

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б 438

УДК 621.384.647

9-88-795

**БЕЛОШИЦКИЙ
Павел Федорович**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ
СИЛЬНОТОЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ
ЭЛЕКТРОННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ПУЧКОВ**

**Специальность: 01.04.20 - физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1988

Работа выполнена в Общественном научно-методическом отделении Объединённого института ядерных исследований.

Научный руководитель
доктор физико-математических
наук профессор

Э.А.Перельштейн

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук

А.Н.Лебедев

кандидат физико-математических
наук

Л.А.Юдин

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Харьковский физико-технический институт АН УССР, г. Харьков.

Защита диссертации состоится "___" _____ 198 г.

в ___ час. на заседании Специализированного совета Д.047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединённого института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

Автореферат разослан "___" _____ 198 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь
Специализированного совета
доктор физико-математических наук

Ю.А.Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

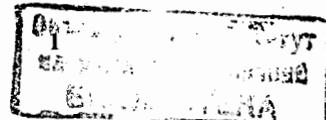
В последнее время интенсивно развиваются физика и техника релятивистских пучков заряженных частиц. Сильноточные пучки находят применения в ядернофизических исследованиях, в проблеме управляемого термоядерного синтеза, в разработках коллективных и новых методов ускорения частиц, в релятивистской СВЧ-электронике, в прикладных задачах и т.п. Для успешного использования сильноточных пучков необходимо обеспечить их высокое качество и стабильность. В традиционных циклических ускорителях повышение интенсивности пучков также приводит к необходимости исследования их устойчивости. Поэтому проблема устойчивости сильноточных кольцевых пучков, один из разделов которой рассматривается в диссертационной работе, является актуальной и важной.

Рассматриваемая в работе продольная неустойчивость кольцевых пучков заряженных частиц носит пороговый характер и принципиально ограничивает их интенсивность. Для оценки степени опасности неустойчивости первостепенное значение имеют исследования ее нелинейной стадии. Такие исследования должны ответить на вопрос о конечных (после закрытия неустойчивости) параметрах кольца.

Одним из важнейших направлений повышения средней интенсивности ускорителей с электронными кольцами является увеличение цикличности их работы. Определяющую роль здесь играет стадия формирования электронных колец, в процессе которой возрастает плотность заряда в пучке и релятивистский фактор. В традиционных схемах компрессии, где сжатие осуществляется в импульсном магнитном поле, большая потребляемая и рассеиваемая мощности существенно ограничивают частоту работы компрессора. В диссертационной работе рассматривается способ компрессии электронных колец, основанный на использовании комбинации статического и импульсного магнитных полей. Предложенный способ допускает и высокую частоту работы компрессора, и большую плотность сжатых колец и поэтому является актуальным.

Диссертация является обобщением работ, выполненных в соответствии с научно-тематическим планом ОИЯИ.

Цель работы заключалась в исследовании продольной неустойчивости в релятивистских кольцевых пучках заряженных частиц и проработке схемы компрессии электронных колец с высокой частотой повторения.



Научная новизна работ

1. Теоретически исследовано асимптотическое поведение продольной неустойчивости, выяснен характер временной зависимости параметров кольцевого пучка в режиме сильной нелинейности колебаний. На основе полученных результатов дано объяснение экспериментальным данным.

2. В численном моделировании обнаружена возможность самозахвата релятивистского электронного пучка при однооборотной инжекции на круговую орбиту в слабофокусирующее поле.

3. Показана устойчивость относительно длинноволновых возмущений циркулирующих по орбите сгустков с разбросом по частотам обращения, меньшим порогового линейной теории, в условиях, когда эффективная масса частиц отрицательна, а угловой размер сгустков достаточно мал.

4. Предложен новый вариант высокоциклического компрессора электронных колец.

Практическая ценность работ

1. Результаты численного моделирования продольной неустойчивости важны для анализа экспериментов по формированию интенсивных электронных и ионных колец, для проектирования установок с сильноточными кольцевыми электронными пучками, для повышения интенсивности кольцевых пучков.

2. В предложенной схеме компрессора достигается высокая средняя интенсивность электронного пучка, что представляет практический интерес для различных приложений.

