



Федеральное государственное унитарное предприятие
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ»

2009-16
ОУ-У70, ОЛУ

О.К. Беляев, И.А. Звонарев

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПЕРИОДА УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ
С ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ
ВЧК-ФОКУСИРОВКОЙ**

Направлено в *ИТЭ*

Протвино 2009

Аннотация

Беляев О.К., Звонарев И.А. Определение электродинамических параметров периода ускоряющей структуры с пространственно-периодической ВЧК-фокусировкой: Препринт ИФВЭ 2009–16. – Протвино, 2009. – 12 с., 9 рис., библиогр.: 7.

Отказ от постоянства ВЧ-напряжения на периодах ускорения структуры с пространственно-периодической ВЧК-фокусировкой существенно расширяет диапазон применимости, но усложняет процесс настройки электродинамических параметров. В работе предлагается методика расчета электродинамических параметров периода ускорения такой структуры. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных данных. Показана возможность и необходимость применения расчета при настройке ускоряющей структуры.

Abstract

Belyaev O.K., Zvonarev I.A. Design RF-Parameters for the Accelerating Period of the Structure with Spatial Periodic RFQ Focusing: IHEP Preprint 2009–16. – Protvino, 2009. – p. 12, fig. 9, refs.:7.

The abandon of a constant RF voltage on the accelerating periods of the structure with a radiofrequency quadrupole focusing (RFQ) critically extends the range of the applicability, but complicates the RF-tuning. Calculation RF-parameters for acceleration period of such structure is offered in the paper. Theoretical and experimental results are compared. Possibility and necessity this calculation for accelerating structure RF-tuning is shown.

Структура с пространственно-периодической ВЧК-фокусировкой на резонаторе с продольным магнитным полем применяется для ускорения ионов, в частности для ускорения ионов водорода с энергией более $1,5 \div 2,0$ МэВ [1] и, являясь альтернативой структуре Альвареца, имеет меньшие размеры, стоимость, более проста и технологична в изготовлении. Период ускорения такой структуры содержит ускоряющий (аксиально-симметричный) и фокусирующий (с квадрупольной симметрией) зазоры, разделенные промежуточным электродом, установленным на ноге крепления. Напряжения на зазорах задаются требованиями динамики частиц и определяются соотношением емкостей этих зазоров.

В случае равенства напряжений на ускоряющих и фокусирующих зазорах по всей длине структуры, что реализовано в линейном ускорителе УРАЛ-30 [2], темп ускорения уменьшается по мере роста энергии частиц [3]. При равенстве напряжений нога крепления промежуточного электрода делит площадь поперечного сечения соответствующего резонатора с продольным магнитным полем на две равные части.

Увеличение напряжения на ускоряющих зазорах с ростом энергии позволяет существенно снизить падение темпа ускорения. Напряжение на фокусирующих зазорах может оставаться постоянным. Нога крепления промежуточного электрода в этом случае должна устанавливаться под переменными углами.

Получение заданного соотношения напряжений на зазорах периода и распределения напряжений на периодах по длине структуры на заданной частоте резонатора является задачей радиотехнической настройки ускоряющей структуры, которая решается трудоемкими экспериментальными методами [4]. В предлагаемой работе показана возможность проведения предварительных расчетов с целью получения требуемых элек-

тродинамических параметров периода ускорения, что существенно упрощает процесс радиотехнической настройки. Период ускорения структуры с ППКФ представляет собой емкостный делитель напряжения между трубками дрейфа, установленными на краях щели резонатора (бортовыми электродами). Емкости, составляющие делитель, являются емкостями ускоряющего (аксиально-симметричного) C_a и фокусирующего (с квадрупольной симметрией) $C_{кв}$ зазоров и образуются за счет введения промежуточного электрода между трубками дрейфа. При отсутствии тока по ноге крепления промежуточного электрода справедливо соотношение:

$$\frac{U_a}{U_{кв}} = \frac{C_{кв}}{C_a} \quad (1)$$

Для периода ускорения, установленного на резонаторе с продольным магнитным полем, токи через ускоряющий и фокусирующий зазоры [4]

$$I_a = j\omega C_a \int_{S_a} \mu H_a ds, \quad (2)$$

$$I_{кв} = j\omega C_{кв} \int_{S_{кв}} \mu H_{кв} ds,$$

где смысл обозначения ясен из приведенного рис. 1.

