients have the opposite signs and the harmonic coefficients determined by the geometrical accuracy of the assembly are enough small.

Table 2. Average values and standard deviations of the magnet axis positions and roll angles.

Multipole type (quantity of magnets)	$\langle x \rangle \pm \sigma_x$, BINP (SLS), μm	$\langle y \rangle \pm \sigma_y$, BINP (SLS), μm	$\langle \varphi \rangle \pm \sigma_\varphi$, BINP (SLS), mrad
QA (43)	-1±16 (0±17)	8±13 (19±14)	0,126±0,16 (-0,01±0,16)
QAW (13)	-4±8 (-7±11)	6±12 (14±14)	-0,02±0,20 (0,02±0,17)
QB (54)	2±14 (2±14)	8±11 (13±12)	-0,02±0,17 (0,00±0,17)
QBW (13)	-3±11 (-4±17)	5±15 (5±18)	-0,02±0,21 (0,01±0,16)
QC (54)	-2±11 (1±12)	7±11 (14±12)	0,03±0,17 (0,08±0,15)
QCW (13)	-2±14 (0±12)	-2±14 (2±12)	-0,09±0,16 (0,03±0,13)
SR (84)	1±11 (3±12)	8±9 (18±11)	-0,02±0,19 (-0,07±0,26)
SRW (39)	0±9 (-1±15)	4±11 (8±11)	0,08±0,18 (-0,02±0,28)

Table 3. Main harmonic coefficients of the magnet fields for the multipoles.

Quadrupole type	$\langle B_3 \rangle$	$\langle A_3 \rangle$	$\langle B_4 \rangle$	$\langle A_4 \rangle$	$\langle B_6 \rangle$	$\langle B_{10} \rangle$		
	$\pm \sigma_{B3}$	$\pm \sigma_{A3}$	$\pm \sigma_{B4}$	$\pm \sigma_{A4}$	$\pm \sigma_{B6}$	$\pm \sigma_{B10}$		
QA	-0,02 $\pm 0,28$	-0,07 $\pm 0,29$	0,01 $\pm 0,19$	0,04 $\pm 0,14$	0,18 $\pm 0,13$	-0,62 $\pm 0,03$		
QAW	0,07 $\pm 0,27$	-0,22 $\pm 0,34$	-0,09 $\pm 0,17$	-0,06 $\pm 0,12$	0,20 $\pm 0,11$	-0,59 $\pm 0,02$		
QB	0,01 $\pm 0,22$	-0,24 $\pm 0,31$	0,00 $\pm 0,19$	-0,01 $\pm 0,08$	0,25 $\pm 0,07$	-0,42 $\pm 0,01$		
QBW	-0,15 $\pm 0,25$	-0,13 $\pm 0,26$	0,00 $\pm 0,22$	-0,03 $\pm 0,06$	0,18 $\pm 0,04$	-0,38 $\pm 0,01$		
QC	-0,06 $\pm 0,15$	-0,13 $\pm 0,32$	-0,03 $\pm 0,14$	0,00 $\pm 0,06$	0,21 $\pm 0,05$	-0,32 $\pm 0,02$		
QCW	-0,04 $\pm 0,12$	-0,12 $\pm 0,13$	0,35 $\pm 0,16$	0,00 $\pm 0,06$	0,19 $\pm 0,04$	-0,29 $\pm 0,03$		
Sextupole type	$\langle B_1 \rangle$	$\langle A_1 \rangle$	$\langle B_4 \rangle$	$\langle A_4 \rangle$	$\langle B_5 \rangle$	$\langle B_9 \rangle$	$\langle B_{15} \rangle$	$\langle B_{21} \rangle$
	$\pm \sigma_{B1}$	$\pm \sigma_{A1}$	$\pm \sigma_{B4}$	$\pm \sigma_{A4}$	$\pm \sigma_{B5}$	$\pm \sigma_{B9}$	$\pm \sigma_{B15}$	$\pm \sigma_{B21}$
SR	-1,05 $\pm 0,76$	0,08 $\pm 0,63$	0,03 $\pm 0,52$	-0,38 $\pm 0,49$	0,17 $\pm 0,35$	-0,41 $\pm 0,08$	2,68 $\pm 0,05$	-2,37 $\pm 0,03$
SRW	-1,12 $\pm 0,83$	0,07 $\pm 1,18$	0,03 $\pm 0,44$	-0,46 $\pm 0,48$	-0,52 $\pm 0,36$	-0,29 $\pm 0,08$	2,63 $\pm 0,05$	-2,32 $\pm 0,04$

