

Научная статья

УДК 621.384.6.01

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-3-5-19

Исследование возможности применения пооборотных измерений для обнаружения возмущений магнитной структуры ускорителей*

Дарья Вячеславовна Дорохова^{1,2}, Виктор Леонидович Дорохов^{1,2}
Сергей Алексеевич Никитин¹

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

²Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов», СКИФ,
Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН
Кольцово, Россия

D.V.Dorokhova@inp.nsk.su

V.L.Dorokhov@inp.nsk.su

S.A.Nikitin@inp.nsk.su

Аннотация

Метод коррекции РСА заключается в глобальном анализе пооборотных данных, полученных с пикапов. Одним из главных его преимуществ является его быстродействие и возможность определения пульсирующих источников питания. Наряду с этим метод РСА отличается широким спектром применения: определение возмущений магнитной структуры ускорителя, расчет элементов транспортной матрицы и оптических функций, а также определение величины поперечной связи. Был написан прототип программы, реализующий предложенный метод, который для экспериментальной апробации тестировался на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М. В ходе экспериментов искусственно поочередно вводились возмущения в отдельные элементы скью-квадрупольной коррекции. В одном случае возбуждение бетатронных колебаний осуществлялось посредством удара инфлектора, а в другом случае – путем резонансной раскачки пластинами деполяризатора. Было обнаружено, что, несмотря на простоту практической реализации, исследуемый метод имеет некоторые нюансы, которые мешают получению и идентификации верных результатов. Тем не менее удалось выявлять введенные возмущения и даже найти магнит с низкочастотными пульсациями по характерным изменениям рассчитанных инвариантов. Кроме того, была рассмотрена возможность определения интегральных параметров связи колебаний в экспериментах по наблюдению резонансно раскаченных собственных мод, имеющих вид эллипсов в поперечной к оси движения пучка плоскости.

Ключевые слова

бетатронные колебания, коррекция оптики, бетатронная связь, минимизация связи, сингулярные числа, собственные моды, метод главных компонент

Благодарности

Разделы 1 и 2 данной работы выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда правительства Новосибирской области Российской Федерации (Грант РНФ № 22-12-20025 «Развитие методов повышения яркости излучения и апробация диагностик электронного пучка источника СИ 4-го поколения СКИФ»). Раздел 3 выполнен при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП СКИФ (проект FWUR-2022-0001).

* По материалам доклада на конференции RuPAC'23, 10-15 сентября, ИЯФ СО РАН, Новосибирск.

Для цитирования

Дорохова Д. В., Дорохов В. Л., Никитин С. А. Исследование возможности применения пооборотных измерений для обнаружения возмущений магнитной структуры ускорителей // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 3. С. 5–19. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-3-5-19

Investigation of the Possibility of Using Turn-by-Turn Measurements to Detect Perturbations in the Magnetic Structure of Accelerators

Daria V. Dorokhova^{1,2}, Viktor L. Dorokhov^{1,2}
Sergei A. Nikitin¹

¹Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

²Synchrotron Radiation Facility Siberian Circular Photon Source SKIF,
Boreskov Institute of Catalysis SB RAS
Kol'tsovo, Russian Federation

D.V.Dorokhova@inp.nsk.su

V.L.Dorokhov@inp.nsk.su

S.A.Nikitin@inp.nsk.su

Abstract

The PCA correction method consists of a global analysis of turn-by-turn data obtained from beam position monitors (BPMs). One of its main advantages is speed of operation and the ability to detect pulsating power supplies. Along with this, a wide range of applications characterizes the PCA method: determination of perturbations of the accelerator magnetic structure, calculation of transport matrix elements and optical functions, and determination of the magnitude of the transverse coupling. A software prototype implementing the proposed correction method was written and tested on the electron-positron collider VEPP-4M for experimental validation.

In the experiments, perturbations were introduced one by one into individual elements of the skew-quadrupole and quadrupole corrections. In one case, the excitation of betatron oscillations was carried out by the kick of the inflector. In another case, the oscillations were excited by resonant swing with a depolariser. It was found that, despite the simplicity of practical implementation, the examined method has some nuances that make it difficult to obtain and identify correct results. Nevertheless, it was possible to identify the introduced perturbations of quadrupole and skew-quadrupole corrections. Moreover, it was possible to detect a magnet with low-frequency pulsations by characteristic changes in the estimated invariants. In addition, the possibility of determining the integral coupling parameters in experiments on the observation of resonantly excited eigen modes having the shape of ellipses in the plane transverse to the beam motion axis is considered.

Keywords

betatron oscillations, optic correction, betatron coupling, coupling minimization, singular values, eigen modes, principal component analysis

Aknowledgments

Sections 1 and 2 of this work were supported by the the financial support of the Russian Science Foundation of the Government of the Novosibirsk region of the Russian Federation (RSF Grant No. 22-12-20025 “Development of methods for increasing brightness of radiation and testing of diagnostics of the electron beam of the 4th generation SR source SKIF»).

For citation

Dorokhova D. V., Dorokhov V. L., Nikitin S. A. Investigation of the possibility of using turn-by-turn measurements to detect perturbations in the magnetic structure of accelerators. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 3, pp. 5–19. (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-3-5-19

Введение

В современных источниках синхротронного излучения (СИ), таких как строящийся СКИФ, особое внимание уделяется оптимизации параметров, которые определяют качество генерируемого излучения. При запуске бустерного и накопительного колец СКИФ необходи-

мо решить задачу глобальной коррекции оптики – одну из ключевых задач для циклических машин, необходимую для получения расчетных параметров электронного пучка, особенно малого вертикального эмиттанта, так как ультрамалый вертикальный эмиттанс, а соответственно коэффициент бетатронной связи, имеет решающее значение при достижении высокой яркости источника СИ. Для решения данной задачи предполагается использование комбинации нескольких методов, одним из которых является PCA [1] – алгоритм определения ошибок оптики ускорителя из пооборотных данных с мониторов положения пучка (пикапов) [2] с применением статистического метода обработки данных. Данный метод предлагается использовать во время первых запусков ускорителя, так как его применение позволяет обнаружить и локализовать существенные возмущения магнитной структуры, в отличие от общеизвестного LOCO, при расчете которым подобные возмущения будут «размазываться» между соседними элементами. Дополнительно использование такого метода позволит фиксировать ошибки в срабатывании пикапов, например, если они начинают измерения с разных оборотов или работают нестабильно. Главным преимуществом PCA является скорость, так как получить пооборотные измерения с пикапов намного проще и быстрее, чем снять матрицу отклика: для сравнения – на ВЭПП-4М снятие матрицы отклика занимает около одного часа, в то время как запись пооборотных измерений – менее одной минуты. Еще одно существенное достоинство метода – возможность определять положение/наличие пульсирующих источников питания в ускорителе. Одновременно с этим исследуемый метод коррекции имеет широкий спектр применения:

1) определение элементов транспортной матрицы между соседними пикапами в реальной структуре ускорителя [2]. Иначе говоря, по изменениям матричных элементов можно точно указать, между какими пикапами находится то или иное возмущение;

2) измерение величины связи колебаний в накопителе через определение того, как изменяются элементы матрицы связи вдоль кольца ускорителя;

3) измерение углов наклона эллипсов собственных мод колебаний и определение отношения их осей для исследования связи по всему кольцу накопителя.

