

НАСТРОЙКА ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ С КОМБИНИРОВАННОЙ ФОКУСИРОВКОЙ ПУЧКА

А. Ф. Дьяченко

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,

Харьков, Украина

E-mail: dyachenkoa@kipt.kharkov.ua

Рассмотрены методические подходы к настройке встречно-штыревой ускоряющей структуры с комбинированной фокусировкой пучка. Представлены результаты экспериментальных исследований регулировки распределения электрического поля в модели встречно-штыревой ускоряющей структуры с переменнo-фазовой и высокочастотной квадрупольной (в виде «рогов») фокусировкой пучка. Регулирование распределения электрического поля осуществляется изменением угла расположения подвесок трубок дрейфа квадруполь в азимутальной плоскости.

1. ВВЕДЕНИЕ

В линейных ускорителях ионов проблема радиально-фазовой устойчивости сгустков пучка в процессе ускорения решается различными путями. В зависимости от сорта ускоряемых ионов, диапазона их энергий, интенсивности ускоряемых пучков, требований прецизионности их характеристик разработаны и используются различные способы обеспечения радиально-фазовой устойчивости сгустков пучка в процессе ускорения. Среди вариантов фокусирующих систем наиболее часто используется принцип жесткой фокусировки, реализуемый с помощью магнитных квадруполь [1], принцип переменнo-фазовой фокусировки (ПФФ) [2, 3] в различных модификациях [4-7]. Значительные успехи достигнуты в разработке фокусировки пучков ВЧ-полем – система ВЧ-квадруполь (ВЧК, RFQ) [8], используемая в настоящее время в большинстве ускорителей протонов и тяжелых ионов на начальном этапе ускорения и формирования сгустков. Один из вариантов фокусировки ВЧ-полем предложен [9] и внедрен в конструкции действующего ускорителя протонов до энергии 30 МэВ с импульсным током пучка около 100 мА [10, 11]. В этой конструкции применены ВЧ-квадруполь в виде «рогов», установленных на торцевых стенках трубок дрейфа с различным значением потенциалов.

Разработки вариантов переменнo-фазовой фокусировки с плавущим центром сгустка (ПЦС) [7], а также с шаговым изменением синхронной фазы (ШИСФ) [12] позволили в значительной мере улучшить ситуацию, но остается важный недостаток всех вариантов ПФФ – это зависимость фокусирующего действия ВЧ-поля от фазы частиц. Поскольку действие ВЧ-поля является главным механизмом, который обеспечивает поперечную стабильность пучка, то на поперечные колебания сильно влияет продольное движение частиц. Эти особенности способствуют росту поперечного эмиттанса, особенно при низких энергиях. Проведенный анализ показал, что комбинация методов ПФФ с ВЧК может дать хороший результат как по темпу ускорения, так и относительно радиально-фазовой устойчивости сильноточных пучков ионов [13].

Природа действия ПФФ такова, что радиальная сила, действующая на фокусирующем участке, пропорциональна $\sin \varphi_s$, где φ_s – фаза пролета синхронной частицей центра ускоряющего зазора, где значение поля максимально. При ВЧ-квадрупольной фокусировке радиальная сила пропорциональна $\cos \varphi_s$. Таким образом, в первом случае фокусирующая сила максимальна для частиц, которые пролетают центр ускоряющего зазора в фазе 90° . По мере того, как фаза уменьшается, радиальная сила постепенно падает и при $\varphi_s = 0$ эта сила равняется нулю. Во втором случае (ВЧ-квадруполь) зависимость фокусирующей (знакопеременной) силы от фазы противоположная – максимальная фокусирующая сила действует на те частицы, для которых ПФФ малоэффективна, и бездействует там, где эффективность ПФФ максимальна. Таким образом, если объединить эти два способа фокусировки на одном ускоряюще-фокусирующем периоде, то возможно достичь сохранения радиальной устойчивости даже при значительно большем размахе фазовых колебаний частиц, захваченных в процесс ускорения [14].