Апробация работ

Результаты диссертации докладывались на УП и XI Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1980 и 1988 г.г.), совещаниях по коллективным методам ускорения (Дубна, 1982 и 1987 г.г.), на конференции по численным методам и приложениям (София, 1988 г.), а также на научных семинарах ОНМО ОИЯИ.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 работ, приведенных в списке литературы.

Структура диссертации

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. Общий объем составляет 141 страницу, включая 55 рисунков, список литературы насчитывает 77 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы задачи, являющиеся предметом работы, кратко описаны методы их решения и изложены некоторые результаты исследований.

В первой главе рассматривается когерентная продольная неустойчивость в азимутально однородных релятивистских электронных кольцевых пучках.

В результате анализа теоретических работ, посвященных изучению неустойчивости, сформулированы вопросы, оставшиеся невыясненными и являющиеся предметом исследования:

1) о конечных (т.е. асимптотических во времени) значениях разброса по частотам обращения при возбуждении продольной неустойчивости в кольце;

2) о временной зависимости гармоник возмущенных величин;

3) о построении теоретической модели, адекватно описывающей данные экспериментального исследования продольной неустойчивости.

Детальные эксперименты по ее изучению были проведены на установке "Компрессор - 4" в Беркли и выявили существенную роль нелинейных взаимодействий гармоник и возможность в несколько раз превзойти порог по интенсивности линейной теории без заметного ухудшения качества кольца.*)

Для приложений наиболее интересны исследования нелинейной стадии неустойчивости с целью выяснения степени ее опасности. Аналитические исследования нелинейной стадии сильно затруднены, поэтому в работе используется метод ее изучения с помощью "крупных частиц", получивший широкое распространение при решении различных электродинамических задач.

Движение частиц считается одномерным $/I/$.

$$\frac{d\varphi_k}{dt} = \omega_k, \quad \frac{dW_k}{dt} = e r_0 E(\varphi_k, t), \quad (I)$$

k - номер частицы, φ - азимутальная координата, ω и r_0 - частота и средний радиус обращения, W - момент импульса, E - азимутальная компонента поля пучка, t - время.

Поле собственного заряда пучка с помощью соотношений **)

$$E = \sum_n E_n(t) \exp[in(\varphi - \omega_0 t)], \quad (2)$$

$$E_n(t) = \frac{eN_0}{(2\pi)^2} \frac{\omega_0}{r_0} \lambda_n(t) Z_{n, n\omega_0} \quad (3)$$

*) Faltens A. et al. Observations on Collective Longitudinal Instabilities in Electron Rings. In: Proc. IX Internat. Conf. on High Energy Accelerat. California, Stanford, 1974, p. 226; LBL-2488, Berkeley, California, 1974.

***) Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. М., Атомиздат, 1979.

(ω_0 - средняя частота обращения, M_c - число частиц в пучке, λ_n - гармоника плотности, $Z_{n, n\omega_0}$ - импеданс пучка с камерой) вычисляется на сетке, покрывающей интервал $[0, 2\pi]$ с использованием быстрого преобразования Фурье. Это позволяет одновременно учитывать значительное число гармоник электрического поля, а также создать программу с высоким быстродействием и оптимально используемой оперативной памятью ЭВМ.

Ограничения модели связаны как с ее одномерностью (максимальный номер учитываемой гармоники $n_{max} < \frac{r_0}{a} \gamma_0$, a - полуразмер сечения пучка, γ_0 - релятивистский фактор), так и со способом вычисления полей (требование нерезонансного вида импеданса $Z_{n, n\omega_0}$).

В работе рассмотрены одномодовый и многомодовый режимы неустойчивости. Многомодовый режим исследуется для двух случаев: кольца в свободном пространстве ^{/2,3/} и кольца, расположенного между двумя бесконечными идеально проводящими плоскостями ^{/4/}. Первый случай соответствует использованию керамических камер ускорителя, прозрачных для высокочастотных полей возмущения, второй - использованию низкочастотных компрессоров с металлическими боковыми стенками и малой апертурой.