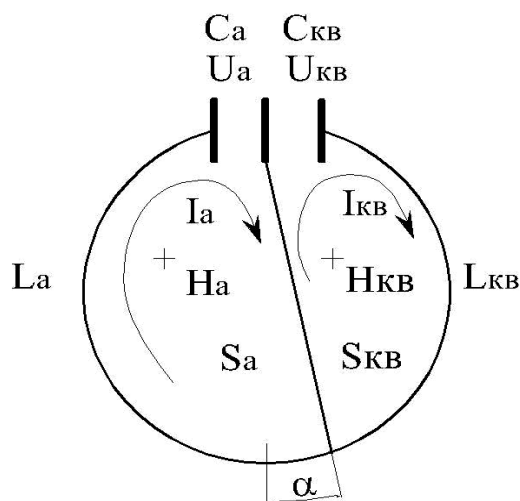


Рис. 1. Схематическое изображение емкостного делителя, образованного электродами периода ускорения на резонаторе с продольным магнитным полем.

Вследствие противоположной направленности токов I_a и $I_{кв}$ условие отсутствия тока по ноге крепления промежуточного электрода для выполнения (1):

$$I_a = I_{кв}, \quad (3)$$

что приводит к соотношению

$$\frac{U_a}{U_{кв}} = \frac{C_{кв}}{C_a} = \frac{\int_{S_a} \mu H_a ds}{\int_{S_{кв}} \mu H_{кв} ds}, \quad (4)$$

из которого следует, что требуемый коэффициент деления определяется соотношением емкостей зазоров, площадей S_a и $S_{кв}$, т.е. положением ноги крепления промежуточного электрода и соответствующими магнитными полями H_a и $H_{кв}$.

Кроме соотношения площадей, положение ноги крепления должно обеспечивать ортогональность электрических силовых линий внутри резонатора к поверхности ноги. В противном случае нога крепления вносит значительное возмущение в картину распределения поля в резонаторе.

В резонаторе с секторной формой поперечного сечения условие ортогональности выполняется для любой линии, проходящей через вершину сектора. К таким резонаторам относятся секторный (SH) и двухкамерный (2К) [5, 6] резонаторы. Центр щели совпадает с вершиной сектора и осью ускоряюще-фокусирующего канала, трубки дрейфа которого крепятся на края щели. Прямая нога крепления промежуточного электрода в этих резонаторах может устанавливаться под различными углами α (рис. 2).

Для получения требуемого деления напряжения на периоде ускорения необходимо нахождение величины коэффициента деления $k = U_a / U_{кв}$ и способа его изменения (настройки), а также определение положения ноги крепления промежуточного электрода. Развитие вычислительных методов позволяет получать данные, необходимые для радиотехнической настройки структуры с помощью 3D расчетных программ.

Расчетная модель (рис. 2) представляет собой нагруженный электродами ускоряюще-фокусирующего канала (периодом ускорения) отрезок резонатора с продольным магнитным полем (в данном случае 2К-резонатора), ограниченный двумя «магнитными стенками», на которых выполняются граничные условия: $E_\tau \neq 0$; $E_n = 0$; $H_\tau = 0$; $H_n \neq 0$. «Магнитные стенки» рассекают трубки дрейфа посередине, перпендикулярно оси канала. Назначение элементов, приведенных на рис. 2, следует из дальнейшего рассмотрения. Количество периодов ускорения внутри расчетного отсека ограничено возможностями вычислительной техники.