2. МЕТОДЫ НАСТРОЙКИ ЯЧЕЕК ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Сама по себе ПФФ делает ускоряющую структуру нерегулярной, т. е. длины трубок дрейфа изменяются скачкообразно, что создает определенные трудности в настройке ячеек такой структуры, а, кроме того, в ней же имеются ВЧК-ячейки, которые и определяют величину пробойного напряжения в зазорах. Ранее этот параметр существенно влиял на темп ускорения в ускоряющих структурах с ВЧК-фокусировкой [11]. Применение же встречно-штыревой ускоряющей структуры и разработанных в ННЦ ХФТИ методов и элементов настройки [15, 16], позволяет эту трудность обойти. Поэтому в расчеты могут быть заложены максимальные значения электрических полей в зазорах трубок дрейфа без «рогов» (за исключением первого и последнего зазоров) и более низкие величины полей в зазорах ячеек, где трубки дрейфа с «рогами» (в каждой ячейке это значение полей рассчитывается индивидуально).

Для глобального воздействия на распределение электрического поля в структуре очень

эффективными показали себя концевые резонансные элементы настройки (КРЭН), разработанные в различных конструктивных вариантах [16]. В данном случае следует учитывать наличие в структуре ВЧК, настройка полей в которых требует специфического подхода. Наиболее приемлемым может быть вариант, когда первые и последние три трубки дрейфа из одного ряда располагаются на продольном несущем элементе с одной и двумя (на выходном конце) опорными штангами (Рис.1,2). Концевые подрезы замыкаются на боковую поверхность резонатора проводящими подвижными поршнями, положение которых определяется при настройке. Этот элемент настройки, ввиду его эффективности воздействия на общее распределение электрического поля в резонаторе, должен сохранить возможность перемещения и в реальной структуре, так как моделирование не позволяет с такой степенью точности произвести настройку и учесть возможные конструктивные отклонения.

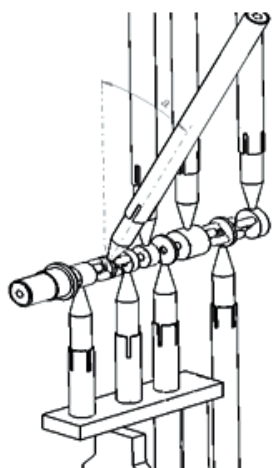


Рис.1. Концевой резонансный элемент настройки на входном конце структуры

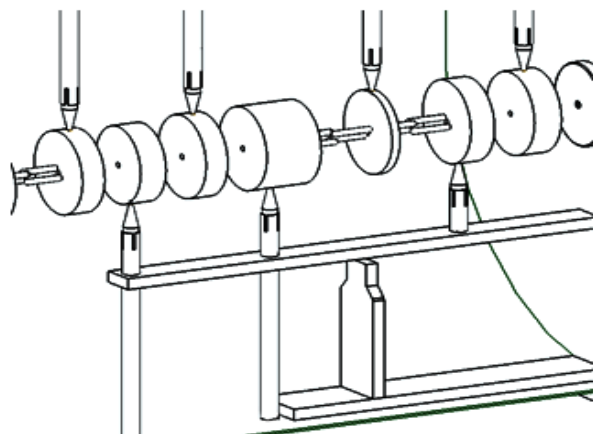


Рис.2. Концевой резонансный элемент настройки на выходном конце структуры

Эффективным способом локальной настройки ячеек встречно-штыревой структуры является внедренный в действующих ускоряющих структурах метод меняющегося угла раствора («встречности») противостоящих подвесок трубок дрейфа (относительно традиционного 180°) [17, 18]. В случае ВЧК-регулировка распределения электрического поля может также осуществляться изменением

угла расположения подвесок трубок дрейфа (см. Рис.1) в азимутальной плоскости.

Проблема автономного изменения резонансной частоты при сохранении определенного распределения электрического поля в Н-структурах всегда стояла довольно остро ввиду взаимосвязанности процессов настройки. Обычно она решалась в комплексе, а созданные элементы регулировки частоты были малоэффективны и действовали только в направлении повышения частоты. Задача создания эффективных элементов автономного воздействия на характеристики структуры с целью снижения ее резонансной частоты потребовала новых подходов, проведения численных расчетов и экспериментальных исследований.

В результате этого разработаны новые эффективные индуктивно-емкостные настроечные устройства («контрики») в виде стержней, расположенных на стороне трубок дрейфа, противоположной их подвескам [19]. При определенном конструктивном исполнении точную локальную подстройку ячеек возможно осуществить не только подбором длины «контриков», но и изменением угла их расположения относительно оси подвесок трубок дрейфа. «Контрики» проявили себя как эффективный элемент настройки, локально влияющий на величину электрического поля в ближайших зазорах и понижающий резонансную частоту без существенного ухудшения электродинамических характеристик резонансной системы. На Рис.3 показан один из вариантов конструктивного решения крепления «контриков» на трубках дрейфа, а на Рис.4 – «контрики», установленные в реальной ускоряющей структуре.

