

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

С.Д. Колокольников^{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

^a Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

^b Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская обл., Россия

^c Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Черноголовка, Московская обл.,
Россия

^d Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., Россия

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

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 19.06.2023 г.

Принята к публикации 03.07.2023 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.

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). Создание отводных каналов является большим преимуществом, не требующим значительной перестройки комплекса и затрат, при всём 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 Т-ВМТ [2]:

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

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

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 приведённых 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 нулевое 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 магнитную 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 $B_{dip} = 0,132$ Т, а также магнитную жесткость $B\rho = 3,252$ Т·м. (Таблица 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 $L_{acc} = 503,04$ м. Длина одной арки равна $L_{arc} = 142,15$ м. Итак, доступно $(L_{acc} - 2L_{arc})/2 = 109,6$ м.

ByPass – это канал для отклонения луча на альтернативный прямой участок. Дипольные магниты выбраны таким образом, чтобы обеспечить отклонение на угол $\alpha = 9^\circ$. Сила диполя $B_{BP} = 1$ Т при длине $L_{dip}^{BP} = 50$ см. Альтернативный прямой участок находится на расстоянии 1 метра от исходного, поэтому длина обводного участка $L_{BP} = 1\text{ м} / \sin \alpha \approx 6,4$ м. Принципиальная схема обходных каналов показана на Рисунке 1.

Отклоняющие магниты искажают дисперсионную функцию. Таким образом, необходимо было использовать по меньшей мере 2 фокусирующих квадруполь на обходном канале для подавления дисперсия 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 квадруполь.

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 FODO прямой секцией.

Первичная схема с 3 квадрупольями

В этом случае байпас состоит из минимально возможных 3 квадрупольей: 2 фокусирующих QBP1 и 1 дефокусирующий QBP2 (Рисунок 2). Согласование арки с каналом ByPass обеспечивается тремя квадрупольями QM1, QM2, QM3 (секция согласователя Matching M1). А согласование ByPass с прямым участком также симметрично осуществляется такими же квадрупольями QM1, QM2, QM3. Это возможно

в силу изначально заложенной симметрии между аркой и прямым участком. Длины упомянутых секций приведены на Рисунке 2, а также в таблице 1. Тогда общая длина всего ускорителя составит $L_{3quad}^{acc} = 503,46$ м.

На Рисунке 3 приведены Твисс-функции, черными линиями указаны границами 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 5 квадрупольями*

По сравнению с предыдущим случаем, обводной канал состоит из 5 квадрупольей, которые представлены 2 семействами: фокусирующим QBP1 и дефокусирующим QBP2. Он становится длиннее $L_{5quad}^{BP} = 9,35$ м и отклоняется на 1,46 м (Рисунок. 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 $L_{5quad}^{acc} = 510,02$ м. На Рисунке 5 показаны, что максимум β_y становится меньше в центре. Стоит отметить, что максимум дисперсионной функции стал увеличился от $D_x^{3quad} \sim 0.2$ м до $D_x^{5quad} \sim 0.5$ 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 рассмотрим полностью регулярный прямой участок, который стал короче $L_{SS}^{BP} = 80,71$ м (Рисунок 6). Байпас состоит из 5 квадрупольей 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 Рисунке 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 *ByPass*. Также на прямых участках есть возможность разместить специальные элементы – фильтры Wien для компенсации вращения спина от МДМ компоненты в поворотных арках. Поскольку арки остаются неизменными, это позволяет использовать NICA в различных экспериментах.

Рассмотрены 2 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 *ByPass* NICA.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Syresin et al. NICA Ion Collider at JINR, RuPAC2021.doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOY02
2. D. Anastassopoulos, V. Anastassopoulos, D. Babusci et al. AGS Proposal: Search for a permanent electric dipole moment of the deuteron nucleus at the 10^{-29} cm level; BNL. — 2008. https://www.bnl.gov/edm/files/pdf/deuteron_proposal_080423_final.pdf
3. Y. Senichev et al. Investigation of Lattice for Deuteron EDM Ring, Proceedings of ICAP2015, Shanghai, China, MODBC4. ISBN 978-3-95450-136-6
4. V. Lebedev, OptiM code, Private communication url: www-bdnew.fnal.gov/pbar/organizationalchart/lebedev/OptiM/optim.htm
5. COSY INFINITY. [url:www.bmtdynamics.org](http://www.bmtdynamics.org)

Таблица 1. Основные параметры структуры и эксперимента.