Conclusion

The magnetic field parameters of SLS multipoles produced by BINP were measured at the specially designed Rotating Coil Systems. Such precision magnetic measurement system permits obtaining the harmonic coefficients, axis position and roll angle with high accuracy.

References

- [1] R. Abela et al. Design considerations for a Swiss Light Source (SLS), Proceedings of the EPAC92, Berlin, March 1992, p. 486.
- [2] W. Joho et al. Design of a Swiss Light Source (SLS), Proceedings of EPAC94, London, June 1994.
- [3] Conceptual Design of the Swiss Synchrotron Light Source, PSI Internal Report, September 1993.
- [4] W.G. Davies. The theory of the measurement of magnetic multipole fields with rotating coil magnetometers, NIM, Vol.A311 (1998) 399-436.

Система стабилизации пучков синхротронного излучения накопителя ВЭПП-3

А.Н.Алешаев, С.И.Мишнев, М.Г.Федотов, В.Ф.Пиндюрин, В.Е.Панченко,
Н.Г.Гаврилов, И.В.Полетаев,
Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

Б.П. Толочко
Институт химии твердого тела СО РАН, Новосибирск, Россия

На накопителе ВЭПП-3 (ИЯФ СОРАН, Новосибирск) реализована система стабилизации орбиты пучка в месте выпуска СИ, основанная на измерении положения двух пучков СИ, излучаемых из двух близко расположенных участков накопителя. Приводятся описание системы, результаты ее тестирования, оценки точности поддержания орбиты во время работы на потребителях СИ.

Накопитель ВЭПП-3 часть времени работает на потребителей синхротронного излучения (СИ) на энергии $E = 2$ ГэВ с током пучка около 100 мА. Источником СИ для большинства является трехполюсный вигглер с полем 2 Тл; часть потребителей использует СИ из соседнего поворотного магнита с полем 1.7 Тл.

Для экспериментов на пучках СИ важна стабильность орбиты излучающего пучка электронов по вертикальной координате и углу в месте генерации СИ в течение всего времени работы. В то же время известно, что орбита пучка в ВЭПП-3 может изменяться со временем в зависимости от температуры магнитных и конструктивных элементов. Амплитуда изменения вертикальной орбиты составляет несколько миллиметров, а изменение углов – порядка долей мрад; постоянные времени этих изменений – от нескольких часов до десятков часов.

Стабилизация орбиты по измерениям с помощью пикап-электродов не отвечает требованиям экспериментов с СИ: во-первых, из-за низкой точности, во-вторых, из-за механической привязки пикапов к конструктивным элементам накопителя, из-за чего стабильность орбиты по отношению к пикапам еще не означает стабильности точки излучения.

Непосредственное определение положения пучков СИ на экспериментальных станциях может быть выполнено с микронной точностью и лишено недостатков системы пикап-электродов. Измеряя положение пучков СИ, можно определить координату и угол орбиты электронов в точке излучения. Традиционно это делается по результатам измерений параметров одного пучка СИ, но для этого необходимы два детектора, расположенных на большой базе.

