С.Д. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, Ю.В. СЕНИЧЕВ

*Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия*

*Московский Физико-Технический Институт, Долгопрудный, Россия*

**МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА КОЛЛАЙДЕРА NICA С ВЫСОКОЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ.**

Исследованы способы повышения критической энергии для протонной опции коллайдера NICA. Применен метод суперпериодической модуляции градиентов квадруполей. Осуществлен выбор секступолей для подавления натуральной хроматичности и компенсации секступольной компоненты. Приведены параметры Твисса для предложенных структур, а также исследованы динамические апертуры и рабочие точки.

S.D. KOLOKOLCHIKOV, Y.V. SENICHEV

*Institute for nuclear research of RAS, Moscow, Russia*

*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

**MAGNETO-OPTICAL STRUCTURE OF THE NICA COLLIDER WITH HIGH CRITICAL ENERGY.**

Methods of increasing the critical energy for the proton option of the NICA collider are investigated. The method of superperiodic modulation of quadrupole gradients is applied. The selection of sextupoles is carried out to suppress the natural chromaticity and compensate for the sextupole component. The Twiss parameters for the proposed structures are given, as well as the dynamic apertures and working points are investigated.

# **Протонная опция коллайдера NICA.**

Изначально структура коллайдера NICA проектировалась для работы в двух модах: для экспериментов с тяжелыми ионами и для экспериментов с поляризованными протонами/дейтронами **p**, **d**. В эксперименте по столкновению тяжелых ионов золота c максимальной энергией 4.5 ГэВ/нуклон критическая энергия магнитооптической структуры коллайдера составляет ( В этом случае проблем с прохождением критической энергии не возникает, что было изначально учтено при проектировании. Такое значение критической энергии было достигнуто выбором частоты бетатронных колебаний в горизонтальной плоскости , которая при условии регулярности структуры арок, состоящих из одинаковых ячеек ФОДО, должна быть больше максимального значения фактора Лоренца во всем интервале энергий. Это условие регулярности структуры одновременно необходимо для минимизации модуляции огибающей пучка, совпадающей с условием минимизации эффекта внутрипучкового рассеивания в тяжелоионной опции с большой зарядностью частиц. Небольшие возмущения на концах арки за счет подавителей дисперсии методом введения missing magnet не играют принципиального значения на все выше сказанное.

При прохождении через критическую энергию развивается продольная неустойчивость. Пороговый ток ее развития пропорционален коэффициенту расширения орбиты η, который равен нулю при . Темп ускорения протонов при прохождении через критическую энергию при использовании индукционного ускорения ВЧ1 станции составляет . Этот темп слишком мал, чтобы избежать развития неустойчивости при приближении релятивистского фактора к .

Магнитная жесткость поворотных магнитов постоянна . Тем самым, определяется максимально возможная энергия в эксперименте по ускорению протонов , следовательно критическая энергия должна быть на уровне , что заведомо выше критической энергии для ионной регулярной структуры ( ). Чтобы исключить при ускорении протонов прохождение через критическую энергию, для протонной моды должна быть реализована новая оптическая структура колец вместо оптической структуры ионной моды. В этой оптической структуре критическая энергия должна быть выше максимальной энергии протонов при работе коллайдера на эксперимент.

Для протонного пучка с интенсивностью 2×1013 время внутрипучкового нагрева возрастает примерно в 30 раз по сравнению с пучками ионов золота с интенсивностью 6,6×1010. Поэтому критическая энергия может подниматься за счет вариации дисперсии без опасения влияния внутрипучкового рассеяния. За счет резонансной модуляции дисперсионной функции коэффициент диффузии для внутрипучкового рассеяния возрастает в 2-3 раза, что не критично как при охлаждении протонов во время накопления, так и при их группировке на энергии эксперимента.

# **Введение суперпериодической модуляции.**

Коэффициент расширения орбиты (momentum compaction factor) определяется как

где – длина замкнутой равновесной орбиты, – горизонтальная дисперсионная функция, – радиус кривизны равновесной орбиты.

Уравнение для дисперсионной функции с бипериодической переменной фокусировкой

, (2)

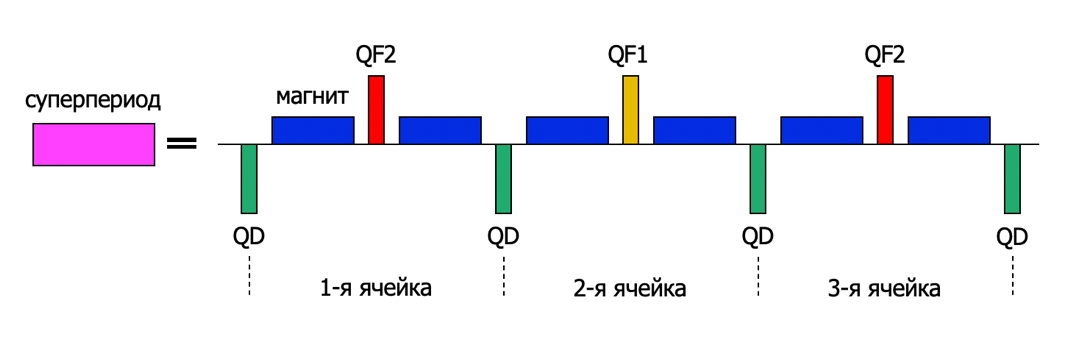
где , ,  *–* градиент магнитооптических линз, – суперпериодическая модуляция градиента. Суперпериод определяется как совокупность нескольких ФОДО ячеек как изображено на Рисунке 1. Таким образом, в общем случае коэффициент расширения орбиты зависит от функций: кривизны орбиты , градиента и модуляции cответственно , . В структуре NICA регулярная расстановка отклоняющих магнитов исключает возможность модуляции кривизны орбиты. Поэтому мы используем только модуляцию силы квадрупольных линз по длине суперпериода. Функция имеет периодичность одного периода фокусирующей ячейки, имеет периодичность суперпериода. Для одного суперпериода коэффициент расширения орбиты определяется по формуле (3), вывод данной формуле произведен в работе [1]:

Рисунок 1 Введение суперпериода, состоящего из 3-х ФОДО ячеек

Где усредненное значение кривизны, – количество горизонтальных бетатронных колебаний на длине арке, S – количество суперпериодов на длине арки, –-ая гармоника модуляции градиента при разложении функции в ряд Фурье . В силу зеркальной симметрии разложение произведено по косинусам. В случает отсутствия суперпериодической модуляции , формула (3) принимает вид , что соответствует случаю регулярной структуры. Для поднятия критической энергии необходимо уменьшить , а значит выражение под знаком суммы должно быть отрицательным, это реализуемо при условии . Первая гармоника является определяющей и для 12 ФОДО ячеек реализуемо условие , , где 3 ФОДО ячейки объединены в один суперпериод. Таким образом, благодаря набегу бетатронных колебаний кратному 2π арка имеет свойства ахромата первого порядка.

