Повышение интенсивности пучка ионов в Бустере NICA: планы, ограничения, ожидания

Д.К. Чумаков, В.А. Лебедев
chumadan@jinr.ru

XVI Международный семинар по проблематике ускорителей заряженных частиц памяти проф. В. П. Саранцева

Дубна, 2026

Планы и ожидания

- Сеанс ПНР-К1: накопление $9.2 \cdot 10^7$ ионов $^{124}Xe^{26+}$; ускорение, вывод из Бустера $7 \cdot 10^7$ ионов $^{124}Xe^{26+}$.
- Сдвиг бетатронных частот от пространственного заряда – потери на резонансах.
- Задача на новый сеанс: светимость в Коллайдере 10^{25} см$^{-2}$·с$^{-1}$;
- Нужна максимальная интенсивность в инжекционном (Бустер, Нуклотрон, каналы) с минимальными потерями;
- Ожидаемая интенсивность в Бустере $2 \ldots 3 \cdot 10^8$ ионов $^{124}Xe^{26+}$;
- Как настроить Бустер для максимальной эффективности накопления?
- Как ускорить и вывести накопленный пучок с минимумом потерь?

Продольное накопление

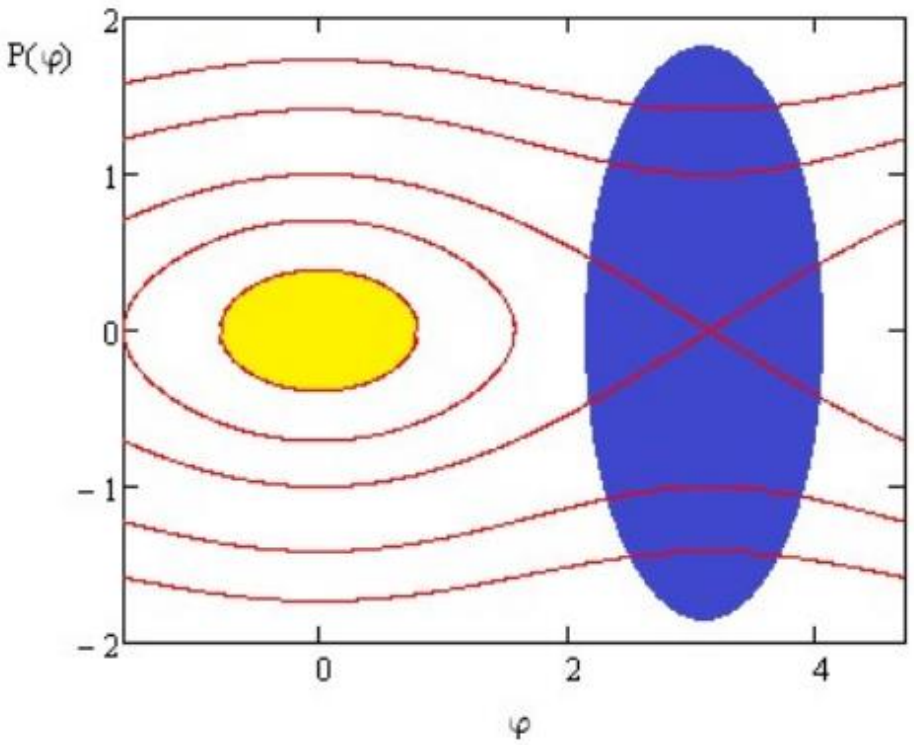
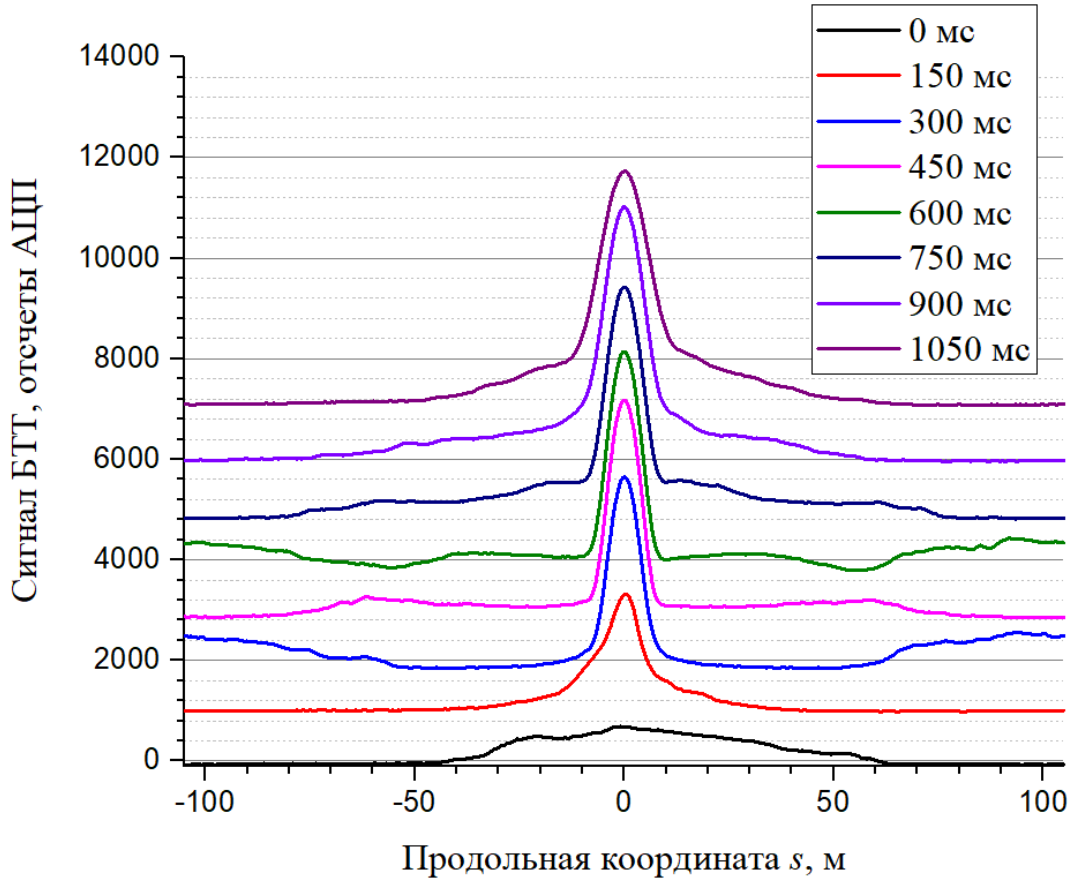


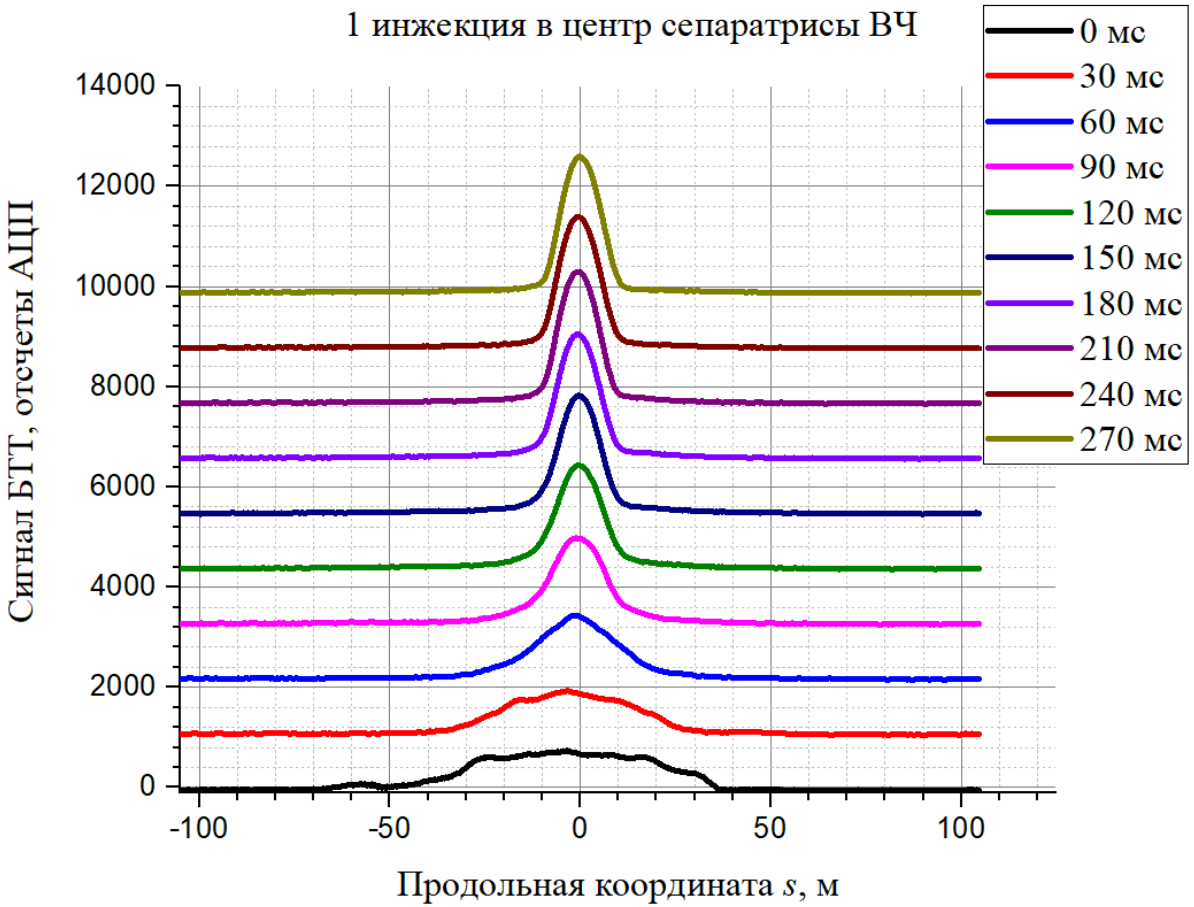
Схема многократной однооборотной инжекции
в продольное фазовое пространство



Накопление трех последовательных инжекций,
данные с быстрого трансформатора тока.
Ноль сигнала для каждой кривой смещен для
наглядности.

