

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАНАЛОВ BYPASS В УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ ПУЧКАМИ ПО ПОИСКУ ЭДМ

© 2024 г. С. Д. Колокольчиков^{a, b, *}, А. Е. Аксентьев^{a, b}, А. А. Мельников^{a, b, c},
Ю. В. Сеничев^{a, b}, В. П. Ладыгин^d, Е. М. Сыресин^d

^aИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^bМосковский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

^cИнститут теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

^dОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

*E-mail: sergey.bell13@gmail.com

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 22.06.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

Проведение экспериментов с поляризованными пучками по поиску электрического дипольного момента в ускорительном комплексе NICA подразумевает проектирование дополнительных отводных ByPass. Такие альтернативные каналы позволят использовать NICA в качестве накопительного кольца и собрать достаточно статистических данных.

Ключевые слова: магнитооптическая структура, отводные каналы ByPass, накопительное кольцо, электрический дипольный момент

DOI: 10.56304/S2079562924050257

ВВЕДЕНИЕ

Ионный коллайдер на базе Нуклотрона (NICA) – ускорительный комплекс, расположенный в г. Дубна, Россия. Главное кольцо в основном предназначено для экспериментов по столкновению тяжелых ионов при энергии 4.5 ГэВ для изучения свойств барионной материи, а также для столкновения поляризованных пучков протонов при энергии 13 ГэВ. Для этих целей на прямых участках устанавливаются соответствующие детекторы MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Polarized Detector), а также другие необходимые элементы на всем протяжении кольца [1].

В экспериментах по измерению электрического дипольного момента (ЭДМ) ключевым является обеспечение высокого показателя времени когерентности (SCT – Spin Coherence Time) порядка 1000 с. В течение такого времени когерентный поляризованный пучок удерживается на орбите. Для этого возможно использовать главное кольцо NICA в качестве накопителя, а не в режиме коллайдера. Поэтому, предлагается установить дополнительные отводные каналы ByPass. Таким образом, можно создать совершенно новую регулярную структуру с альтернативными прямыми секциями, параллельными имеющимся (рис. 1). Созда-

ние отводных каналов является большим преимуществом, не требующим значительной перестройки комплекса и затрат, при всем при этом, позволяющим задействовать NICA в различных экспериментах.

1. ПРЕДПОСЫЛКИ МОДЕРНИЗАЦИИ ГЛАВНОГО КОЛЬЦА NICA

Для измерения ЭДМ необходимо развить методы контроля спина. Эволюция спин-вектора описывается уравнениями T-BMT [2]:

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

Как видно из уравнений, определяющими факторами являются энергия эксперимента, а также сорт частиц.

