

Проблемы и перспективы разрезного микротрона

Выполнил аспирант кафедры ОЯФ
Борисов Максим Антонович

Научный руководитель
Шведун В Василий Иванович

План доклада

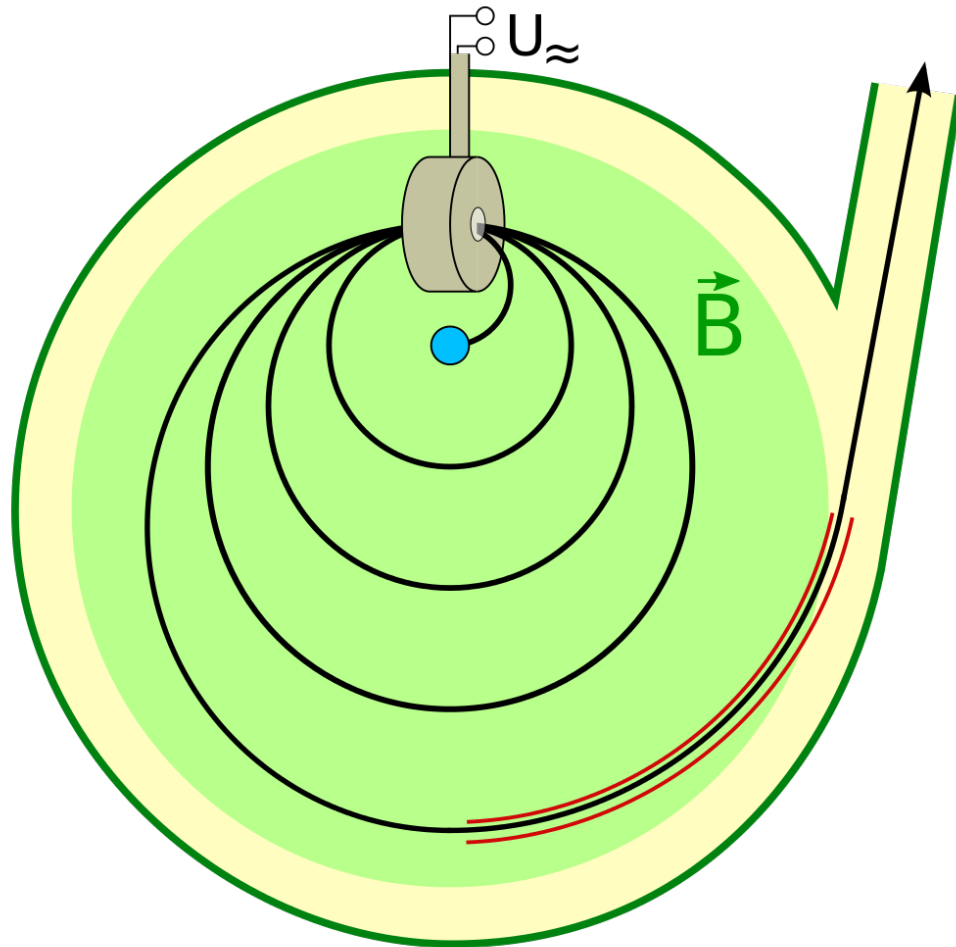
- Описание устройства разрезного микротрона и его сравнение с линейным ускорителем электронов
- Обсуждение возможно использования электронных ускорителей для наработки медицинских изотопов
- Примеры разрезных микротронов
- Постановка основных проблем разрезных микротронов и возможные пути их решения

Цель доклада

- Показать, что разрезной микротрон является напрасно “забытой” технологией и после некоторых доработок может представлять хорошую альтернативу линейному ускорителю.
- Обозначить проблемы и возможные пути их решения.

На данный момент начат цикл разработки разрезного микротрона на энергию 35 МэВ с большим выходным током. Принципиальным отличием является полное трехмерное моделирование ускорителя.

Классический микротрон



Принцип действия классического микротрона был предложен Векслером в 1944 г. Основная идея состояла в выборе так называемого микротронного режима ускорения, когда период обращения частицы в магните всегда кратен периоду СВЧ системы.

Название связано с необходимостью использования генераторов сантиметровых волн - микроволн

Основные уравнения

Для обеспечения синхронизма между ускоряющим полем и частицей, необходимо связать величину магнитного поля и прирост энергии за оборот:

$$B = \frac{2\pi\Delta E_p}{ec\lambda}$$

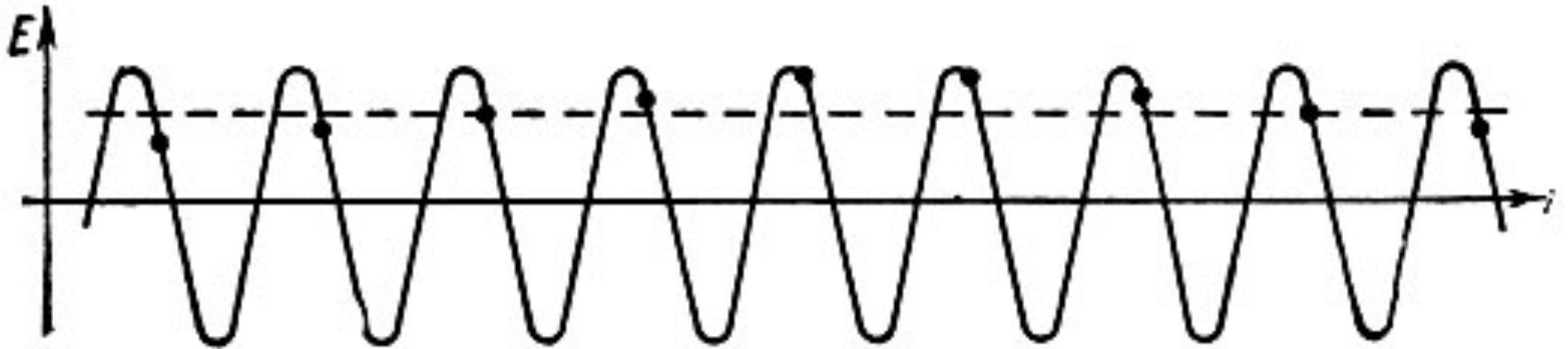
Основная система уравнений:

$$\begin{cases} \delta E_{n+1} = \delta E_n + E_{\text{макс}} * \cos(\delta\varphi_n + \varphi_p) - \Delta E_p \\ \delta\varphi_{n+1} = \delta\varphi_n + 2\pi\nu \frac{\delta E_{n+1}}{\Delta E_p} \end{cases}$$

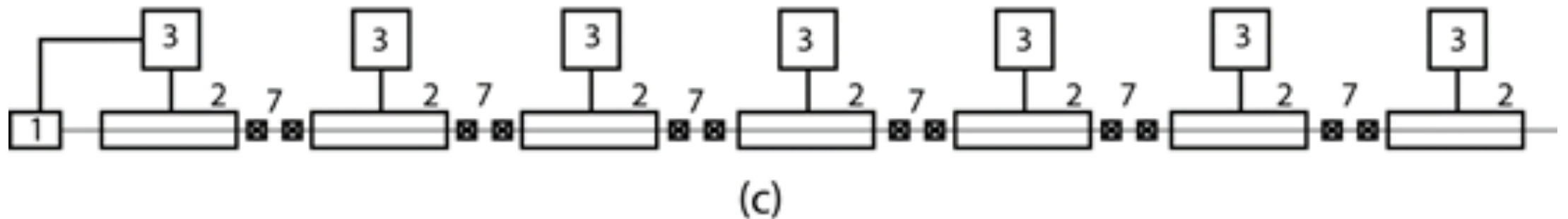
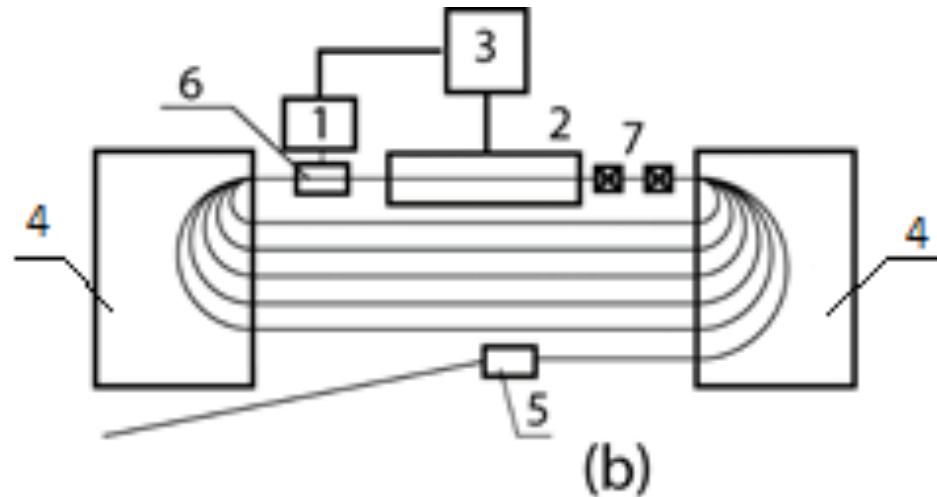
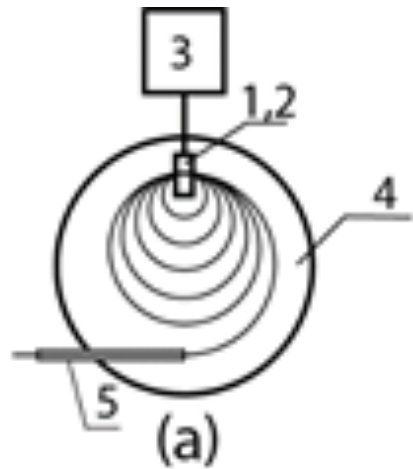
Принцип автофазировки