Ранее все формулы были приведены для арки, а не для всего кольца коллайдера. Введение прямых участков уменьшает степень модуляции дисперсионной функции. Усреднение дисперсии по более длинной орбите автоматически уменьшает ее значение, а значит уменьшает коэффициент уплотнения орбиты для всего ускорителя, результирующее значение критической энергии увеличивается и определяется выражением:

# **Рассмотрение способов поднятия критической энергии методом суперпериодической модуляции.**

Для увеличения критической энергии ускорительного кольца NICA рассматривается возможность изменения дисперсионной функции путем модуляции градиентов квадруполей на поворотных арках кольца. Для этого рассматривается суперпериод, состоящий из 3-х ФОДО ячеек, где центральный фокусирующий квадруполь отличается от двух крайних бОльшим значением градиента.

Важным требованием при проектировании магнитооптической структуры является обеспечение нулевого значения дисперсии на прямых участках для обеспечения движения частиц вдоль равновесной орбиты на этих участках. Это требование легко реализуемо в случае создания регулярных поворотных арок, составленных из одинаковых суперпериодов. В этом случае, обеспечив нулевое значение дисперсии (а также производной дисперсии ) на входе в арку, в силу регулярности на выходе из арке также будут нулевые значения дисперсии и её производной, а следовательно и на всем прямом участке. Однако, учитывая особенность структуры коллайдера NICA, наличие missing-магнитов на двух крайних cell’aх не дает возможность создать полностью регулярную арку из 4-х одинаковых суперпериодов. Таким образом, необходимо обеспечить подавление дисперсии на краях арки. Рассматриваются 2 возможных случая подавления дисперсии:

1. Подавление дисперсии при помощи крайних суперпериодов.

А именно двух крайних ФОДО ячеек. На Рисунке 2 и 3 сверху (Edge Suppressor – ES) изображена принципиальная схема данной магнитооптической структуры. Как видно две крайние ФОДО ячейки отличаются наличием missing-magnet и в этих ячейках квадруполи QFE1 и QFE2 также имеют отличные градиенты от основных квадруполей арки и подбираются таким образом, чтобы подавить дисперсию.

1. Подавление дисперсии всей аркой, при помощи выбора градиентов квадруполей двух семейств.

На Рисунке 1 снизу (Arc Suppressor – AS) изображена принципиальная схема данной магнитооптической структуры. Этот случай отличается тем, что все квадруполи арки принадлежат первому, либо второму семейству и подавление дисперсии также обеспечивается только 2-мя семействами.

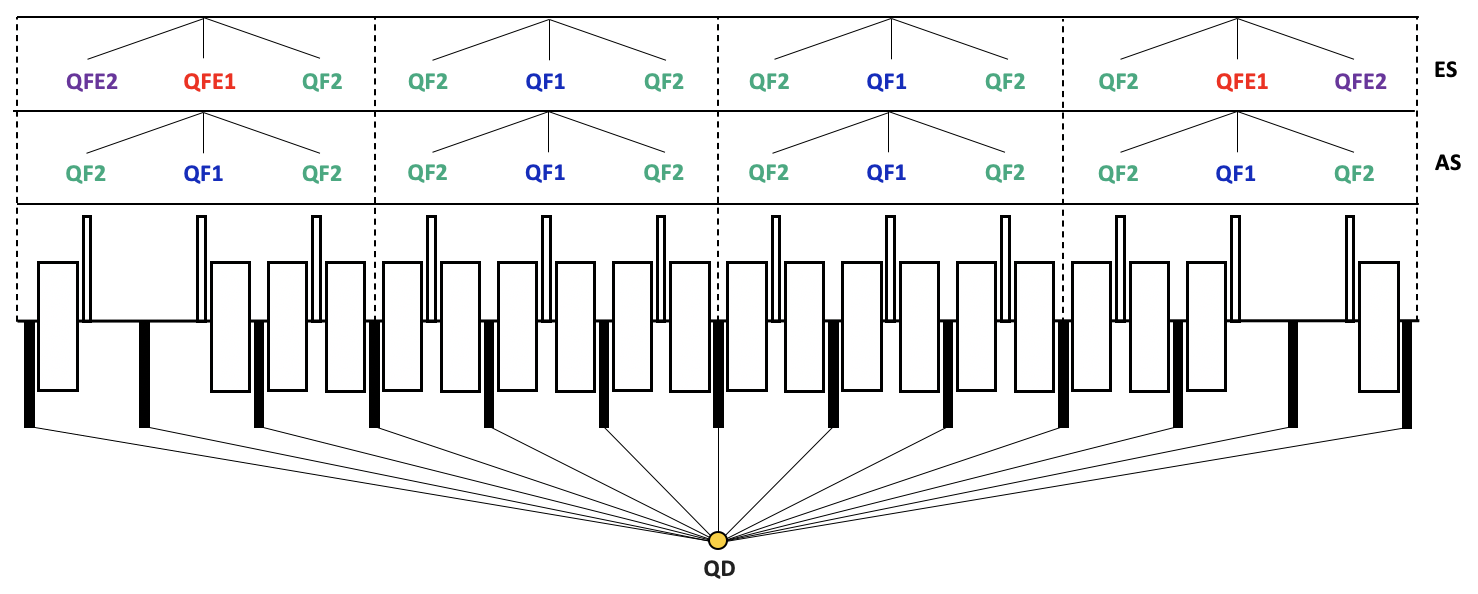
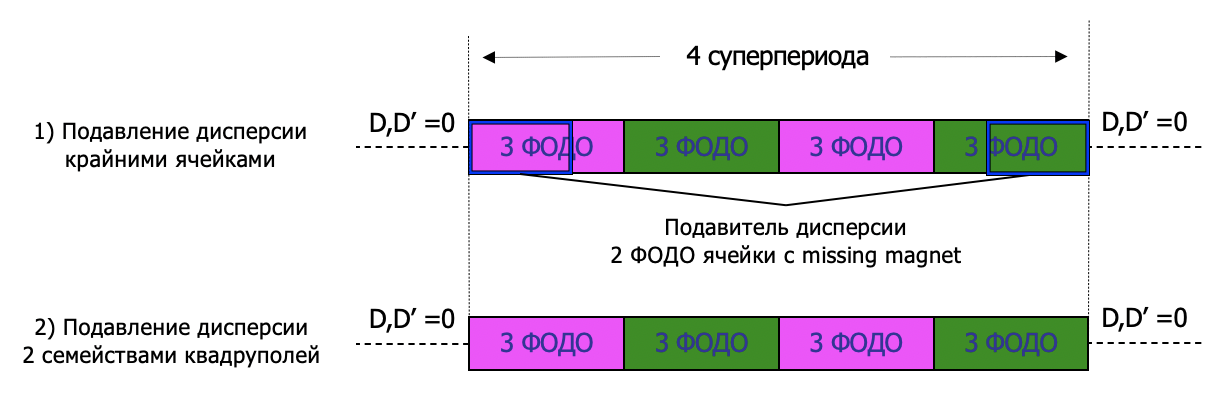
Дефокусирующие же квадруполи как в первом, так и во втором случае принадлежат только одному семейству QD.