Основные результаты численного моделирования неустойчивости следующие ^{/2,4/}:

1. На начальной стадии имеет место экспоненциальный рост возмущенных величин с инкрементами, равными вычисленным в линейной теории. По достижении некоторого уровня неустойчивость стабилизируется и амплитуда гармоник электрического поля (и связанных с ними линейным соотношением (3) гармоник плотности) уменьшается в несколько раз (рис.1). По завершении переходных процессов устанавливается спектр $|\lambda_n| \approx const$ (амплитуды гармоник плотности в среднем не зависят от номера и от времени).

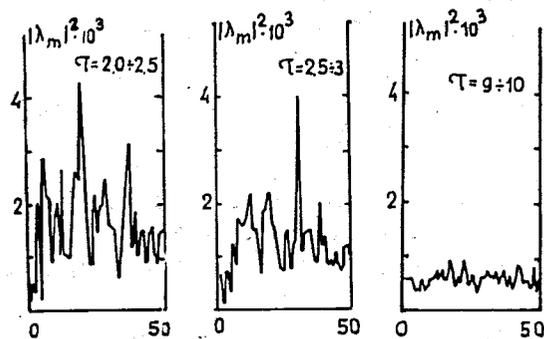


Рис.1. Зависимость усредненной по времени амплитуды гармоники плотности от ее номера (кольцо между двумя проводящими плоскостями, моноэнергетический пучок).

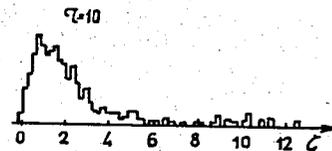


Рис.2. Распределение частиц по частотам обращения на нелинейной стадии продольной неустойчивости (кольцо между двумя проводящими плоскостями, моноэнергетический пучок).

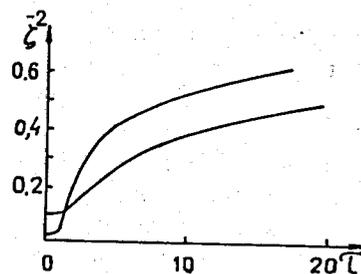


Рис.3. Зависимость разброса по частотам обращения от времени (кольцо между двумя плоскостями).

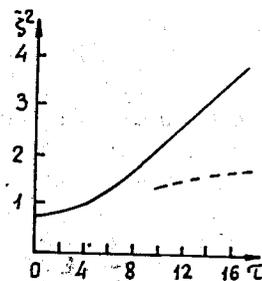


Рис.4. Зависимость разброса по частотам обращения от времени (кольцо в свободном пространстве).

2. Функция распределения приобретает асимметричный вид - вытягивается в сторону больших значений частоты обращения (рис.2). С этого края ($\omega > \bar{\omega}$) функции распределения происходит потеря частиц. Темп потерь определяется величиной начального тока и разброса по частотам обращения в кольце, а также импедансом пучка с камерой.

3. Экспоненциальный рост разброса по частотам обращения (показан на рис.3 в безразмерных переменных ζ и τ) на начальной стадии сменяется линейным на стадии развитой неустойчивости. Последний в значительной степени обусловлен потерями частиц. Если исключить потерянные частицы и пересчитать разброс для оставшихся, то окажется, что разброс возрастает от времени в зависимости более медленной, чем линейная (рис.4), что соответствует эксперименту, когда при измерении ширины функции распределения на полувысоте потерянные частицы ("хвосты" функции распределения) не учитываются.

4. Методом численного моделирования обнаружено возбуждение продольной неустойчивости в кольце при значениях начального разброса по частоте обращения, в несколько раз больших порогового линейной теории. Развитие неустойчивости происходит через высокие гармоники, амплитуда которых сначала уменьшается, а затем нерегулярным скачкообразным образом нарастает. Затем за счет нелинейных взаимодействий нарастают низкие гармоники. Уровень возбуждения при этом

ниже, чем при начальном разбросе, меньшем порогового в линейной теории, и неустойчивость не так опасна.

Сравнение результатов численного моделирования и данных ее экспериментального исследования показало, что:

1. При численном моделировании получается качественно правильная зависимость гармоник электрического поля и плотности от времени.

2. Наблюдающееся в экспериментах обрезание спектра возмущений на высоких ($n > 20$) гармониках частоты обращения отсутствует в численном моделировании, по-видимому, вследствие выхода из области применимости одномерной модели.