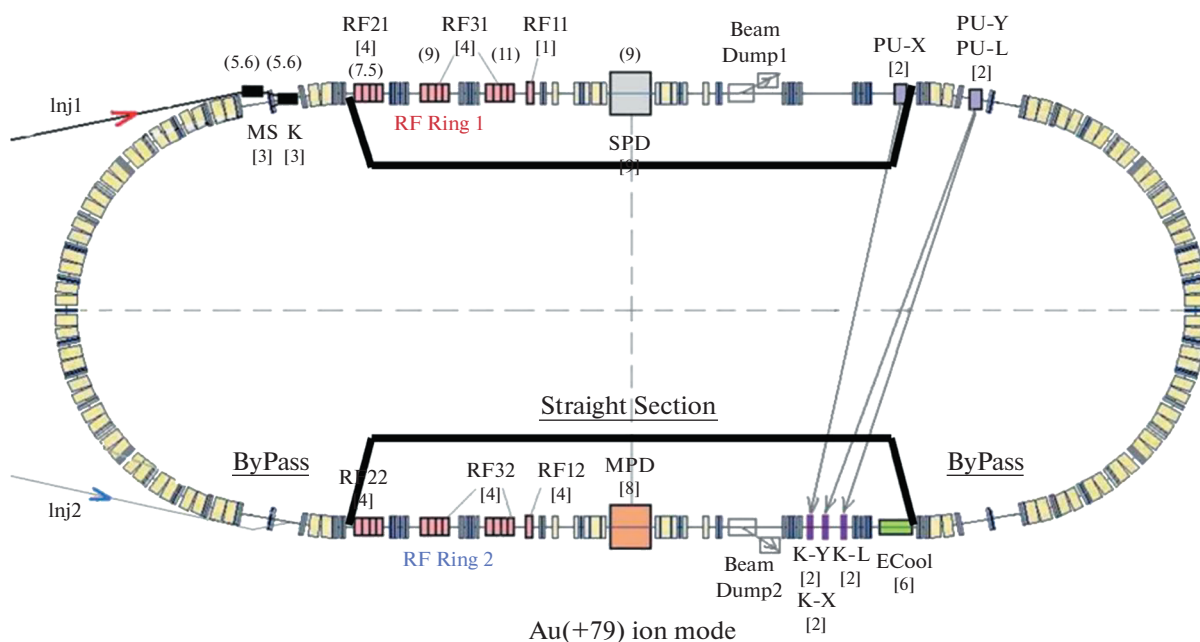


Рис. 1. Принципиальная схема обходных каналов ByPass в существующем комплексе NICA.

Эксперимент по исследованию ЭДМ не требует специального детектора, необходимо только наличие поляриметра. Сечение рассеяния на поляриметре с углеродной мишенью принимает наибольшее значение для протонов и дейтронов при энергии 270 МэВ [3]. Это требование устанавливает энергию эксперимента и определяется потребностями поляриметрии.

Кроме того, требуется обеспечить стабильность спинового движения. Прямым следствием приведенных уравнений является концепция “замороженного” спина [2]. Такой метод предполагает зануление члена, связанного с магнитным дипольным моментом (МДМ) в течение всего времени удержания пучка. Этот способ справедлив как для протонов, так и для дейтронов, но имеет существенные отличия. Аномалия магнитного момента дейтрона отрицательна $G_d = -0.1429$, и на порядок меньше по абсолютному значению, чем у протона $G_p = 1.7928$. Для протонов определенной энергии, называемой “магической”, МДМ член принимает нулевой значение в чисто электрическом кольце, без магнитных элементов. В то время как для дейтронов, из-за отрицательного значения магнитной аномалии, необходимая магнитооптическая структура предполагает использование поворотных дефлекторов как с электрическим, так и с магнитным полем. При этом вращение спина в магнитном поле компенсируется электрическим в одном элементе. Таким образом, вращение сохраняет свою ориентацию в течение всего времени вращения в кольце. Однако диполи в арках главного кольца NICA имеют только магнит-

ную составляющую поля. Таким образом, реализация концепции “замороженного спина” в кольце NICA невозможна без соответствующей значительной модернизации и реконструкции.

Для проведения эксперимента по поиску ЭДМ становится необходимым использовать альтернативный метод управления спином — концепция “квази-замороженного” спина [3]. В отличие от метода “замороженного” спина, спин больше не сохраняет ориентацию в течение всего периода обращения, а восстанавливает ориентацию на прямолинейном участке. Это возможно благодаря использованию на прямом участке элементов как с электрическим, так и с магнитным полями, которые называются фильтрами Вина. Поворот вращения в арке на определенный угол компенсируется соответствующим поворотом в фильтре Вина. Также можно выбрать поля, создающие нулевую силу Лоренца и не нарушающие орбиту. По этой причине поляриметр может устанавливаться на прямых участках. Таким образом, поляриметры, расположенные после фильтров Вина, будут обнаруживать ту же ориентацию спин-вектора, и для них она будет “замороженной”.

Есть две основные причины для модернизации магнитооптической структуры. Во-первых, нехватка места для фильтров Вина в уже существующих прямых секциях. Во-вторых, доступная магнитооптика предполагает использование кольца NICA в режиме коллайдера. Но эксперименты по поиску ЭДМ предполагают длительное удержание и удерживание поляризованного когерентного пучка в течение примерно $T_{SC} \approx 1000$ с.