Последнее особенно актуально в приложении СКИФ для подавления величины бетатронной связи для получения проектных параметров установки, особенно ультрамалого эмиттанта.

1. Краткая теория PCA

PCA (метод главных компонент, от англ. Principle Component Analysis) использует сингулярное разложение пооборотных (за несколько сот – тысяч оборотов) пространственно-временных данных о поперечном положении электронного пучка на пикапах при ударном, а также резонансном возмущениях его траектории. Метод рассчитан на выявление участков ускорителя с наиболее сильными возмущениями.

В матрице пооборотных измерений B по столбцам откладываются номера пикапов, а по строкам – номер оборота измерений. Матрицу B можно выразить в форме, которая разделяет временное изменение фазового пространства и отклики пространственной структуры согласно формуле (1), в математической статистике данный метод известен как PCA:

$$B = TP^T. \quad (1)$$

Матрицы в выражении (1), полученные с помощью PCA, согласно [1], связаны с сингулярным разложением соотношениями:

$$B = USL^T; T = US \text{ и } P = L. \quad (2)$$

Подробные выкладки для вывода ниже представленных выражений (3) изложены в [1], поэтому здесь сразу приведем ответ для выражения пространственных и временных мод, полученных из SVD разложения:

$$\begin{aligned}
 UO &= \frac{1}{\sqrt{P}} \begin{pmatrix} \cdots \sqrt{2J_a/\bar{J}_a} \cos(\varphi_a + \psi_a^0) \cdots \\ \cdots -\sqrt{2J_a/\bar{J}_a} \sin(\varphi_a + \psi_a^0) \cdots \\ \cdots \sqrt{2J_b/\bar{J}_b} \cos(\varphi_b + \tilde{\psi}_b^0) \cdots \\ \cdots -\sqrt{2J_b/\bar{J}_b} \sin(\varphi_b + \tilde{\psi}_b^0) \cdots \end{pmatrix}^T; \\
 O^T SL^T &= \begin{pmatrix} \cdots \sqrt{\bar{J}_a \beta_a \gamma} \cos(\psi_a - \psi_a^0) \cdots \\ \cdots \sqrt{\bar{J}_a \beta_a \gamma} \sin(\psi_a - \psi_a^0) \cdots \\ \cdots \sqrt{\bar{J}_b \beta_a c_b} \cos(\psi_b + \Delta\psi_b - \tilde{\psi}_b^0) \cdots \\ \cdots \sqrt{\bar{J}_b \beta_a c_b} \sin(\psi_b + \Delta\psi_b - \tilde{\psi}_b^0) \cdots \end{pmatrix},
 \end{aligned} \tag{3}$$

где UO – временные моды, $\varphi_{a,b}$ – фаза колебаний во времени (от оборота к обороту), $O^T SL^T$ – пространственные моды; $\psi_{a,b} = \int_0^s \frac{ds}{\beta_{a,b}(s)}$ – бетатронная фаза. Матрица O содержит повороты, которые смешивают физический базис в матрице T , определяемой из выражения (1), и приводят к временным векторам в U , содержащим смешанные гармоники колебаний [1]. Важно отметить, что формулы (3) получены для случая возбуждения горизонтальных X колебаний, вертикальные Y моды могут быть получены путем замены в формулах: $x \rightarrow y$ и $a \rightarrow b$.

При выполнении преобразования Фурье по каждому столбцу данных в матрицах обнаруживается доминирующая мода Фурье-спектра на собственной частоте резонансного возбуждения. Каждой моде колебаний соответствуют две степени свободы бетатронного движения для каждого возбуждения (горизонтального и вертикального).

Косинусоподобная орбита представлена действительной частью, а синусоидальная орбита представлена мнимой частью. Следовательно, всего восемь, четыре из X измерений и четыре из Y измерений, линейных независимых мод можно извлечь из двух возбуждений собственных мод [2], которые в дальнейшем используются для определения инвариантов Q_{12} и Q_{34} согласно выражениям (4) [2]:

$$\begin{aligned}
 \frac{x_1^a x_2^b - x_2^a x_1^b}{Q_{12}} + \frac{x_3^a x_4^b - x_4^a x_3^b}{Q_{34}} &= R_{12}^{ab}, \\
 \frac{x_1^a y_2^b - x_2^a y_1^b}{Q_{12}} + \frac{x_3^a y_4^b - x_4^a y_3^b}{Q_{34}} &= R_{32}^{ab}, \\
 \frac{y_1^a x_2^b - y_2^a x_1^b}{Q_{12}} + \frac{y_3^a x_4^b - y_4^a x_3^b}{Q_{34}} &= R_{14}^{ab}, \\
 \frac{y_1^a y_2^b - y_2^a y_1^b}{Q_{12}} + \frac{y_3^a y_4^b - y_4^a y_3^b}{Q_{34}} &= R_{34}^{ab}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Для определения инвариантов Q_{12} и Q_{34} нужно использовать модельные (рассчитанные, например, с помощью MADX) элементы транспортной матрицы. Затем, используя найденные инварианты и четыре независимые пространственные моды, полученные из матрицы истории пучка, определяются экспериментальные элементы транспортной матрицы между соседними пикапами.

2. Эксперименты с РСА

На электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М проведены первые эксперименты по изучению возможностей сравнительно нового метода по выявлению возмущений в магнитной системе накопителя путем сравнения пространственно-временных характеристик когерентных поперечных колебаний пучка, измеренных с помощью системы пикап-станций на разных азимутах накопительного кольца, с базовыми характеристиками: в одном случае в качестве базы выбиралась теоретическая структура ВЭПП-4М в формате MADX (например, как в разделе 2.1), а в другом базой для расчетов выбиралась структура реального ускорителя в режимах без возмущения. Эксперименты проводились на энергии 1,9 ГэВ.

В одном случае колебания возбуждались импульсным воздействием на пучок и были свободными. Амплитуда колебаний, наблюдаемых по положению центра масс сгустка, уменьшалась в течение нескольких сотен оборотов пучка в накопителе из-за явления декогеренции вследствие имеющегося разброса частот у частиц в пучке (рис. 1). Во втором случае с помощью внешнего переменного электромагнитного поля возбуждались вынужденные колебания в резонансе с одной из двух собственных частот (в идеале одна относится к вертикальным, другая – к горизонтальным колебаниям). Декогеренция в наблюдениях отсутствовала, массив данных увеличился до нескольких тысяч оборотов, что должно повышать точность метода (рис. 2). Вследствие радиационного затухания колебаний (из-за потерь энергии на синхротронное излучение) устанавливается конечное значение их амплитуды.