Мы предложили схему определения параметров орбиты, основанную на измерении положения пучков СИ из двух различных участков орбиты электронов. Для накопителя ВЭПП-3 задача облегчается тем, что практически все потребители получают СИ из одного источника – короткого трехполюсного вигглера, в котором и нужно стабилизировать орбиту (рис. 1).

Для реализации предложенной системы стабилизации на накопителе ВЭПП-3 использовались пучки СИ из поворотного магнита (ЗВ8) и вигглера (WG). Эти два пучка выводятся в канал № 7 ВЭПП-3 и видны на экране, на который нанесен слой люминофора (рис. 2).

Одновременное измерение положения обоих пучков СИ позволяет определить вертикальную координату и угол орбиты электронного пучка в вигглере при условии, что набег фазы вертикальных бетатронных колебаний между точками излучения, выбранными для диагностики орбиты, стабилен и имеет величину порядка $\pi/2$ (между вигглером и поворотным магнитом находится магнитная линза ЗF8).

Для стабилизации орбиты в вигглере нужны, как минимум, два корректора орбиты, набег фазы вертикальных колебаний между которыми также порядка $\pi/2$ (используются корректоры 4Z5 и 4Z7, см. рис. 1).

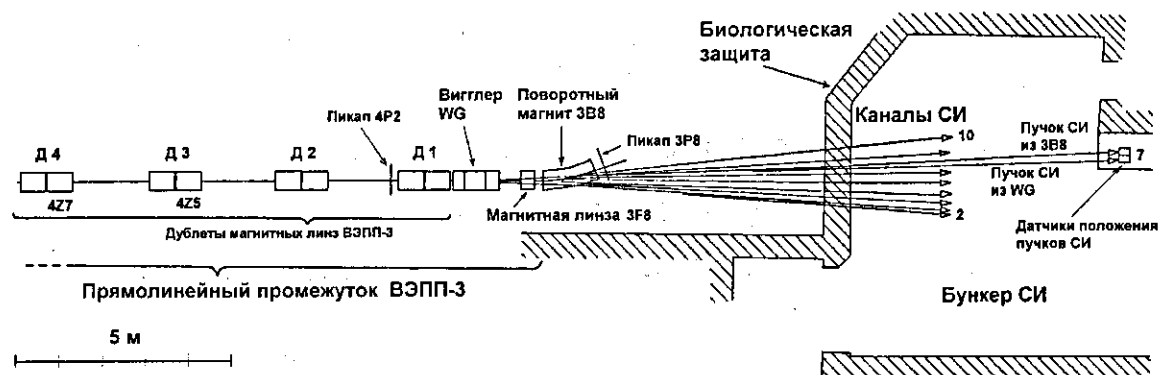


Рис. 1. Вид в плане фрагментов накопителя ВЭПП-3, бункера СИ и радиационно опасного отсека с двумя датчиками положения пучка СИ. Д1 - Д4 - дублиеты магнитных линз накопителя; 4Z5, 4Z7 - вертикальные корректоры орбиты, встроенные в линзы; WG - трехполюсный вигглер; 3B8 - поворотный магнит; 3F8 - магнитная линза; 3P8, 4P2 - пикапы для измерения орбиты пучка в накопителе.

Пучки СИ ослабляются фильтрами и попадают на покрытый люминофором экран. Изображения пучков на экране проектируются объективом на два линейных прибора с зарядовой связью (ПЗС), которые измеряют профили вертикального распределения яркости пучков СИ. Первичная компьютерная обработка результатов измерений позволяет определить центр тяжести, ширину и амплитуду функций распределения яркости для обоих пучков. Эти данные по системе связи Ethernet передаются в ЭВМ, управляющую магнитной системой накопителя ВЭПП-3.