Область устойчивых фазовых колебаний: $0^\circ \leq \varphi_p \leq 32.48^\circ$

В этой области работает механизм автофазировки и возможно устойчивое ускорение частиц.



Устройство разрезного микротрона



(a) Классический микротрон, (b) разрезной микротрон, (c) линейный ускоритель

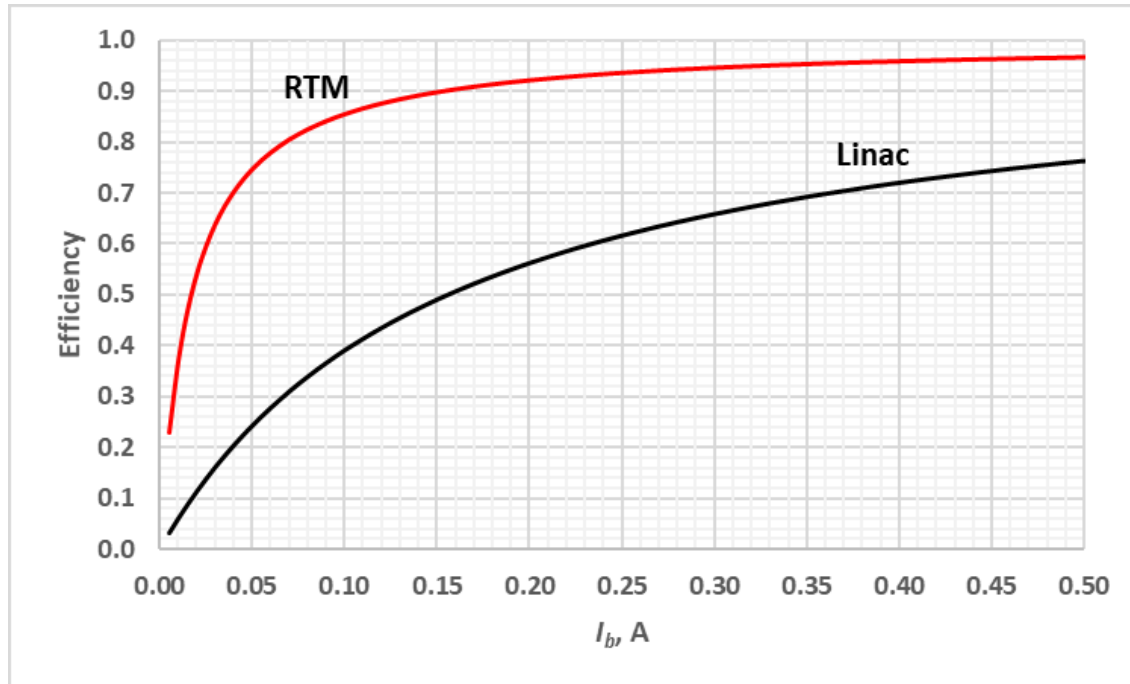
От классического к разрезному микротрону

Переход от классического к разрезному микротрону позволил использовать полноценную ускоряющую структуру вместо одного резонатора, а также применять различные схемы фокусировки и корректировки пучка.

Из минусов можно отметить необходимость использования более сложных поворотных магнитов из-за проблем с рассеянным полем, а также проблему скольжения по фазе частиц на первых орбитах.

Сравнение с линейным ускорителем

Главное преимущество разрезного микротрона перед линейным ускорителем – более эффективное использование СВЧ мощности, так как разрезной микротрон является циклическим ускорителем.



$$\text{Эффективность} = \frac{\text{мощность пучка}}{\text{мощность СВЧ поля}}$$

Главный недостаток – более сложная конструкция

^{99m}Tc

Изотоп ^{99m}Tc является одним из самых востребованных медицинских изотопов. Нашел широкое применение в медицинской диагностике.

Основной способ получения: $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc} + e^- + \bar{\nu}_e$ (так называемые генераторы технеция). Это связано с малым периодом полураспада: $T_{1/2} \approx 6 \text{ ч.}$ ($T_{1/2}(^{99}\text{Mo}) \approx 66 \text{ ч.}$).

Основной способ получения ^{99}Mo это распад ^{235}U . Однако после прекращения работы ряда реакторов, в мире наблюдается недостаток данного изотопа.

Альтернативный способ получения ^{99}Mo

Table 2 Radioactivities produced from the bremsstrahlung γ -ray beam irradiation of 3 min on a 1 g $^{\text{nat}}\text{MoO}_3$ target using a 30 MeV electron beam with a 1 μA intensity