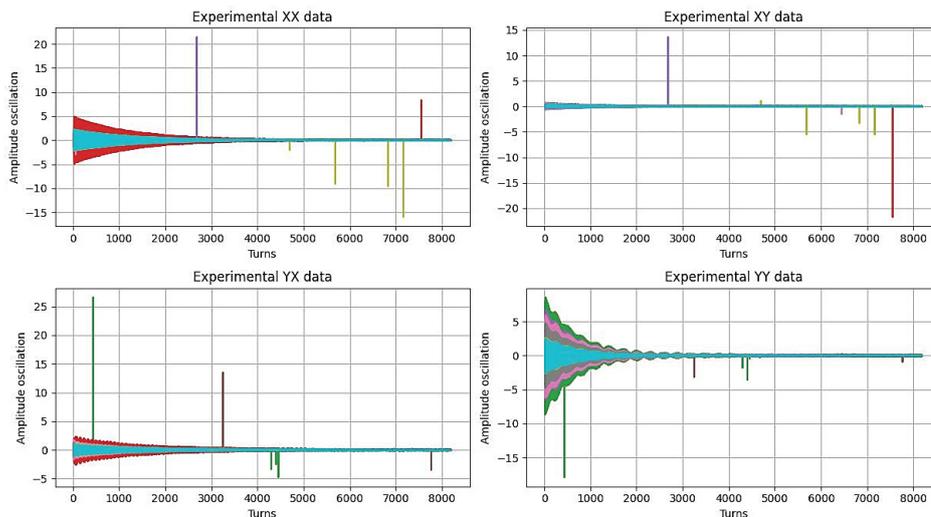


Рис. 1. Пооборотные данные в режиме удара по пучку: XX – горизонтальное положение центра масс пучка при горизонтальном ударе; XY – вертикальное положение при горизонтальном ударе; YX – горизонтальная координата при вертикальном ударе; YY – вертикальная координата при вертикальном ударе. По горизонтальной оси – номер оборота. Изображены данные по всем 52 пикапам. Затухание колебаний вследствие декогеренции происходит примерно за 500 оборотов

Fig. 1. The turn-by-turn data in experiment with kick the beam: XX is a horizontal position of the center of mass of the beam during a horizontal kick. XY is a vertical position of the center of mass of the beam during a horizontal kick. YX is a horizontal position of the center of mass of the beam during a vertical kick. YY is a vertical position of the center of mass of the beam during a vertical kick. Horizontal axis is a number of turn. Data from 52 beam position monitors is shown. The oscillations damping due to decoherence occurs in approximately 500 turns

Смысл экспериментов – протестировать написанный программный скрипт и определить, существуют ли значительные отклонения магнитной структуры коллайдера ВЭПП-4М от иде-

альной модели. А также, искусственно вводя в известные возмущения в структуру реального ускорителя, показать, возможно ли с помощью метода PCA увидеть введенное возмущение.

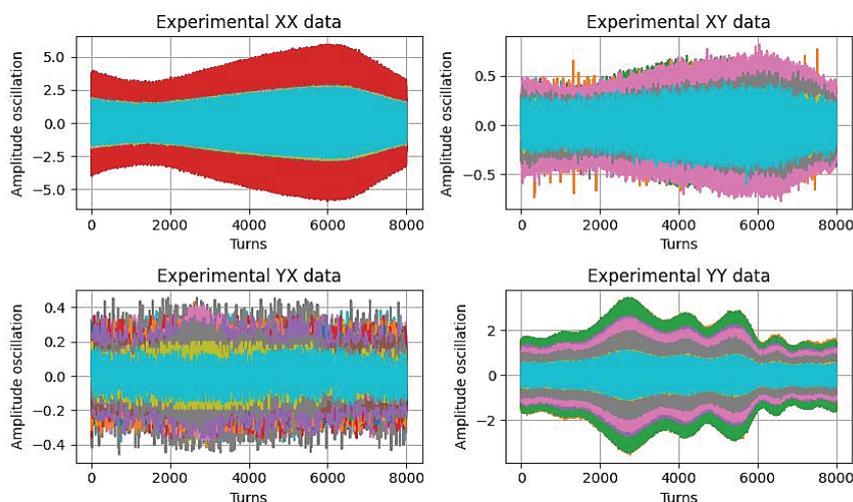


Рис. 2. Пооборотные данные в режиме резонансной раскачки (всего 8000 оборотов). Первая буква в названии данных указывает направление раскачки, которое задается выбором собственной частоты (X или Y), вторая – координату. Неравномерность амплитуд по оборотам, по-видимому, вызвана нестабильностью собственных частот

Fig. 2. The turn-by-turn data in experiment with resonance swing of (in all 8000 turns). The first letter in the name of the data indicates the direction of the swing, which is set by choosing the betatron tune (X or Y); the second letter is the coordinate. The irregularity of the amplitudes over turns is apparently caused by the instability of betatron tune

Для реализации данной цели было проведено два типа экспериментов:

- 1) возбуждение бетатронных колебаний пучка посредством удара инфлектора ВЭПП-4 независимо в вертикальном и горизонтальном направлениях;
- 2) раскачка пучка деполяризатором на частотах, близких к бетатронным.

1.1. Выявление неверно работающих пикапов

В первых экспериментальных заходах в поведении вычисленных инвариантов Q_{12} , Q_{34} и, соответственно, в матричных элементах R_{12} , R_{34} , R_{14} , R_{32} наблюдались значительные отличия реальной структуры от базовой (рис. 3), в качестве которой была выбрана структура ВЭПП-4М в формате MADX.

Выбросы в поведении инвариантов указывают отличия реальной структуры от той, которая взята в качестве базовой. Элементы транспортной матрицы R_{12} , R_{34} на рис. 4 в реальной структуре ВЭПП-4М также показывают сильное отличие реальной структуры от модели в южном полукольце.

В результате обработки экспериментальных данных и проверки всех выдвинутых гипотез о причинах наличия подобных различий идеальной и реальной структур ускорителя было определено, что данные неверно считываются с пикапов.

Было показано, что пикапы в кольце ВЭПП-4М начинают запись пооборотных измерений с разных оборотов: часть начинают работать с 8-го оборота, а часть – с 9-го. Тем не менее, вычисление с учетом этих особенностей показало наличие двух пикапов, первые обороты на которых «скачут» от измерения к измерению. Такое их поведение отражалось на поведении инвариантов и матричных элементов. Таким образом, для более верной идентификации и получения верного результата обнаруженные пикапы были выброшены из рассмотрения.