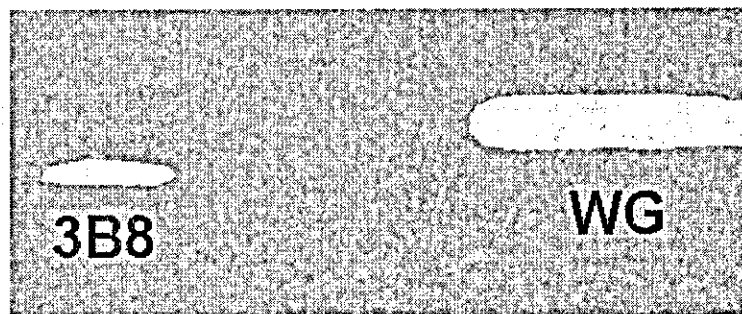


Рис. 2. Вид на люминофорном экране пучков СИ из поворотного магнита (3B8) и вигглера (WG).

При расхождении измеренных и "опорных" (записанных в памяти ЭВМ) положений центров пучков СИ ЭВМ рассчитывает и вводит добавки токов в корректоры системы управления орбитой. После нескольких итераций положения пучков СИ сходятся к опорным значениям и удерживаются около них с точностью ≈ 10 мкм в течение всего эксперимента (несколько часов - до следующей инжекции пучка). Соответствующие ошибки в вертикальной координате и угле орбиты пучка в вигглере составляют ± 2 мкм и ± 1 мкрад. Промежуток времени между итерациями в настоящее время составляет около 5 сек, хотя при необходимости он может быть значительно сокращен. Опорные значения положения пучков СИ выбирались по согласованию с потребителями; при необходимости они могут быть изменены оператором, который управляет накопителем ВЭПП-3.

Для визуального наблюдения за работой системы обратной связи на одном из пультовых мониторов выделено окно, в котором графически и цифрами показано отклонение центров пучков СИ от опорных значений. Если система обратной связи не работает, в окне появляется "код ошибки" - число, показывающее причину неработоспособности (неисправность или несоответствующий режим установки ВЭПП-3).

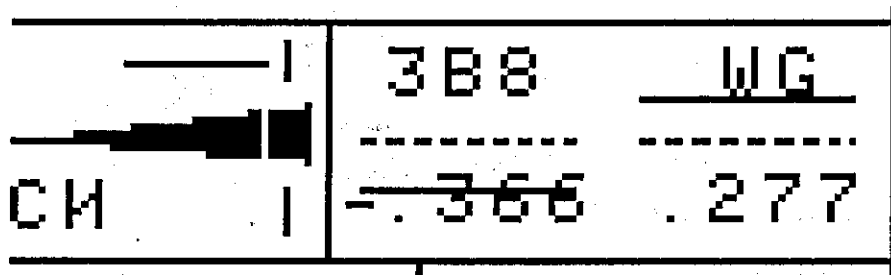


Рис. 3. Окно экрана монитора для наблюдения за работой системы стабилизации. Слева - открытый затвор для выпуска пучка СИ в бункер. Справа - отклонения пучков СИ из поворотного магнита (ЗВВ) и вигглера (WG) от опорных значений (числа - в мм; опорные значения - пунктирные линии). Показано состояние, когда система стабилизации еще не притянула пучки СИ к положениям, близким к опорным.

Для тестирования работы системы обратной связи в течение одного цикла работы на СИ с периодичностью около 1 мин записывались некоторые параметры: отклонения положений пучков СИ от опорных значений, силы двух корректоров, участвующих в работе системы обратной связи, и координаты орбиты, измеренные двумя ближайшими к вигглеру пикапами. На рис.4 и 5 показан разброс результатов измерения смещения пучка СИ, выходящего из вигглера, относительно опорного значения в состоянии, когда работает стабилизация орбиты. Примерно так же ведут себя измерения смещения пучка СИ из поворотного магнита.