В предлагаемой работе расчетным путем определяются следующие параметры для одного периода ускорения:

- коэффициент деления напряжения $k = \frac{U_a}{U_{кв}} = \frac{C_{кв}}{C_a}$;

- характеристики элементов подстройки коэффициента деления;

- угол установки ноги крепления промежуточного электрода α ;

- собственная частота расчетного отсека $f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi}$;

- характеристики элементов подстройки частоты.

Вследствие сложной формы электродов периода ускорения расчет емкости каждого зазора затруднителен, и коэффициент деления k определяется через отношение напряжений на зазорах. Напряжение находится путем интегрирования продольной компоненты электрического поля в соответствующих пределах.

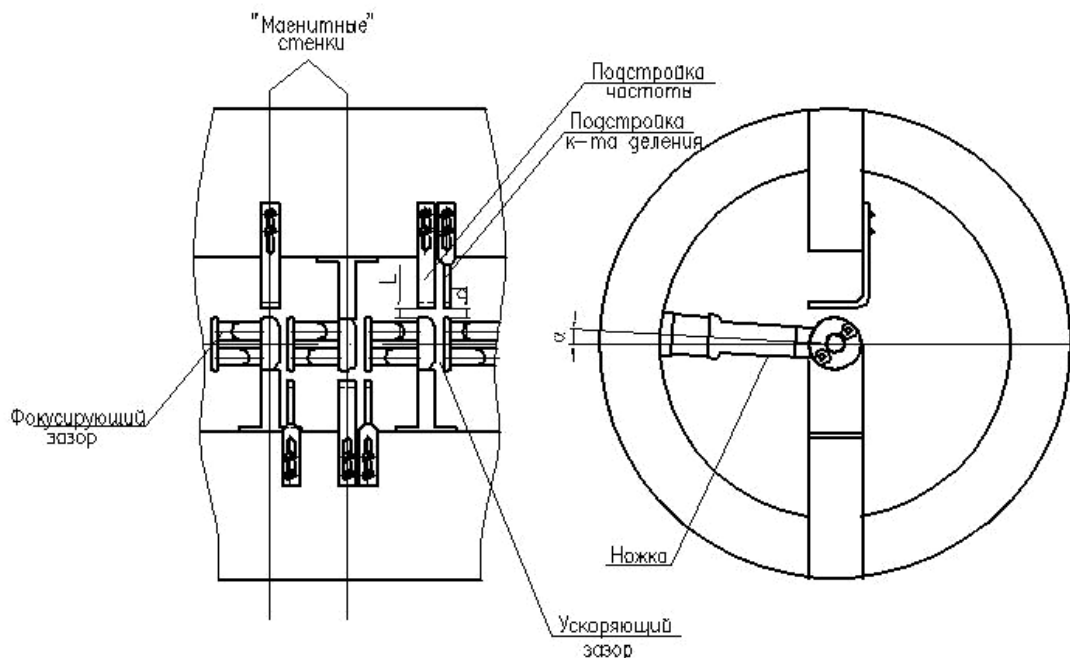


Рис. 2. Расчетный отсек периода ускорения.

На рис. 3 штриховой линией показано распределение продольной компоненты E_Z по длине периода ускорения на оси структуры. Видно, что при таком распределении определить точные границы интегрирования не возможно. Сплошной линией показано распределение компоненты E_Z по линии оси фокусирующего рога. В этом случае пределы интегрирования однозначно определяются размерами зазоров. В электростатическом приближении

$$U_a = \int_a^b E_z' dz, \quad U_{кв} = \int_c^d E_z' dz, \quad k = \frac{U_a}{U_{кв}}. \quad (5)$$