3. Введение в модель обрезания спектра путем уменьшения импеданса на высоких гармониках позволяет при сохранении всех качественных выводов о характере неустойчивости получить количественное согласие с данными эксперимента в вопросе о величине конечного разброса по частоте обращения. Как и в эксперименте, если начальное значение разброса в несколько раз меньше порогового линейной теории, то развивающаяся неустойчивость не столь опасна, и конечное значение разброса остается меньше порогового линейной теории. Если же начальный разброс во много раз больше (или число частиц во много раз больше) порогового, то неустойчивость носит сильный характер и конечное значение разброса больше порогового линейной теории (рис.5).

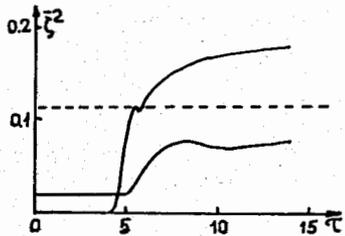


Рис.5. Зависимость разброса по частотам обращения от времени (кольцо между двумя плоскостями).

нейной теории (рис.5).

4. Как и в экспериментах, при моделировании не наблюдается порогового поведения неустойчивости, предсказываемого линейной теорией.

Во второй главе рассмотрены вопросы продольной (азимутальной) устойчивости в азимутально неоднородных релятивистских электронных пучках: о развитии продольной неустойчивости и ее влиянии на захват пучка при его однооборотной инжекции на круговую орбиту в слабофокусирующее магнитное поле $1/5$ и об устойчивости нелинейных азимутальных волн пространственного заряда в кольцевых пучках $1/6$.

Метод исследования, как и в первой главе, основан на моделировании пучка ансамблем "крупных частиц", движение которых описывается системой уравнений (I).

При однооборотной инжекции пучка на круговую орбиту изменение средней частоты обращения частиц в течение оборота за счет потерь на

синхротронное излучение равно

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = -\frac{2V}{\delta_0} \gamma \frac{2}{\pi} \sum_{m>0} \frac{Re Z_{m,m\omega_0}}{m^2} \left(1 - \frac{\sin m\omega_0 t}{m\omega_0 t}\right), \quad (4)$$

$$\text{где } V = \frac{N_e}{2\pi r_0} \frac{e^2}{mc^2}, \quad \gamma = \left(\frac{\epsilon}{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial \epsilon}\right)_{\omega=\omega_0}, \quad \epsilon = mc^2 \gamma_0.$$

В соответствии с (4) основной вклад в изменение частоты обращения (и радиуса $\Delta r = r_0 (\gamma V)^{-1} \Delta\omega/\omega_0$) вносят низкие гармоники. Поэтому при экранировании проводящими поверхностями, когда излучение на низких гармониках отсутствует ($Re Z_{m,m\omega_0} = 0$), поджатие пучка за счет синхротронного излучения резко уменьшается.

Так, для кольца в свободном пространстве с параметрами КУТИ-20^ж) и числом частиц $N_e = 4 \cdot 10^{12}$ величина $\Delta r \approx 1$ мм, для кольца между двумя проводящими плоскостями при тех же параметрах примерно на порядок меньше.

На основе численного решения уравнений продольного (азимутально) движения исследовано влияние развивающейся в течение оборота продольной неустойчивости на изменение среднего радиуса обращения пучка. Из закона сохранения импульса с учетом переменного числа частиц на орбите вытекает

$$\Delta\bar{\omega} \propto \sum_m Re \tilde{Z}_{m,m\omega_0} \cdot |\lambda_m(t)|^2. \quad (5)$$

Поэтому изменение средней частоты обращения (и среднего радиуса) будет велико в том случае, если за один оборот гармоники плотности λ_m успеют вырасти до больших величин. Это возможно для гармоник с большими номерами m . Кроме того, эффект должен иметь резко выраженный характер в зависимости от числа частиц в пучке и их начального разброса, в силу быстрого нарастания величин λ_m на начальной стадии неустойчивости.