Магнитное поле диполей	0,132 Т
Магнитная жесткость $B\rho$	3,252 Т · м
Полная длина ускорителя	503,04 м
Энергия эксперимента	240 МэВ

Таблица 2. Длины и параметры рассмотренных магнитооптических структур.

Структура	Полная длина, м	Длина прямого участка, м	Длина канала ВуPass, м	Секция согласования, м	Рабочая точка
NICA	503.04	109.6	—	-	9.44/9.44
3 квадруполь	503.46	83.97	6.41	3.198	13.8/11.8
5 квадруполь	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

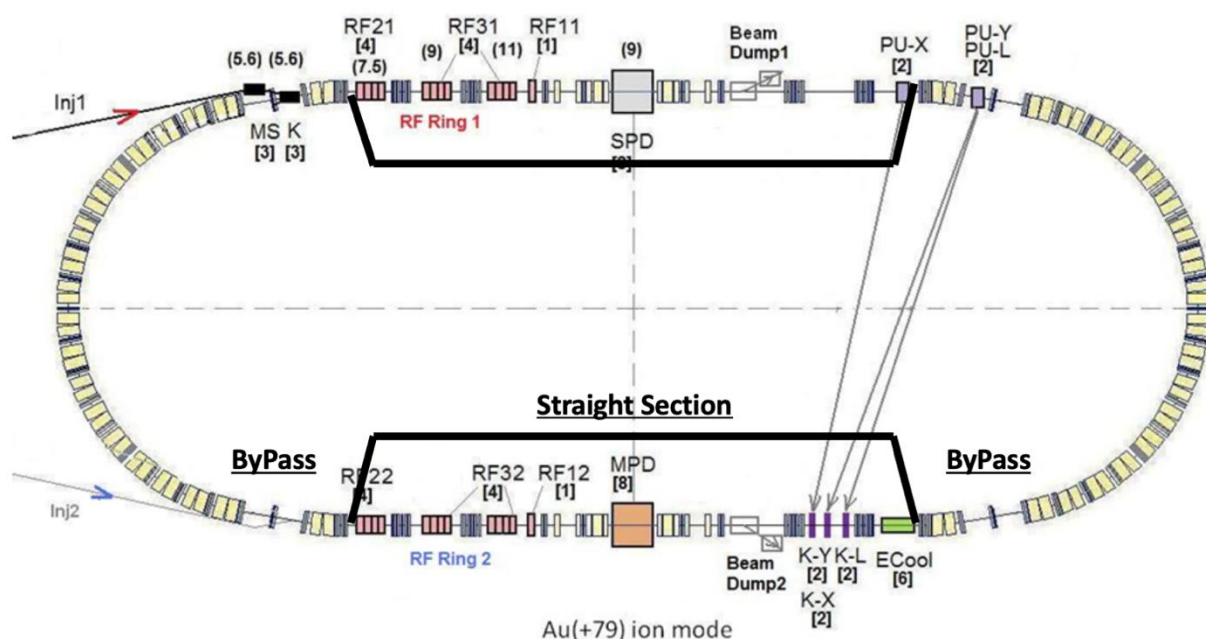


Рис. 1. Принципиальная схема обходных каналов ByPass в существующем комплексе NICA.