Рисунок 3 Схемы арки кольца, обеспечивающие вариацию критической энергии и выполняющие функцию подавления дисперсии на прямых участках. Сверху изображен случай с возможностью подавления дисперсии крайними суперпериодами (Edge suppressor). Снизу – подавление дисперсии только при помощи подбора градиентов двух семейств квадруполей (Arc suppressor).

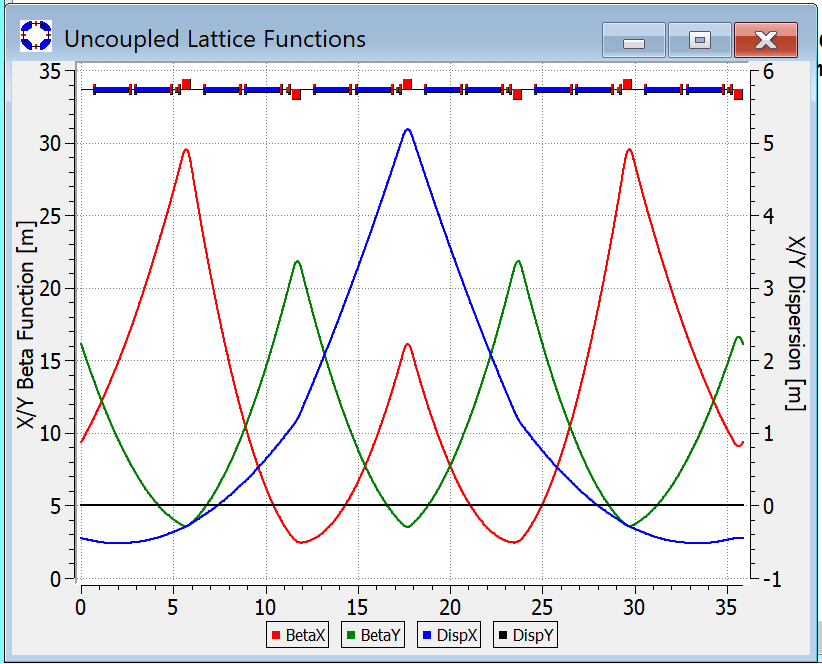
Рисунок 2 Принципиальная схема двух возможных вариантов подавления дисперсии для протонной опции коллайдера NICA

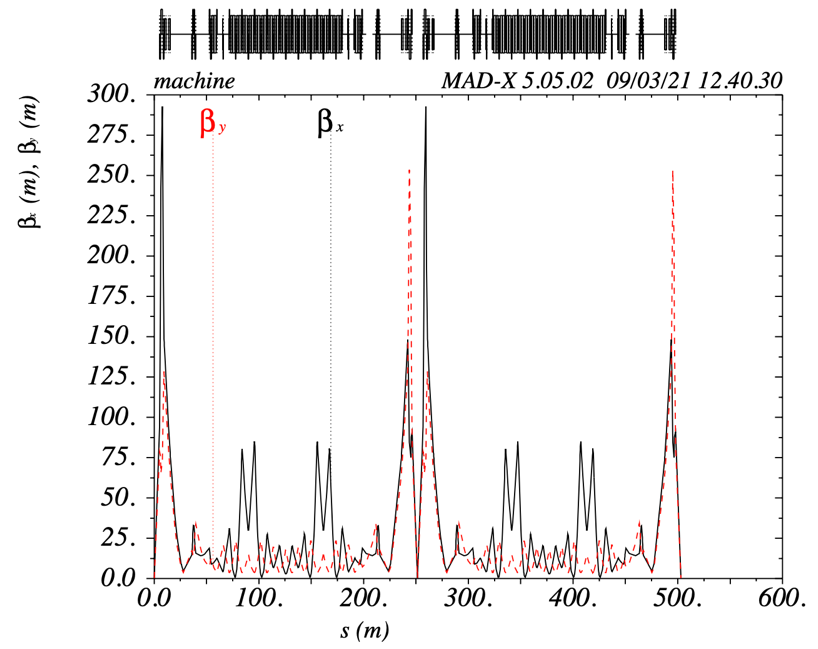
* 1. **Подавление дисперсии крайними ячейками арки**
     1. **Выбор градиентов квадруполей**

Выбор значения градиентов квадруполей арки определяется двумя факторами:

1. Получение необходимого значения критической энергии на всем кольце коллайдера, что соответствует ;
2. Обеспечить количество бетатронных колебаний на арке в обоих плоскостях, тем самым удовлетворив резонансному условию при количестве суперпериодов .

|  |  |
| --- | --- |
| **Квадруполи** | **Градиент, T/m** |
| QF1 | 28,26481 |
| QF2 | 20,9276 |
| QD | 22,62231 |
| QFE1 | 30,9342 |
| QFE2 | 19,58429 |

Исходя из этих условий модулируем суперпериод с набегом фазы на суперпериоде в обоих плоскостях (Рисунок 4).



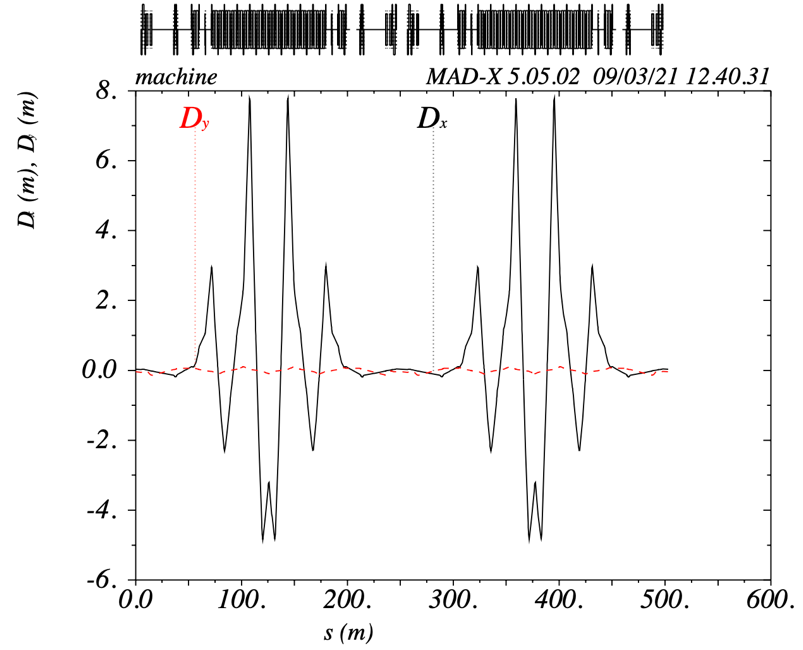


Рисунок 4 Модулированный суперпериод

Рисунок 5 Подавление дисперсии крайними ячейками арки  
Слева – бета-функции; Справа – дисперсионные функции.