Поэтому была предложена модернизация коллайдера NICA путем введения обходных каналов для создания альтернативного прямого участка, параллельного первоначальному (рис. 1). Таким образом, NICA можно использовать в качестве накопительного кольца (Storage Ring mode). Такие кольца позволяют проводить эксперименты по исследованию ЭДМ с поляризованными дейтронами и поиска аксиона в режиме “квази-замороженного” спина.

2. МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА С ОТВОДНЫМИ КАНАЛАМИ BYPASS

Приведенные в предыдущей главе особенности являются решающими при выборе энергии эксперимента и сорта частиц. В будущем вся предлагаемая магнитооптика будет рассмотрена для дейтронов с энергией 240 МэВ. Стоит отметить, что расчеты показывают основные параметры магнитного поля диполей $B_{\text{dip}} = 0.132$ Тл, а также магнитную жесткость $B\rho = 3.252$ Тл м (табл. 1).

Проектируя накопительное кольцо NICA с отводными секциями ByPass, планируется, оставить геометрию арок неизменной. Возможно лишь изменение полей в уже установленных элементах. Так что NICA можно использовать для различных экспериментов.

В кольце NICA, арка имеет ненулевую дисперсию. По краям как дисперсия, так и ее производная сведены к нулю. Прямой участок имеет нулевую дисперсию по всему периметру.

Общая длина оригинального кольца NICA $L_{\text{acc}} = 503.04$ м. Длина одной арки равна $L_{\text{arc}} = 142.15$ м. Итак, доступно $(L_{\text{acc}}/L_{\text{arc}})/2 = 109.6$ м.

ByPass — это канал для удержания пучка в альтернативном прямом участке. Дипольные магниты выбраны таким образом, чтобы обеспечить отклонение на угол $\alpha = 9^\circ$. Сила диполя $B_{\text{BP}} = 1$ Тл при длине $L_{\text{BP}}^{\text{BP}} = 50$ см. Альтернативный прямой участок находится на расстоянии 1 м от исходного, поэтому длина обводного участка $L_{\text{BP}} = 1/\sin\alpha \approx 6.4$ м. Принципиальная схема обходных каналов показана на рис. 1.

Таблица 1. Основные параметры структуры и эксперимента

Магнитное поле диполей	0.132 Тл
Магнитная жесткость $B\rho$	3.252 Тл м
Полная длина ускорителя	503.04 м
Энергия эксперимента	240 МэВ

Отклоняющие магниты искажают дисперсионную функцию. Таким образом, необходимо было использовать по меньшей мере 2 фокусирующих квадрупольа на обходном канале для подавления дисперсии на выходе. Это поможет обеспечить нулевую дисперсию на всем прямолинейном участке. Чтобы обеспечить периодичность и симметрию бета-функций, можно использовать или один или три дефокусирующих квадрупольа.

Будут рассмотрены два случая, с адаптированными прямыми участками, идентичным поворотным аркам, но без магнитов. Это сделано для простоты моделирования в регулярной идеальной структуре. Наконец, мы рассмотрим реальный случай магнитооптики с полностью регулярной ФОДО прямой секцией.

Первичная схема с тремя квадрупольами

В этом случае байпас состоит из минимально возможных трех квадрупольа: двух фокусирующих QBP1 и одного дефокусирующего QBP2 (рис. 2). Согласование арки с каналом ByPass обеспечивается тремя квадрупольами QM1, QM2, QM3 (секция согласователя Matching M1). А согласование ByPass с прямым участком также симметрично осуществляется такими же квадрупольами QM1, QM2, QM3. Это возможно в силу изначально заложенной симметрии между аркой и прямым участком. Длины упомянутых секций приведены на рис. 2, а также в табл. 1. Тогда общая длина всего ускорителя составит $L_{3\text{quad}}^{\text{acc}} = 503.46$ м.