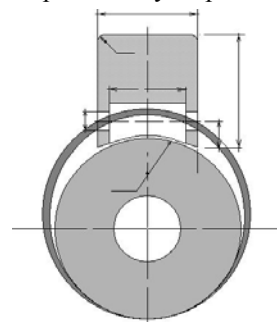


Рис.3. Конструктивное решение крепления «контриков» на трубках дрейфа



Рис.4. «Контрики», установленные в реальной ускоряющей структуре

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ С ПФ + ВЧК ФОКУСИРОВКОЙ НА МОДЕЛИ

Рассматриваемая ускоряющая структура состоит из последовательности ускоряющих и фокусирующих ячеек. Ей свойствен ряд специфических особенностей:

- фокусирующий период начинается и заканчивается ячейками, которые входят в состав ВЧК;

- между ВЧК расположен ряд ускоряющих ячеек с изменяющейся синхронной фазой, часть которых рассчитана на эффективное группирующее действие, а другая – на наиболее высокий темп ускорения;

- ВЧК расположены в области с малыми абсолютными значениями синхронных фаз, где электрическое поле наиболее высокое;

- в ВЧК одновременно имеет место фокусировка и ускорение частиц потенциалом, приложенным между концами «рогов» и торцами трубок дрейфа;

- при постоянной величине апертуры трубок дрейфа и расстояния между «рогами» фокусирующее поле также остается постоянным, несмотря на рост скорости частиц и длин ячеек. Этот фактор приводит к падению темпа ускорения в регулярных многоячеечных структурах, где разность потенциалов между трубками дрейфа постоянна и ограничена напряжением между встречными «рогами» квадруполей;

- фокусирующий период при использовании ВЧК только тогда будет эффективным, когда обеспечена возможность настройки ячеек, содержащих квадруполь, на уровень поля существенно более низкий, чем в соседних ускоряющих ячейках, поскольку допустимая разность потенциалов между встречными «рогами» пропорциональна расстоянию между ними; однако фокусирующий градиент обратно пропорционален квадрату радиуса, на котором располагаются «рога». По этой причине при постоянной апертуре трубок дрейфа вдоль структуры необходимо поддерживать постоянную величину допустимой разности потенциалов между «рогами». В этом случае высокий темп ускорения может быть достигнут только путем отдельной настройки фокусирующей и ускоряющей ячеек.

Возможность снижения уровня электрического поля в ячейках, содержащих ВЧК, может быть достигнута, если использовать, например, многозазорные ячейки с промежуточными трубками дрейфа. Эта идея реализована в ускорителе УРАЛ-30 [10]. В этом случае в каждый зазор между потенциальными трубками дрейфа устанавливалась трубка с нулевым потенциалом (Рис.5). В более поздних вариантах подвески этих промежуточных трубок находились уже под некоторым углом к вертикальной плоскости [11].

Это возможно также в ускоряющей структуре встречно-штыревого типа при условии, что подвеска такой промежуточной трубки дрейфа будет расположена под углом 90° по отношению к встречным штырям. В результате разность

потенциалов на ячейке распределяется между двумя зазорами – фокусирующим и ускоряющим. Изменяя положение промежуточной подвески в азимутальной плоскости, можно регулировать этот процесс распределения. Но более приемлемым вариантом является ускоряющая структура, комбинирующая ПФФ с регулярно размещенными ВЧК-дублетами.

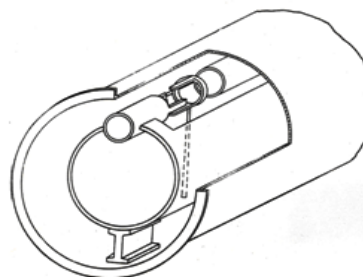


Рис.5. H-резонатор с ВЧК-фокусировкой, реализованной в ускорителе УРАЛ-30

Изучено несколько вариантов комбинации ускоряющих и фокусирующих элементов, которые составляют структуру фокусирующих периодов, и модификаций высокочастотных квадрупольных дублетов [13]. На Рис.6 приведена схема наиболее простого варианта такой ячейки. Кроме ее структуры показан также уровень электрического поля, которое воздействует на синхронную частицу при ее пролете вдоль ячейки. ВЧК дублет, состоит из двух π -ячеек общей длиной $\beta\lambda$. Совмещенное расположение квадруполей с перпендикулярным распределением E_x и E_y дает наибольший фокусирующий эффект. Для встречно-штыревой ускоряющей структуры в этом варианте для поддержания высокого темпа ускорения требуется локальная настройка фокусирующих ячеек. Регулировка распределения электрического поля осуществляется, как указывалось ранее, изменением угла расположения основной или промежуточных подвесок трубок дрейфа в азимутальной плоскости.