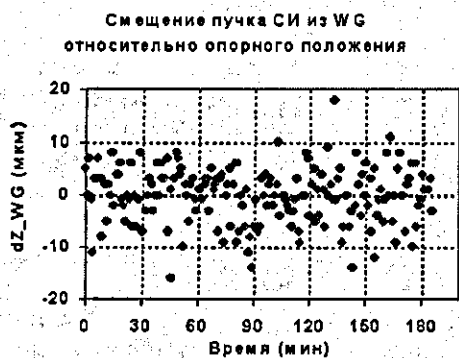


Рис. 4.



Рис. 5.

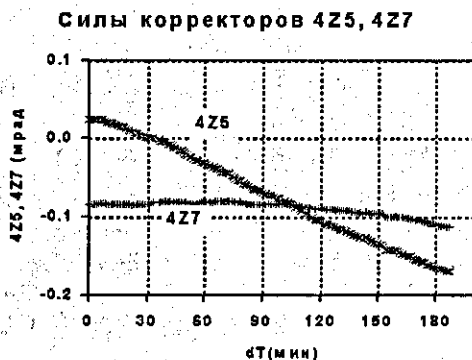


Рис. 6.

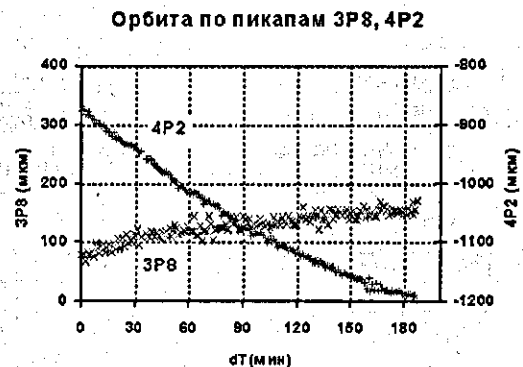


Рис. 7.

На рис. 6 показано, как меняется с течением времени сила корректоров, участвующих в стабилизации орбиты. Монотонное изменение силы корректора 4Z5 связано с изменением теплового режима накопителя, так как до начала данной серии измерений накопитель в течение примерно 12 часов был выключен.

На рис. 7 показано, как меняется орбита пучка, измеренная двумя ближайшими к вигглеру пикапами. Видно, что если бы система стабилизации опиралась на измерения орбиты пучка электронов с помощью пикапов, она не могла бы удерживать в постоянном положении пучки СИ. Если установка хорошо прогрета, например, в течение суток работала на потребителей СИ, то силы корректоров и измеренная пикапами орбита меняются мало.

Литература

[1] Батраков А.М., Козак В.Р. Препринт ИЯФ СО АН СССР 85-9. Новосибирск, 1985.

[2] Пискунов Г.С., Тарарышкин С.В. Автометрия, 1986, №4, с.32.

Проект нового электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2000

А.А. Валишев, В.Н. Волков, Д.И. Ганюшин, А.В. Евстигнеев, П.М. Иванов,
И.А. Кооп, А.П. Лысенко, Н.А. Мезенцев, Н.В. Митянина, И.Н. Нестеренко,
А.В. Отбоев, Е.А. Переведенцев, С.П. Петров, С.И. Середняков, А.Н. Скринский,
П.Ю. Шатунов, Ю.М. Шатунов, Д.Б. Шварц, Л.М. Щеголев, С.И. Эйдельман
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Введение

Последние 5–6 лет коллайдер ВЭПП-2М успешно работает с двумя современными детекторами СНД [1] и КМД-2 [2]. Набранные детекторами КМД-2 и СНД интегральная светимость около 50 пб^{-1} дает возможность изучить с высокой точностью большинство каналов адронной аннигиляции от порога рождения адронов до максимальной энергии ВЭПП-2М $2 \times 0.7 \text{ ГэВ}$. Вместе с 24 пб^{-1} , накопленными на ВЭПП-2М в предыдущем поколении экспериментов (1974–1987 гг.), эта интегральная светимость более чем на порядок величины превышает 6 пб^{-1} , набранные вместе различными экспериментальными группами в Орсе и Фраскати в области энергии от 1.4 до 2 ГэВ. Таким образом, между максимальной энергией, достижимой на ВЭПП-2М, и 2 ГэВ имеется заметный разрыв, в котором точность имеющихся данных низкая. В то же время хорошая точность знания адронных сечений в этом диапазоне энергии является решающей для лучшего понимания многих явлений физики высоких энергий.