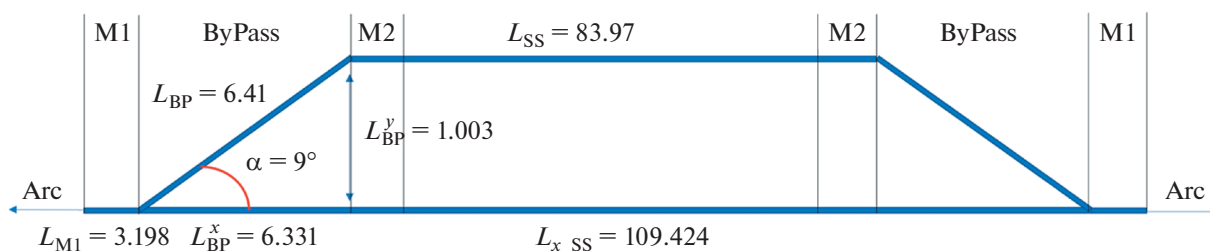


Рис. 2. Принципиальная схема ByPass с тремя квадрупольами.

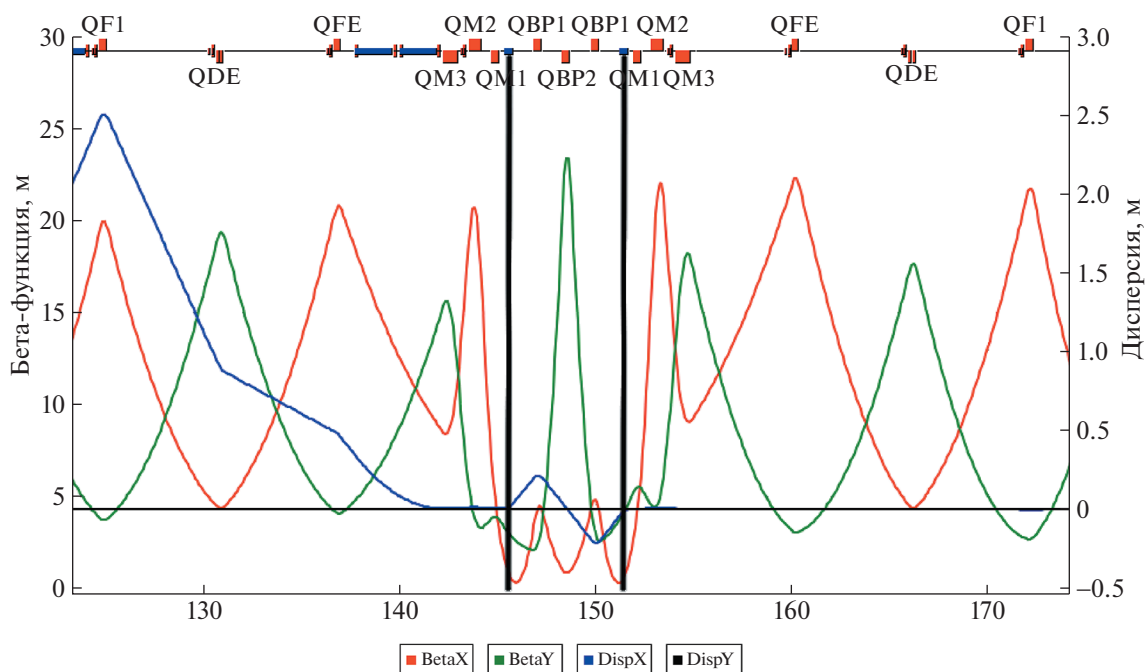


Рис. 3. Twiss-параметры для ByPass с тремя квадрупольями. Черными линиями показано расположение дефлекторов.

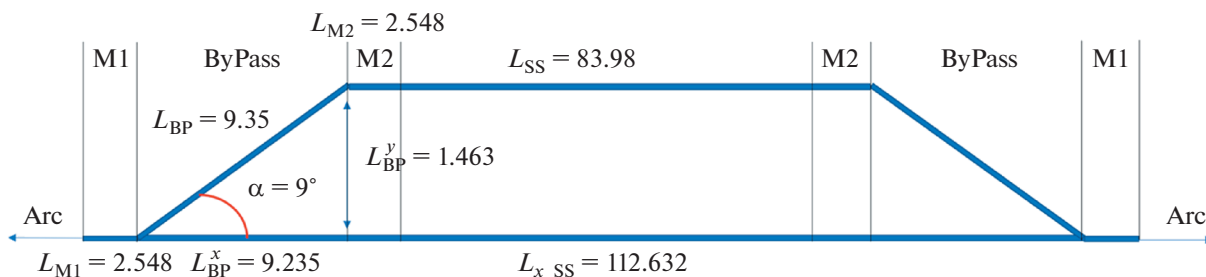


Рис. 4. Принципиальная схема ByPass с пятью квадрупольями.