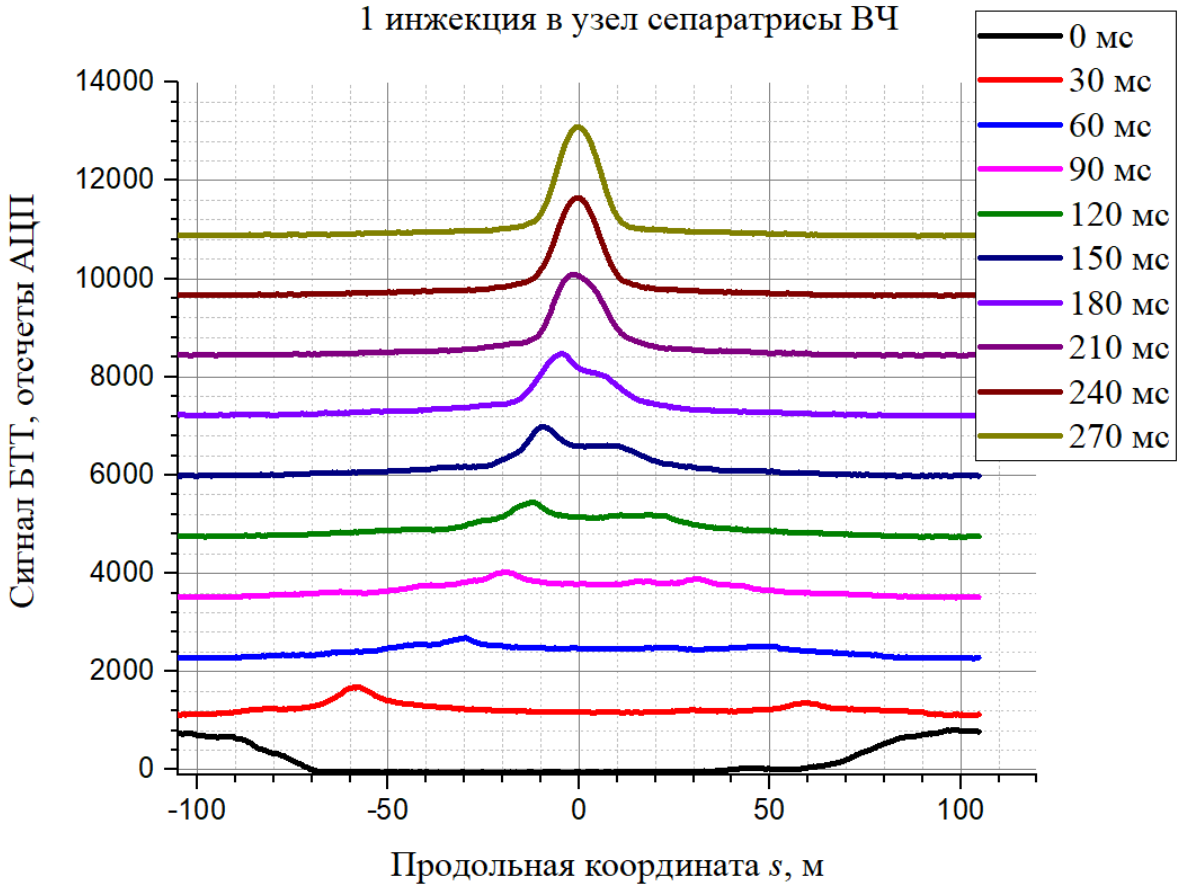
- На выходе из ЛУТИ: $\mathbf{2.1..2.3 \cdot 10^7}$ ионов;
- КРИОН: произвели 10 инжекций за цикл;
- Хорошо: накопление $\mathbf{2.2 \cdot 10^8}$ ионов $^{124}Xe^{26+}$;
- Первая – в центр сепаратрисы, последующие – в край.

Инжекция в центр и край сепаратрисы



Охлаждение пучка, инжектированного в центр сепаратрисы
Ноль сигнала для каждой кривой смещен для наглядности.

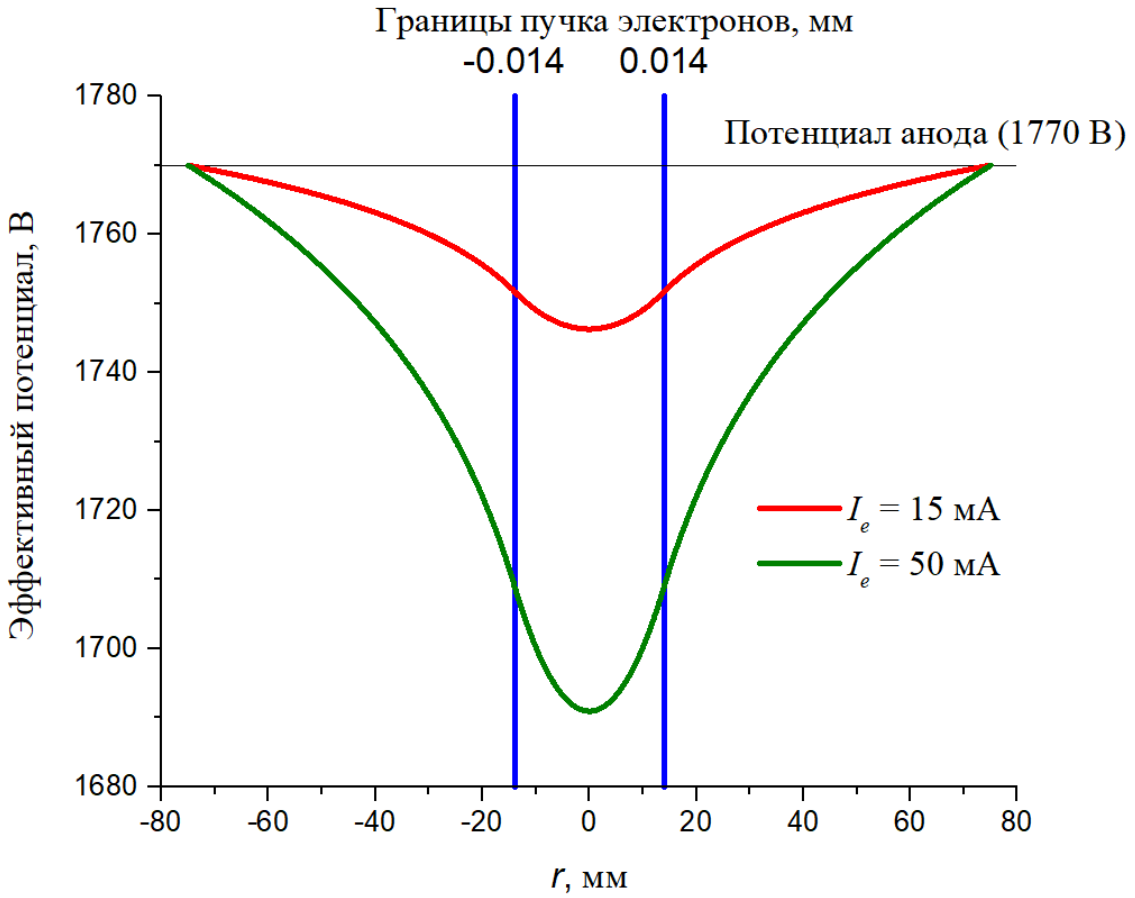
Характерное время ~ 70-100 мс

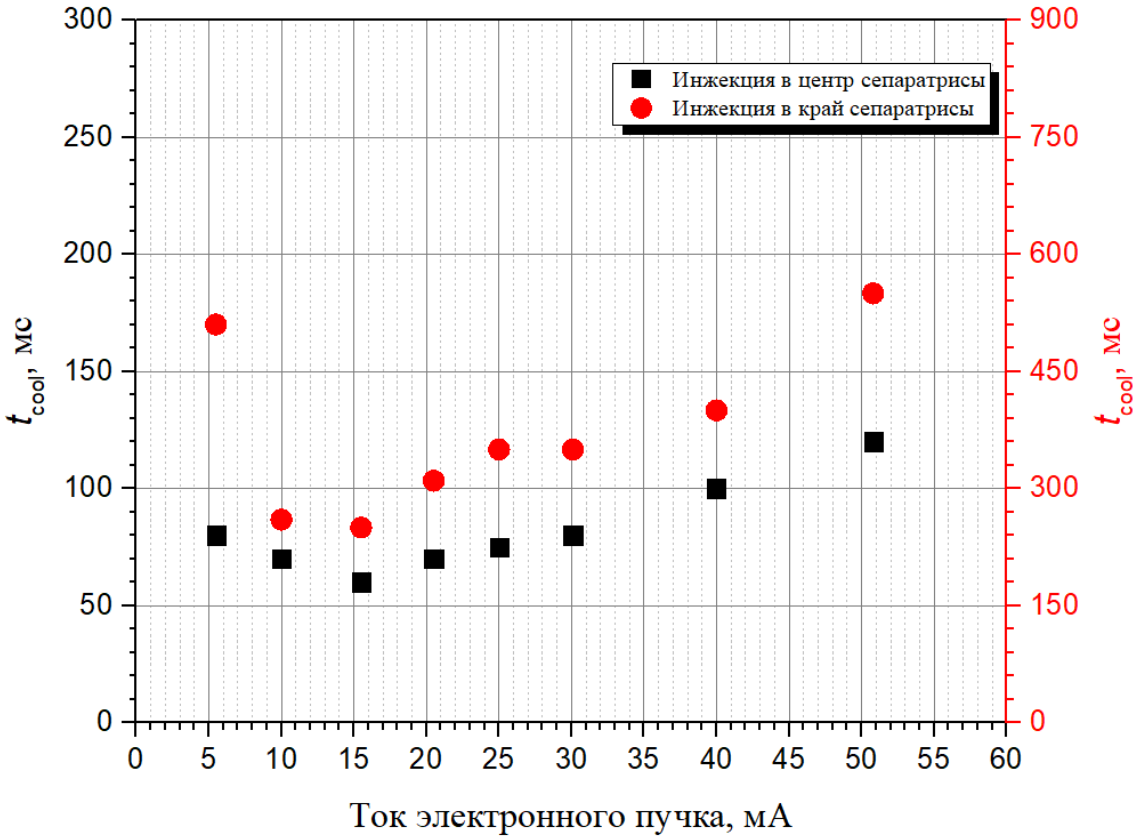


Охлаждение пучка, инжектированного в край сепаратрисы
Ноль сигнала для каждой кривой смещен для наглядности.