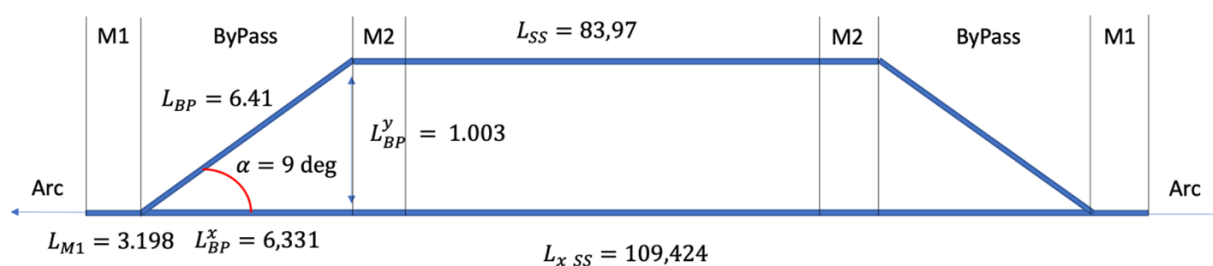


Рис. 2. Принципиальная схема ByPass с тремя квадрупольями.

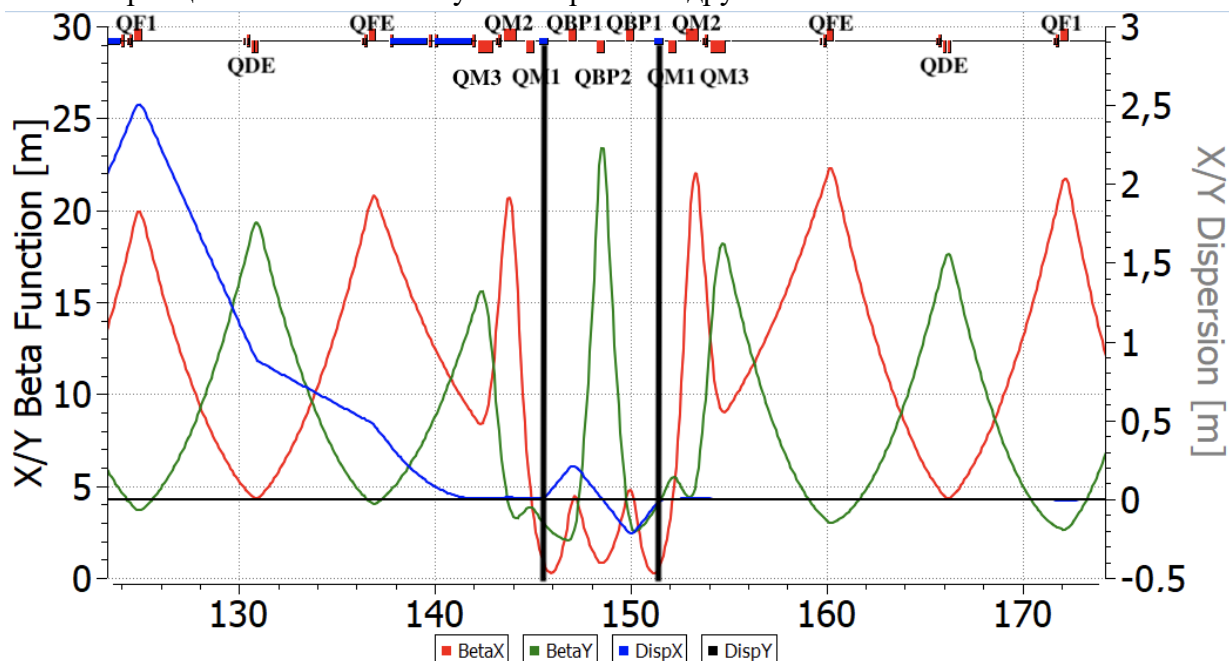


Рис. 3. Twiss-параметры для ByPass с тремя квадрупольями. Черными линиями показано расположение дефлекторов.