На рис. 3 приведены Твисс-функции, черными линиями указаны границы канала ByPass. Максимум бета-функции β_y расположен в центре канала ByPass. И может принимать большое значение, по сравнению с β_x . По этой причине можно рассмотреть случай с 5 квадрупольями в отводном канале.

Схема ByPass с пятью квадрупольями

По сравнению с предыдущим случаем, отводной канал состоит из пяти квадрупольей, которые представлены двумя семействами: фокусирующим QBP1 и дефокусирующим QBP2. Он становится длиннее $L_{5\text{quad}}^{\text{BP}} = 9.35$ м и отклоняется на 1.46 м (рис. 4). Теперь секции согласования M1

и M2 по-прежнему идентичны, но представлены двумя квадрупольями QM1 и QM2 для обеспечения регулярности Твисс-функций. Однако, полная длина ускорителя становится больше, NICA $L_{5\text{quad}}^{\text{acc}} = 510.02$ м. На рис. 5 показано, что максимум β_y становится меньше в центре. Стоит отметить, что максимум дисперсионной функции увеличивается от $D_x^{3\text{quad}} \sim 0.2$ м до $D_x^{5\text{quad}} \sim 0.5$ м. Таким образом, этот случай должен быть адаптирован к реальному.

Реальный случай

Основываясь на рассмотренных примерах, мы, наконец, можем получить структуру, максимально адаптированную к реальности. Теперь

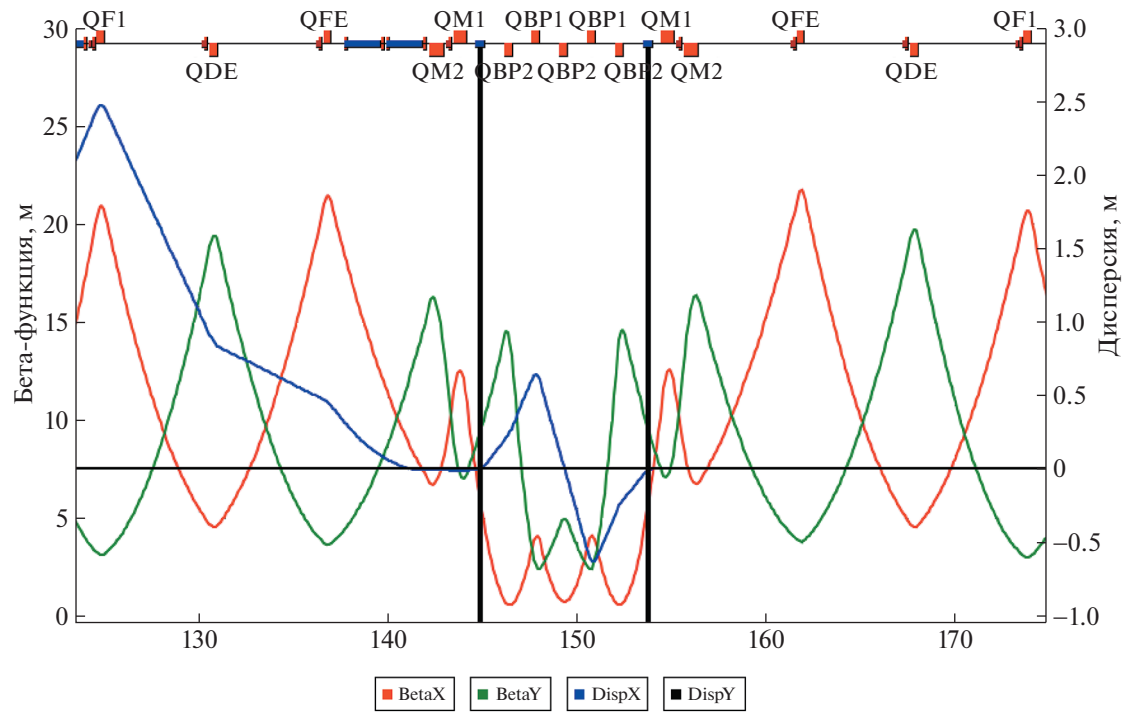


Рис. 5. Twiss-параметры для ByPass с пятью квадрупольями. Черными линиями показано расположение дефлекторов