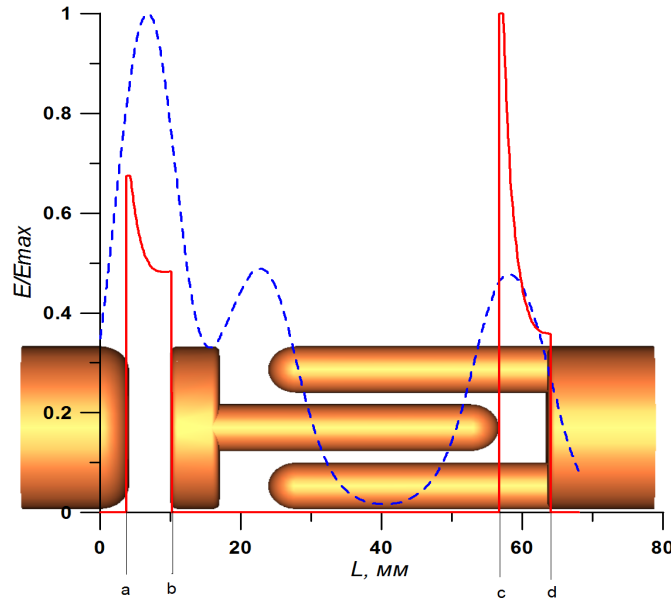


Рис. 3. Распределения продольной компоненты E_z по линии оси канала (пунктирная линия) и по линии оси рогов (сплошная линия).

Так как размеры электродов ускоряюще-фокусирующего канала определяются требованиями динамики частиц, а не соотношением емкостей, то для получения заданного коэффициента деления напряжения необходима возможность изменения (настройки) k без искажения структуры электрического поля в зазорах.

В настоящей работе предлагаются настроечные элементы, создающие переменную емкость, подключаемую параллельно к соответствующему зазору. Конструктивно такой элемент представляет собой металлическую пластину, устанавливаемую на край щели резонатора в плоскости промежуточного электрода и создающую дополнительную емкость между бортом резонатора и промежуточным электродом. Величина емкости зависит от расстояния d между элементом и промежуточным электродом. В зависимости от выбора края щели для установки подстроечного элемента дополнительная переменная емкость подключается либо к ускоряющему, либо к фокусирующему зазорам.

На рис. 2 схематически изображена установка подстроечного элемента. На рис. 4 приведены его настроечные характеристики, показывающие диапазон изменения коэффициента деления в зависимости от положения настроечного элемента. Минимальное значение d ограничено электропрочностью зазора между подстроечным элементом и промежуточным электродом.

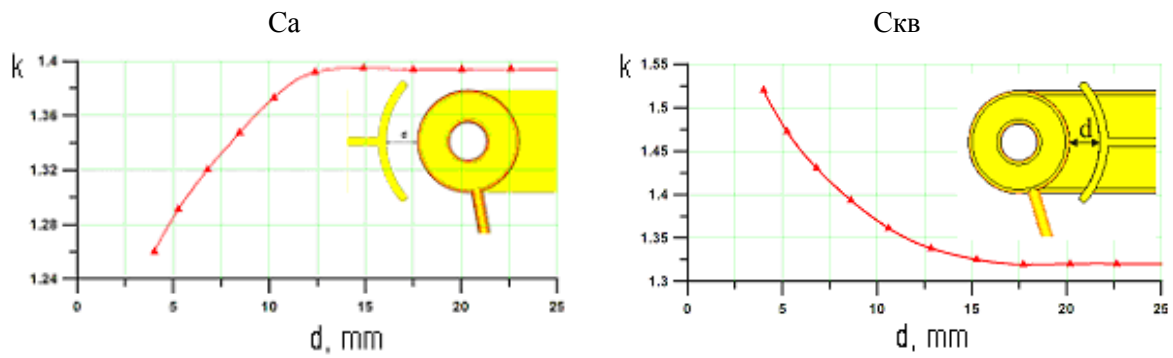


Рис.4 Расчетные настроечные характеристики

Угол установки α ноги крепления промежуточного электрода должен соответствовать выполнению условия (4).