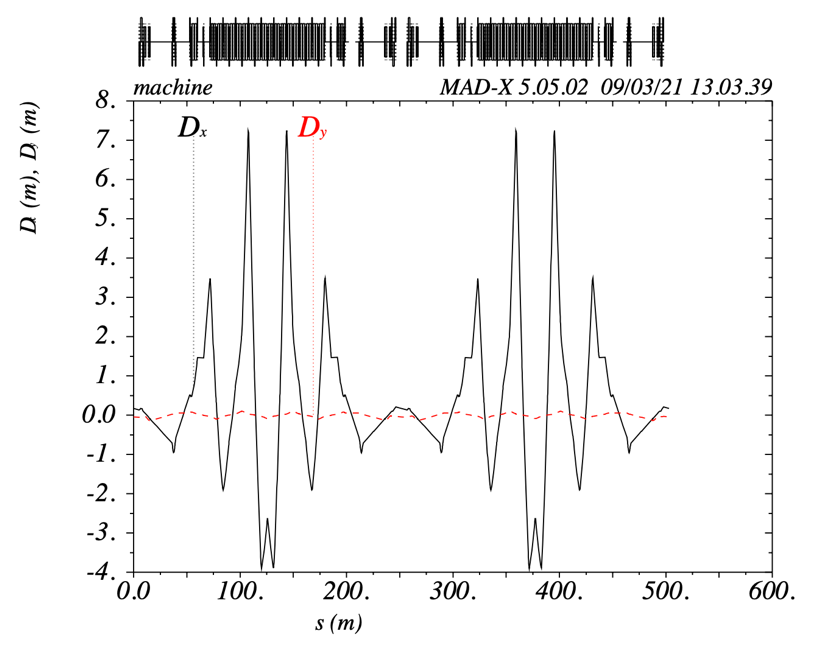
Коллайдер также состоит из 2-х арок и 2-х прямых участках, соединяющих арки. Посередине прямых участков имеются точки столкновения, где нужно обеспечить малое значение бета-функции для достижения требуемой светимости. На Рисунке 6 изображены параметры Твисса всего кольца коллайдера без введения крайних квадруполей QFE1 и QFE2, наглядно видно, что дисперсия не подавлена на прямых участках. Крайний суперпериод имеет missing magnet в 2-х cell’ах, тем самым делая арки коллайдера не регулярными и возникает необходимость подавления дисперсии на прямых участках при помощи введения 2-х дополнительных семейств квадруполей QFE1 и QFE2 на краю арки, параметры Твисса изображены на Рисунке 5.

Рисунок 6 Дисперсионная функция без введения подавителей дисперсии на 2-х крайних ячейках

В результате значение критической энергии подобрано таким образом, что , а количество колебаний на арке: .

* + 1. **Расстановка секступолей**

При расстановке секступолей также нужно учесть несколько параметров:

1. Во-первых, необходимо подавить хроматичность на всем кольце коллайдера;
2. Во-вторых, для достижения большего значения динамической апертуры нужно добиться взаимной компенсации секступолей и сделать ахромат 2 порядка.

Для выполнения первого условия, нужно подавить натуральную хроматичность, обусловленную линейным элементами – квадруполями и диполями. Для этого необходимо установить секступоли в области ненулевой дисперсии – на арках вблизи квадруполей.

Так как набег фазы на арке . Таким образом на каждом суперпериоде набег фазы , в том числе и на крайних. В описанном случае возникают пики -функции на арке на квадруполях QF2. Тем самым разность фаз между квадруполями QF2 первого и третьего (второго и четвертого суперпериода) не кратна . При этом количество бетатронных колебаний между центральными квадруполями (QF1 или QFE1) 1 и 3 или 2 и 4 суперпериодов . Таким образом, расставив секступоли одного семейства рядом с центральными квадруполями, получится обеспечить взаимное подавление секступолей. На Рисунке 6 изображена принципиальная схема расстановки секступолей.

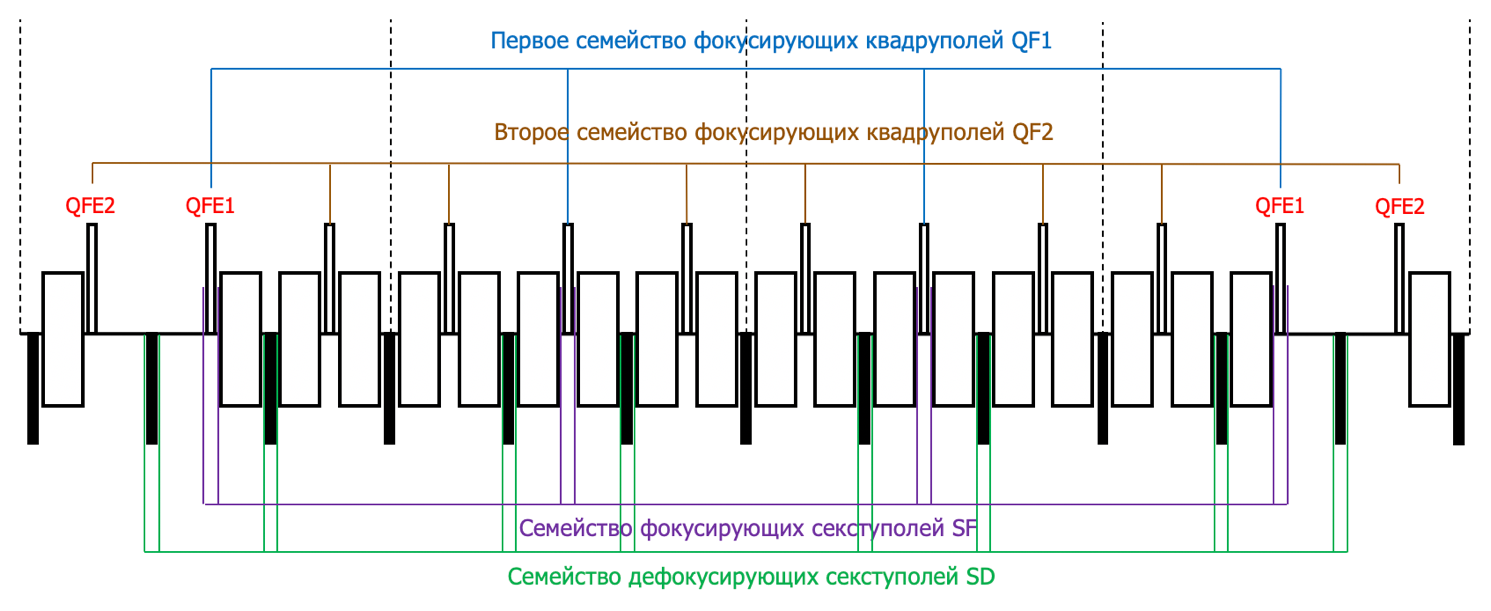


Рисунок 7 Принципиальная схема расстановке секступолей в случае подавления дисперсии крайними суперпериодами