Результаты численного моделирования для моноэнергетического пучка с числом частиц к концу оборота $N_e = 1,1 \cdot 10^{13}$ показаны на рис.6. Как видно из рисунка, при этих параметрах пучка вклад неустойчивости в изменение средней частоты обращения является определяющим, а величина поджатия пучка $\Delta r \approx 1$ см. Разброс по частотам обращения, появляющийся вследствие развития неустойчивости, к концу оборота $(\Delta\omega^2)^k \approx \Delta\bar{\omega}$, и, следовательно, возможны потери на инжекционном устройстве.

ж) Александров В.С. и др. Первая очередь коллективного ускорителя тяжелых ионов КУТИ-20. В кн.: Труды XIII Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий. Новосибирск, Наука, Сиб. отделение, 1987, с.241.

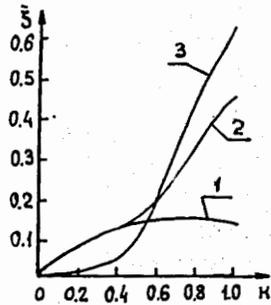


Рис.6. Зависимость безразмерной частоты обращения от числа оборотов K для пучка в свободном пространстве (кривая 1 - по формуле (4), кривая 2 - результат численного моделирования) и между двумя идеально проводящими плоскостями (кривая 3 - результат численного моделирования).

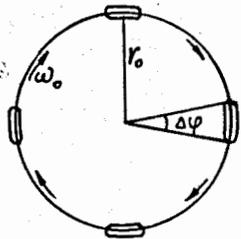


Рис.7. Схематический рисунок последовательности $n_0 = 4$ сгустков на орбите.

номер учитываемой гармоники возмущения $n_{max} \approx 2\pi / (\Delta\varphi)^{1/2}$.

Приведем результаты исследования продольной устойчивости одиночного на орбите сгустка в условиях слабой ($Re Z_{m, m\omega_0} \ll Im Z_{m, m\omega_0}$) диссипации:

* Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А. Стационарные нелинейные азимутальные волны в циркулирующих заряженных пучках. ЖТФ, 1980, 50, с.768.

Эти результаты качественно соответствуют отмеченному в экспериментах в Беркли факту существенного уменьшения радиуса кольца и влияния на захват продольной неустойчивости при большом токе ($N_e = 7 \cdot 10^{12}$) и минимальном разбросе ($\sim 0,5\%$) в пучке.

Задача об исследовании продольной устойчивости нелинейных волн пространственного заряда также решалась методом численного моделирования. Волны представляют собой последовательность сгустков (рис.7), самофокусировка которых происходит в условиях кулоновского взаимодействия частиц, эффективная масса которых отрицательна.* Распределение частиц в сгустке сильно неоднородно; в частности, при значениях разброса по частоте обращения, много меньших порогового в линейной теории для азимутально однородных распределений, оно имеет вид

$$f(\varphi, \omega) \sim \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\Delta\omega^2}\right] \exp\left[-\frac{(\varphi - \varphi_0)^2}{\Delta\varphi^2}\right], \quad (6a)$$

$$\Delta\varphi^2 \approx \frac{\Delta\omega^2}{2n_0^2 \sum \Delta\omega_{пор, n}^2 \cdot n^2}, \quad (6б)$$

где f - функция распределения. Азимутальная устойчивость сгустка исследовалась в длинноволновом приближении, когда максимальный

1. Пусть угловой размер сгустка согласован с разбросом по частотам обращения, т.е. выполняется соотношение (6б). Тогда сгусток оказывается устойчивым относительно длинноволновых возмущений, а его азимутальный и радиальный размеры не меняются.

2. Если размеры сгустка не согласованы, то в зависимости от начальных условий он приходит к одному из двух конечных состояний: а) компактный сгусток с новыми значениями $\Delta\varphi^2(t \rightarrow \infty)$ и $\Delta\omega^2(t \rightarrow \infty)$, связанными соотношением (6б); б) сгусток расплывается по азимуту и заполняет всю орбиту. При $\Delta\omega^2(t \rightarrow \infty) < \Delta\omega_{пор}^2$ реализуется первый вариант, в обратном случае - второй.

3. Результаты исследования устойчивости сгустка слабо зависят от вида функции распределения, а также от абсолютной величины импеданса.