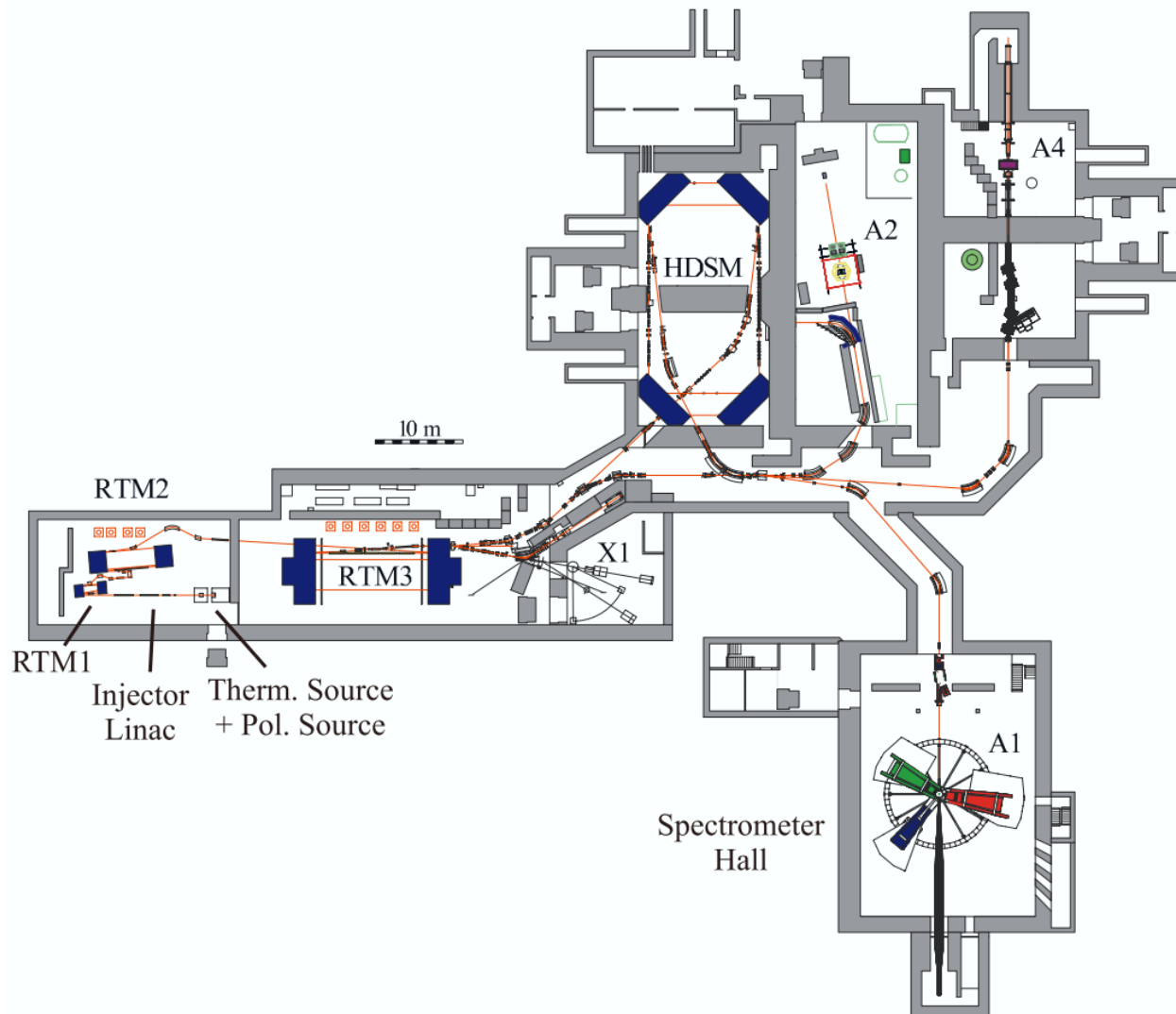
Nucleus	Half-life	Activity ($t = 0$) Bq/ $\mu\text{Ah/g-MoO}_3$	Activity ($t = 24$ h) Bq/ $\mu\text{Ah/g-MoO}_3$
^{90}Mo	5.7 h	$(1.7 \pm 0.1) \times 10^3$	$(9.0 \pm 0.5) \times 10^1$
^{90}Nb	14.6 h	$(1.7 \pm 0.1) \times 10^3$	$(1.3 \pm 0.2) \times 10^1$
$^{91\text{m}}\text{Nb}$	61 days	≤ 80	≤ 80
^{91}Mo	15.5 m	Not determined	Not determined
$^{92\text{m}}\text{Nb}$	10.2 days	$(7.7 \pm 0.9) \times 10^1$	$(7.2 \pm 0.9) \times 10^1$
^{95}Nb	35 days	$(2.1 \pm 0.3) \times 10^2$	$(2.7 \pm 0.3) \times 10^2$
$^{95\text{m}}\text{Nb}$	3.6 days	$(4.5 \pm 0.4) \times 10^2$	$(3.7 \pm 0.3) \times 10^3$
^{96}Nb	23 h	$(1.08 \pm 0.04) \times 10^4$	$(5.2 \pm 0.1) \times 10^2$
^{97}Nb	72 m	$(3.9 \pm 0.4) \times 10^5$	$(3.2 \pm 0.4) \times 10^{-1}$
$^{98\text{m}}\text{Nb}$	51 m	$(2.5 \pm 0.5) \times 10^3$	$(7.9 \pm 1.6) \times 10^{-6}$
^{99}Mo	66 h	$(1.05 \pm 0.06) \times 10^5$	$(8.1 \pm 0.4) \times 10^4$
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 h	$(1.1 \pm 0.1) \times 10^4$	$(7.4 \pm 0.9) \times 10^4$

Takeda T. et al. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ production via the (γ, n) reaction on natural Mo // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2018. – T. 318. – No. 2. – C. 811-821.

Основные требования к ускорителю

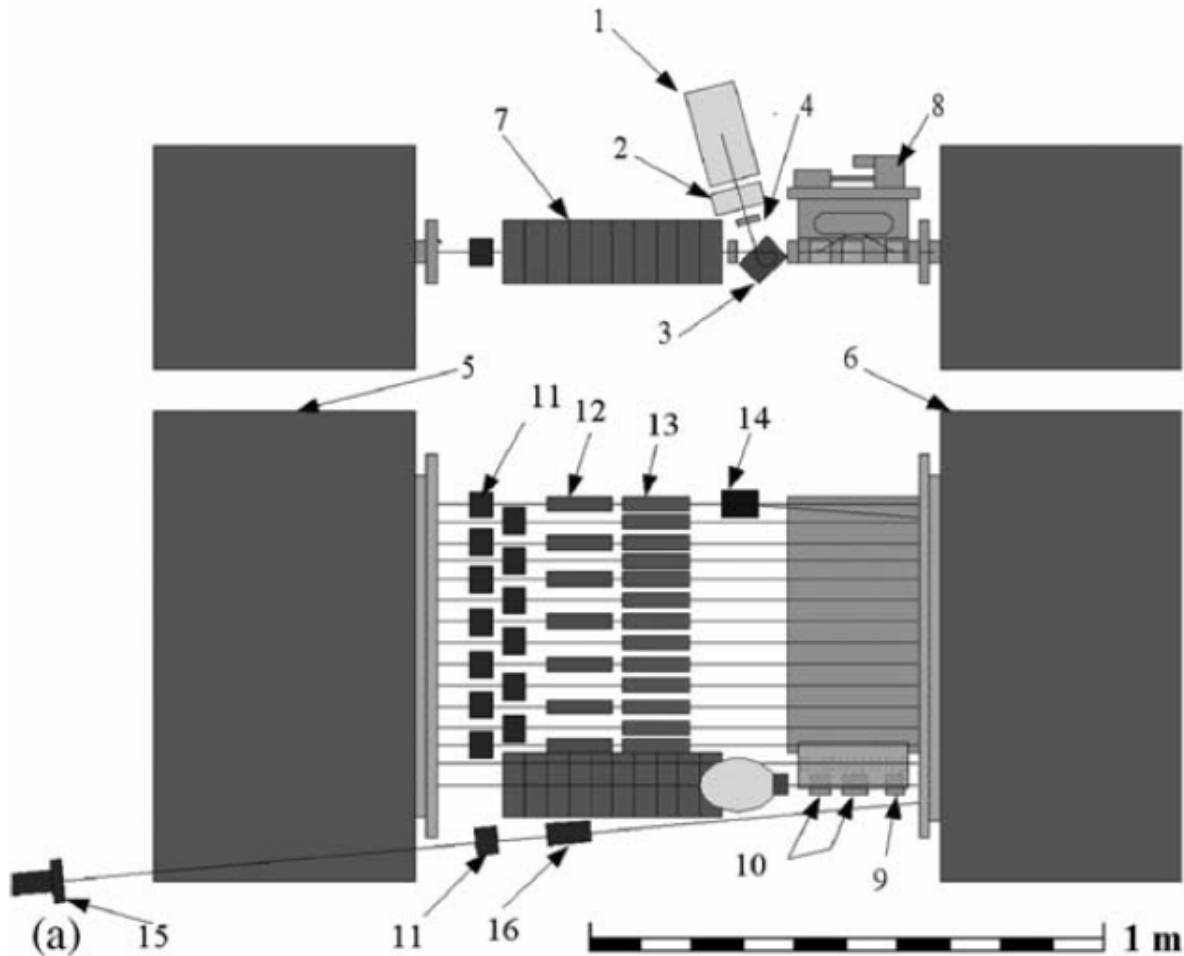
- Энергия электронов 35 МэВ
- Средний выходной ток 100 мкА для производства достаточного количества изотопа
- Стабильность работы как в процессе наработки изотопа, так и изо дня в день