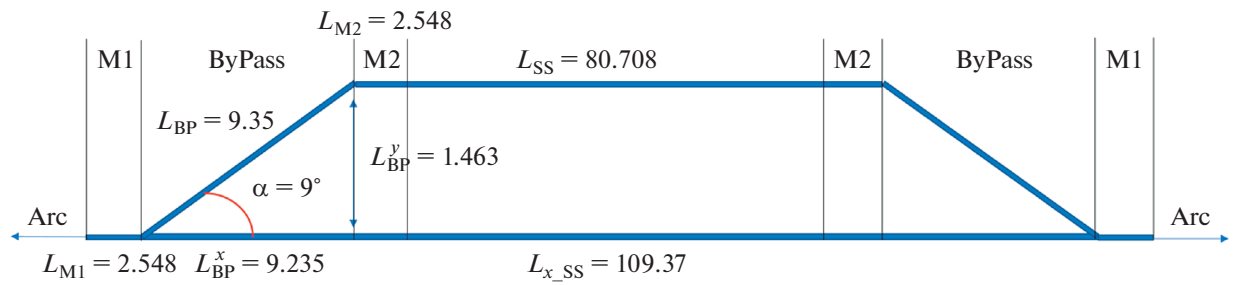


Рис. 6. Принципиальная схема реального байпаса.

Таблица 2. Длины и параметры рассмотренных магнитооптических структур

Структура	Полная длина, м	Длина прямого участка, м	Длина канала ByPass, м	Секция согласования, м	Рабочая точка
NICA	503.04	109.6	—	—	9.44/9.44
3 квадруполья	503.46	83.97	6.41	3.198	13.8/11.8
5 квадрупольей	510.0	83.97	9.35	2.548	13.44/11.44
Реальный	503.5	80.70	9.35	2.548	12.8/11.8