В простейшем случае однородности магнитного поля по площади поперечного сечения резонатора без учета габаритов электродов и ноги крепления

$$\frac{\alpha_a}{\alpha_{кв}} = \frac{S_a}{S_{кв}} \approx \frac{U_a}{U_{кв}}, \quad (6)$$

где $S_a, S_{кв}, \alpha_a, \alpha_{кв}$ – площади и центральные углы секторов соответствующих ускоряющему и фокусирующему зазорам.

В общем случае вычисление угла установки ноги проводится на расчетной модели, приведенной на рис. 2. Условием соответствия угла постановки заданному делению напряжения является отсутствие тока по ноге, что выражается в нулевом напряжении на малом зазоре Δ между ногой крепления и поверхностью резонатора. Таким образом, вычисление угла проводится путем расчета зависимости

$$U_{\Delta} = U_{\Delta}(\alpha). \quad (7)$$

На рис. 5 показан график такой зависимости. Искомому значению угла соответствует $U_{\Delta} = 0$. Диапазон изменения α для вычисления зависимости (7) выбирается из условия (6). После установки ноги в требуемое положение зазор Δ замыкается, и проводится расчет отношения напряжений на зазорах. При необходимости, отношение корректируется с помощью подстроечного элемента и уточняется угол установки ноги.

Проверкой приведенного алгоритма может быть вычисление отношения напряжений путем интегрирования магнитного поля по площадям согласно (4). В случае однородного поля отношение напряжений равно отношению площадей, определенных с учетом габаритов электродов и ноги крепления.

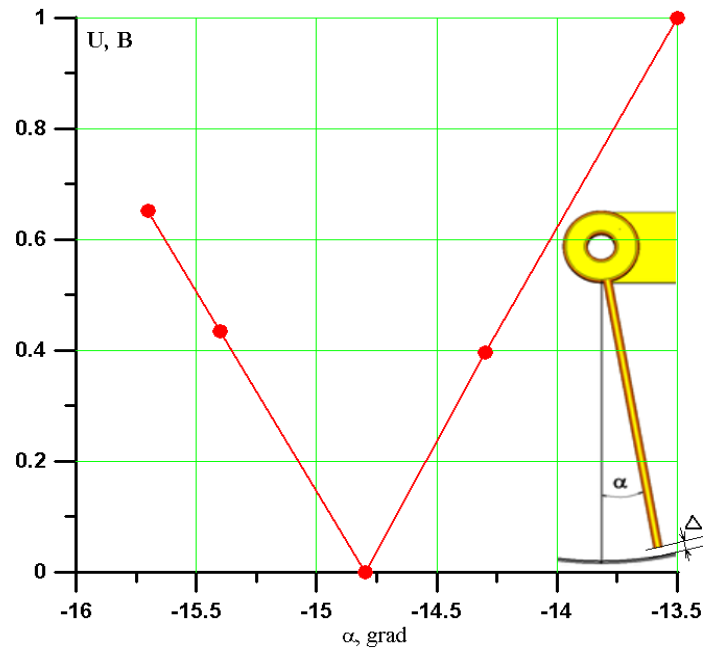


Рис. 5. Зависимость напряжения на ножке от ее угла установки.

Необходимо отметить, что при уменьшении радиуса резонатора расхождение результатов, полученных при интегрировании магнитного поля и при вычислении площадей, увеличивается (рис. 6). Такое расхождение объясняется увеличением вклада неоднородности магнитного поля вблизи системы электродов в результаты интегрирования (4).

Однозначное соответствие угла установки ноги требуемому делению напряжения указывает на последовательность операций при экспериментальной настройке структуры:

- 1) установка ноги под расчетным углом;
- 2) изменение коэффициента деления напряжения элементом подстройки при индикации тока по ноге. Исчезновение тока является признаком получения требуемого соотношения напряжений.