Mainz Microtron



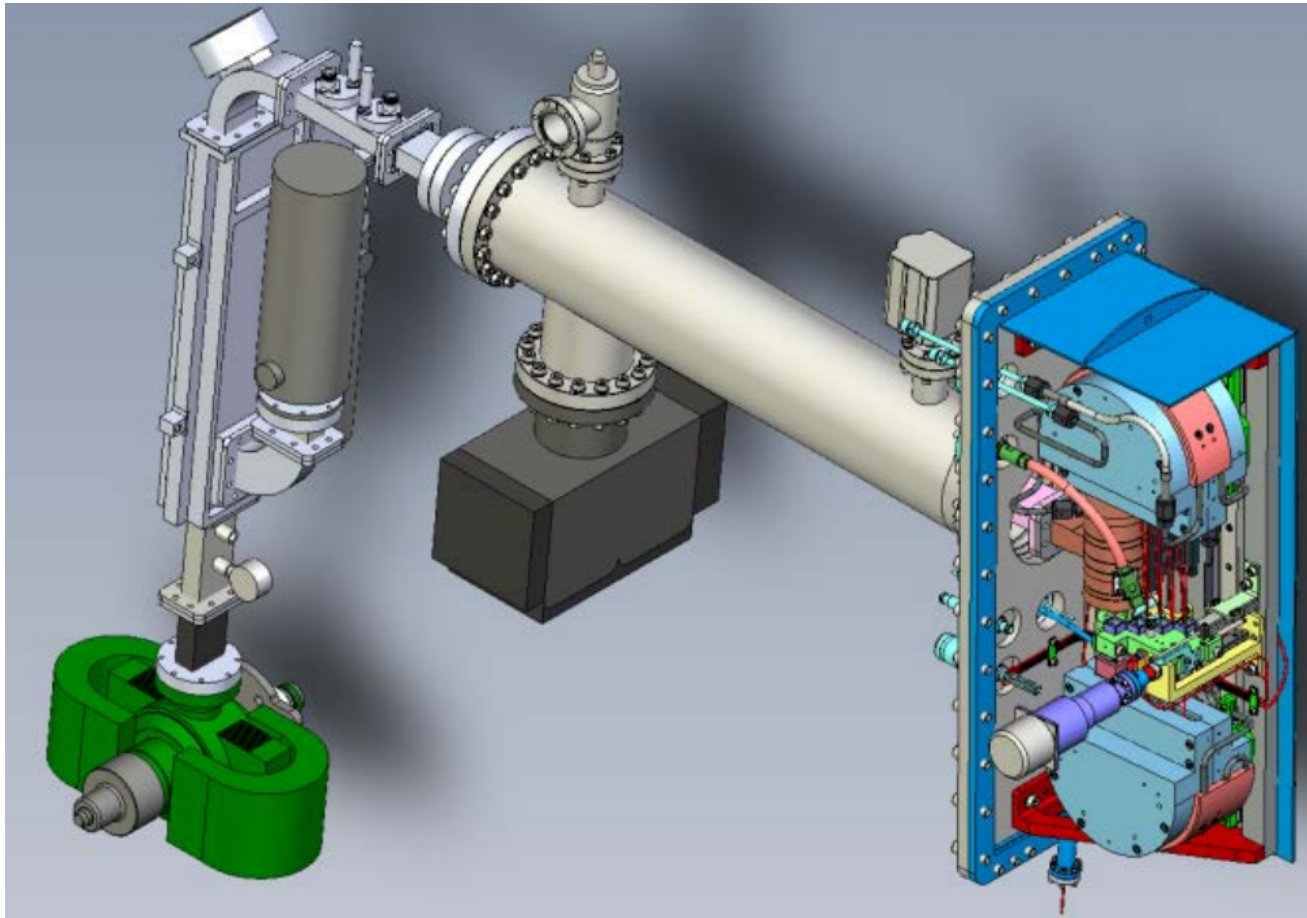
Характеристики	
Выходная энергия	1.5 ГэВ
Прирост энергии за оборот	0.6 – 13.7 МэВ
Средний выходной ток	30 мкА
Общая масса	≈ 2000 Т

Импульсный разрезной микротрон на энергию 70 МэВ



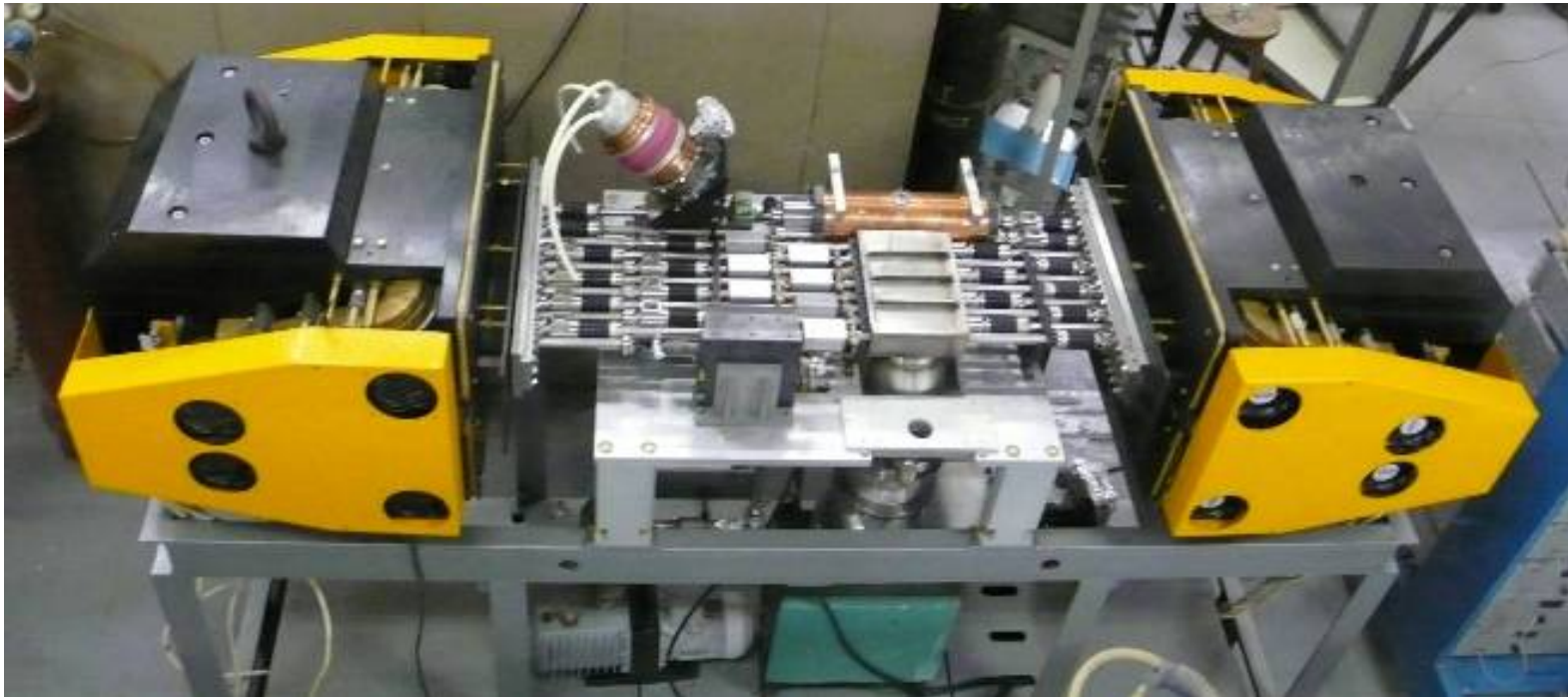
Характеристики	
Выходная энергия	14.8 – 68.3 МэВ
Прирост энергии за оборот	4.8 МэВ
Средний выходной ток	≈ 20 мкА
Общая масса	≈ 2000 кг

Разрезной микротрон для лучевой терапии



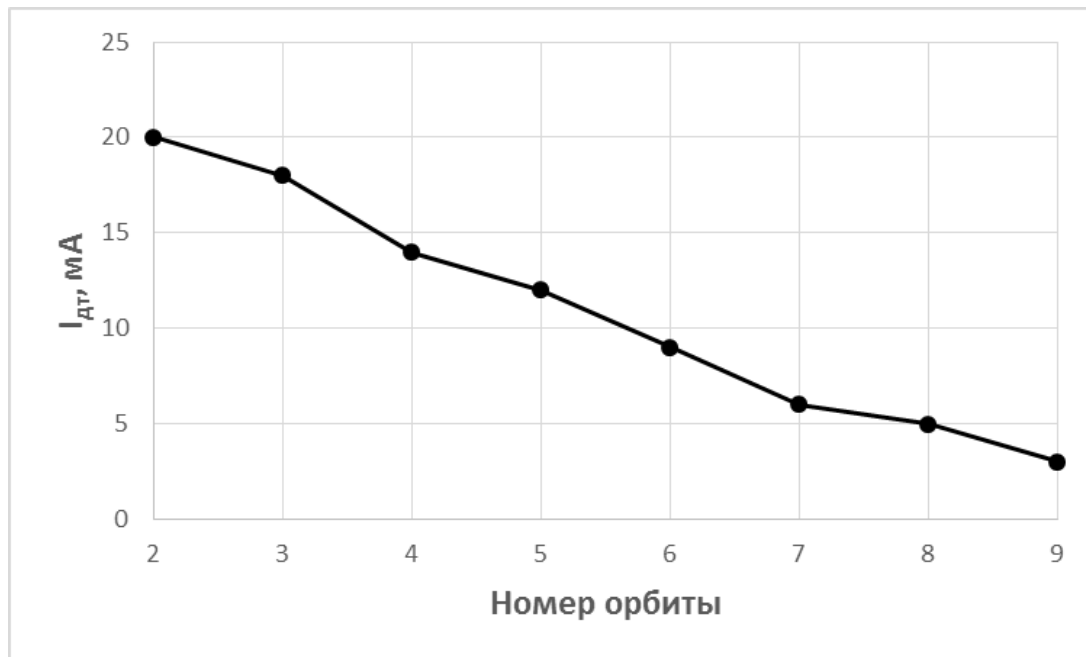
Характеристики	
Выходная энергия	6, 8, 10, 12 МэВ
Прирост энергии за оборот	2 МэВ
Средний выходной ток	≈ 20 мкА
Общая масса	≈ 40 кг