Характерное время ~ 250 мс
«Хвосты» полностью группируются за ~ 400 мс

Выбор тока электронного пучка



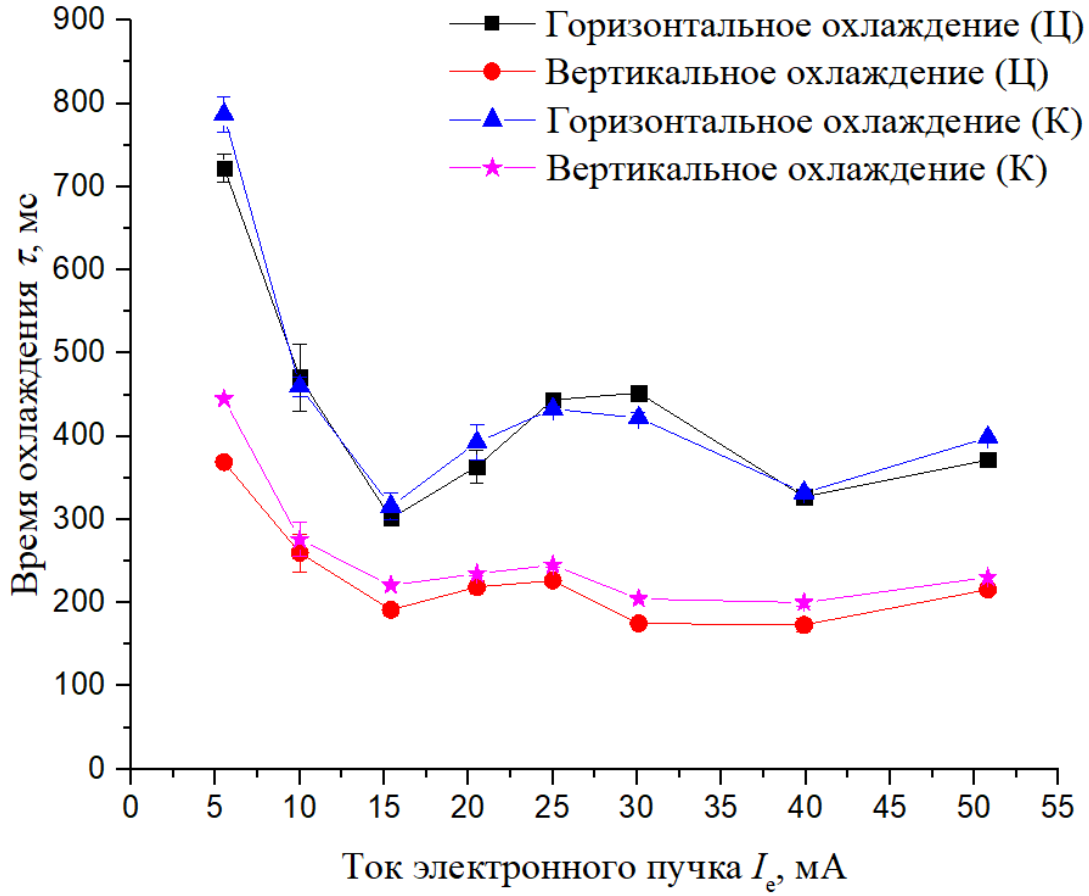


Синие линии – границы эл.пучка
Провисание потенциала влияет на энергию электронов СЭО

Время охлаждения пучка, инжектированного в центр и край сепаратрисы при разных токах пучка электронов

Поперечное охлаждение

- Нет разницы для поперечной степени свободы, инжектируем ли мы пучок в центр или край сепаратрисы
- Несмотря на связь, времена для *X* и *Y* различаются
- Горизонтальное охлаждение преднамеренно ухудшено для уменьшения плотности пучка в поперечном фазовом пространстве



Накопление: октябрь 2025

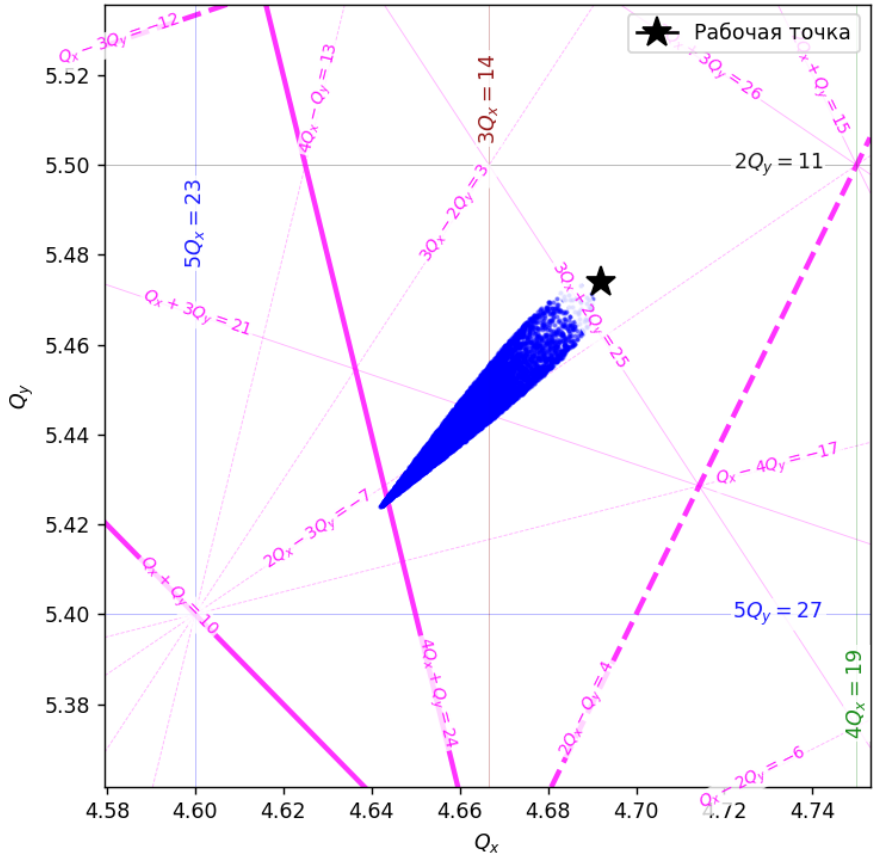
01-02.10.25. 10х инжекций. Qx=4.692 Qy=5.474/5.469 k1 = 0.053 k2 = 0.0727.

Изменение положения пучка на пикапе №16. Изменение хроматизма вариацией тока в секступолях. Дальнейшая оптимизация рабочей точки, положения пучка, коррекция хроматизма не проводились: цель – инжекция в Нуклотрон. D_x = 0.15 м

250 мс между инжекциями



Максимальное накопление 9.2×10^7 ионов



Накопление: январь 2026

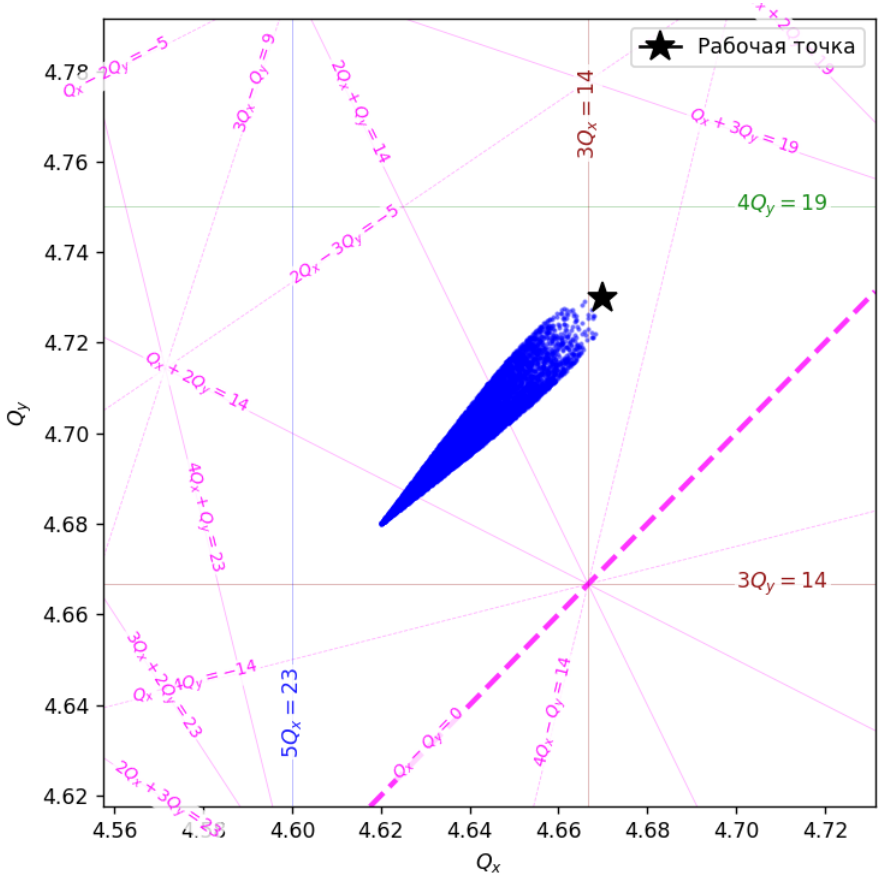
07-11.01.26. Трехкратная инжекция. Qx=4.67 Qy=4.73 k1 = 0.097 k2 = 0.022.