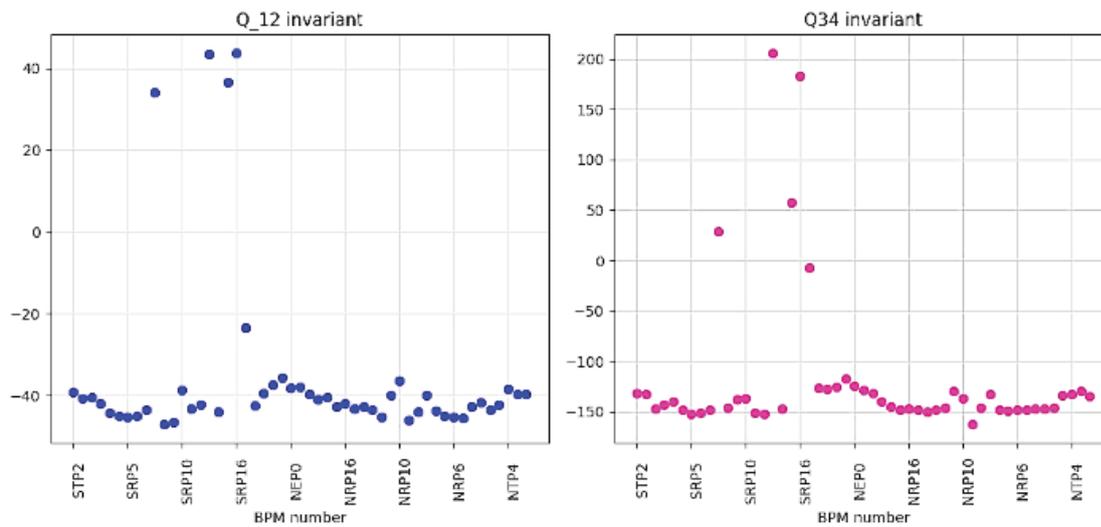


Рис. 3. Поведение инвариантов Q_{12} и Q_{34} в реальной структуре при неверном считывании данных с пикапов
 Fig. 3. The Q_{12} and Q_{34} invariance in the real structure with incorrect data from beam position monitors

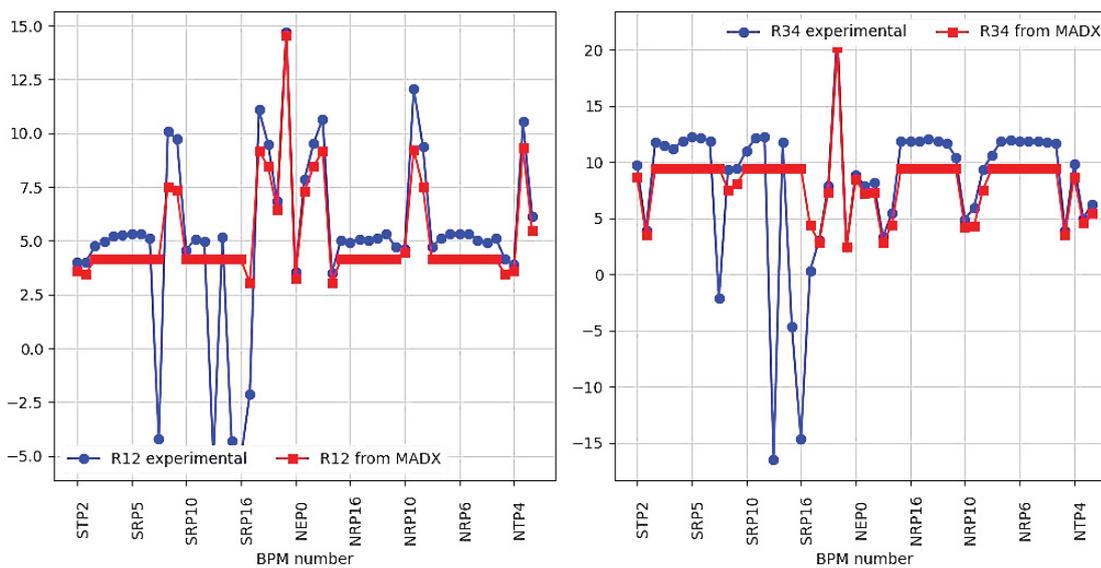


Рис. 4. Элементы транспортной матрицы R_{12} и R_{34} при неверном считывании данных с пикапов: синяя линия – результат, вычисленный из поворотных данных; красная – расчет MADX
 Fig. 4. Elements R_{12} and R_{34} of transport matrix in case of incorrect data from beam position monitors. The blue line is the result calculated from the experimental turn-by-turn data; red line is the MADX model calculation

Инварианты, рассчитанные из обработанных данных с исключенными из рассмотрения пикапов, приведены на рис. 5.

Видно, что после исключения из рассмотрения пикапов с нестабильным первым оборотом ушли выбросы в инвариантах и матричных элементах.

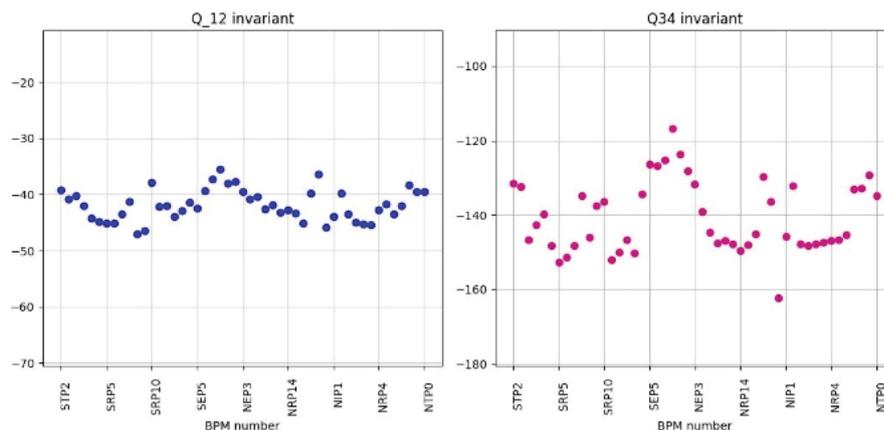


Рис. 5. Поведение инвариантов Q_{12} и Q_{34} в кольце ВЭПП-4М при верном считывании данных с пикапов. По горизонтали – номера и имена пикапов

Fig. 5. The Q_{12} and Q_{34} invariance in the VEPP-4M storage ring with correct data from beam position monitors. The horizontal axis is names and numbers of beam position monitors

Таким образом, метод РСА очень чувствителен: с его помощью можно обнаружить нестабильно срабатывающие пикапы, что не позволяют сделать другие алгоритмы коррекции, подобные LOCO. Также отметим, что данный результат важен для обеспечения верности работы любых систем, для которых важен учет последовательного азимутального распределения колебаний пучка.

1.2. Обнаружение пульсирующего источника питания

При обработке экспериментальных данных было обнаружено: если выбирать в качестве модели для расчета реальную структуру ВЭПП-4М без возмущения, а потом остальные измерения в этом же режиме без возмущения рассчитывать относительно выбранной базы, то в некоторых данных наблюдается выброс в инвариантах между пикапами SEP3 – SEP0 (рис. 6).

