

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

УСТОЙЧИВОСТЬ МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ ОСИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПУЧКА ПОСРЕДСТВОМ СПИН-НАВИГАТОРНЫХ СОЛЕНОИДОВ В СПИН-ПРОЗРАЧНОМ КОЛЬЦЕ

© 2022 г. А. А. Мельников^а, *, А. Е. Аксентьев^а, Ю. В. Сеничев^а

^аИнститут ядерных исследований РАН, проспект 60-летия Октября 7а, Москва, 117312 Россия

*E-mail: alexei.a.melnikov@gmail.com

Поступила в редакцию 19.07.2021 г.

После доработки 09.08.2021 г.

Принята к публикации 09.08.2021 г.

Исследовалась устойчивость метода управления ориентацией оси поляризации в заданной точке ускорителя посредством спин-навигаторных соленоидов к ошибкам установки поворотных магнитов кольца. Для этого было оценено изменение компонент инвариантной оси прецессии спина, вызванное “неидеальностью” структуры накопительного кольца, работающего в спин-прозрачном режиме. Изучалось поведение вектора поляризации в данной структуре; были сделаны выводы о возможности задания направления поляризации посредством “навигаторных” соленоидов в области детектора.

Ключевые слова: спин-прозрачный режим, управление поляризацией, спин-орбитальная динамика

DOI: 10.56304/S2079562922010298

ВВЕДЕНИЕ

В предполагаемом методе управления поляризацией пучка в спин-прозрачном (“Spin Transparency,” далее ST-) режиме частота прецессии спина пучка устанавливается близкой к нулю за счет использования “сибирских змеек”. Поскольку в ST-режиме частицы находятся вблизи целочисленного резонанса, для стабилизации требуемого направления поляризации в детекторе используются соленоиды–“навигаторы” со слабыми полями (рис. 1) [1]. Они состоят из соленоидов с продольным полем и магнитов с радиальным полем, при этом спин-векторы частиц пучка вращаются на малые углы. С помощью данного метода можно получить любое направление оси поляризации в любой точке ускорителя и для любой энергии.

Данный метод управления поляризацией крайне чувствителен к ошибкам, поэтому необходимо

показать его устойчивость в ходе численного эксперимента. Стабилизирующее влияние навигаторных соленоидов в области целочисленного резонанса должно превосходить влияние полей от неточной юстировки магнитов. В представленной работе была исследована спин-орбитальная динамика пучка дейтронов в структуре коллайдера NICA, и сделаны выводы касательно устойчивости метода управления ориентацией оси поляризации в заданной точке ускорителя к ошибкам установки поворотных магнитов кольца.

1. МЕТОД “SPIN-KICK”

При наклонах поворотных магнитов вокруг оптической оси необходимо компенсировать вертикальную компоненту ведущего поля для сохранения замкнутой орбиты. Последняя также не будет плоской при наличии радиальных компо-

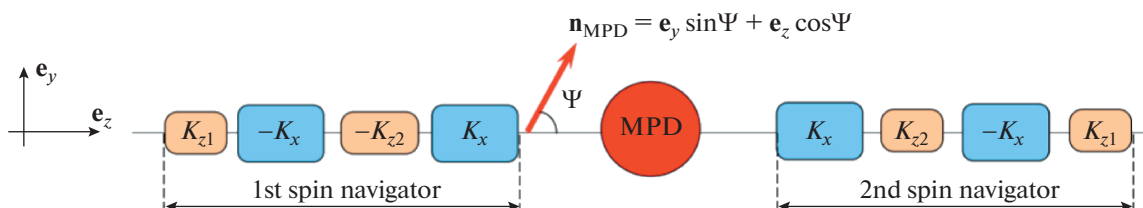


Рис. 1. Схема расположения “навигаторных” соленоидов в промежутке MPD-детектора [1].