Многоцелевой импульсный разрезной микротрон на энергию 55 МэВ



Характеристики	
Выходная энергия	55 МэВ
Прирост энергии за оборот	5 МэВ
Средний выходной ток	≈ 10 мкА
Общая масса	≈ 2000 кг

Основные проблемы разрезного микротрона



Ток пучка на орбитах в RTM55

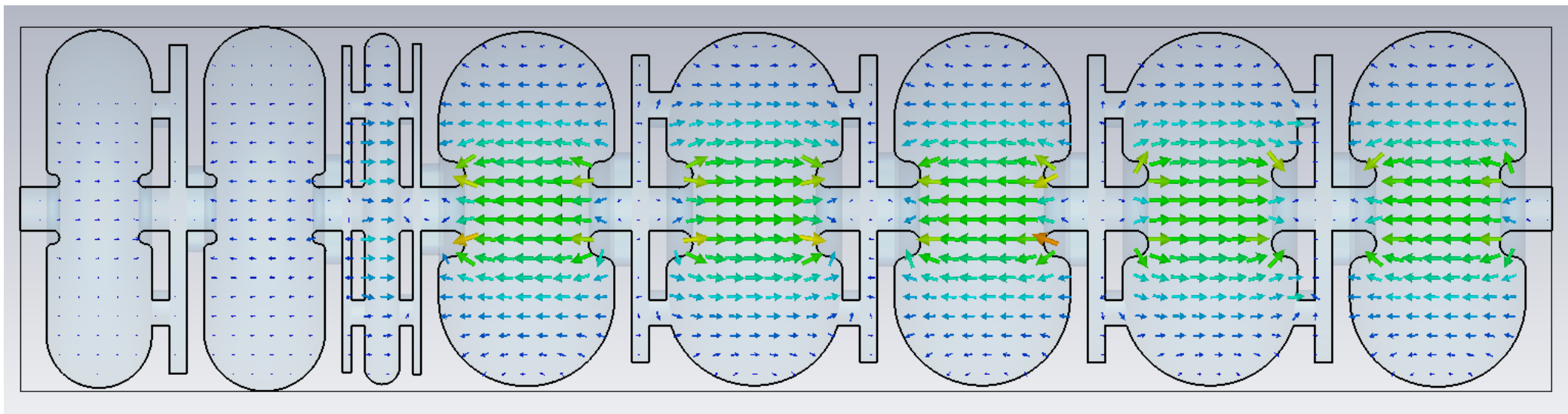
- Большие потери частиц в процессе ускорения из-за малой области устойчивых фазовых колебаний
- Сложности в настройке ускорителя и стабильного получения выходного тока

Варианты решения проблем:

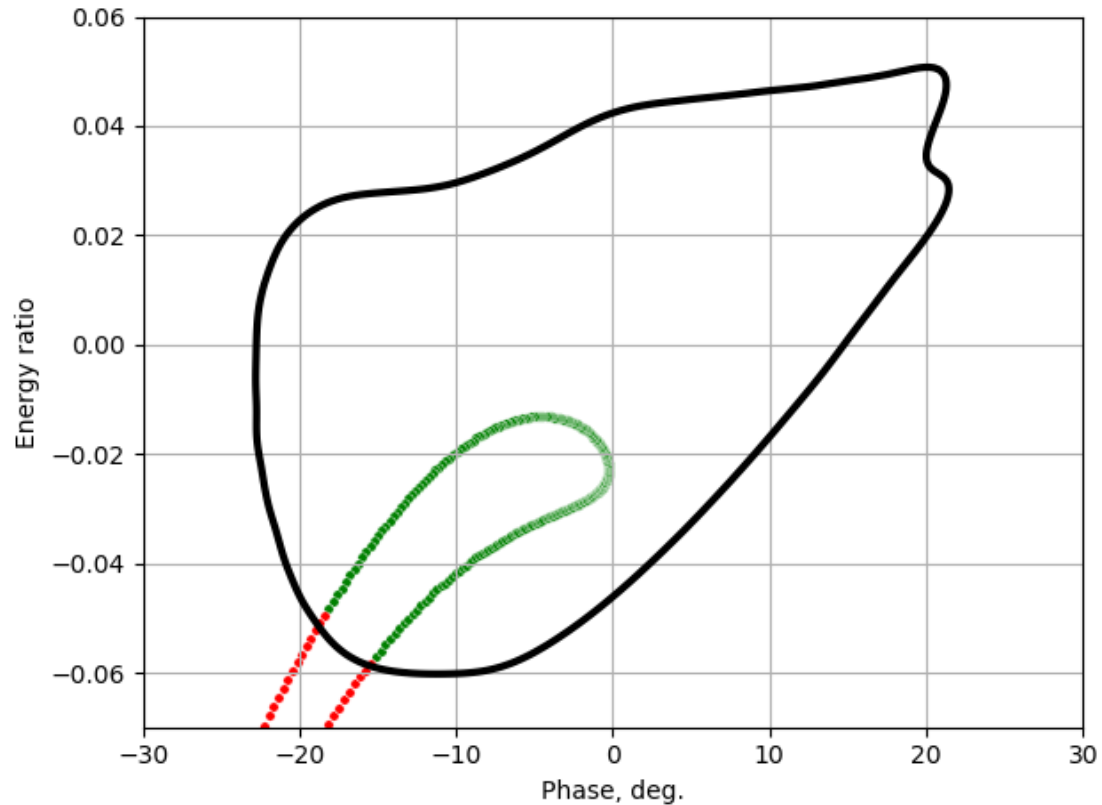
- Уменьшение эмиттанта инжектированного пучка путем оптимизации начальной части ускоряющей структуры
- Увеличение продольного и поперечного аксептансов за счет использования второй гармоники
- Создание более эффективной системы диагностики и коррекции