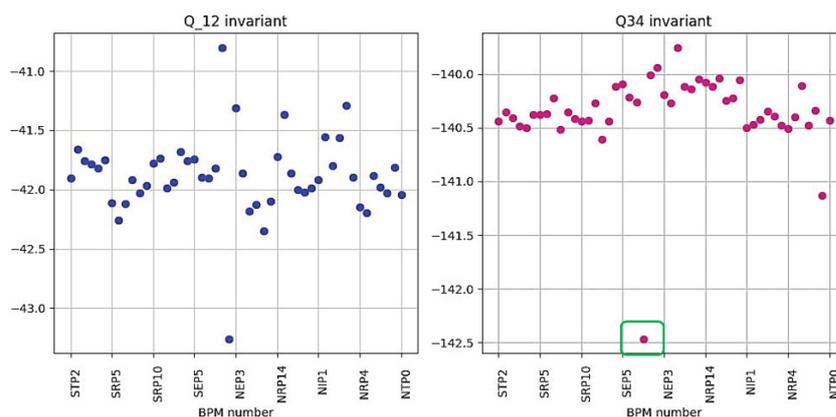


Рис. 6. Инварианты Q_{12} и Q_{34} в измерениях без введенного возмущения, в качестве базы также выбрана структура ВЭПП-4М. Зеленой рамкой отмечен выброс между пикапами SEP3 – SEP0, периодически возникающий в измерениях

Fig. 6. The Q_{12} and Q_{34} invariance in no-disturbance measurements; in these experiments the real VEPP-4M structure is the basic structure. The green frame marks the outlier between SEP3 – SEP0 beam position monitors, which periodically appears in the measurements

Выброс (точка в зеленой рамке на рис. 6) в распределении по кольцу ВЭПП-4М одной из характеристик колебаний, величина которой в идеальном случае не зависит от точки наблюдения (инварианты Q_{12} и Q_{34}), от измерения к измерению мог то появляться, то исчезать. Такое «мерцание» можно объяснить очень низкой частотой обнаруженных пульсаций в источнике питания магнитной линзы, на местоположение которой указало данное измерение (порядка несколько Гц). Само измерение занимает несколько миллисекунд. Проведенные примерно в то же время независимые измерения пульсаций источников питания показали пульсации источника линзы EL2, расположенной в данном месте на частоте порядка 1 Гц.

1.3. Эксперименты по обнаружению искусственно введенного возмущения в структуре ВЭПП-4М

В элемент SEOQ задавалось дополнительное значение тока +2.2 А. Введение тока в SEOQ значительно изменило величину расщепления частот $\Delta\nu$: исходное – 0,0035, с возмущением – 0,021. Цель экспериментов – увидеть с помощью метода РСА введенное возмущение; ожидается, что в инвариантах Q_{12} и Q_{34} будет наблюдаться выброс между пикапами SEP0 – NEP0, между которыми расположен элемент SEOQ.

В качестве базовой структуры выбиралась реальная структура коллайдера ВЭПП-4М в режиме с минимальным расщеплением частот.

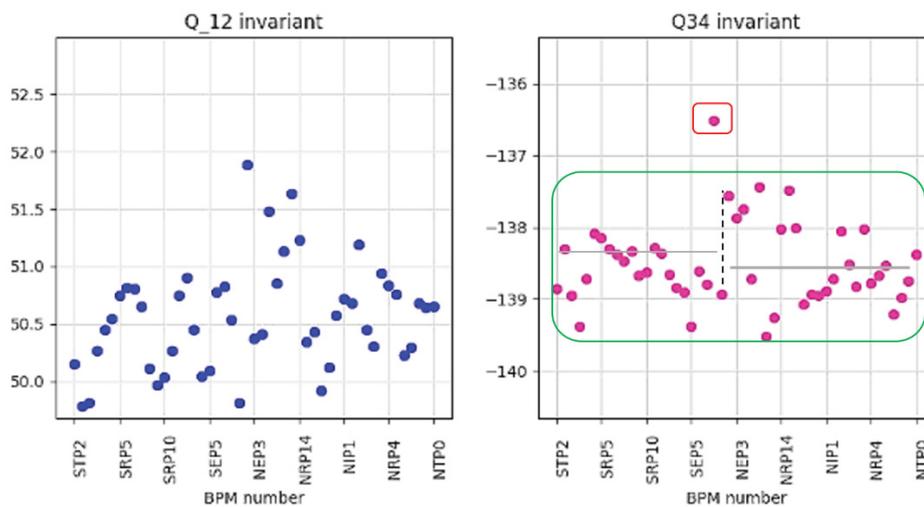


Рис. 7. Поведение инвариантов Q_{12} и Q_{34} с введенным возмущением в элементе SEOQ. Красной рамкой отмечена точка, которая соответствует введенному возмущению; зеленой – общий уровень точек инварианта; черная линия отмечает «скачок» в поведении инварианта
 Fig. 7. The Q_{12} and Q_{34} invariance in experiment with perturbation in the SEOQ element. The red frame marks the point that corresponds to the introduced disturbance. The green frame marks the general level of the invariant points. The black line marks a “jump” in the invariant

На рис. 7 изображены инварианты Q_{12} и Q_{34} в ВЭПП-4М с введенным возмущением в элементе SEOQ. Из графиков ясно видно выбивающуюся из общего уровня точку между пикапами SEP3 – SEP0, которая как раз находится в месте расположения введенного возмущения. Также необходимо отметить факт присутствия небольшой ступеньки: скачка в поведении инвариантов в том месте, где расположено возмущение. Наличие небольшой ступеньки становится очевидным, если отметить на графиках среднее значение инварианта по кольцу, как показано серой линией на рис. 7.

Стоит подчеркнуть, что выброс наблюдается только в инварианте Q_{34} , тогда как в инварианте Q_{12} явного пика не наблюдается. Такое поведение, вероятно, объясняется большим радиальным размером пучка, что может приводить к неточности результатов метода РСА из-за снижения чувствительности пикапов в определении центра тяжести пучка.

Значительные отличия наблюдаются в матричных элементах R_{14} и R_{32} , изображенных на рис. 8, которые возникают при наличии ненулевой связи в кольце ускорителя. Видно, что элементы связи в кольце ВЭПП-4М практически повторяют друг друга за исключением места между пикапами SEP3 – SEP0 в элементе R_{14} . Указанный выброс в матричном элементе R_{14} можно трактовать как результат, соответствующий введенному возмущению, согласно модельным вычислениям, в матричных элементах, отвечающих связи, в месте расположения возмущения, как показано на рис. 9.