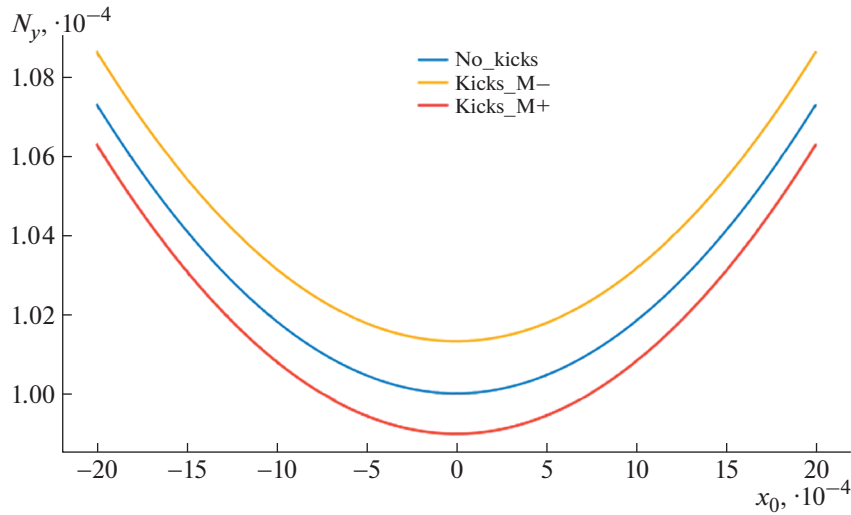


Рис. 2. Частота прецессии спина в зависимости от поперечной координаты частиц в пучке для идеальной структуры и при поворотах магнитов вокруг продольной оси на углы $\varphi \sim N(\pm 10^{-3}, 10^{-4})$.

нент поля. Поэтому при моделировании было использовано упрощающее предположение, что орбитальная динамика не изменяется, а трансфер-матрица спинового движения поворачивается для каждого элемента в зависимости от угла ошибки юстировки магнита. Все результаты не теряют общности при данном предположении в рамках оценки устойчивости управления поляризацией.

Спиновая динамика частиц в лабораторной системе определяется уравнением Т-БМТ:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{S}}{dt} &= \mathbf{S}(\mathbf{\Omega}_{\text{MDM}} + \mathbf{\Omega}_{\text{EDM}}) \\ \mathbf{\Omega}_{\text{MDM}} &= \frac{q}{m\gamma} \left[(\gamma G + 1) \mathbf{B}_{\perp} + (1 + G) \mathbf{B}_{\parallel} - \right. \\ &\quad \left. - \gamma \left(G + \frac{1}{\gamma + 1} \right) \frac{\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{E}}{c} \right] \\ \mathbf{\Omega}_{\text{EDM}} &= \frac{q\eta}{2m} \left[\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{B} + \frac{\mathbf{E}}{c} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Где $\mathbf{\Omega}_{\text{MDM}}$ и $\mathbf{\Omega}_{\text{EDM}}$ — частоты прецессии спин-вектора $\mathbf{S}$, вызванные наличием магнитного и электрического дипольного момента частиц — MDM и EDM соответственно. G — аномальный магнитный момент, γ — Лоренц фактор. $\mathbf{B} = \mathbf{B}_{\parallel} + \mathbf{B}_{\perp}$, $\mathbf{B}_{\parallel} = \frac{\mathbf{v}\mathbf{B}}{v}$.

В случае магнитной структуры ($E = 0$) и с учетом малости $\mathbf{\Omega}_{\text{EDM}}$ по сравнению с $\mathbf{\Omega}_{\text{MDM}}$, в собственной системе верно:

$$\mathbf{\Omega}_{\text{MDM}} = \frac{q}{m\gamma} [\gamma G \mathbf{B}_{\perp} + (1 + G) \mathbf{B}_{\parallel}]. \quad (2)$$

В случае наклонов поворотных дипольных магнитов вдоль оптической оси ускорителя $B_{\parallel} = 0$; в линейном приближении вертикальная частота прецессии не изменится, появляется радиальная составляющая $\Delta\mathbf{\Omega}_{\text{MDM}}$. Что эквивалентно вращению спин-вектора вокруг радиальной оси на угол ψ :

$$\psi = \frac{\alpha R}{v} \Delta\mathbf{\Omega}_{\text{MDM}} = \frac{\alpha R q G}{v m} B \sin(\varphi), \quad (3)$$

где α и R — угловой размер и радиус траектории частицы в магните, B — ведущее поле, φ — случайный угол поворота вокруг оптической оси.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПИН-ОРБИТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ

Для численного моделирования использовалась программная среда COSY INFINITY, основанная на методах дифференциальной алгебры для оптимизации вычисления трансфер-матриц. Последние вычисляются независимо для спинового и орбитального движения.