Оптимизация начальной части УС

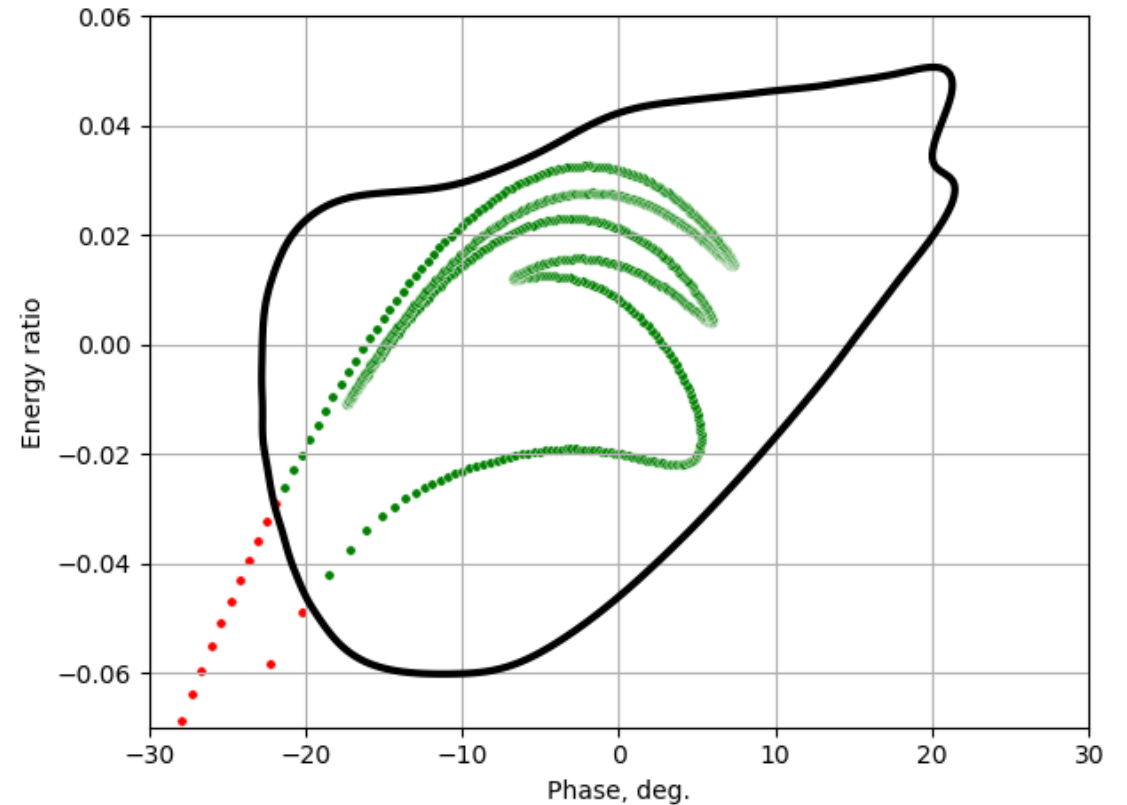
Обычно в разрезной микротрон инжектируют уже сформированный релятивистский пучок. Однако в современных линейных ускорителях именно начальная часть ускоряющей структуры используется для формирования пучка из равномерного потока частиц и имеет сложную форму. Путем ее оптимизации можно добиться высокого коэффициента захвата, а также необходимых энергетических и пространственных характеристик пучка на выходе. Предлагается аналогичным образом оптимизировать начальную часть ускоряющей структуры для разрезного микротрона.



Сравнение продольных эмиттансов

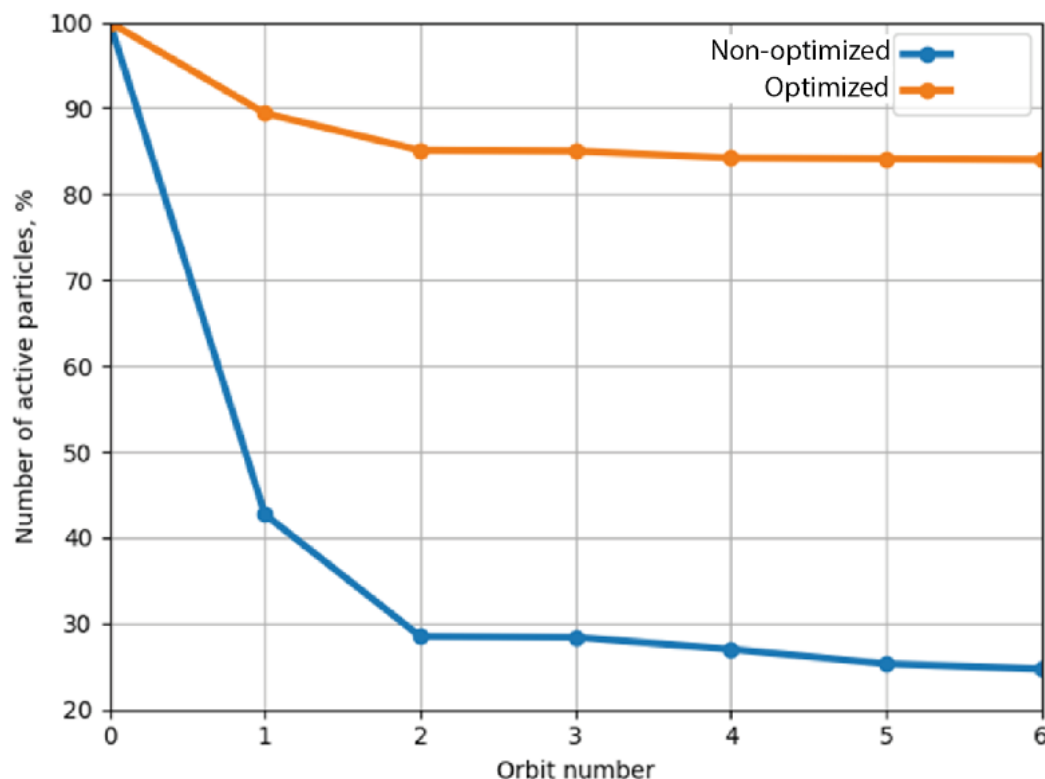


Поперечной фазовое пространство RTM55 после первого ускорения



Поперечной фазовое пространство после первого ускорения при использовании структуры с оптимизированной начальной частью

Сравнение коэффициентов захвата



Коэффициенты захвата частиц в зависимости от орбиты для ускоряющей структуры RTM55 и ускоряющей структуры с оптимизированной начальной частью

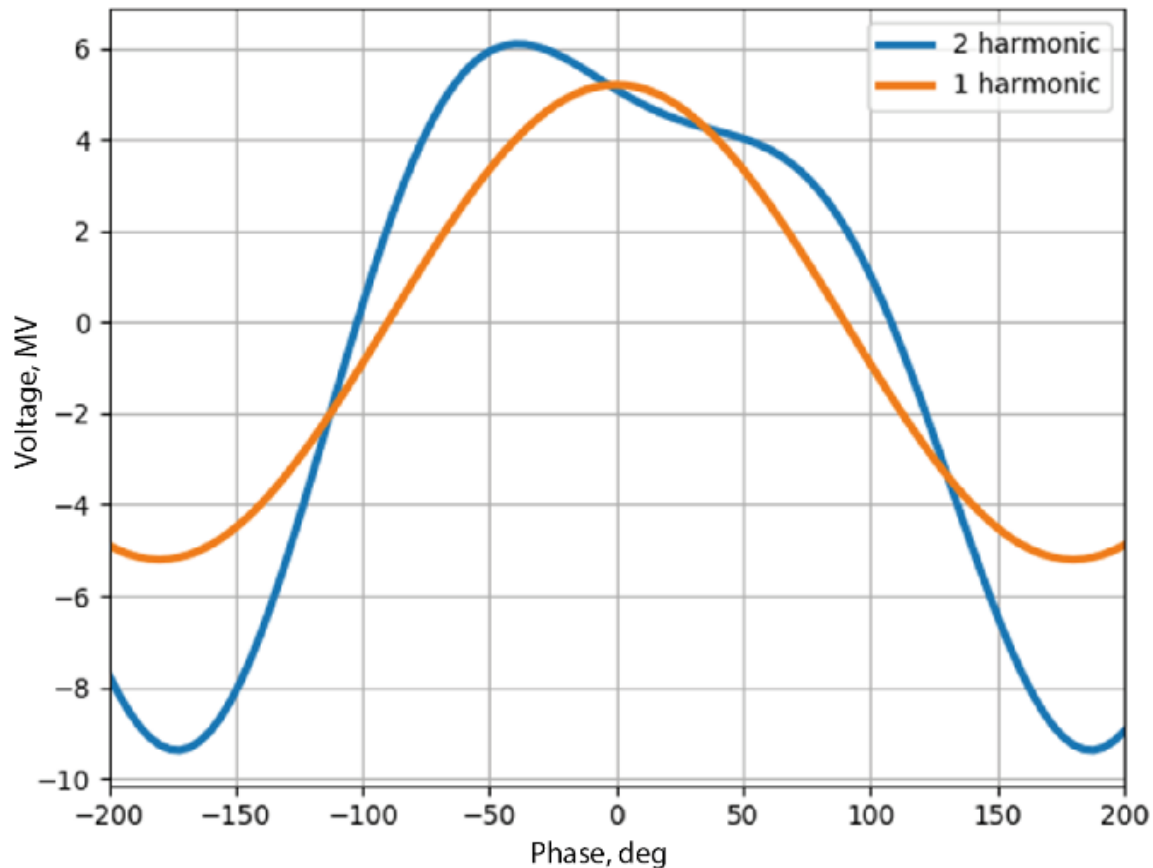
Оптимизация начальной частицы позволяет увеличить коэффициент захвата с 21 % до 81 %. Это достигается за счет более узкого энергетического спектра пучка после первого ускорения. Таким образом низкоэнергетический “хвост” не рассеивается на стенках вакуумной камеры поворотных магнитов.

Из минусов можно выделить более широкий выходной спектр и поперечные размеры пучка.