Вследствие различия емкостей периодов ускорения возникает необходимость настройки собственной частоты каждого расчетного отсека. Для получения требуемого значения резонансной частоты всей структуры необходимо равенство частот всех расчетных отсеков, что обеспечивается за счет элементов подстройки частоты. Элемент подстройки частоты представляет собой пластину с кронштейном крепления, устанавливаемую на край щели резонатора напротив трубки дрейфа и создающую дополнительную переменную емкость параллельную емкости периода.

На рис. 2 схематически изображены элементы подстройки частоты. На рис. 7 приведена расчетная настроечная характеристика.

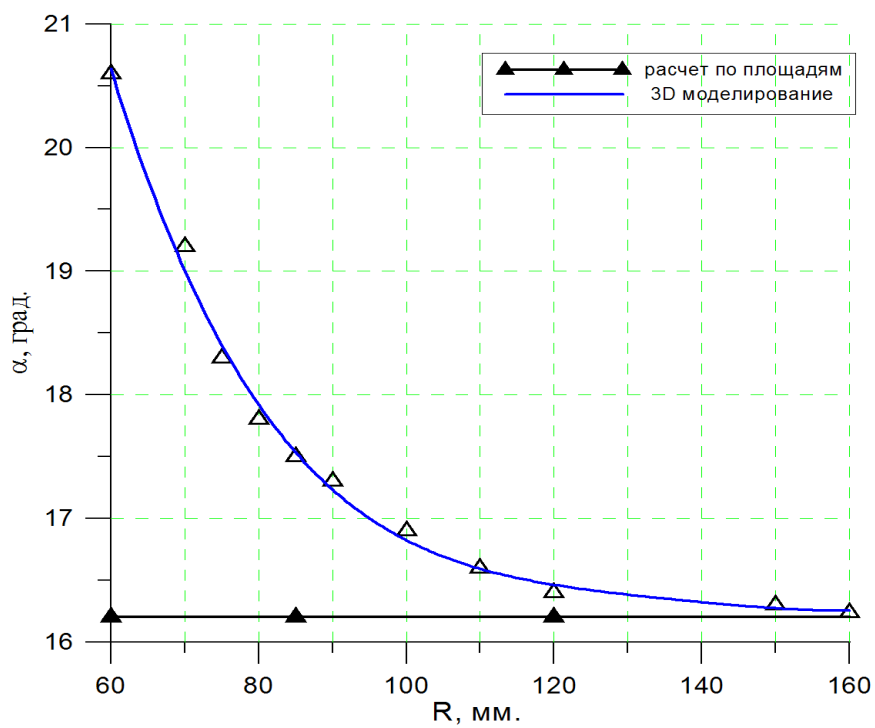


Рис. 6. Зависимость угла установки ноги от радиуса резонатора.

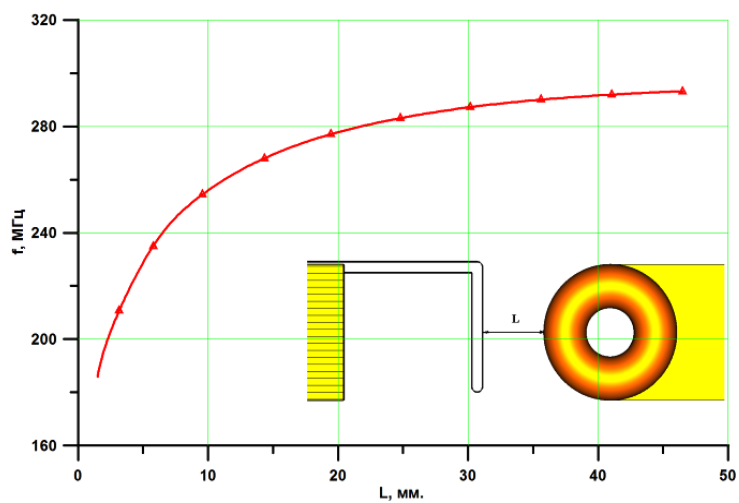


Рис. 7. Расчетная настроечная характеристика элемента подстройки частоты.