1. Схема и оптическая структура коллайдера

Весной 1999 года в ИЯФ принято решение о модернизации комплекса ВЭПП-2М для повышения светимости и увеличения максимальной достижимой энергии до 2 ГэВ, что позволит существенно улучшить возможности проведения экспериментов на коллайдере. Новый проект получил название ВЭПП-2000 (рис. 1).

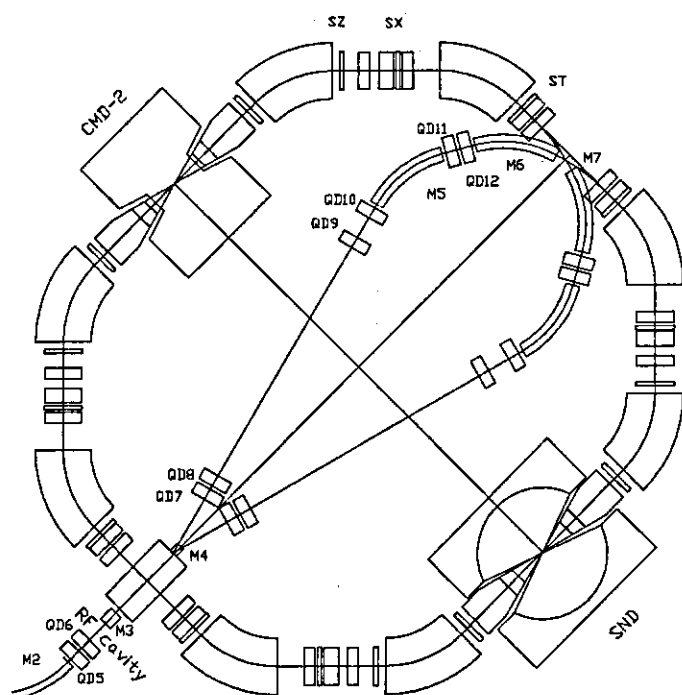


Рис. 1: Схема коллайдера ВЭПП-2000.

Оптика нового накопителя основана на концепции круглых пучков [3, 4], которая подразумевает выполнение следующих основных условий:

- 1) равные малые β -функции встречных пучков в области взаимодействия
 $\beta_x = \beta_y = \beta^*$;
- 2) равные горизонтальный и вертикальный эмиттансы $\epsilon_x = \epsilon_y$, возбуждаемые в арках квантовыми флуктуациями излучения;
- 3) равные частоты бетатронного движения $Q_x = Q_y$.

Условия 1), 2) и 3) приводят к сохранению углового момента, с помощью которого поперечное движение становится одномерным и интегрируемым. При этом уменьшается сила резонансов, которые могут приводить к раздуванию пучка,

уменьшению времени жизни и динамической апертуры. Для достижения максимального значения параметра пространственного заряда пучка ξ_{max} следует выбирать дробную часть бетатронных частот чуть выше целого резонанса. В случае круглого пучка максимальное ожидаемое значение $\xi \sim 0.1$, что больше достижимой величины $\xi \simeq 0.05$ в случае плоского пучка. Основные требования концепции круглого пучка на практике могут быть удовлетворены применением сверхпроводящих соленоидов для фокусировки в обоих местах встречи.