Накопленный пучок ускорен без потерь до 200 МэВ/н, переведен в Нуклотрон. Дисперсия в области СЭО D_x = 0.22 м. 250 мс между инжекциями.

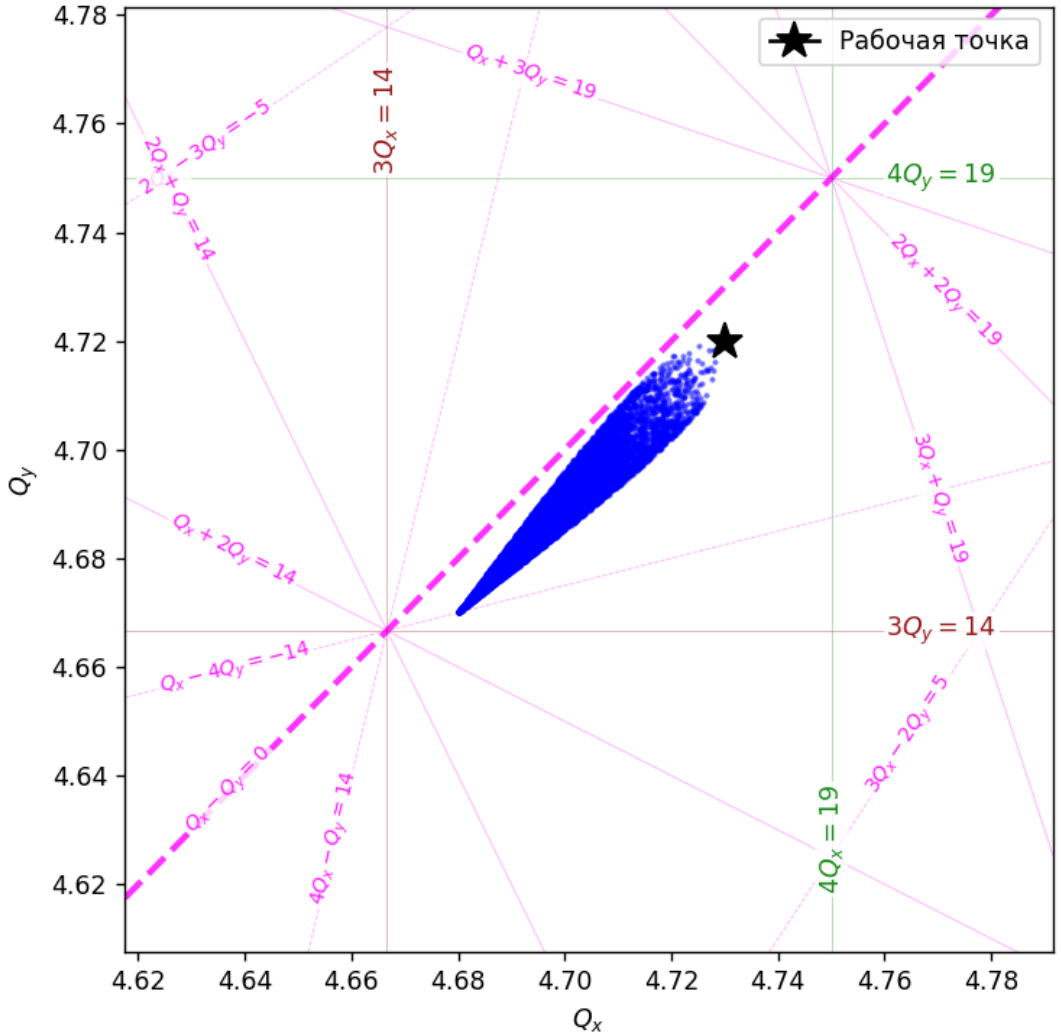
Стремимся к Qx=4.74, Qy=4.72 – мешает связь.



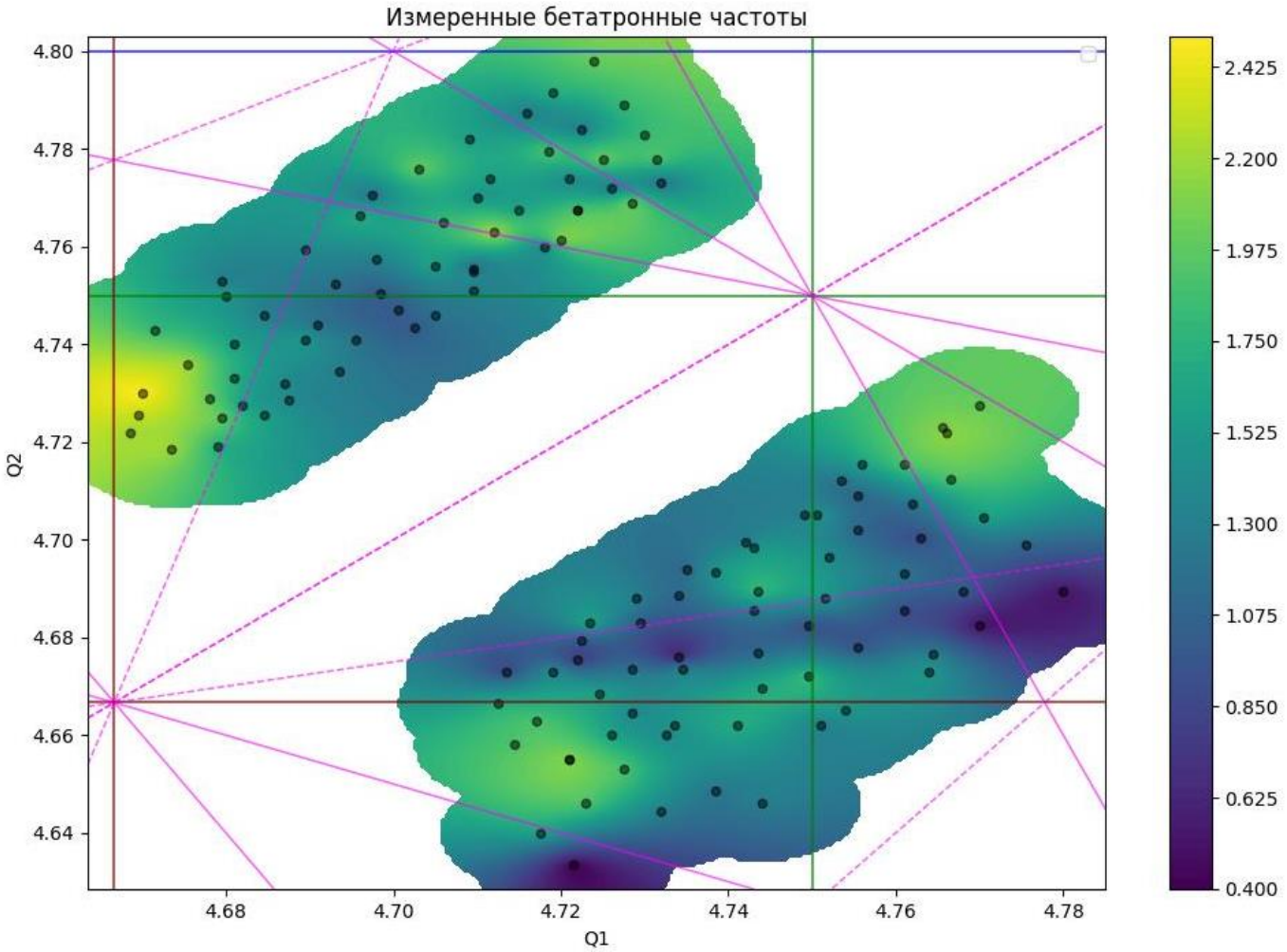
Максимальное накопление 7×10^7 ионов



Накопление: выбор рабочей точки



Рабочая точка 4.74/4.72 при подавлении связи…



… и результаты сканирования рабочей точки (соленоид 700 Гс)

Сдвиг бетатронных частот пучка под действием собственного пространственного заряда