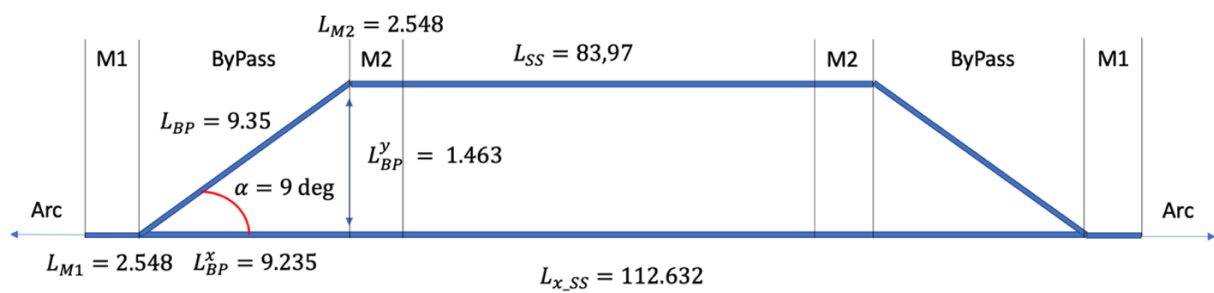


Рис. 4. Принципиальная схема ByPass с пятью квадрупольями.

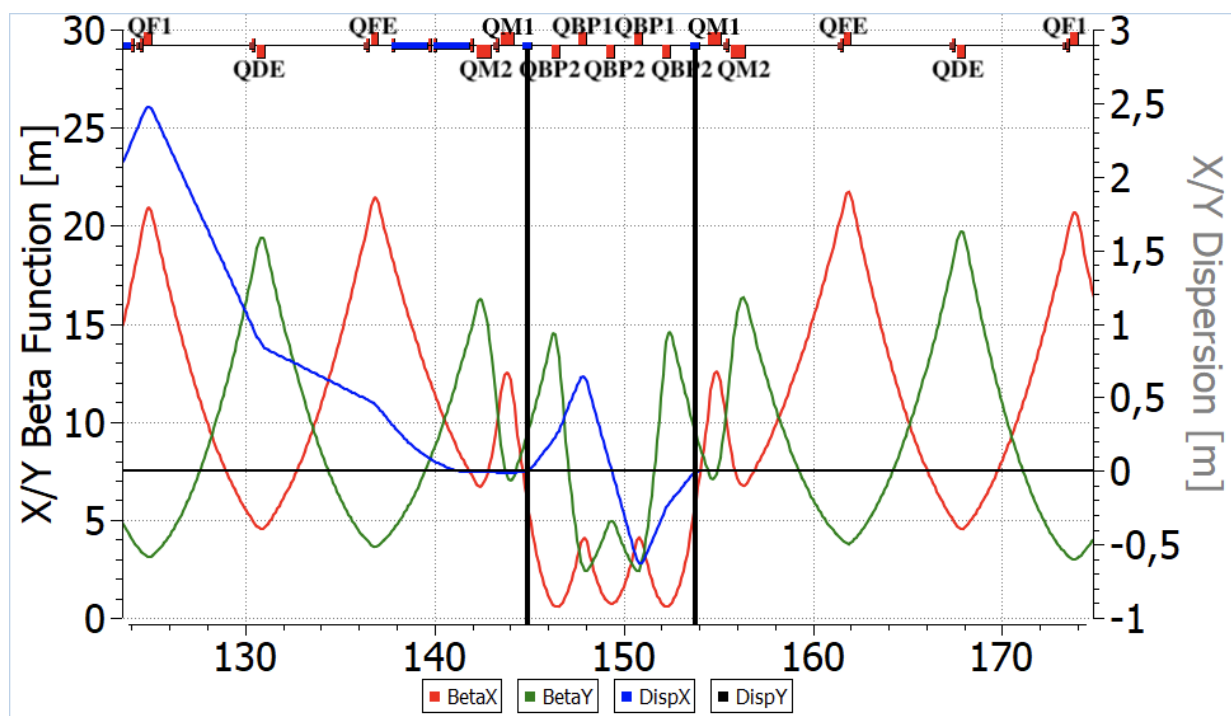


Рис. 5. Twiss-параметры для ByPass с пятью квадрупольями. Черными линиями показано расположение дефлекторов