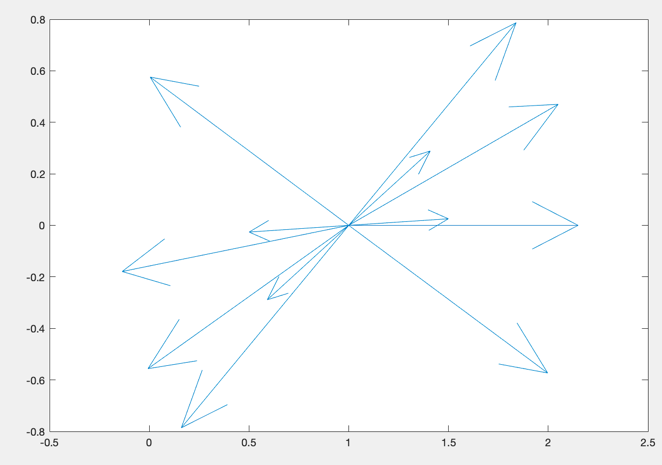
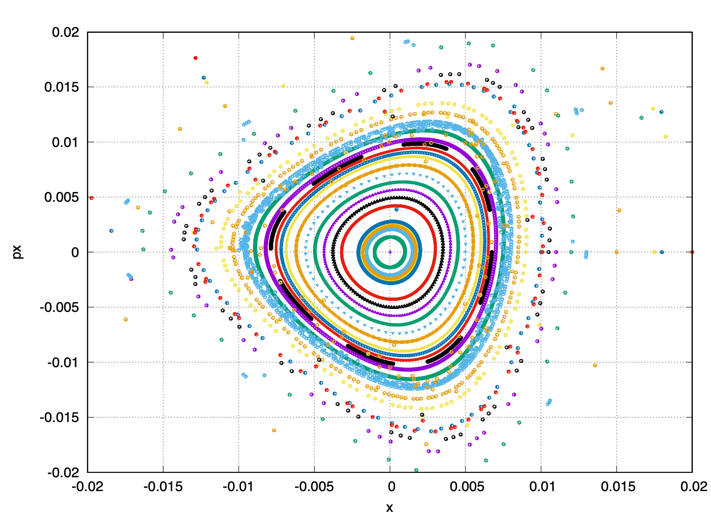
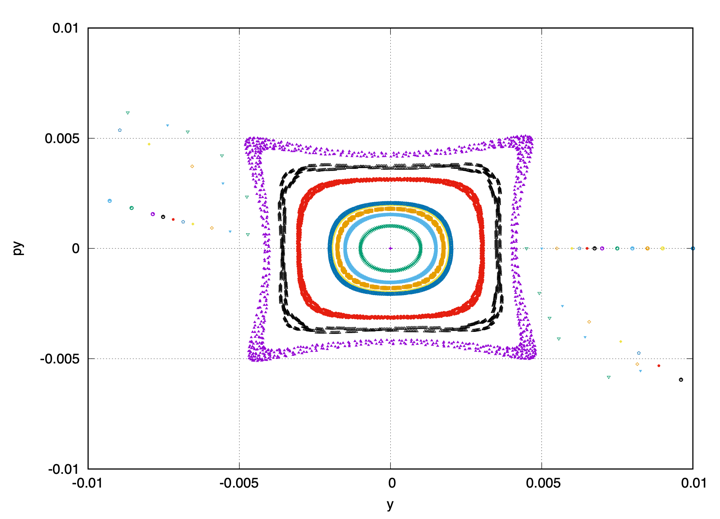
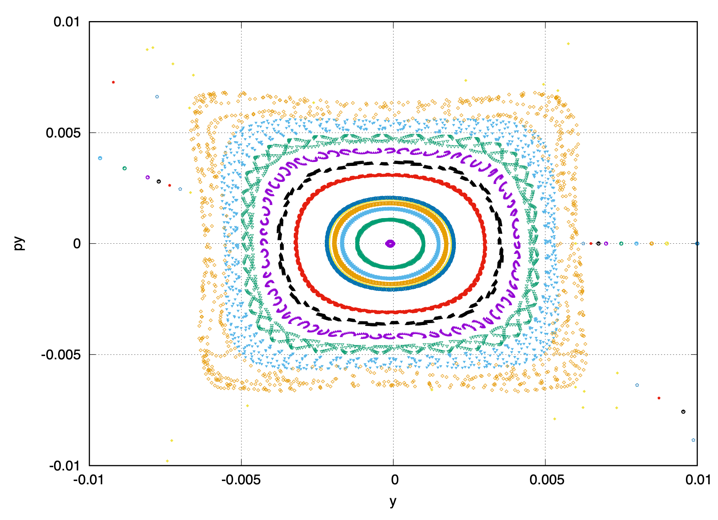
В данном случае необходимо убедиться, что секступоли скомпенсированы. На Рисунке 3 градиенты соответствующих изображены в виде векторов, при этом поворот вектора отражает набег фазы между соответствующими секступолями и равно количеству бетатронных колебаний умноженных на (в качестве реперного был взят первый секступоль арки). Видно, что каждому для каждого вектора находится вектор, который направлен в противоположную сторону и компенсирует его.

Рисунок 8 Векторы секступольных градиентов повернутые друг относительно друга с учетом фазы

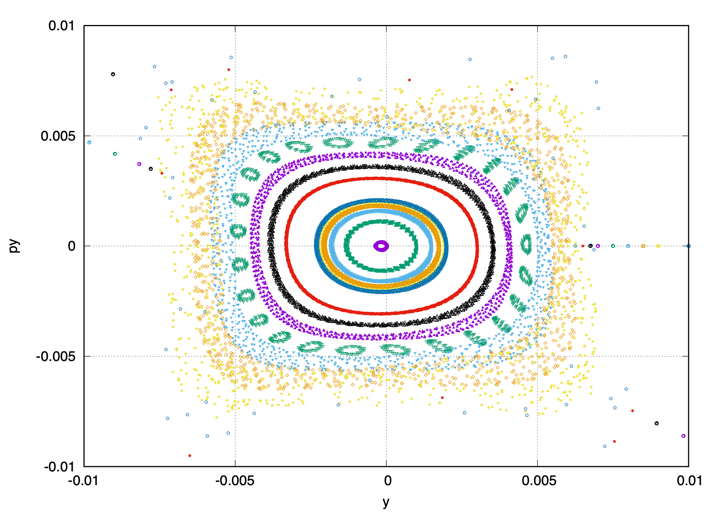
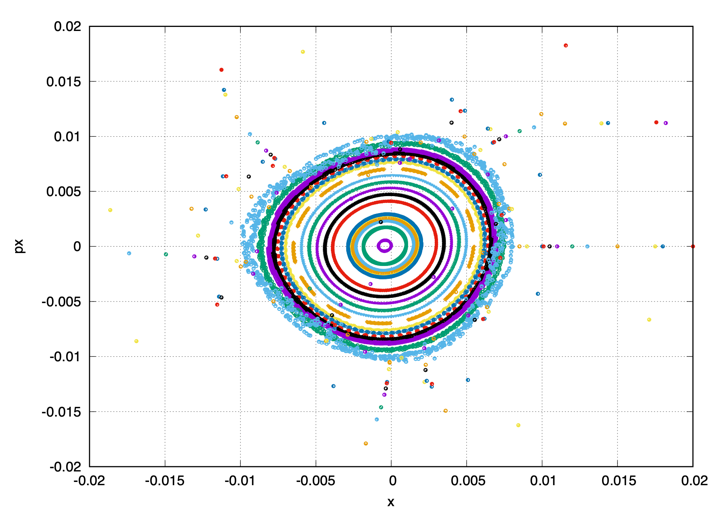
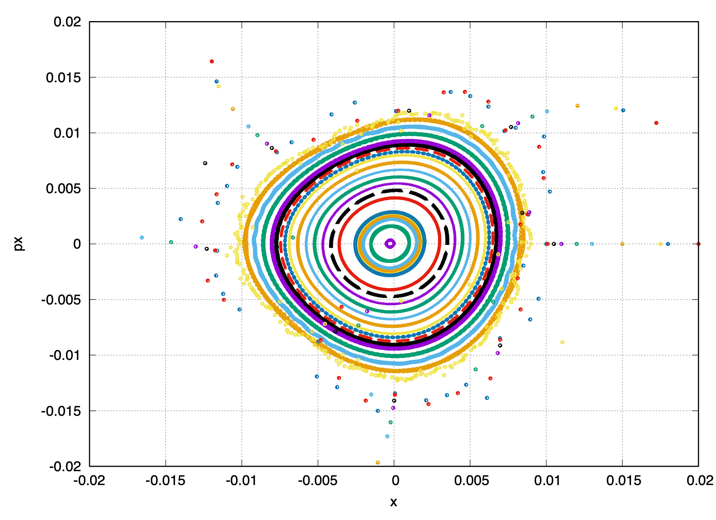
* + 1. **Динамическая апертура и рабочая точка**