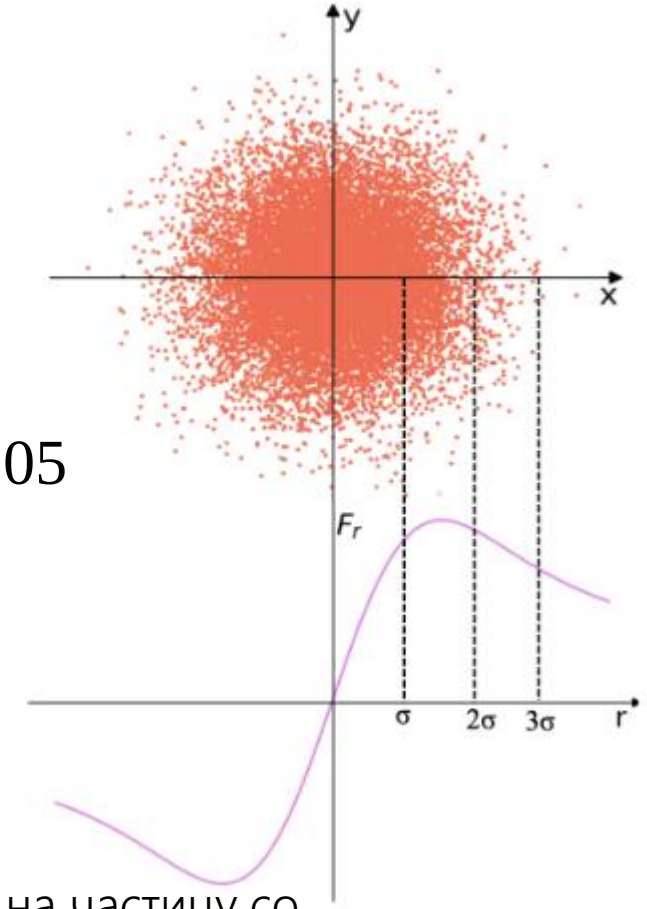
Для сгруппированного пучка с гауссовым поперечным распределением:

$$\Delta Q_x = -\frac{N r_0}{\pi \beta^2 \gamma^3 B_f} \frac{2}{4\varepsilon_x^{1\sigma}\left(1+\frac{\sqrt{\varepsilon_y^{1\sigma}\langle\beta_y\rangle}}{\sqrt{\varepsilon_x^{1\sigma}\langle\beta_x\rangle}}\right)} \qquad r_0 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Z^2 e^2}{A m_0 c^2} \qquad B_f = \frac{I_{avg}}{I_{peak}}$$

Введем требование по максимальному сдвигу частот: $|\Delta Q_{x,y}| \leq 0.05$

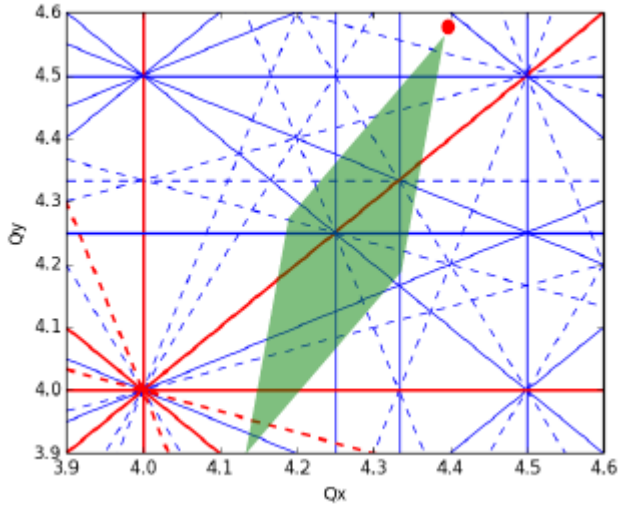
Тогда максимально мы можем накопить N_{max} частиц:

$$N_{max} = |\Delta Q_x| \frac{\pi \beta^2 \gamma^3 B_f}{r_0} \cdot \frac{4\varepsilon_x^{1\sigma}\left(1+\sqrt{\varepsilon_y^{1\sigma}\langle\beta_y\rangle}/\sqrt{\varepsilon_x^{1\sigma}\langle\beta_x\rangle}\right)}{2}$$



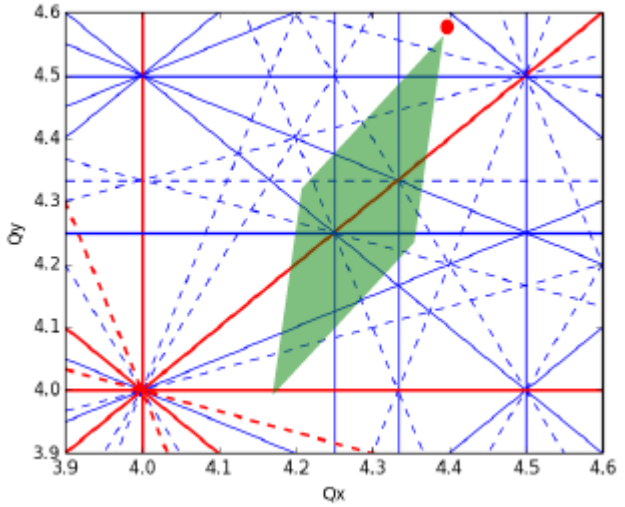
Сила, действующая на частицу со стороны поля пространственного заряда пучка

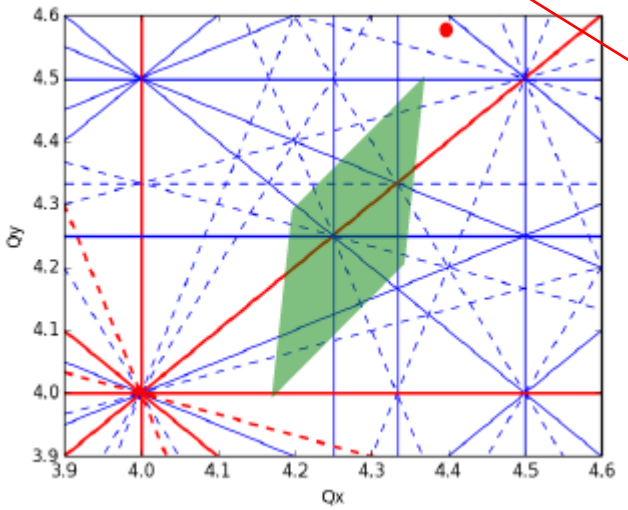
Механизм потери частиц пучка

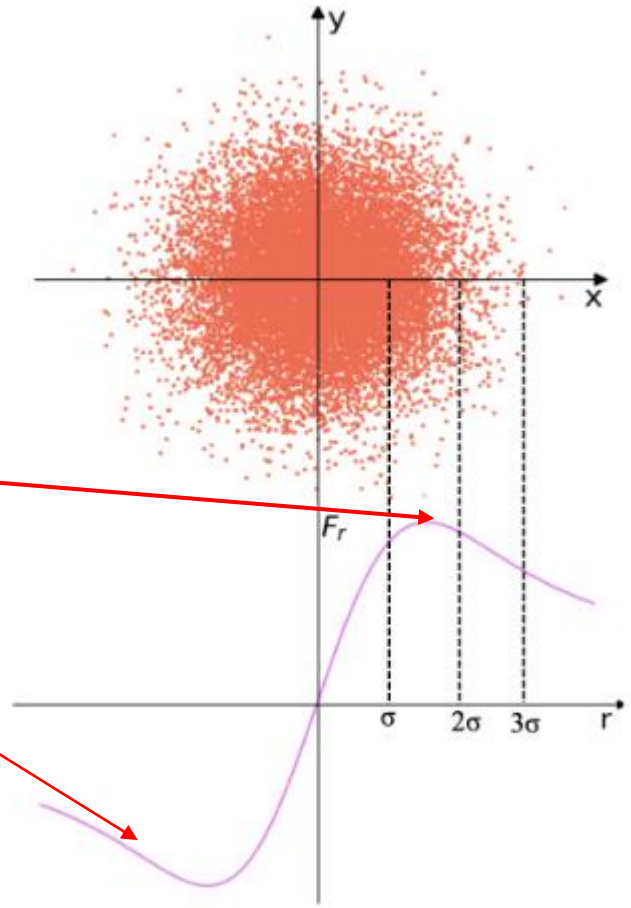


… на резонансах низших порядков

… на резонансах высших порядков из-за развития нелинейности с ростом напряженности поля пространственного заряда: периферия пучка





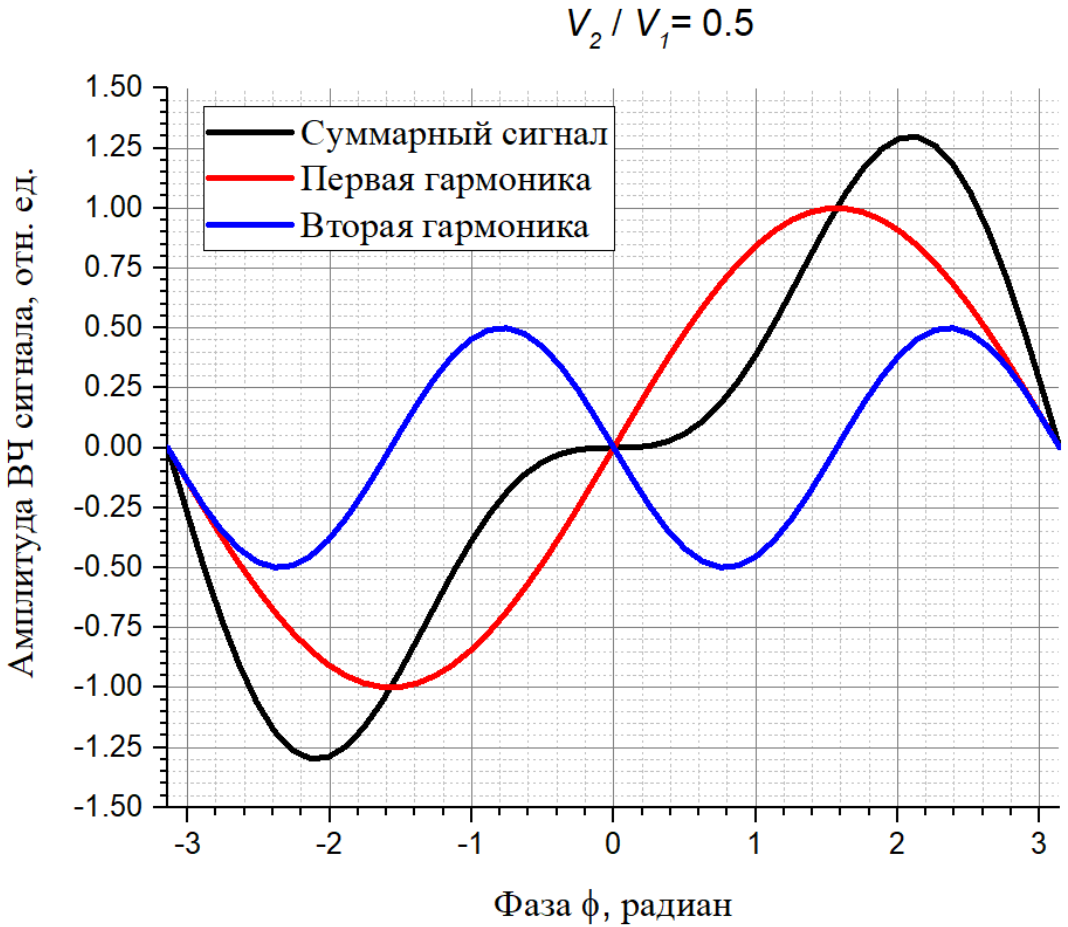


Как увеличить предел накопления?