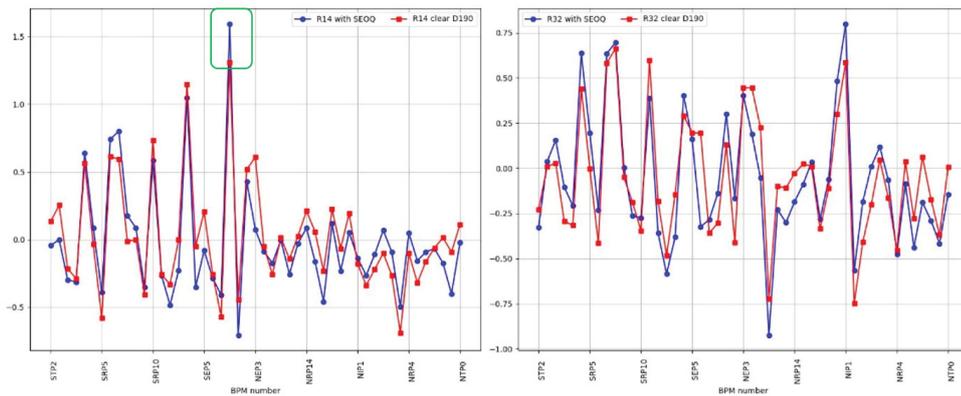


Рис. 8. Матричные элементы R_{14} (слева) и R_{32} (справа). Красная линия – базовый режим; синяя – режим с возмущением в SEOQ; зеленой рамкой выделена точка, которая вполне может соответствовать введенному возмущению в элементе SEOQ

Fig. 8. Matrix elements R_{14} (left plot) and R_{32} (right plot). The red line is the basic real structure; blue line is the real structure with disturbance in SEOQ. The green frame highlights the point that may well correspond to the introduced disturbance in the SEOQ element

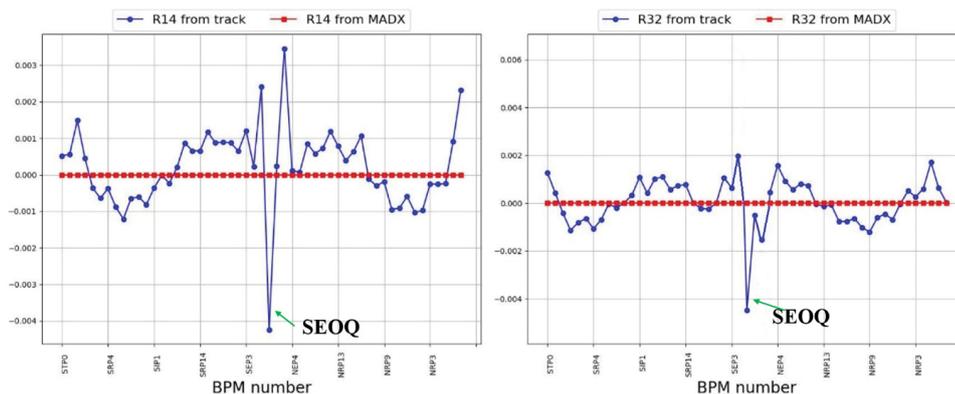


Рис. 9. Матричные элементы R_{14} (слева) и R_{32} (справа) в модельном расчете с возмущением в линзе SEOQ. Красная линия – идеальная структура; синяя – структура с возмущением в SEOQ; стрелкой указано расположение SEOQ, которое совпадает с выбросом в матричных элементах

Fig. 9. Matrix elements R_{14} (left plot) and R_{32} (right plot) in the model calculation with perturbation in the SEOQ element. The red line is the ideal structure; blue line is the structure with disturbance in SEOQ. The arrow indicates the location of SEOQ, which matches with the outlier in the matrix elements

Однако, тем не менее, введенное возмущение мало влияет на изменение матричных элементов в реальном эксперименте. Подобное «замазывание» эффекта, вероятнее всего, можно связать с наличием вклада от других скью-квадрупольных корректоров в кольце ускорителя: т. е., по-видимому, матричные элементы R_{14} и R_{32} отражают интерференцию амплитуды и фазы коэффициента связи.

Также необходимо отметить, что в теоретической структуре ВЭПП-4М не заложены поля детектора КЕДР и компенсирующих соленоидов. Если локальная компенсация не полная, а интегральный эффект связи подавлен скью-квадруполями, то нельзя исключить полученный в эксперименте результат. Добавим, что компенсацию антисолоноидами с ошибкой около 1 % удавалось достигать только с помощью прецизионного измерения сдвига спиновой частоты методом резонансной деполяризации [3].

Эксперименты по исследованию применимости метода РСА проводились в двух вариантах возбуждения колебаний: удар инфлектора ВЭПП-4М и резонансная раскачка деполяризатором, об этом и в том числе о главных отличиях двух методов уже говорилось выше. Мы не будем подробно описывать эксперимент при раскачке колебаний пластинами деполяризатора, только отметим, что в такой вариации эксперимента по применению РСА полученные результаты совпадали с полученными ранее: в поведении инвариантов Q_{12} и Q_{34} наблюдается ступенька в месте расположения возмущения, что согласуется с теоретическими предсказаниями.

В конце раздела, однако, оговорим, что на данном этапе при расчете не учитывались вклады от нелинейных элементов магнитной структуры, т. е. инварианты рассчитывались без учета вклада от секступолей и мультиполей более высокого порядка. Но следует отметить, что даже с такими оговорками метод РСА показывает хорошее согласие с теоретическими предсказаниями.

2. Определение интегральных параметров связи из собственных мод

2.1. Теоретические выкладки

В [4] был предложен метод количественной диагностики линейного разностного резонанса связи колебаний в электрон-позитронном накопителе по углам поворота эллиптических нормальных мод, возбуждаемых резонансной раскачкой. В нем использовано решение [6; 7] уравнений бетатронных колебаний вблизи линейного разностного резонанса $Q_x - Q_y = p + \Delta$.

При резонансной раскачке бетатронных колебаний с помощью пластин деполяризатора возбуждаются собственные моды колебаний, поэтому можно изобразить эллипсы собственных мод напрямую. Эта информация позволяет определить параметры связи поперечных колебаний и поэтому важна для решения задачи минимизации вертикального размера пучка в том числе в строящемся источнике СИ СКИФ.

Такие эллипсы можно экспериментально наблюдать как в случае малой связи ($\Delta\nu_{\text{связи}} = 0,0035$), так и в случае большой связи ($\Delta\nu_{\text{связи}} = 0,021$ при введении скью-квадрупольного градиента в элемент SEOQ). Результаты эксперимента по наблюдению раскачанных собственных мод поперечных колебаний на нескольких азимутах коллайдера ВЭПП-4М в двух случаях представлены на рис. 10.

Центр масс пучка каждой из двух мод от оборота к обороту описывает фигуру, близкую к эллипсу, в плоскости, поперечной к оси движения. Наклоны осей эллипсов и их «округлость» тем более выражены, чем сильнее связь вертикальных и горизонтальных колебаний. Разброс точек может быть вызван изменением амплитуды из-за неустойчивости собственных частот, а также влиянием нелинейности ведущего поля.