Проблема малой области устойчивых фазовых колебаний

Помимо влияния на коэффициент захвата, малая продольная область устойчивых фазовых колебаний накладывает жесткие требования на изготовление и позиционирование отдельных элементов разрезного микротрона.

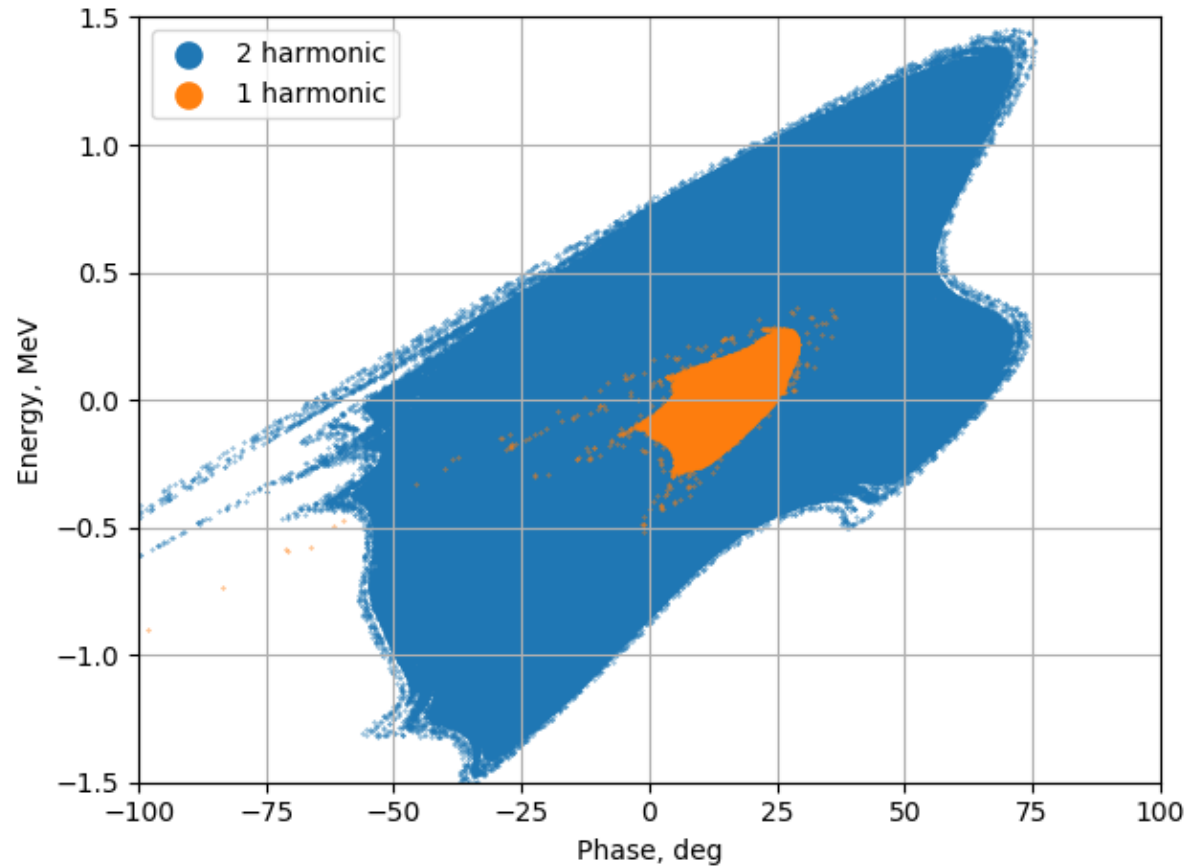
Использование дополнительной гармоника



В случае разрезного микротрона гармоническое изменение ускоряющего поля во времени не является оптимальным. В идеале необходимо использовать линейную зависимость поля от времени. В той или иной мере этого можно достигнуть путем добавления дополнительной гармоника.

В процессе исследования было установлено, что оптимальная фаза второй гармоника близка к 180° . Это позволяет использовать так называемый “пустой” резонатор, поле которого представляет собой наведенные поля самим пучком.

Сравнение аксептансов

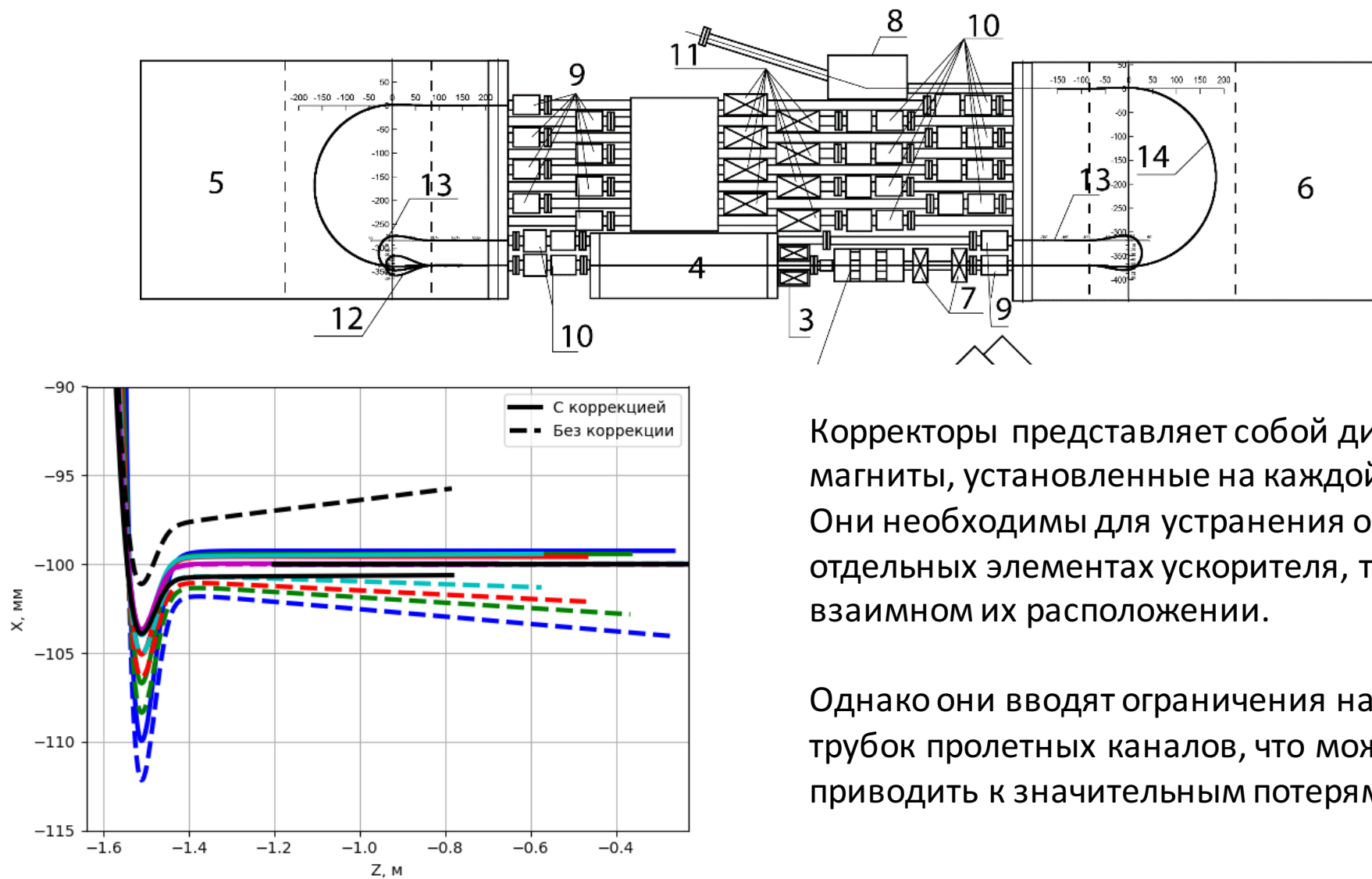


Видно значительное увеличение области устойчивых фазовых колебаний, что должно повысить стабильность работы ускорителя и уменьшить влияние погрешностей при изготовлении.

Однако создание необходимого поля второй гармоники требует дальнейшего исследования.

Также из-за наличия пролетных каналов вакуумной системы, частицы с большим отклонением по энергии (относительно равновесной частицы) будут рассеиваться.