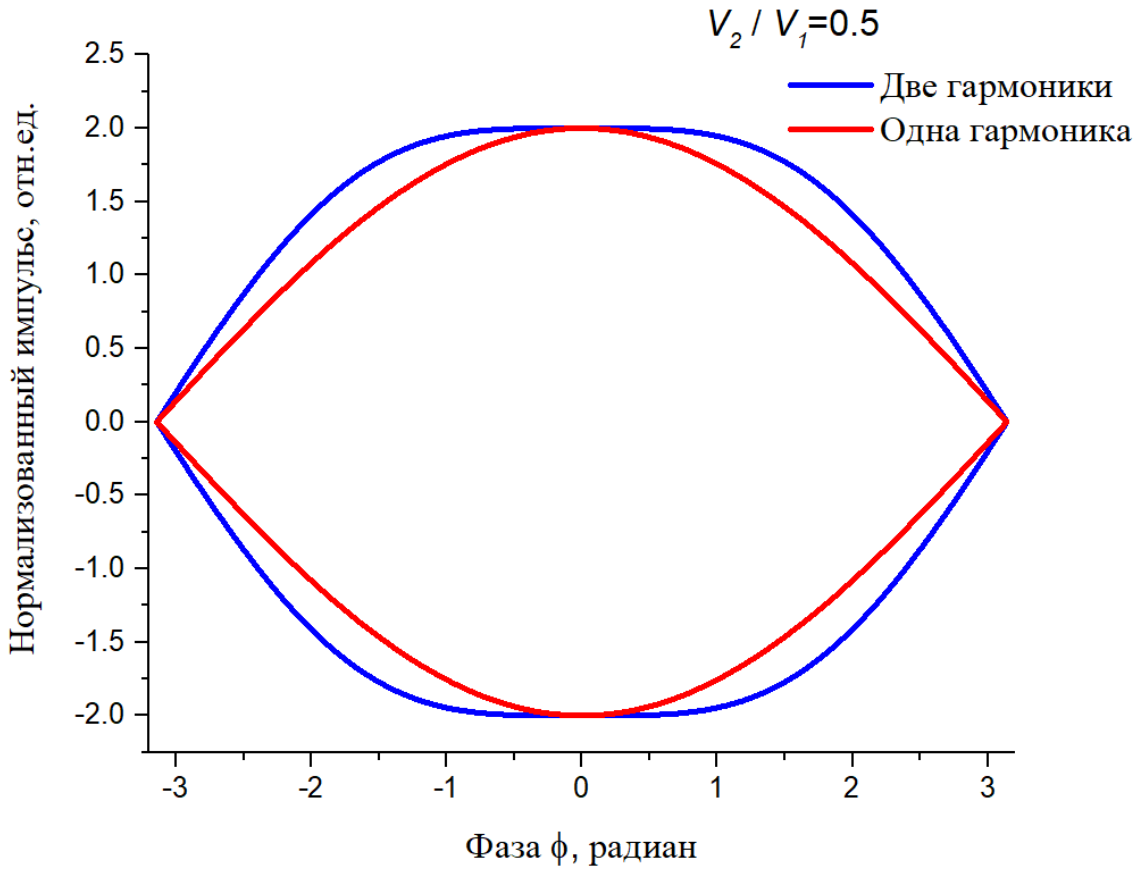
- Мы не перестраиваем ускоритель, поэтому $\beta, \gamma, r_0, \langle\beta\rangle$ - константы;
- Нормализованный поперечный эмиттанс при накоплении – не больше 0.3 мм·мрад;
- Коррекция мультипольными корректорами для уменьшения силы резонансов высоких порядков.
- Предел поперечного эмиттанса – из размера электронного пучка (эффективность охлаждения): $3\sigma_{x,y} \leq r_e$
- $|\Delta Q|$ - выбранное ограничение сдвига частот, сохраняется.
- Остается только фактор группировки пучка $\boldsymbol{B_f = I_{avg}/I_{peak}}$.

$$N_{max} = |\Delta Q_x| \frac{\pi\beta^2\gamma^3 B_f}{r_0} \cdot \frac{4\varepsilon_x^{1\sigma}\left(1+\sqrt{\varepsilon_y^{1\sigma}\langle\beta_y\rangle}/\sqrt{\varepsilon_x^{1\sigma}\langle\beta_x\rangle}\right)}{2}$$

Группировка и ускорение двумя гармониками



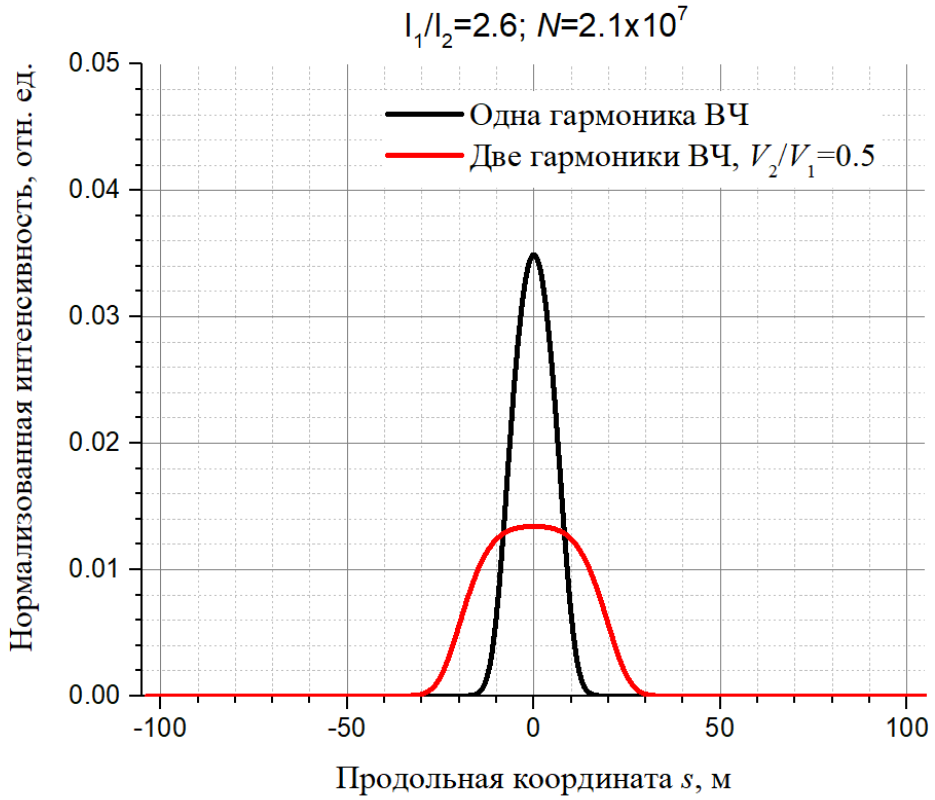
Формирование действующего сигнала двухгармонической ВЧ системы



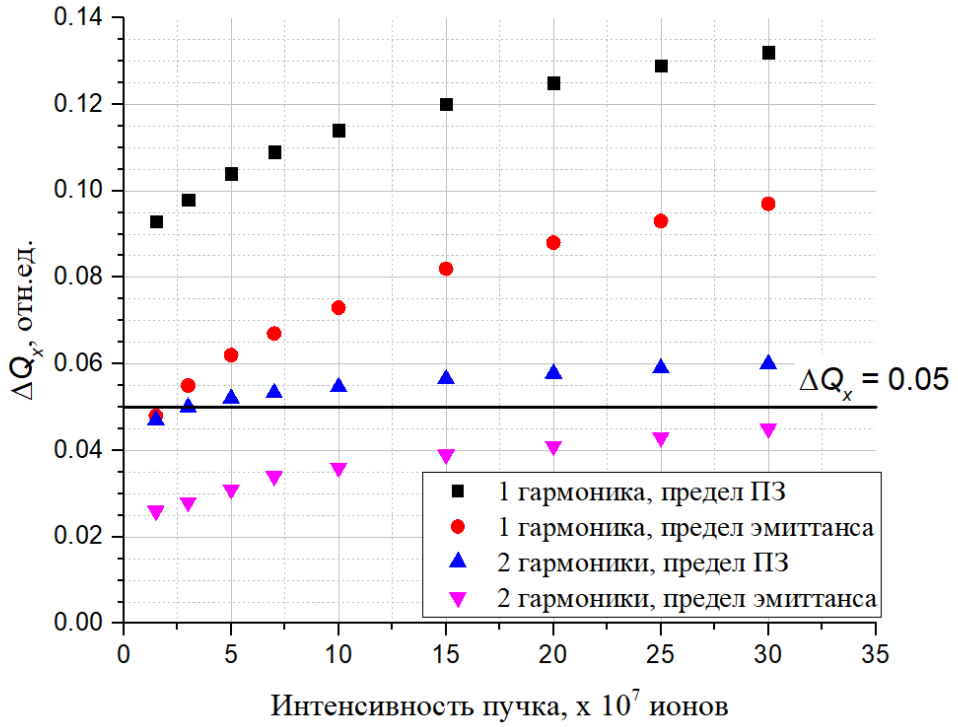
Сравнение сепаратрис одно- и двухгармонического ВЧ сигнала

Сдвиг бетатронных частот при накоплении

- Предел по пространственному заряду: фактор группировки и эмиттанс из равновесия охлаждения и внутрипучкового рассеяния
- Предел по эмиттансу: пучок не охлаждаем до равновесия, его поперечный размер должен помещаться в пучка электронов СЭО ($3\sigma_{x,y} \leq r_e$).