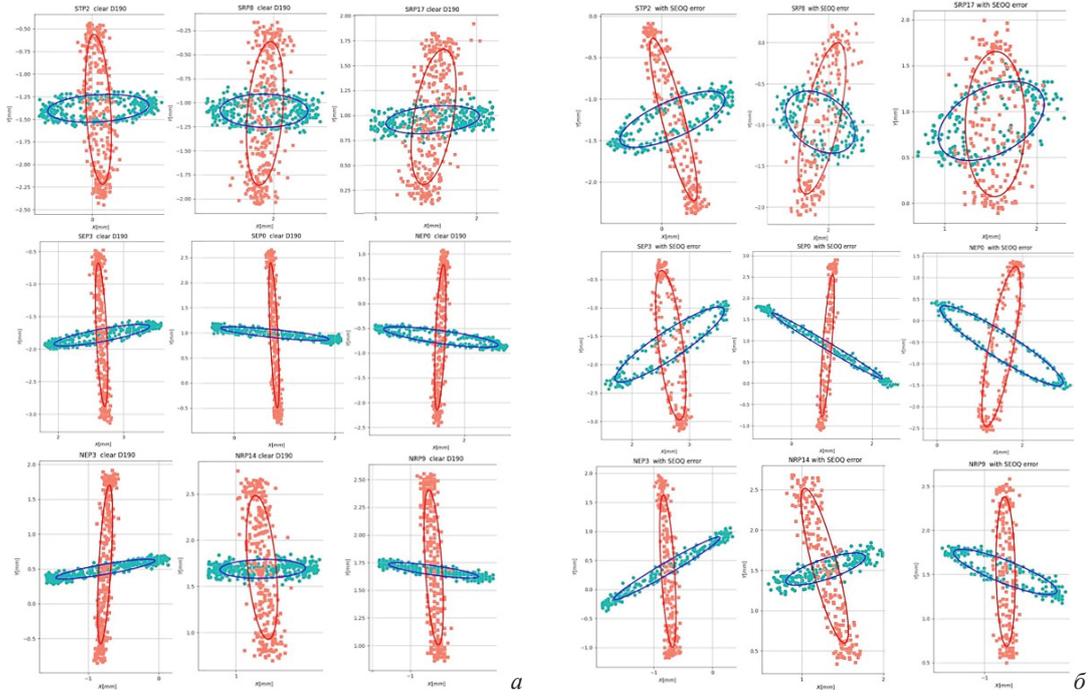


Рис. 10. Раскачанные собственные моды на пикапах: *a* – в режиме без возмущения (красный график – вертикальная мода, зеленый – горизонтальная); *б* – в режиме со скью-квадрольным возмущением в SEOQ (красный график – вертикальная мода, зеленый – горизонтальная)
Fig. 10. Swing of eigen mods on beam position monitors: *a* – in no-disturbance experiment (the red graph is the vertical mode; the green graph is the horizontal mode); *б* – in experiment with skew-quadrupole error (the red graph is the vertical mode; the green graph is the horizontal mode)

Используя углы поворота нормальных мод, можно определить коэффициент связи. Пусть наблюдение раскачанных мод дало значения углов их наклона Ψ_+ и Ψ_- , а также значения частот нормальных мод Q_1 и Q_2 , нецелые части которых составляют ν_1 и ν_2 . Введем обозначения:

$$\varepsilon = \frac{\tan 2\Psi_+}{\tan 2\Psi_-} \text{ и } F = \frac{\beta_y}{\beta_x}, \quad (5)$$

здесь функции $\beta_{x,y}$ соответствуют азимуту, на котором происходит наблюдение поперечного профиля пучка. Используя введенные обозначения (5), получаем выражение для невозмущенной разности частот по данным наблюдения профиля пучка:

$$\Delta = (\nu_1 - \nu_2) \frac{(1+\varepsilon)(1-F)}{(1-\varepsilon)(1+F)}. \quad (6)$$

После нахождения Δ определяем модуль коэффициента связи:

$$k = \frac{1}{2} \sqrt{(\nu_1 - \nu_2)^2 - \Delta^2}. \quad (7)$$

Более того, также имеется возможность определять и фазу комплексного параметра бетатронной связи по величине угла наклона каждой из мод по выражениям:

$$\delta_k = \chi_x - \chi_y - \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{4k\sqrt{F}} [(1-F)(\nu_1 - \nu_2) + (1+F)\Delta] \tan 2\Psi_+ \right\} \quad (8)$$

и

$$\delta_k = \chi_x - \chi_y - \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{4k\sqrt{F}} [(1-F)(\nu_2 - \nu_1) + (1+F)\Delta] \tan 2\Psi_- \right\}, \quad (9)$$

здесь $\chi_{x,y}$ – фаза функции Флоке [5] при азимуте, на котором происходит наблюдение поперечного профиля пучка. Так как (8) и (9) в идеальном случае должны давать одно и то же значение, их сравнение в эксперименте будет проверкой степени применимости методики в целом.

2.2. Эксперимент по определению интегральных параметров связи

Как уже упоминалось, в экспериментах по исследованию метода РСА на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М возбуждение колебаний производилось посредством раскочки деполяризатором. Напомним, что для проведения соответствующих экспериментов создавался режим работы с минимальным расщеплением бетатронных частот ($Q_x = 0,54, Q_y = 0,58$), затем в созданном режиме задавалось дополнительное значение тока +2,2 А в элемент SEOQ ($Q_x = 0,537, Q_y = 0,583$). Это, в свою очередь, привело к возбуждению сильной бетатронной связи.

Значения параметров связи, определенные из углов наклона собственных мод
 Values of coupling parameters determined from the inclination angles of eigen modes

Параметр	Режим без возмущения	Режим с возмущением в SEOQ
Измеренный $\Delta v_{\text{связи}}$	0,0035	0,021
Рассчитанный $\Delta v_{\text{связи}}$	$0,009 \pm 0,038$ для доверительного интервала $P = 95 \%$	$0,022 \pm 0,005$ для доверительного интервала $P = 95 \%$

В эксперименте модуль комплексного коэффициента связи k измерялся путем сведения бетатронных частот. Затем по формуле (7) с учетом выражений (5) и (6) были рассчитаны значения модулей коэффициента связи k , усредненный по всем пикапам. Полученные значения сравнивались с измеренными в полученных режимах работы. Результаты приведены в таблице. Как видно, наблюдается несоответствие для малой величины бетатронной связи, что можно связать с ошибками в ориентации осей пикапов на некоторый угол $\frac{\alpha}{2}$ (в самом простом приближении возможно предположить, что оси пикапов по горизонтали и вертикали смещены на один и тот же угол), так как эта ошибка коррелируется с вычисленной ошибкой в модуле связи из неточности углов поворота эллипсов; что вносит ошибку в определение параметра ε как

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = \alpha \left(\frac{\tan 2\psi_- - \tan 2\psi_+}{\tan 2\psi_- \tan 2\psi_+} \right). \tag{10}$$

Из этого следует, что даже малые ошибки в определении угла наклона мод дают большие отклонения в определении Δ и, следовательно, параметра k .