Соленоиды создают равные β^* -функции в местах встречи пучков и вращают плоскости бетатронных колебаний на $\pi/2$. Это приводит к смене плоскостей собственных мод бетатронного движения, что в свою очередь приводит к равным частотам и одинаковой раскачке эмиттансов ϵ_x и ϵ_z . Оптические функции структуры нового накопителя с круглым пучком представлены на рис. 2, а основные параметры — в табл.1. В найденной оптике удалось занулить дисперсионные функции в местах встречи, резонаторе и участках инжекции. Выбранная оптическая схема имеет еще одно преимущество: изменение фокусировки соленоидов приводит к пропорциональному изменению β^* и эмиттансов, сохраняя размер пучков в соленоидах. Это дает возможность настраивать оптику кольца на максимальную светимость. Это же условие на фокусировку соленоидов создает зависимость светимости $\propto \gamma^2$ на малых энергиях, вместо $\propto \gamma^4$ в схеме с фиксированной β^* .

Таблица 1: Основные параметры коллайдера на энергии $E=900$ МэВ.

Периметр, м	Π	24.388
Частота ВЧ, МГц	f_0	172.
Напряжение ВЧ, кВ	V	100
ВЧ-гармоника	q	14
Коэффициент уплотнения орбит	α	0.036
Синхротронная частота, кГц	ν_s	30.73 ($\alpha = 0.036$)
Эмиттансы, см · рад	ϵ_x	$2.2 \cdot 10^{-5}$
	ϵ_z	$2.2 \cdot 10^{-5}$
Потери энергии/оборот, кэВ	ΔE_0	41.5
Безразмерные декременты затухания	δ_x	$2.3 \cdot 10^{-5}$
	δ_z	$2.3 \cdot 10^{-5}$
	δ_s	$4.6 \cdot 10^{-5}$
Энергетический разброс	σ_x	$6.4 \cdot 10^{-4}$
β_x в месте встречи, см	β_x	6.3
β_z в месте встречи, см	β_z	6.3
Бетатронные частоты	Q_x, Q_z	4.1, 2.1
Число частиц в сгустке	e^-, e^+	$1.0 \cdot 10^{11}$
Число сгустков в пучке		1
Сдвиги частот	ξ_x, ξ_z	0.075, 0.075
Светимость на одно место встречи, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	L_{max}	$1.0 \cdot 10^{32}$

2. Схема инжекции

Инжекция пучков в новое накопительное кольцо будет проводиться в горизонтальной плоскости в пустой промежуток напротив резонатора. Система впуска построена по принципу однооборотной инжекции с предударом накопленного пучка. Инфлекторные пластины будут размещаться в вакуумной камере внутри поворотных магнитов, примыкающих к концам впускного промежутка по их внутреннему и внешнему радиусам. Преимущество такой схемы состоит в

независимости траектории впущенного пучка от поля соленоидов. Это дает возможность попробовать различные варианты оптической схемы: обычный круглый пучок, схема "Мёбиус", а также плоский пучок без вращения плоскостей бетатронных колебаний.