В расчетной модели инжектировался пучок из 100 дейтронов при $\gamma = 1.14$. Частицы распределены равномерно от -2 до 2 мм по радиальному направлению. Поляризация при инжекции продольная.

Дипольные магниты поворачивались на углы $\varphi \sim N(0, 10^{-4})$. Среднеквадратичная ошибка угла поворота $\sigma(\varphi)$ выражается через погрешность высоты ножек магнита $\sigma(h)$ и длину магнита L : $\sigma(\varphi) = \sigma(h)/L$. При $\sigma(h) \sim 100$ мкм и $L \sim 1$ м,

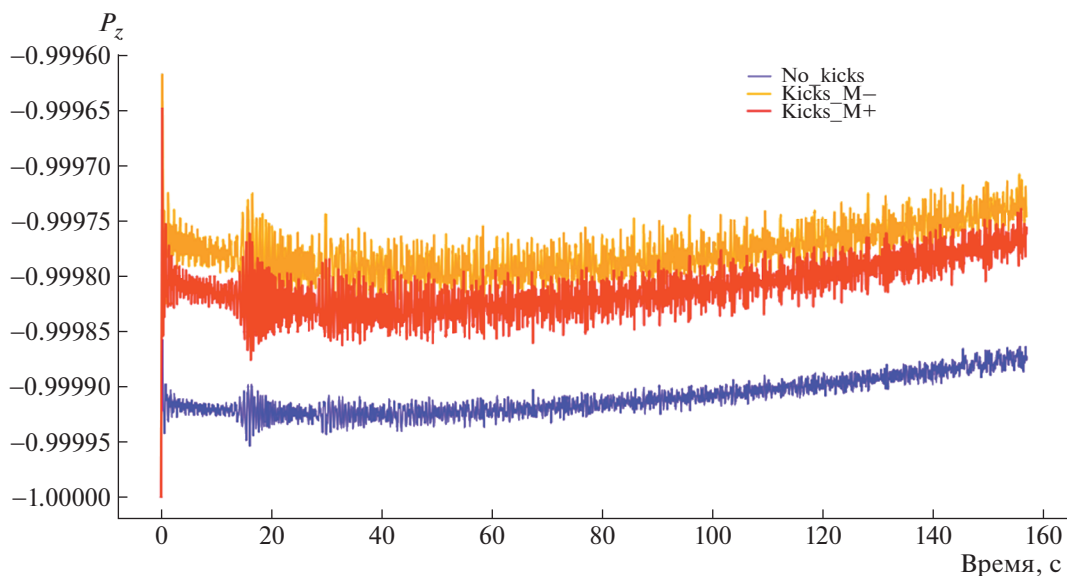


Рис. 3. Зависимость продольной поляризации пучка от времени в точке детектора для идеальной структуры и при поворотах магнитов вокруг продольной оси на углы $\varphi \sim N(\pm 10^{-3}, 10^{-4})$.

$\sigma(\varphi) \sim 10^{-4}$. При этом относительное изменение частоты прецессии спина и продольной поляризации $\Delta v/v \sim 10^{-3}$, $\Delta P/P \sim 10^{-5}$. Эти величины обусловлены ненулевой выборочной реализацией математического ожидания и, как следствие, появлением ненулевой Y проекции инвариантной оси N_y в области детектора. Последняя возникает как результат преобразования вертикаль-

ной поляризации, возникшей от поворота магнита, змеечными соленоидами.

Было изучено влияние сдвига математического ожидания распределения углов поворота элементов на $\pm 10^{-3}$ рад. При этом $\Delta v/v \sim 10^{-2}$, $\Delta P/P \sim 10^{-4}$, $\Delta N_y \sim 10^{-2}$ (рис. 2, 3, 4).