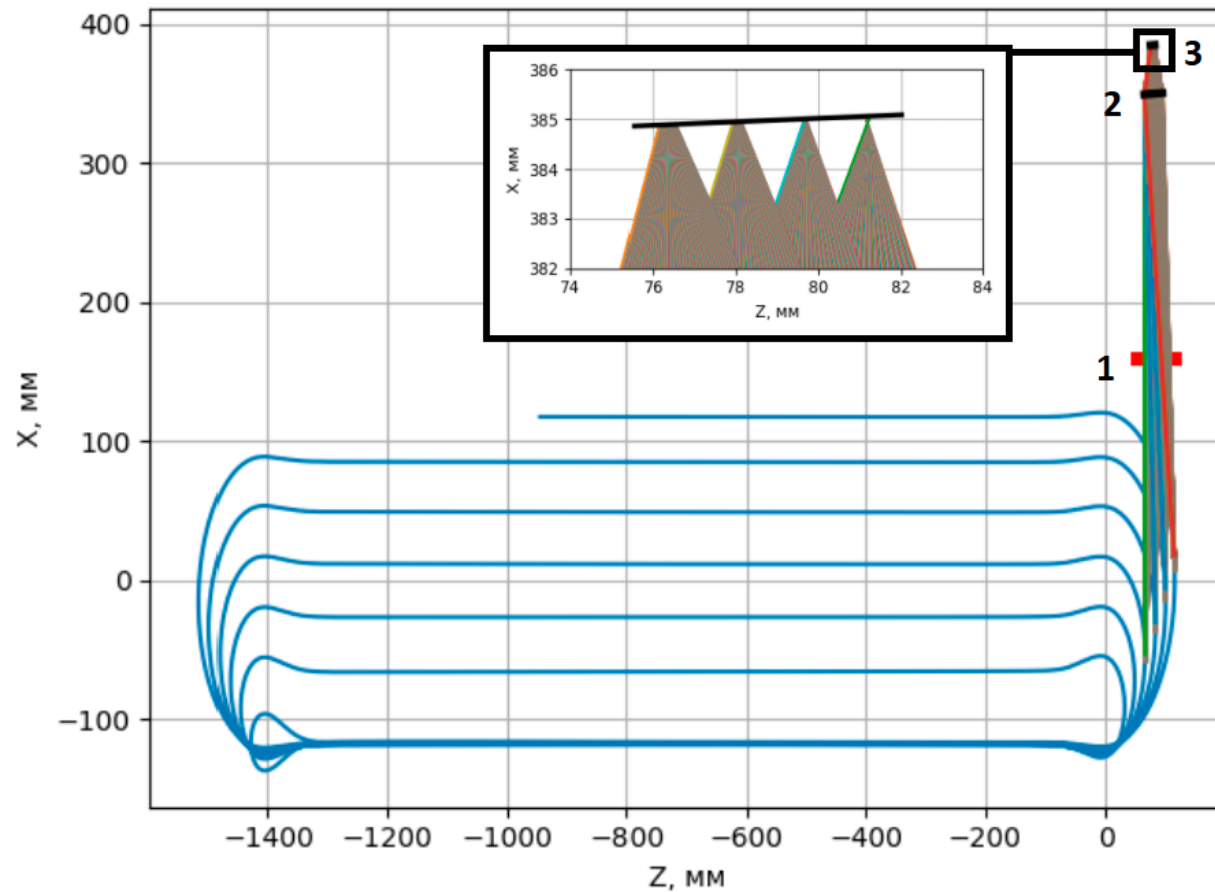
Система коррекции



Корректоры представляет собой дипольные магниты, установленные на каждой орбите. Они необходимы для устранения ошибок как в отдельных элементах ускорителя, так и во взаимном их расположении.

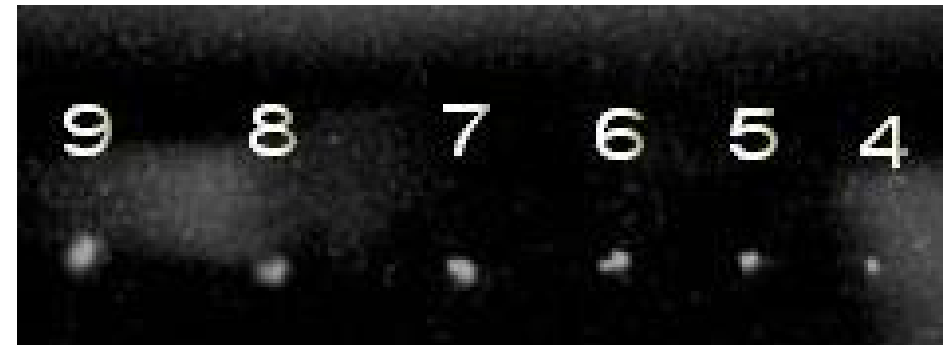
Однако они вводят ограничения на диаметр трубок пролетных каналов, что может приводить к значительным потерям.

Система диагностики

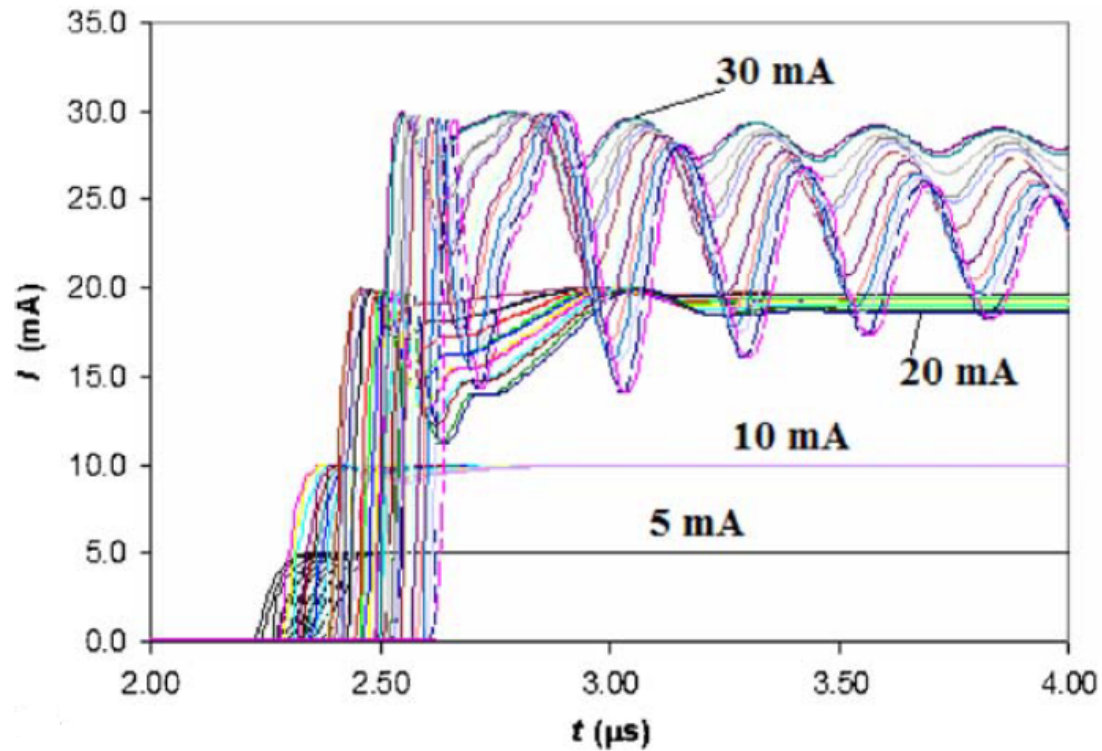


На данный момент система диагностики состоит из датчиков тока пучка, установленных на каждой орбите.

Более перспективный метод – диагностика по синхротронному излучению.



Токовые неустойчивости



В разрезном микротроне в процессе ускорения пучок проходит через ускоряющую структуру много раз. Таким образом даже небольшой для линейных ускорителей ток может возбуждать паразитные моды, приводящие к появлению магнитного поля на оси ускоряющей структуры.

Также необходимо учитывать нагрузку поток пучка, которая может приводить к нестабильной работе ускорителя.

Вывод

Разрезной микротрон является хорошей альтернативой линейному ускорителю в ситуации, когда необходимо получить пучок с энергией от 10 до 100 МэВ и током до десятков миллиампер. К основным преимуществам можно отнести меньшие габариты и стоимость.

Однако существует ряд проблем, которые необходимо решить.

Спасибо за внимание!