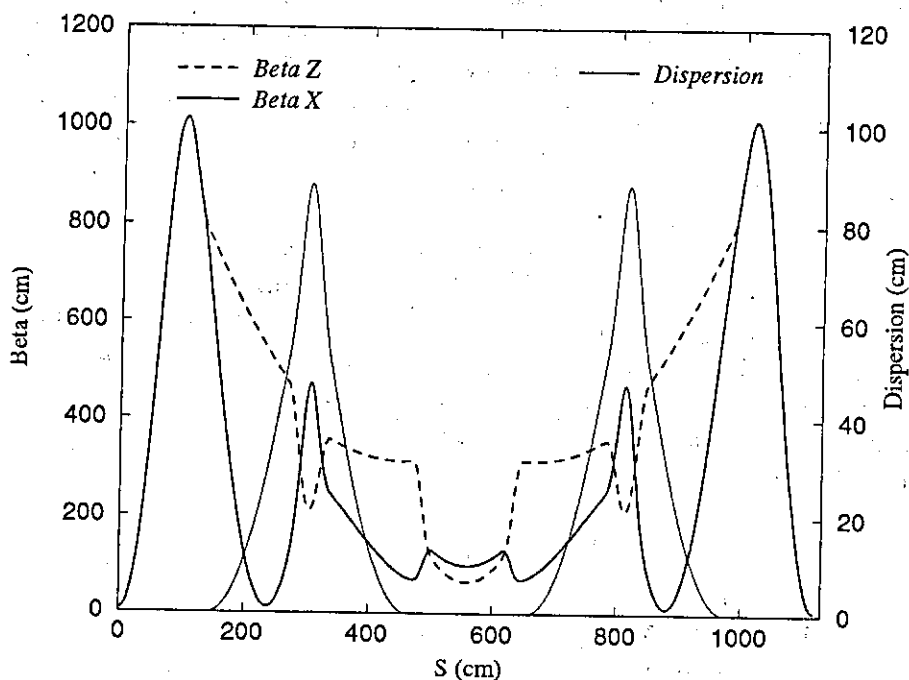


Рис. 2: Оптические функции половины периода. $S = 0$ соответствует месту встречи.

3. Коррекция хроматизма и динамическая апертура

Накопитель ВЭПП-2000 имеет большой натуральный хроматизм ($\gamma \frac{\partial \nu}{\partial \gamma} = -13.3$), обусловленный в основном наличием сильных фокусирующих соленоидов. При этом из-за требования равенства нулю дисперсии в местах встречи и в резонаторе компенсация хроматизма секступолями возможна только в "технических" триплетных промежутках (рис. 1). Разместить секступоли Z-семейства планируется в промежутках между дипольным магнитом со стороны места встречи и триплетом. X-секступоли могут быть установлены в промежутках между линзами триплета.

Изучение динамики частиц в накопителе с учетом нелинейных корректоров производилось методом трекинга при помощи программы *RING*. При этом помимо секступолей принималась во внимание также кубическая нелинейность краев соленоидов и квадрупольных линз. В представленной структуре значение динамической апертуры составило $\approx 12\sigma$ для частицы с отклонением по энергии $\delta = 1 \cdot 10^{-3}$. Из имеющихся данных следует, что резонансом, определяющим динамическую апертуру несмотря на свою малую амплитуду, является $3\nu_x = 12$, поскольку обусловленный краевыми полями положительный сдвиг бетатронной частоты с амплитудой весьма велик ($\partial \nu / \partial a^2 = 1.2 \text{ см}^{-2}$). Этот вывод подтверждается также трекингом — фазовый портрет колебаний вблизи динамической апертуры имеет характерный треугольный вид.

По-видимому, уменьшить величину сдвига частоты можно, увеличив эффективную длину края соленоидов, либо применяя октупольные корректоры, создающие отрицательный сдвиг, что позволит компенсировать нелинейность основных источников. Оптимизация системы секступольных корректоров в данном случае не имеет особого значения, поскольку, как показал трекинг, даже увеличение секступольного градиента на 30% практически не уменьшает динамическую апертуру.

Заключение

Оптическая схема ВЭПП-2000, основанная на концепции круглых пучков, позволяет надеяться получить высокую светимость в области энергий от 1.4 до 2 ГэВ. Проведено моделирование движения в структуре с учетом нелинейных полей, и найдена схема корректоров, обеспечивающих требуемую динамическую апертуру. Выбранная схема инжекции позволяет работать как с круглым, так и с плоским пучками.

Список литературы

- [1] M.N.Achasov et al. Preprint BudkerINP 98-65, Novosibirsk, 1998.
- [2] R.R.Akhmetshin et al. Preprint BudkerINP 99-11, Novosibirsk, 1999.
- [3] L.M.Barkov et al. Proc. of the IEEE Particle Accelerator Conference, San Francisco (1991), p.183.
- [4] V.V.Danilov et al. Proc of the Asian Particle Accelerator Conference, Tsukuba (1998), p.257.