Рабочая точка для всего кольца , такая же как и для регулярной структуры. На Рисунке 3 изображены динамические апертуры для этой рабочей точки в обоих плоскостях для разных .

dp/p = 0.0%

Динамическая апертура в x-плоскости: ; в x-плоскости: ;

dp/p = 0.5 %

******

dp/p = 0.3%

Рисунок 9 Динамическая аппретура для случая плавления дисперсии крайними квадруполями.   
Слева – x-плоскость; справа – y-плоскость.

* 1. **Подавление дисперсии двумя семействами квадруполей арки.**
     1. **Выбор градиентов квадруполей**

Данный способ показывает возможность подавления дисперсии на прямых участках при помощи только двух семейств фокусирующих квадруполей.

Тут важно учесть, как и в первом случае выполнить:

1. Получение необходимого значения критической энергии на всем кольце коллайдера, что соответствует ;
2. Только при помощи квадруполями двух семейств подавить дисперсию на прямых участках

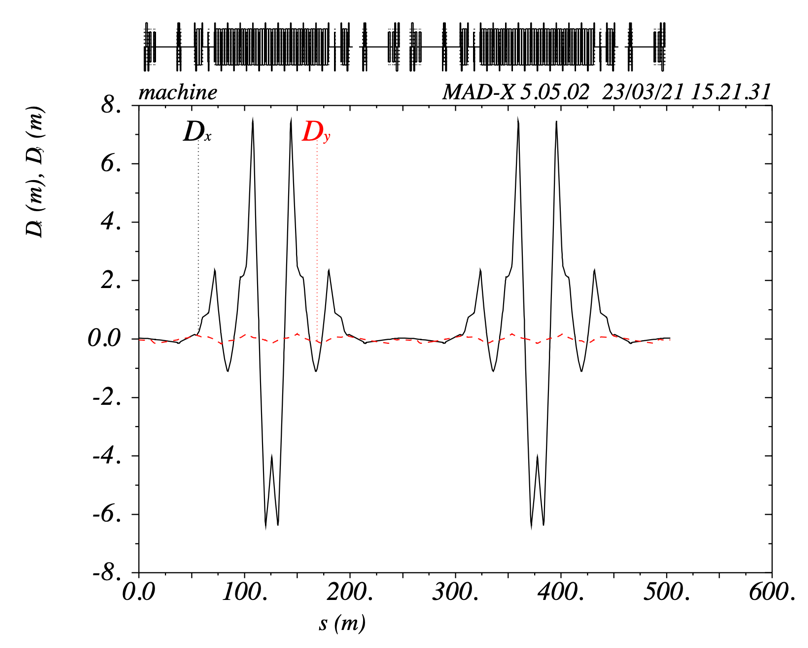
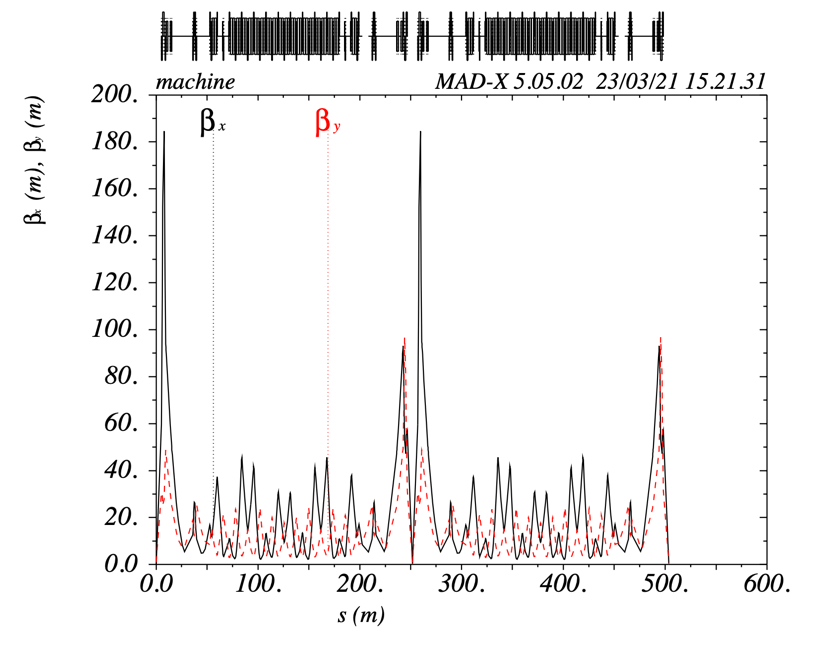


Рисунок 10 Подавление дисперсии двумя семействами квадруполей.   
Слева – бета-функции; Справа – дисперсионные функции.

Изначально выбирается суперпериод, как и в первом случае с набегом на суперпериоде . Тем самым получаем значения квадруполей QF1 и QF2 для всей арки, в том числе и на краях.

Однако, получается, что дисперсия на прямых участках оказывается не подавленной. Для подавления значения градиентов квадруполей изменяется, но в таком случае набег фазы на арке становится равен , то есть в x–плоскости кратен .

|  |  |
| --- | --- |
| **Квадруполи** | **Градиент, T/m** |
| QF1 | 28,95 |
| QF2 | 19,91 |
| QD | –22,6 |

В этом случае для достижения требуемого значения критической энергии необходимо обеспечить большую модуляцию градиентов квадруполей, чем в случае подавления дисперсии крайними суперпериодами.