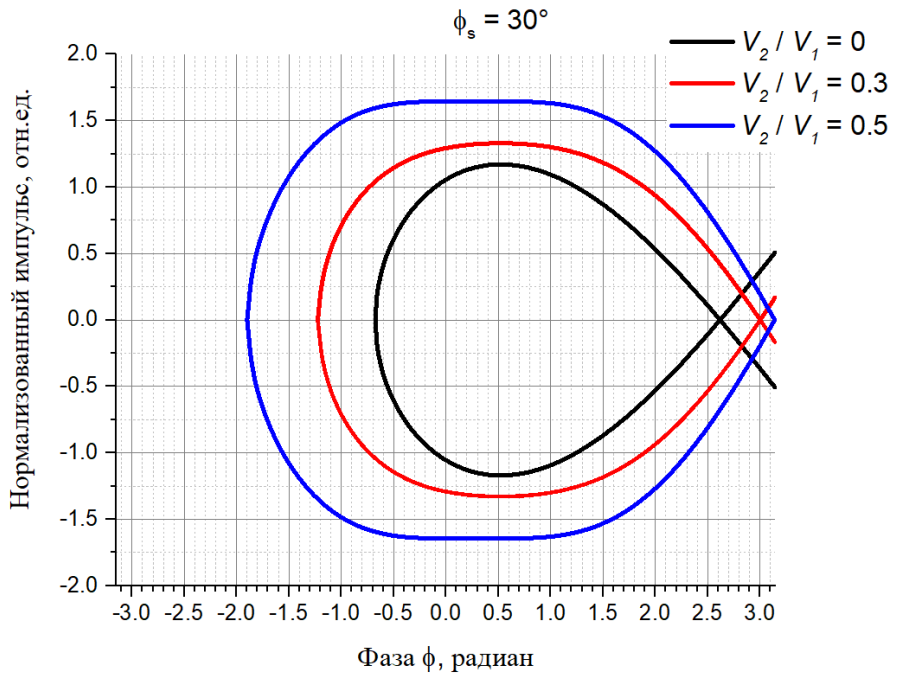
Сравнение распределений, сгруппированных разным ВЧ напряжением



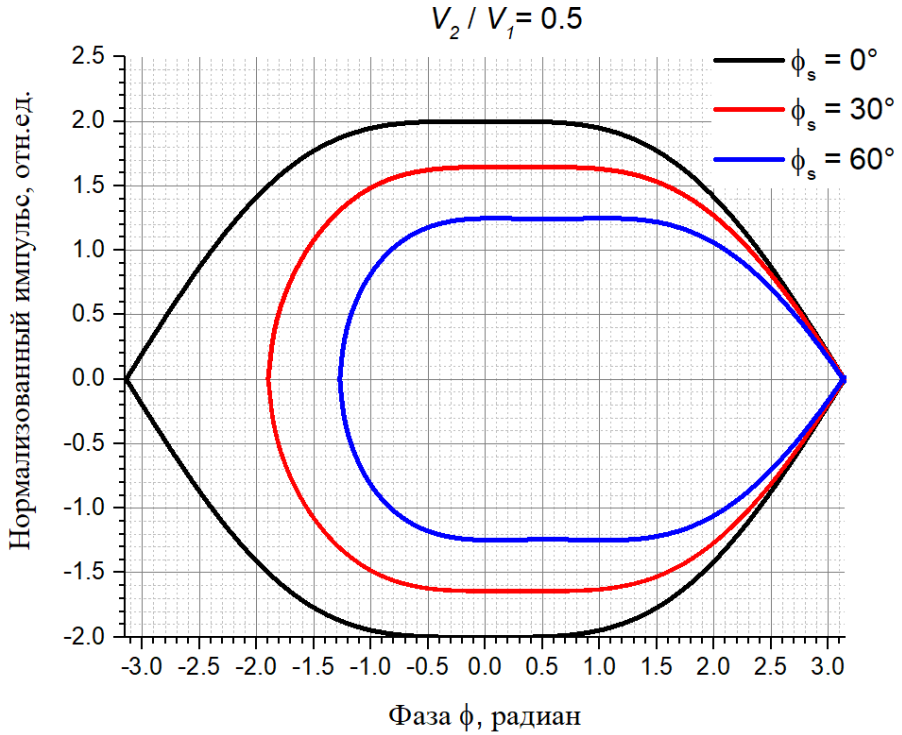
ΔQ_x для равновесных и неравновесных пучков разной интенсивности с использованием разных гармоник

Группировка и ускорение двумя гармониками

- Нужно адиабатическое ускорение;
- Долю второй гармоники уменьшаем постепенно ($\Delta Q_{x.y}$).
- Плоская потенциальная яма нужна для наибольшего $B_f = I_{peak}/I_{avg}$



Разные отношения амплитуд гармоник



Разные значения ускоряющей фазы 1-й гармоники

Когда отключать вторую гармонику?

$$\Delta Q_x \propto \frac{1}{\beta^2 \gamma^3 B_f}$$

Сдвиг частот уменьшается при ускорении.

Фактор группировки растет при ускорении

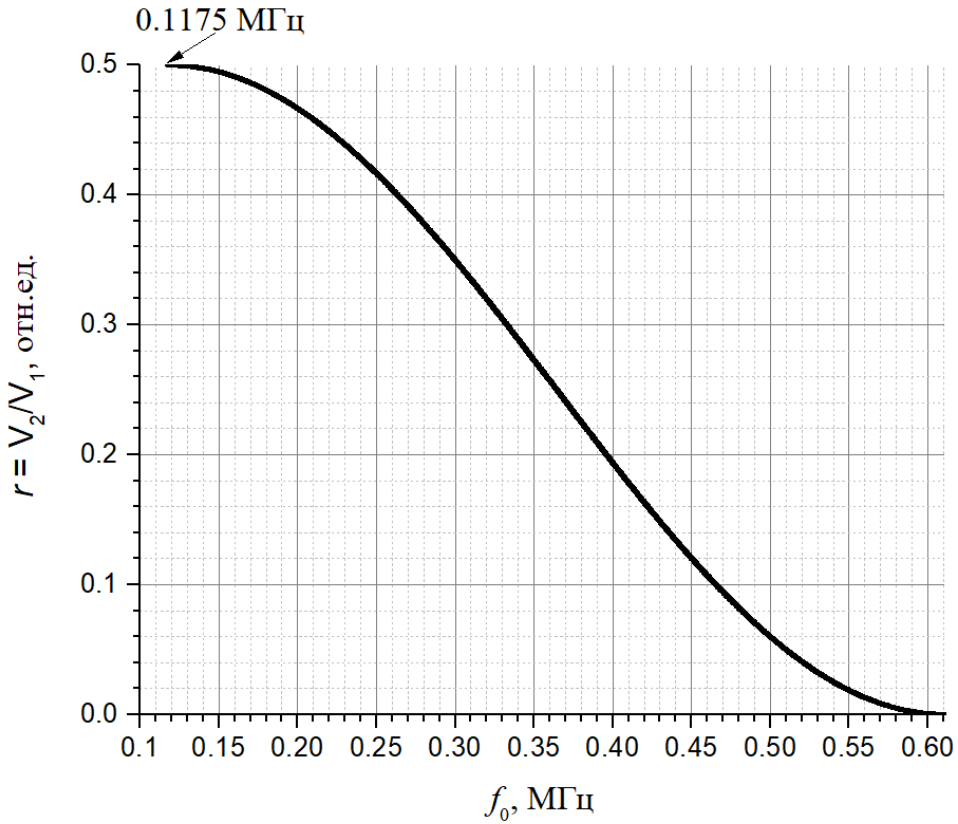
Введем зависимость $r(f) = V_2 / V_1$

Зависимость достаточно плавная, чтобы

на начальном этапе сохранять минимальный B_f

$$r \cdot \frac{1}{2}\left[\cos\left(\pi \cdot \frac{f - f_0}{f_{fin} - f_0}\right) + 1\right]$$

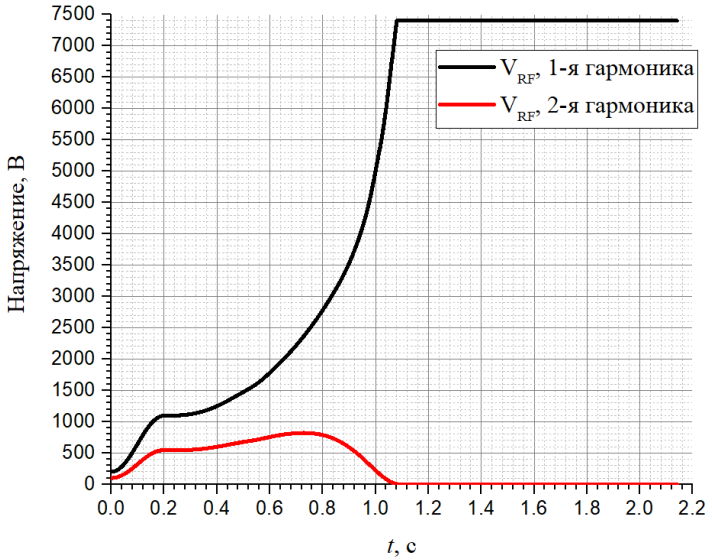
где f_0, f_{fin} - частота обращения пучка на инжекции и при 100 МэВ/н соответственно.