На рис. 2 спин-тун равновесной частицы соответствует необходимому значению 10^{-4} , задава-

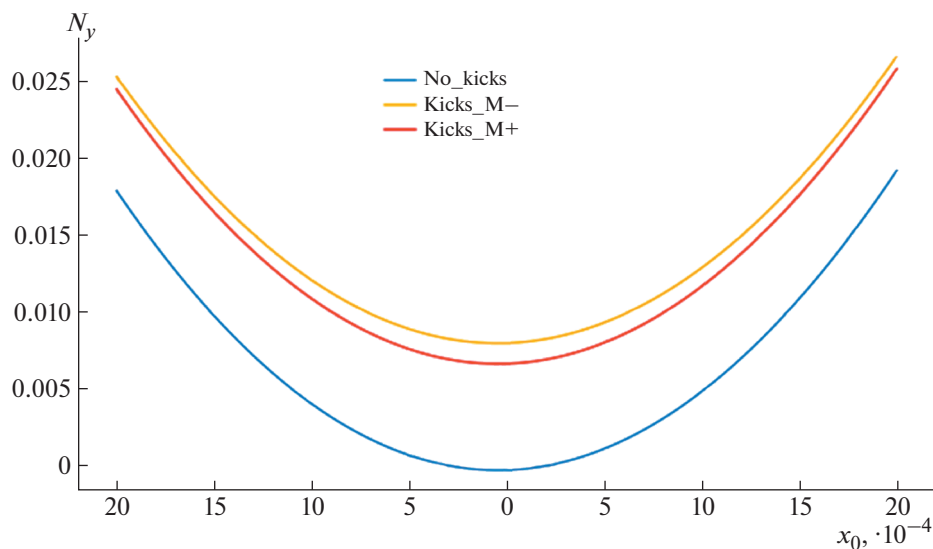


Рис. 4. Зависимость вертикальной компоненты инвариантной оси N_y в точке детектора от поперечной координаты частиц в пучке для идеальной структуры и при поворотах магнитов вокруг продольной оси на углы $\varphi \sim N(\pm 10^{-3}, 10^{-4})$.

емому навигаторными соленоидами для обеспечения стабильности управления поляризацией [1]. Параболическая зависимость спин-тюна от положения частицы в сгустке объясняется различием их длин орбит. Данный факт приводит к различным эффективным энергиям частиц в силу принципа автофазировки [2].

воротных магнитов, является появление вертикальной проекции инвариантной оси прецессии в точке детектора, что было показано в ходе численного эксперимента. Качественного изменения спиновой динамики не наблюдалось, что говорит о стабильности движения в окрестности нулевого спинового резонанса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была продемонстрирована принципиальная возможность контроля направления поляризации с помощью навигаторных соленоидов в структуре с ошибками юстировки элементов. Основным эффектом, возникающим от наклона по-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Kondratenko A.M., Kondratenko M.A., Filatov Y.N., Kovalenko A.D. et al. // Polarized Ions at NICA Complex. Project Description. Dubna, August 2018.
2. Senichev Y., Aksentev A., Ivanov A. and Valetov E. // arXiv:1711.06512v1. 2017.

Robustness of the Spin-Navigator Based Method for the Manipulation of the Beam Polarization Axis in a Spin-Transparent Storage Ring

A. A. Melnikov^{1, *}, A. E. Aksentyev¹, and Yu. V. Senichev¹

¹*Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

**e-mail: alexei.a.melnikov@gmail.com*

Received July 19, 2021; revised August 9, 2021; accepted August 9, 2021

Abstract—We have investigated the robustness of the spin-navigator based method for manipulating the beam polarization to bend magnet installation errors. Toward that end, variation of the invariant spin axis components along the beamline of an imperfect storage ring operating in the spin-transparent mode has been estimated. The beam polarization vector behavior in the given lattice has been investigated. Conclusions are made regarding the feasibility of using “spin navigator” solenoids for defining the beam polarization axis in the detector region.

Keywords: spin-transparent mode, polarization control, spin-orbit dynamics