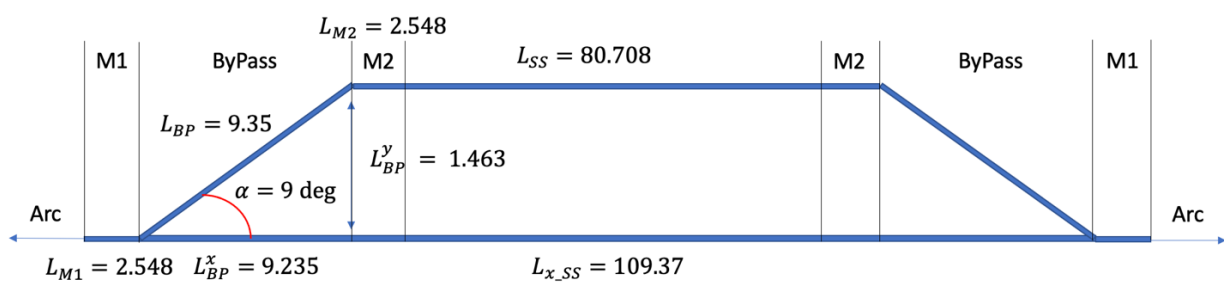


Рис. 6. Принципиальная схема реального байпаса.

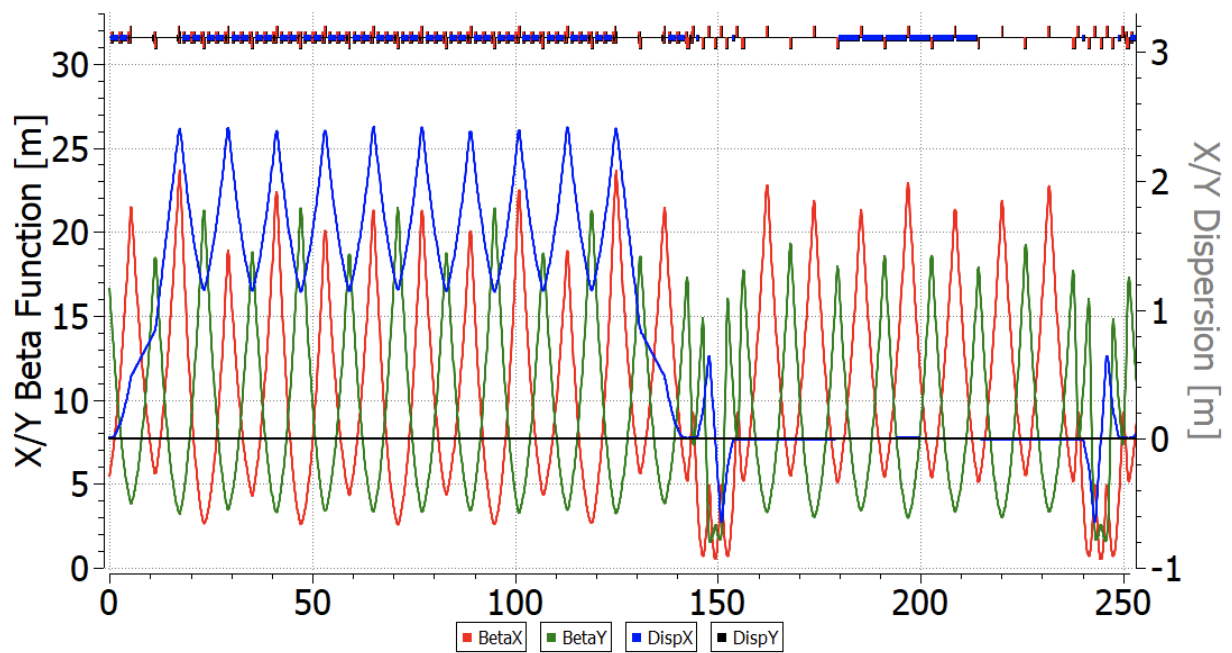


Рис. 7. Twiss-функции для половины байпасного кольца NICA. Фильтры Вина расположенные на прямом участке.