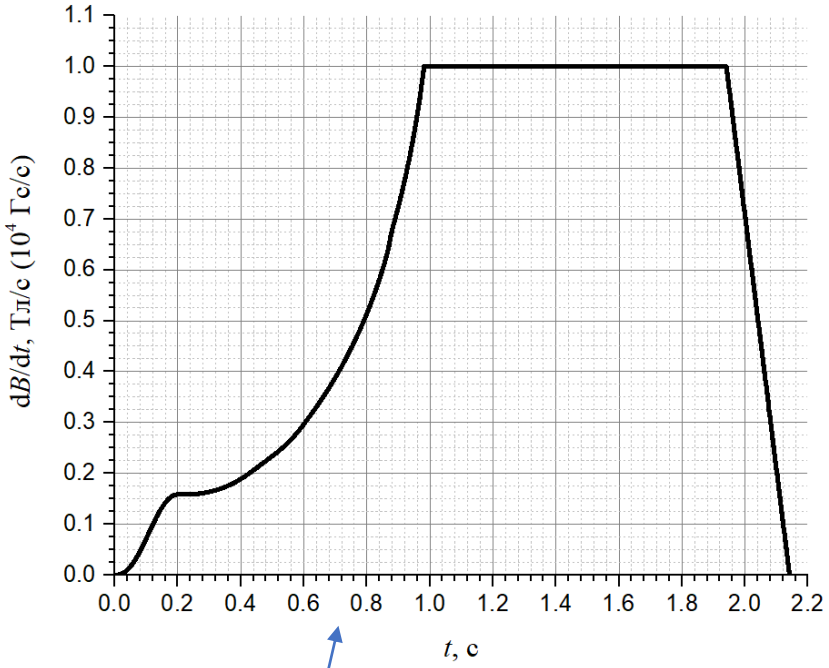
Закон изменения амплитуды второй гармоники отн. амплитуды первой

Таблица для алгоритма

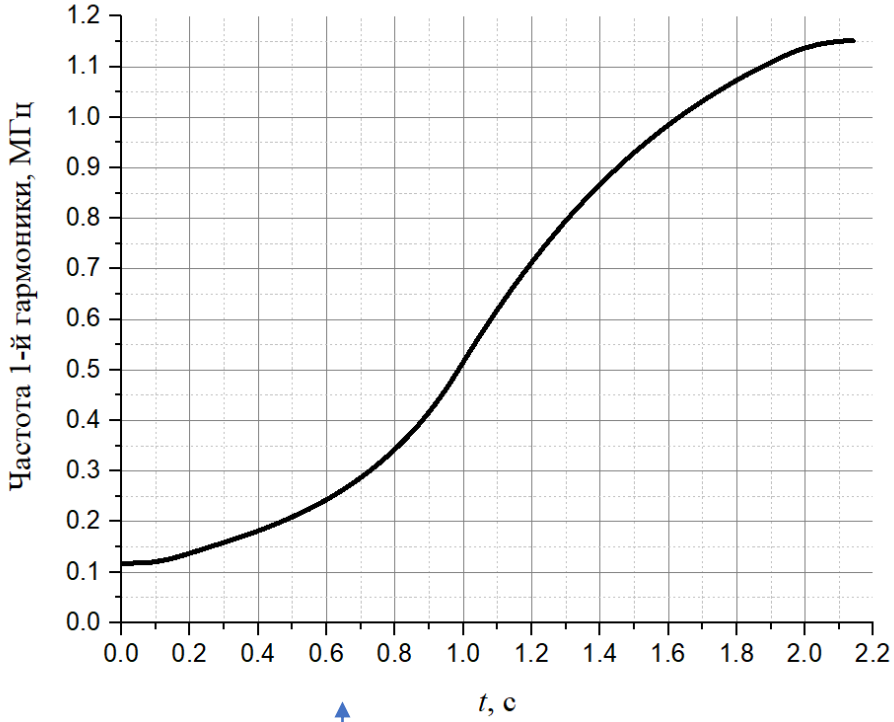
- Основана на алгоритме согласования амплитуды ускоряющего напряжения и темпа роста магнитного поля (О.И. Бровко, А.А. Володин, Ф.Н. Ганюшкин, В.А. Лебедев, Е.М. Сыресин), дополненном для двух ВЧ гармоник



Амплитуда ВЧ гармоник



Темп роста маг.поля



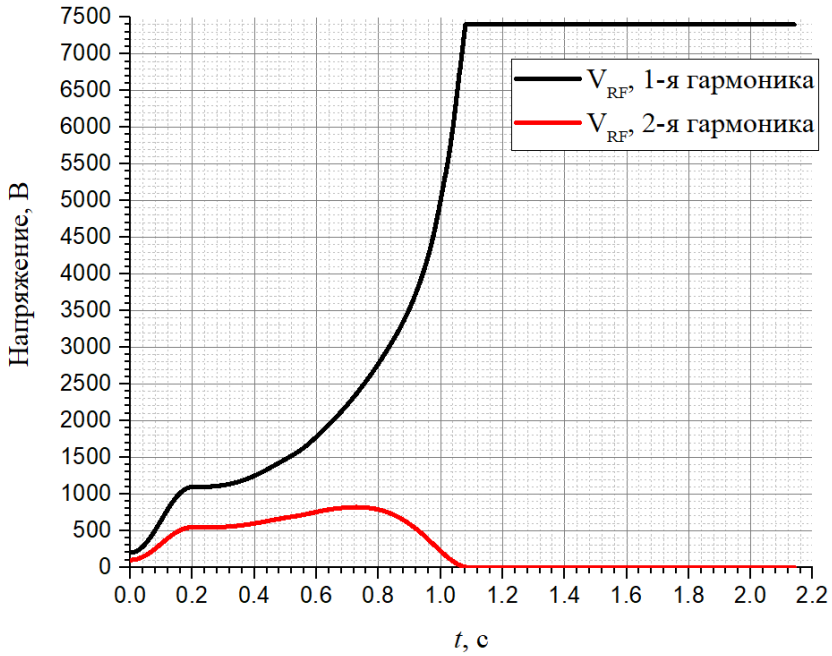
Частота 1-й гармоники

Сдвиг бетатронных частот при ускорении

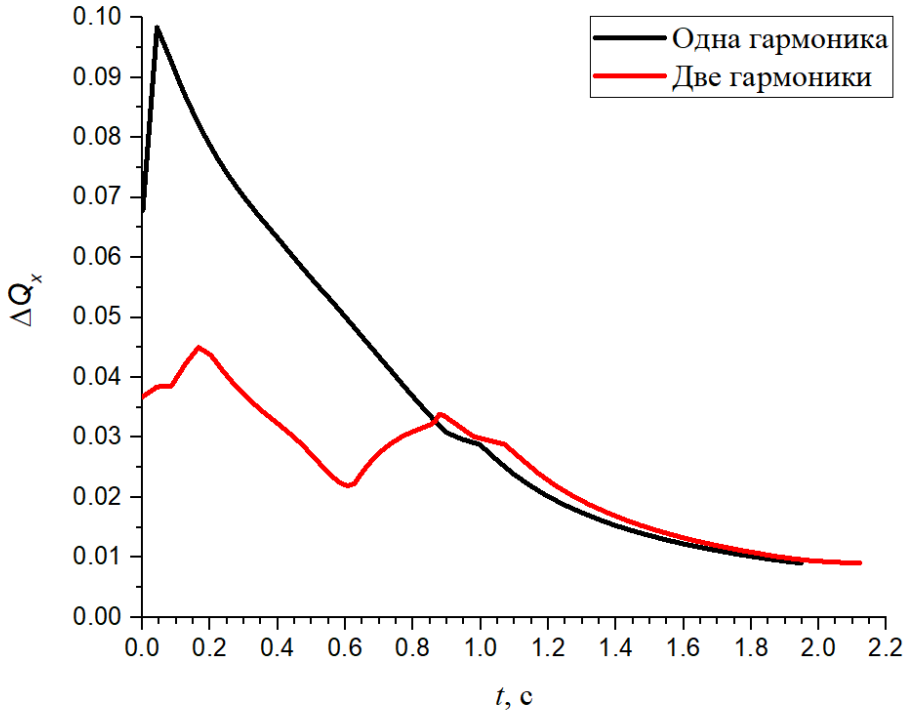
В начале ускорения быстро растет пиковый ток;

При постепенном отключении второй гармоники ΔQ_x стремится к величине, полученной для одной гармоники

Поэтому вторая гармоника остается до энергий порядка 100 МэВ/н



Амплитуда ВЧ гармоник



Сдвиг бетатронных частот при ускорении

Итоги

- Настройка накопления – итерационный процесс;
- Выбор рабочей точки, оптимизация инжекции, коррекция орбиты, коррекция связи.
- Оптимизация СЭО. Возможно, охлаждение стоит «испортить»;
- Ухудшение поперечного охлаждения или «полый» пучок;
- Внедрение второй гармоники увеличивает фактор группировки пучка в 2-3 раза – а значит, и предел накопленных частиц;
- Нужно проверить накопление с двумя гармониками, коррекцией секступолями и оптимизацией орбиты пучка.
- Ускорение также необходимо проводить с сохранением двух гармоник как можно дольше.
- Больше энергия вывода – меньше потери пучка в канале, но тогда попадаем на ограничения по магнитной жесткости элементов канала.

Повышение интенсивности пучка ионов в Бустере NICA: планы, ограничения, ожидания

Д.К. Чумаков, В.А. Лебедев
chumadan@jinr.ru

XVI Международный семинар по проблематике ускорителей заряженных частиц памяти проф. В. П. Саранцева

Дубна, 2026