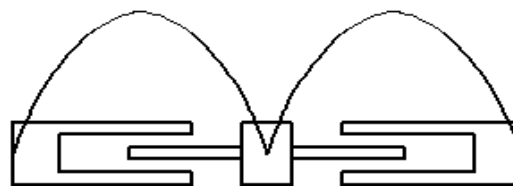


Рис.6. Вариант конструкции высокочастотных квадруполей

На 17-ззорной модели ускоряющей структуры с ПФФ, настроенной на приблизительно равномерное распределение электрического поля [20], проведены экспериментальные исследования по изменению распределения полей в ячейках ВЧК. В этой модели установлены «рога» на шести трубках дрейфа, образуя вокруг 4 и 9 трубок дрейфа ВЧК-дублеты. В этих двух ячейках (к сожалению, больше таких ячеек разместить не удалось по конструктивным соображениям) одновременно изменялся угол «встречности» штанг 4 и 9 трубок дрейфа по отношению к соседним от 180 до 52° .

Результаты этого воздействия можно наблюдать на диаграммах измеренного распределения электрического поля в зазорах структуры (в

относительных единицах) для четырех значений угла «встречности» 180, 128, 90 и 52° (Рис.7,а, б, в, г).

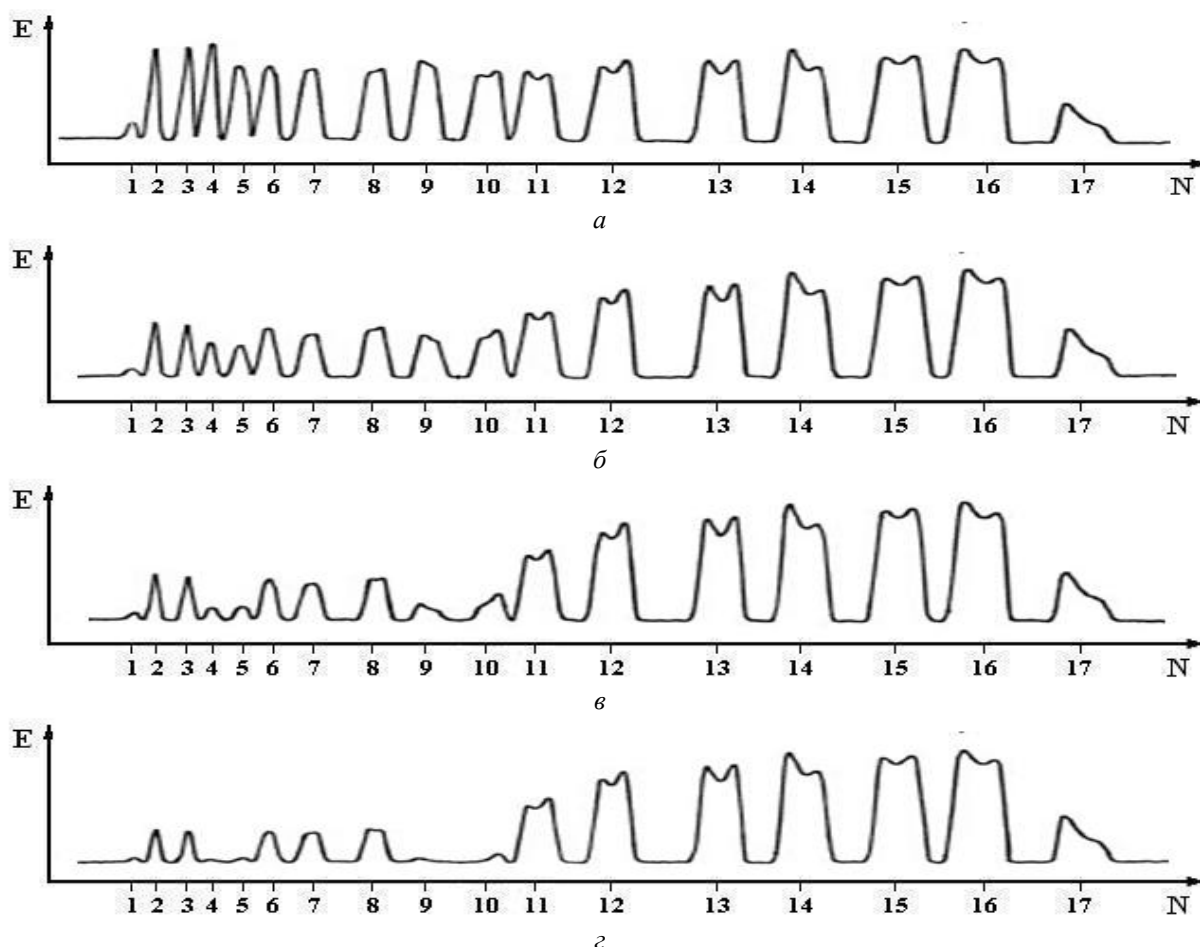


Рис.7. Распределение электрического поля в ускоряющей структуре с ВЧК-дублетами, образованными вокруг 4 и 9 трубок дрейфа для различных положений их штанг (а – 180°, б – 128°, в – 90°, г – 52°)

Как видно из этих рисунков, уровень электрического поля существенно понижается в 4, 5, 9 и 10 зазорах, при этом в соседних зазорах его уровень снижается, но наблюдается выравнивание значений полей в начальной части структуры в «ускоряющих» зазорах и подъем уровня поля на выходе (где отсутствуют ВЧК-ячейки). Такое выравнивание значений электрических полей в «ускоряющих» зазорах, расположенных