В условиях сильной диссипации ($Re Z_{n, n\omega_0} \geq Im Z_{n, n\omega_0}$) происходит потеря частиц из сгустка, и компактное ядро постепенно разрушается.

Когерентную устойчивость последовательности сгустков на орбите можно обеспечить с помощью внешней фокусирующей силы. Так, например, устойчивость последовательности симметрично расположенных на орбите n_0 сгустков можно обеспечить бегущей электромагнитной волной вида

$$E = E_0 \sin M(\varphi - \omega_0 t), \quad M = kn_0, \quad k = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

Результаты численного моделирования показывают устойчивость колебаний сгустков в такой системе с внешней электромагнитной волной умеренной амплитуды.

В третьей главе рассмотрен вариант компрессора релятивистских электронных колец с высокой циклическостью $\sim 10^7$. Принцип работы компрессора основан на совместном использовании статического и импульсного магнитных полей. Электронное кольцо I (рис.8) волной импульсного магнитного поля \tilde{B}_r (рис.9) продвигается в нарастающее вдоль оси

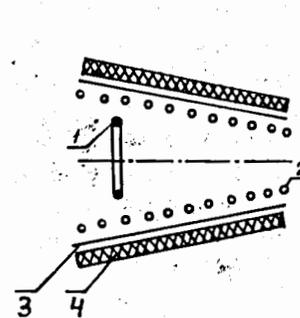


Рис.8. Принципиальная схема высокоциклического компрессора.

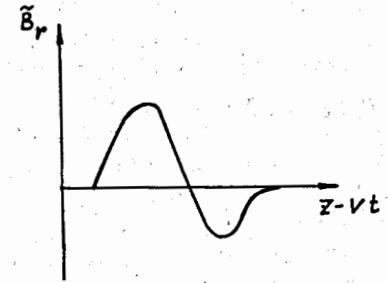


Рис.9. Профиль волны импульсного магнитного поля (V - скорость ее распространения по замедляющей линии).

установки статическое поле $B_z^{ст}$. Статическое магнитное поле создается соленоидом 4, расположенным снаружи вакуумной камеры 3. Импульсное магнитное поле образуется при распространении по замедляющей линии 2 токового импульса, генерируемого специальной схемой, подключенной к ее входу. При продвижении кольца в нарастающее статическое магнитное поле происходит его сжатие и увеличение плотности электронов, а импульсное поле увеличивает их энергию.

Положение кольца в произвольный момент времени определяется уравнениями

$$\begin{aligned} B_r^{ст}(r, z) + \tilde{B}_r(r, z, t) &= 0, \\ \frac{c}{E} M_\varphi &= r^2 (\theta_2^{ст} + \tilde{\theta}_2) - r (A_\varphi^{ст} + \tilde{A}_\varphi) = const. \end{aligned} \quad (8)$$

В месте нахождения кольца $\partial B_z / \partial z \neq 0$, поэтому малые колебания являются связанными, и квадраты их частот равны

$$\nu_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \pm \left[\frac{1}{4} + \rho^2 - n(n-1) \right]^{1/2}, \quad (9)$$

где $n = -r/\theta_2 \cdot \partial \theta_2 / \partial r$, $\rho = r/\theta_2 \cdot \partial \theta_2 / \partial z$. Из (9) следует $\rho < n(n-1)$, что накладывает ограничения на выбор фазы кольца относительно волны \tilde{B}_r .

Метод расчета импульсного магнитного поля основан на вычислении токов в витках замедляющей линии. В простейшем случае линия состоит из витков, заземленных через емкости. Уменьшения дисперсии токового импульса, возникающего вследствие взаимодействия токов через взаимные индуктивности, можно достичь, увеличивая его пространственную протяженность. Это, однако, приводит к уменьшению величины \tilde{B}_r (и, следовательно, к увеличению длины установки) и ухудшению аксиальной устойчивости кольца. Поэтому выбор параметров токового импульса и замедляющей линии требует компромиссного решения с учетом специфики конкретной установки.