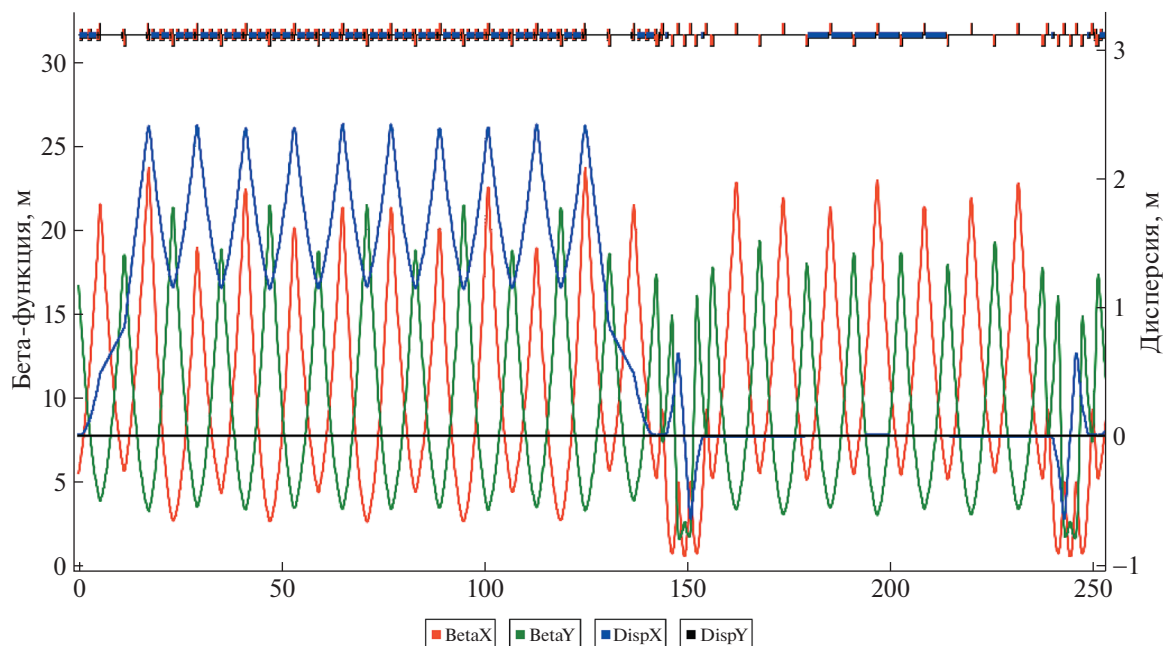


Рис. 7. Twiss-функции для половины байпасного кольца NICA. Фильтры Вина расположены на прямом участке.

рассмотрим полностью регулярный прямой участок, который стал короче $L_{SS}^{BP} = 80.71$ м (рис. 6). Байпас состоит из пяти квадруполов и отклоняет пучок на 1.46 м. Но для согласования использовались разные секции M1 и M2, чтобы компенсировать не симметрию между поворотной аркой и прямым участком. Наконец, Твисс-функция половины байпасного NICA, представлена на рис. 7. В центре прямой секции расположены фильтры Вина.

Все расчеты выполнены при помощи программ OptiM [4] и COSY Infinity [5].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для экспериментов с EDM необходимо использовать NICA в качестве накопительного кольца. По этой причине была рассмотрена модернизация путем создания альтернативных прямых участков, параллельных исходным, с использованием каналов ВуПасс. Также на прямых участках есть возможность разместить специальные элементы — фильтры Вина для компенсации вращения спина от МДМ компоненты в поворотных арках. Поскольку арки остаются неизменными, это позволяет использовать NICA в различных экспериментах.

Рассмотрены две принципиальные схемы обходного канала. И, наконец, получили наиболее реалистичный случай, когда прямой участок полностью регулярный. Конечная конструкция удовлетворяет всем необходимым требованиям к

магнитооптике. Исследование спин-орбитальной динамики с оптимизированными фильтрами Вина показывают, спин восстанавливает ориентацию на прямом участке и метод “Квази-Замороженного Спина” может быть реализован в ВуПасс NICA.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 22-42-04419.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Syresin E. et al. // Proc. Russian Particle Accelerator Conf. RuPA'2021. 2021. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOY02>
2. Anastassopoulos D., Anastassopoulos V., Babusci D., et al. AGS Proposal: Search for a Permanent Electric Dipole Moment of the Deuteron Nucleus at the 10^{-29} cm Level. 2008. BNL. https://www.bnl.gov/edm/files/pdf/deuteron_proposal_080423_final.pdf.
3. Senichev Y. et al. // Proc. ICAP2015. Shanghai, China. 2015. P. MODBC4.
4. Lebedev V. OptiM code. Private communication. www-bdnew.fnal.gov/pbar/organizationalchart/lebedev/OptiM/optim.htm.
5. COSY INFINITY. www.bmtdynamics.org.

Designing Bypass Channels in NICA Accelerator Complex for Polarized Beam Experiments for EDM Search

S. D. Kolokolchikov^{a, b, *}, A. E. Aksentiev^{a, b}, A. A. Melnikov^{a, b, c},
Yu. V. Senichev^{a, b}, V. P. Ladygin^d, and E. M. Syresin^d

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

^b*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow obl., 141701 Russia*

^c*Landau Institute for Theoretical Physics, Chernogolovka, Moscow obl., 142432 Russia*

^d*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow obl., 141980 Russia*

**e-mail: sergey.bell13@gmail.com*

Received June 19, 2023; revised June 22, 2023; accepted June 26, 2023

Abstract—Experiments with polarized beams for electric dipole moment search in the NICA accelerator complex implies the design of additional bypass channels. Such alternative channels will make it possible to use NICA as a storage ring and collect enough statistical data.

Keywords: magneto-optical structure, bypass channels, storage ring, electric dipole moment