между ВЧК, очень благоприятно для длинных структур, содержащих несколько ВЧК-ячеек. Изменение угла «встречности» штанг на этих двух трубках дрейфа ВЧК-ячеек сопровождается повышением резонансной частоты приблизительно на 2,5 МГц. Уровень электрического поля в соседних зазорах можно регулировать соответствующим изменением диаметров трубок дрейфа, а общий перекося поля – положением поршней концевых резонансных элементов настройки.

Измерение электрических полей (в относительных единицах) осуществлялось общеизвестным методом малых возмущений, вносимых в резонатор [21].

ВЫВОДЫ

Рассмотренные методические подходы к настройке встречно-штыревой ускоряющей структуры с комбинированной фокусировкой пучка позволяют реализовать практически любые возможные варианты. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности регулирования распределения электрического поля в высокочастотных квадруполях, используемых для фокусировки пучка (дополнительно к переменноразовой фокусировке) в ускоряющей структуре встречно-штыревого типа. На наиболее простом варианте использования ВЧК осуществлено регулирование уровня электрического поля в довольно широких пределах путем изменения угла расположения подвесок трубок дрейфа в азимутальной плоскости.

ЛИТЕРАТУРА

1. E.D. Courant, M.S. Livingstone, H.S. Snyder. The Strong-Focusing Synchrotron – A New High Energy Accelerator // *Phys. Rev.* 1952, v.88, p.1190.
2. M.L. Good. Phase Reversal in Linear Accelerators // *Phys. Rev.* 1953, v.92, №2, p.538.