Метод расчета статического магнитного поля имеет своей целью создание такой его конфигурации, при которой кольцо движется вдоль заданной траектории $r = r_0(z)$. Во втором из уравнений (10) импульсные величины остаются много меньше статических в течение всего процесса сжатия. Поэтому при движении кольца в суммарном статическом и импульсном поле кольцо будет двигаться по траектории, близкой к

$r = r_0(z)$. Поэтому задача создания статического магнитного поля требуемой конфигурации сводится к нахождению токов в катушках (или соленоиде) по известным значениям $B_r^{ст}$, $B_z^{ст}$ и может быть решена различными известными методами.

В известных статическом и импульсном магнитных полях численным методом (решением системы уравнений (8)) исследовано сжатие электронного кольца. Показана принципиальная работоспособность предложен-

ной схемы компрессора. Приведен пример сжатия кольца с 22,4 см до 3,1 см при увеличении релятивистского фактора γ с 6 до 17 и возрастания статического магнитного поля с 0,46 кГс до 9,2 кГс.

Одним из возможных способов повышения аксиальной устойчивости кольца является использование азимутально разрезанных экранов типа "беличье колесо" (рис.10). С целью выяснения продольной устойчивости

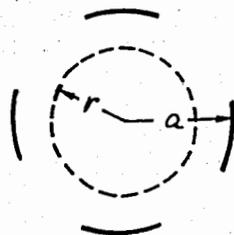


Рис.10. "Беличье колесо" радиуса a с электронным кольцом радиуса r внутри.

увеличения фокусировки.*)

В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертации.

I. Разработан метод численного моделирования продольной неустойчивости в кольцевых пучках заряженных частиц. Метод основан на представлении пучка "крупными частицами", координаты и скорости которых определяются путем численного интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Вычисление собственного поля пучка на сетке с применением быстрого преобразования Фурье позволило создать программу большой вычислительной эффективности, необходимой для одновременного учета значительного числа взаимодействующих гармоник электрического поля.

На основе метода решены следующие задачи: о развитии продольной неустойчивости в релятивистском азимутально однородном кольцевом пучке; о развитии продольной неустойчивости при однооборотной инжекции пучка на круговую орбиту в слабофокусирующее магнитное поле; об устойчивости нелинейных продольных волн пространственного заряда в релятивистских кольцевых пучках.

*) Алексахин Ю.И. Экранирующие свойства двойного беличьего колеса. ОИЯИ, Р9-83-813, Дубна, 1983.

2. Впервые исследовано асимптотическое во времени поведение основных параметров релятивистского электронного кольцевого пучка при возбуждении диссипативной продольной неустойчивости. Результаты исследования показали, что на нелинейной стадии неустойчивости экспоненциальный рост разброса по частотам обращения в кольце сменяется линейным. Одновременно происходит потеря небольшой доли частиц из кольца. Разброс оставшихся в кольце частиц при этом меняется незначительно. Выяснена связь изменения разброса по частотам обращения при наличии развитых шумов электрического поля с величинами сдвигов частот возбужденных волн. Показано, что максимальные значения амплитуд возбуждаемых гармоник уменьшаются с увеличением начального разброса или уменьшением тока кольца. Обнаружено возбуждение неустойчивости при значениях разброса в кольце, превышающих пороговое линейной теории.

Проведенное сравнение результатов численного моделирования и данных экспериментального исследования продольной неустойчивости показало их качественное совпадение и подтвердило вывод последнего о возможности превышения порогового числа частиц в пучке в несколько раз.

3. Решена задача о возбуждении продольной неустойчивости при однооборотной инжекции релятивистского электронного пучка на круговую орбиту в слабофокусирующее магнитное поле. Методом численного моделирования проведен совместный учет влияния когерентного синхротронного излучения, кулоновского взаимодействия в азимутально неоднородном пучке и развивающейся продольной неустойчивости в отсутствие и при наличии проводящих экранирующих поверхностей на изменение среднего радиуса кольца за оборот. Исследована зависимость изменения среднего радиуса кольца за счет когерентного синхротронного излучения от длительности фронта пучка. Показано, что при большом токе и малом энергетическом разбросе пучка уже на первом обороте развивается продольная неустойчивость, приводящая к заметному уменьшению радиуса, увеличению сечения и однооборотному самозахвату пучка.