* + 1. **Расстановка секступолей**

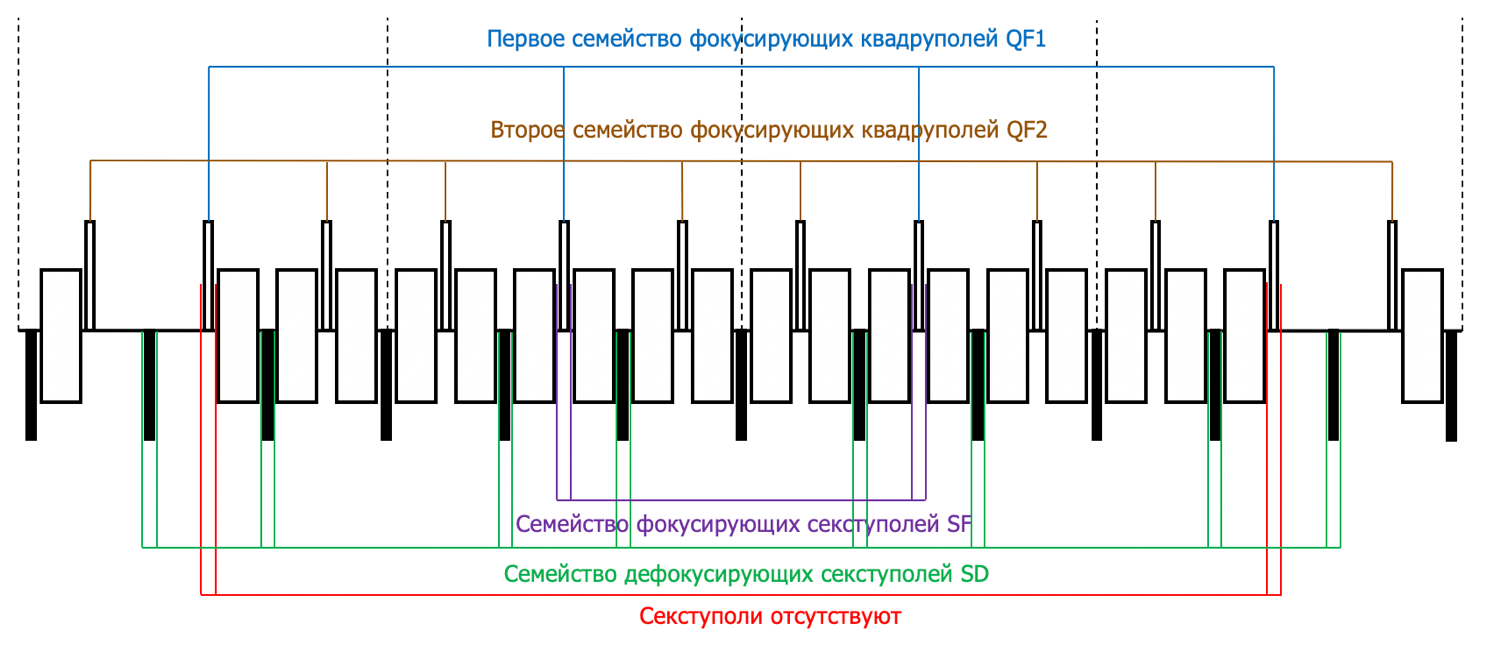


Рисунок 11 Принципиальная схема расстановке секступолей в случае подавления дисперсии двумя семействами квадруполей

В силу того, что набег на арке не кратен , а также между центральными квадруполями не кратен , а равен , получается что секступоли не компенсируют друг друга в точности. Расстановка секступолей для этого случая отлична от расстановки секступолей при наличии подавителей дисперсии на краях арки. Семейство SF устанавливаться рядом c центральными квадруполями суперпериода QF1, а SD рядом с дефокусирующими квадруполями QD, но только теми, которые окружают QF1 слева и справа. Однако, в крайних суперпериодах секступоли фокусирующего семейства отсутствуют. Это сделано для уменьшения влияния секступолей на динамическую апертуру. Подавление же хроматичности возможно и без них, так как основной вклад вносят секступоли 2 и 3 суперпериода.

* + 1. **Динамическая апертура и рабочая точка**

Рабочая точка для всего кольца , такая же как и для регулярной структуры. На Рисунке 3 изображены динамические аппретуры для этой рабочей точки в обоих плоскостях для разных . Динамическая апертура в x-плоскости: ; в x-плоскости: ;