3. Ya.B. Fainberg. Alternating phase focusing // *Proc. of Intern. Symp. on High Energy Accel. and Pion Physics*. Geneva: CERN. 1956, v.1, p.91.
4. В.В. Кушин. О повышении эффективности фазово-переменной фокусировки в линейных ускорителях // *Атомная энергия*. 1970, №29, в.2, с.123.
5. В.Г. Папкович, Н.А. Хижняк, Н.Г. Шулика. Переменно-фазовая фокусировка в линейном ускорителе // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Техника физ. эксперимента» (2)*. 1978, в.2, с.51.
6. E. Nolte, G Geschonke, K. Berdermann, et al. The Munich Heavy Ion Postaccelerator // *Nuclear Instrum. and Methods*. 1979, 158, p.311.
7. V.A. Bomko, A.P. Kobets, B.V. Zaitzev et al. Particle Dynamic in the Ion Linear Accelerator Based on Alternation Phase Focusing with Moving Center of the Bunch // *Proc. of the 8-ht EPAC 2002*. Paris, France, p.870.
8. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков. Линейный ускоритель ионов с пространственно-однородной жесткой фокусировкой // *ПТЭ*. 1970, № 2, с.19.
9. В.В. Владимирский. Вариант жесткой фокусировки в линейном ускорителе // *ПТЭ*. 1956, №3, с.35.
10. В.А. Тепляков. Использование высокочастотной квадрупольной фокусировки в линейных ускорителях ионов // *Тр. 2 Всес. сов. по ускорителям заряженных частиц*. М.: «Наука», 1972, т.2, с.7.
11. В.А. Тепляков, А.П. Мальцев, В.Б. Степанов. *Высокочастотная квадрупольная фокусировка (к истории ее возникновения и развития)*: Препринт ИФВЭ 2006-5, Протвино, 2006, 34 с.
12. V.A. Bomko, A.P. Kobets, Z.E. Ptukhina, S.S. Tishkin. Variant Alternating Phase Focusing with the Stepped Change of the Synchronous Phase // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»*. 2004, №2, p.153.
13. V.A. Bomko, A.F. Dyachenko, A.F. Kobets et al. The Structure of the High Frequency Focusing Cells in Linear Ion Accelerators // *Proc. of the PAC05*. Knoxville, Tennessee, USA, 2005, (TRPT022), p.1796.
14. В.А. Бомко, З.Е. Птухина, С.С. Тишкин, Н.Г. Шулика. Вариант фокусировки ускоряющим ВЧ-полем в линейных ускорителях ионов // *Сб. докл. XVIII Конф. по уск. заряж. част. RUPAC-2002*. Обнинск, 2004, т.1, с.227.
15. В.А. Бомко, А.Ф. Дьяченко, А.В. Пипа, Н.А. Хижняк. *Разработка и изучение электромагнитных характеристик модификаций ускоряющей структуры линейного ускорителя тяжелых ионов*: Препринт ХФТИ 82-10, Харьков, 1982, 47 с.
16. В.А. Бомко, А.Ф. Дьяченко, А.Ф. Кобец, Б.И. Рудяк. *Исследование структур для ускорения тяжелых ионов*: Обзор. М.: «ЦНИИАтоминформ», 1988, 26 с.
17. V.A. Bomko, A.F. Dyachenko, A.F. Kobets et al. Smooth Variation of Ion Energy in the Interdigital Accelerating H-structure // *Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research*. 1998, v.A406, p.1.
18. V.A. Bomko, A.F. Dyachenko, A.F. Kobets et al. Interdigital Accelerating H-structure in the Multicharged Ion Linac (MILAC) // *Review of Scientific Instruments*. 1998, v.69, №10, p.3537.
19. V.A. Bomko, Y.V. Ivakhno. A new technique of tuning an interdigital accelerating structure of the ion linear accelerator // *Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research*. 2007, v.A582, p.374.
20. V.A. Bomko, A.F. Dyachenko, B.V. Zajtzev et al. Development of the New Prestripping Section for LUMZI // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»*. 2001, №3, p.128.
21. W. Chahid. Le Champ et les Pertes Dans les Accelérateurs Lineaires a Ions // *L'Onde Electrique*. 1957, v.37, №359, p.171.

Статья поступила в редакцию 13.05.2008 г.

TUNING OF AN INTERDIGITAL ACCELERATING STRUCTURE WITH THE COMBINED BUNCH FOCUSING

A.F. Dyachenko

Methodical approaches to tuning interdigital accelerating structure with the combined bunch focusing are considered. Results of experimental research of the electric field distribution regulation in the model interdigital accelerating structure with alternating phase and high-frequency quadrupole (in the form of «horns») focusing a beam are discussed. Regulation of the electric field distribution is carried out by a change of a corner of an arrangement of the basic or intermediate stems of the quadrupole drift tubes in an azimuthal plane.

НАСТРОЮВАННЯ ЗУСТРІЧНО-ШТИРЬОВОЇ ПРИСКОРЮВАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ З КОМБІНОВАНИМ ФОКУСУВАННЯМ ПУЧКА

А.Ф. Дьяченко

Розглянуто методичні підходи до настроювання зустрічно-штирєвої прискорювальної структури з комбінованим фокусуванням пучка. Представлено результати експериментальних досліджень регулювання розподілу електричного поля в моделі зустрічно-штирєвої прискорювальної структури з перемінно-фазовим і високочастотним квадрупольним (у вигляді «рогів») фокусуванням пучка. Регулювання розподілу електричного поля здійснюється зміною кута розташування підвісок трубок дрейфу квадруполів в азимутальній площині.