4. Методом численного моделирования исследована устойчивость стационарных нелинейных волн пространственного заряда в релятивистских кольцевых пучках заряженных частиц. Волны представляют собой последовательность движущихся по орбите со средней частотой обращения ступков, самофокусирующихся в условиях кулоновского взаимодействия частиц с отрицательной эффективной массой. Показано, что ступки с разбросом по частотам обращения, много меньшим порогового линейной теории продольной неустойчивости в азимутально однородном кольцевом пучке, оказываются устойчивыми относительно длинноволновых возмуще-

ний, когда их угловой размер достаточно мал. Когерентную устойчивость последовательности симметрично расположенных на орбите ступков можно обеспечить бегущей электромагнитной волной умеренной амплитуды.

5. Предложен вариант компрессора электронных колец с высокой циклическостью, показана работоспособность схемы компрессора. Совместное использование статического и импульсного магнитных полей позволяет при присущей статическим компрессорам высокой циклическости работы формировать кольца с повышенной плотностью благодаря набору энергии электронами. Определены условия сжатия кольца и его продвижения в нарастающее магнитное поле, разработан способ расчета статического и импульсного магнитных полей. Методом численного моделирования исследовано сжатие кольца в таком компрессоре. Проанализирована возможность использования разрезанного экрана типа "беличье колесо" для улучшения аксиальной устойчивости электронного кольца. С целью исследования продольной устойчивости кольца в такой структуре рассчитан импеданс цилиндрического слоя вращающихся электронов. Исследована зависимость импеданса от параметров структуры: ширины ленты и разреза и их числа.

Л и т е р а т у р а

1. Белошицкий П.Ф., Перельштейн Э.А., Шинов Б.Г. Моделирование динамики азимутальной неустойчивости релятивистских электронных колец в одномодовом режиме. Сообщение ОИЯИ, 9-81-326, Дубна, 1981.
2. Белошицкий П.Ф., Перельштейн Э.А., Шинов Б.Г. Моделирование радиационной неустойчивости в релятивистских электронных кольцах. ЖТФ, 1983, 53, с.877.
3. Белошицкий П.Ф., Перельштейн Э.А., Шинов Б.Г. Моделирование продольной неустойчивости в релятивистских электронных кольцах. В кн.: Совещание по проблемам коллективного метода ускорения. ОИЯИ, Д9-82-664, Дубна, 1982, с.37.
4. Белошицкий П.Ф., Перельштейн Э.А., Шинов Б.Г. Численное моделирование продольной неустойчивости в релятивистских электронных кольцах. Препринт ОИЯИ, Р9-88-332, Дубна, 1988.
5. Белошицкий П.Ф., Перельштейн Э.А. Эффекты пространственного заряда сильноточного релятивистского пучка при инжекции в компрессор. Препринт ОИЯИ, Р9-87-258, Дубна, 1987.
6. Белошицкий П.Ф., Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А. Численное моделирование нелинейных продольных волн пространственного заряда в кольцевых пучках. Сообщение ОИЯИ, Р9-88-24, Дубна, 1988.
7. Барабаш Л.С., Белошицкий П.Ф., Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А.,

- Саранцев В.П., Чалышев В.В. Способ формирования электронных колец в статическом и импульсном магнитных полях. Сообщение ОИЯИ, Р9-11776, Дубна, 1978.
8. Барабаш Л.С., Белошицкий П.Ф., Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А., Саранцев В.П., Чалышев В.В. Способ формирования электронных колец в коллективных ускорителях. Авторское свидетельство № 708545. Бюллетень изобретений 1980, №1, с.252.
9. Белошицкий П.Ф., Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А., Шинов Б.Г. О компрессоре электронных колец с высокой цикличностью. Сообщение ОИЯИ, Р9-12830, Дубна, 1979.
- Ю. Александров В.С., Белошицкий П.Ф., Доля С.Н., Красных А.К., Перельштейн Э.А., Саранцев В.П. Компрессор электронных колец с высокой цикличностью. Сообщение ОИЯИ, Р9-80-625, Дубна, 1980.
11. Белошицкий П.Ф., Перельштейн Э.А. Об импедансе цилиндрического слоя вращающихся электронов в открытой периодической структуре типа "беличье колесо". ЖТФ, 1979, 49, с.508.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 ноября 1988 года.