По предварительным оценкам, модуль ошибки угловой выставки всех пикапов лежат в диапазоне: $0^\circ < \left| \frac{\alpha}{2} \right| < 12^\circ$. Таким образом, предварительно имеется верхняя граница на величину выставки угла пикапов. Тем не менее для последующего развития метода и его уточнения необходим более подробный анализ расположения электродов пикапов и их геометрии (некоторые пикапы в полукольцах имеют непрямую геометрию расположения электродов) [8] и тщательное вычисление ошибок углов наклона эллипсов собственных мод.

Заключение

В первых экспериментах по исследованию метода РСА искусственно поочередно вводились возмущения в элементы структуры в двух вариантах экспериментов: возбуждение бета-

тронных колебаний посредством удара инфлектора и раскачки пластинами деполяризатора. Отличие двух вариантов возбуждения колебаний состоит в том, что в первом ограничено количество оборотов из-за эффекта декогеренции, в то время как во втором варианте такой эффект отсутствует, что позволяет в расчете использовать максимальное количество записываемых оборотов.

Посредством используемого метода было определено, что в ВЭПП-4М пикапы начинают запись пооборотных измерений с разных оборотов: часть пишет с девятого оборота, а часть – с восьмого. Также были определены два нестабильно работающих пикапа: номер первого оборота, на которых скачет от измерения к измерению. Указанный результат важен для обеспечения корректной работы любых систем, для которых необходим учет последовательного азимутального распределения колебаний пучка. По результатам экспериментов показано, что реальная структура коллайдера ВЭПП-4М находится в неплохом согласии с моделью.

Также в результате экспериментов удалось наблюдать введенные возмущения в выбранных элементах по распределению вдоль кольца ВЭПП-4М одной из характеристик колебаний, величина которой в идеальном случае не зависит от точки наблюдения (инварианты Q_{12} и Q_{34}). Вместе с тем получилось обнаружить низкочастотные пульсации (порядка нескольких Гц) в источнике питания магнитной линзы, что также было подтверждено непосредственным измерением пульсаций источника линзы, проводимыми в то же время.

Помимо того, показано, что, измерив с помощью резонансной раскачки посредством пластин деполяризатора частоты и углы наклона нормальных мод по СИ-образу пучка, а также используя расчетные данные о невозмущенных значениях структурных функций, можно определить реальную и мнимую часть комплексного коэффициента связи.

Список литературы

1. **Chun-xi Wang** Untangling mixed modes in model-independent analysis of beam dynamics in circular accelerators // *Phys. Rev. Accel. Beams*. 2004. Vol. 7. P. 114001. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.7.114001>
2. **Yan Y. T., Cai Y., Irwin J., and Sullivan M.** Linear Optics Verification for PEP-II using Model-Independent Analysis // Presented at the 23rd Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on High Luminosity e+e- Colliders, 10/15/2001-10/19/2001, Ithaca, NY, SLAC-PUB-9368.
3. **Nikitin S. A.** Influence of errors in KEDR detector field compensation on the spin tune shift and the beam polarization lifetime in VEPP-4M collider at energy of tau lepton production threshold // RuPAC. Новосибирск, 2006.
4. **Никитин С. А.** Диагностика линейной связи колебаний и схема ее компенсации на ВЭПП-4 // Работы молодых специалистов, выполненных в ИЯФ СО АН СССР в 1978–1979 годах. Новосибирск, 1979.
5. **Коломенский А. А., Лебедев А. Н.** Теория циклических ускорителей. М.: Физматлит, 1962.
6. **Bryant P. J., et al.** Methods for measuring the complex coupling coefficient for the second order difference resonance $Q_h - Q_v = 0$ // CERN ISR-MA/ 75-42.
7. **Guignard G.** The general theory of all sum and difference resonances in a three-dimensional magnetic field in a synchrotron // CERN 76-06.
8. **Bekhtenev E., Karpov G., Leshenok D., Nikitin S., Plotnikova O.** Observation of Saw-Tooth effect orbit at VEPP-4M collider // IPAC'18, 29 апреля – 4 мая, 2018, Ванкувер, Канада, Slides FRXGBD4. DOI: <https://DOI.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-FRXGBD4>

References

1. **Chun-xi Wang** Untangling mixed modes in model-independent analysis of beam dynamics in circular accelerators. *Phys. Rev. Accel. Beams*, 2004, vol. 7, p. 114001. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.7.114001>
2. **Yan Y. T., Cai Y., Irwin J., and Sullivan M.** Linear Optics Verification for PEP-II using Model-Independent Analysis. *Presented at the 23rd Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on High Luminosity e+e- Colliders, 10/15/2001-10/19/2001, Ithaca, NY, SLAC-PUB-9368.*
3. **Nikitin S. A.** Influence of errors in KEDR detector field compensation on the spin tune shift and the beam polarization lifetime in VEPP-4M collider at energy of tau lepton production threshold. *Presented of RuPAC September 10–14, 2006, Novosibirsk, Russia.*
4. **Nikitin S. A.** Diagnostics of linear coupling of oscillations and the scheme of its compensation on VEPP-4. In: *Works of young specialists, performed in INPP SB AS USSR in 1978-1979, INPP SB AS USSR.* Novosibirsk, 1979 (in Russ.)
5. **Kolomenskiy A. A., Lebedev A. N.** Theory of cyclic accelerations. Moscow, Phisimatlit, 1962.
6. **Bryant P. J. et al.** Methods for measuring the complex coupling coefficient for the second order difference resonance $Q_h - Q_v = 0$. *CERN ISR-MA/ 75-42.*
7. **Guignard G.** The general theory of all sum and difference resonances in a three-dimensional magnetic field in a synchrotron. *CERN 76-06.*
8. **Bekhtenev E., Karpov G., Leshenok D., Nikitin S., Plotnikova O.** Observation of Saw-Tooth effect orbit at VEPP-4M collider. *The 9th International Particle Accelerator Conference, April 29 – May 4, 2018, Vancouver, Canada, Slides FRXGBD4.* DOI: <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-FRXGBD4>

Информация об авторах

Дорохова Дарья Вячеславовна, младший научный сотрудник

Дорохов Виктор Леонидович, кандидат технических наук

Никитин Сергей Алексеевич, доктор физико-математических наук

Information about the Authors

Daria V. Dorokhova, Junior Researcher

Viktor L. Dorokhov, Candidate of Technical Sciences

Sergei A. Nikitin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

*Статья поступила в редакцию 10.10.2023;
одобрена после рецензирования 13.11.2023; принята к публикации 16.11.2023*

*The article was submitted 10.10.2023;
approved after reviewing 13.11.2023; accepted for publication on 16.11.2023*