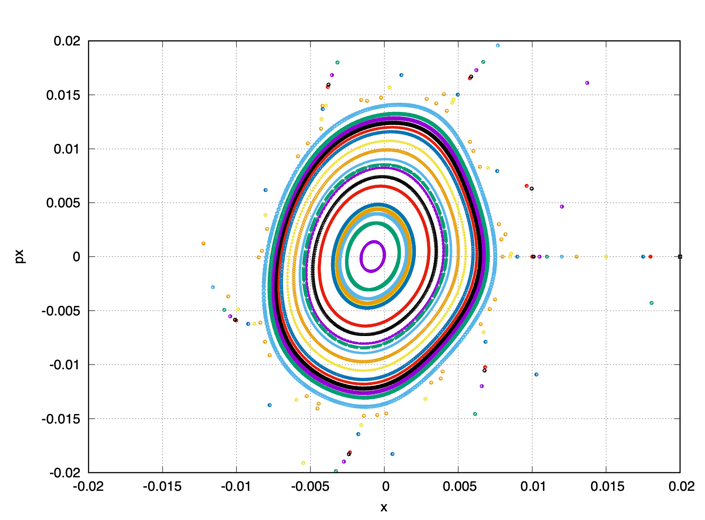
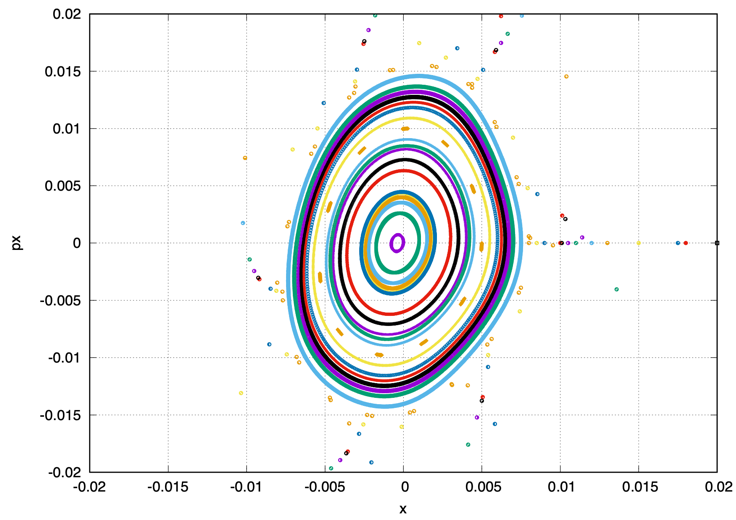
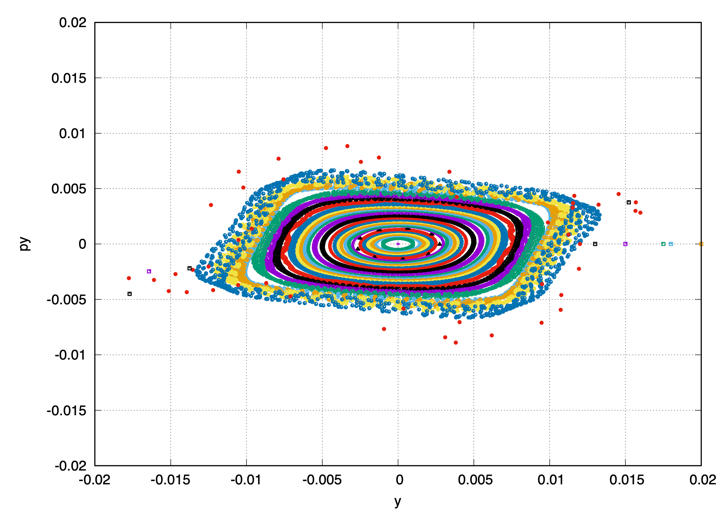
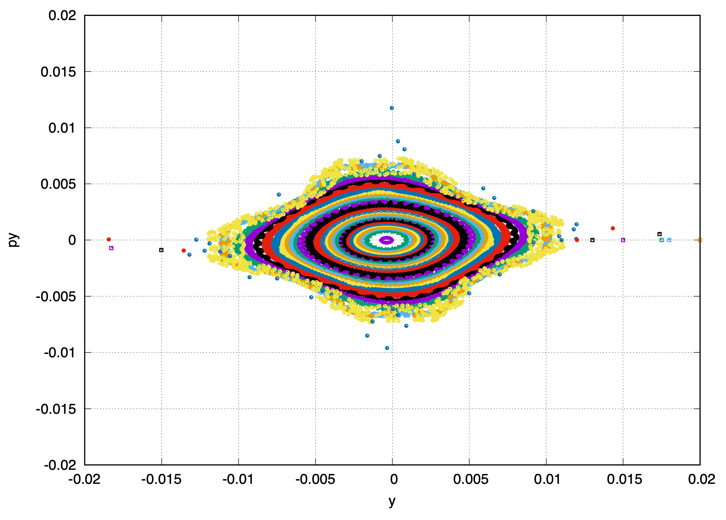
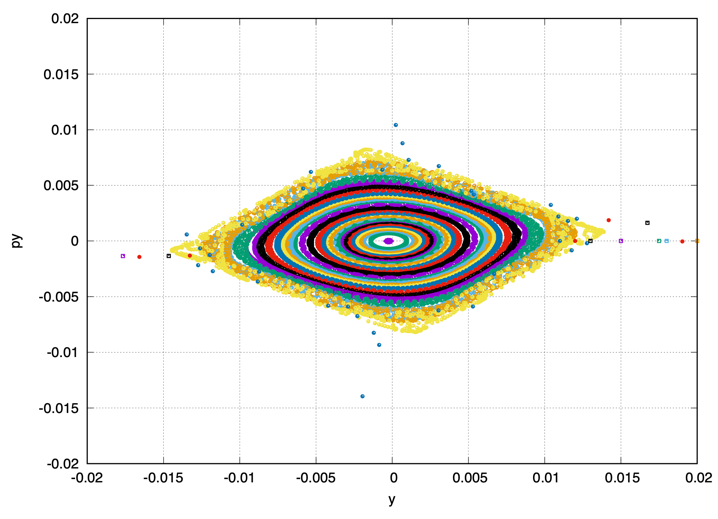
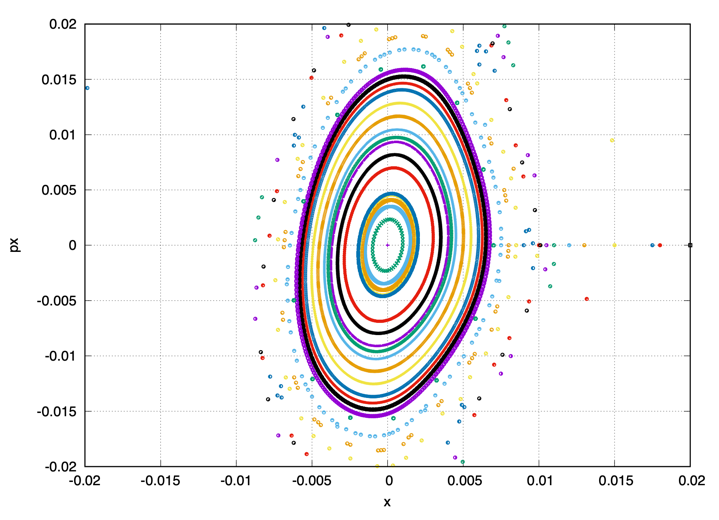
********

Рисунок 12 Динамическая апертура в случае подавление дисперсии двумя семействами квадруполей.  
Слева – x-плоскость; справа – y-плоскость.

dp/p = 0.5 %

dp/p = 0.1 %

dp/p = 0.3 %

**Литература.**

1. Yu. V. Senichev and A. N. Chechenin. Theory of “Resonant” Lattices for Synchrotrons with Negative Momentum Compaction Factor. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2007, Vol. 105, No. 5, pp. 988–997
2. Yu. V. Senichev and A. N. Chechenin. Construction of “Resonant” Magneto-Optical Lattices with Controlled Momentum Compaction Factor Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2007, Vol. 105, No. 6, pp. 1141–1156.
3. Yu. Senichev, A. Chechenin, S. Kostromin. Variable Transition Energy Lattices based on different periodic cells with various types of dispersion suppressor.
4. Bruno Autin Dispersion Suppression with Missing Magnets in a FODO Structure Application To The CERN Antiproton Accumulator, IEEE Transactions on Nuclear Science Vol. NS-26, No. 3, June 1979.
5. Bernhard J. Holzer. Beam optics and lattice design for particle accelerators. CERN Yellow Report CERN-2013-001, pp.171-206
6. B. Lorentz, A. Lehrach, R. Maier, D. Prasuhn, H. Stockhorst, and R. Tölle, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Germany. HESR Linear Lattice Design. Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy.
7. P.J.Bryant, Planning Sextupole Families in a Circular Collider. Advanced accelerator physics. Proceedings, 5th Course of the CERN Accelerator School, Rhodos, Greece, September 20-October 1, 1993. Vol. 1, 2.
8. Е. М. Сыресин, А. В. Бутенко, П.Р. Зенкевич, О.С. Козлов, С.Д. Колокольчиков, С.А. Костромин, И.Н. Мешков, Н.В. Митянина, Ю.В. Сеничев, А.О. Сидорин, Г.В.Трубников. Формирование Поляризованных Протонных Пучков в Ускорительном Комплексе Коллайдера NICA.