Следует отметить, что положение элемента подстройки частоты может влиять на деление напряжений, что требует проведения дополнительной подстройки соответствующими элементами.

Расчет электродинамических параметров периода ускорения проводился на рабочем типе колебаний в отсутствии возможного влияния иных типов. В работе [7] показан мешающий тип колебаний, существующий на периоде ускорения и характеризующийся протеканием тока по ноге промежуточного электрода. Магнитное поле при этом замыкается вокруг ноги. Колебание получило название «резонанса ноги». Для его подавления предлагалось включение в ногу активного сопротивления ~ 100 Ом, не влияющего на рабочий тип колебаний по причине сбалансированности (отсутствия тока) ноги. На практике применение такого способа сталкивается с трудностями обеспечения достаточной мощности рассеивания и электропрочности сопротивления. Устранить возможное влияние резонанса ноги на рабочий тип колебаний можно путем смещения частоты резонанса.

Из анализа эквивалентной схемы рис. 1 при условии равенства токов I_a и $I_{кв}$ ($C_a/C_{кв} = L_{кв}/L_a$) и учета межбортовой емкости C следует, что собственная частота рабочего типа колебаний определяется формулой

$$\omega_1^2 = \frac{\omega_0^2}{1 + \frac{C}{C_0}}, \quad (8)$$

где
$$\omega_0^2 = \frac{1}{C_a L_a} = \frac{1}{C_{кв} L_{кв}}; \quad C_0 = \frac{C_a C_{кв}}{C_a + C_{кв}}.$$

Собственная частота «резонанса ноги» зависит от характера комплексного сопротивления z ноги.

В случае индуктивного характера z

$$z = j\omega L_n; \quad \omega_{2L}^2 = \frac{\omega_0^2}{1 + \frac{L_n}{L_0}}; \quad L_0 = \frac{L_a L_{кв}}{L_a + L_{кв}}. \quad (9)$$

Из формул (8), (9) следует, что при индуктивном характере сопротивления ноги частота «резонанса ноги» может быть больше, равна или меньше частоты рабочего типа колебания в зависимости от соотношения величин C/C_0 и L_n/L_0 . Соотношение

определяется геометрическими размерами электродов и резонатора и может меняться по длине ускорителя.

Для емкостного характера z

$$z = \frac{1}{j\omega C_n} ; \quad \omega_{2c}^2 = \omega_0^2 + \frac{1}{C_n L_0} , \quad (10)$$

т.е. всегда выполняется неравенство

$$\omega_1^2 < \omega_{2c}^2 . \quad (11)$$

Максимальному значению частоты «резонанса ноги» соответствует минимальное значение емкости C_n , что объясняется последовательным включением этой емкости с емкостями зазоров периода.

Сделанные выводы проверены экспериментально на макете, содержащем один период ускорения. На рис. 8 представлены результаты измерения спектра колебаний при различных реактивных сопротивлениях ноги промежуточного электрода. Маркером 1 отмечен рабочий тип колебаний, маркером 2 – тип колебаний с вариацией продольного магнитного поля по длине резонатора, находящийся всегда по частоте выше рабочего типа. Маркером 3 отмечен «резонанс ноги». При цельнометаллической ноге, обладающей некоторой индуктивностью, частота «резонанса ноги» находится выше частоты рабочего типа. Изменение конструкции ноги, приводящее к увеличению ее индуктивности, смещает частоту «резонанса ноги» ниже рабочего типа, что согласуется с выражениями (8), (9). Естественно, что такое смещение может привести к сближению или совпадению частот рабочего типа и «резонанса ноги», что недопустимо.

Емкостный характер сопротивления ноги смещает частоту «резонанса ноги» выше рабочего типа, что соответствует формуле (11). Выбор способа устранения влияния «резонанса ноги» для создаваемой ускоряющей структуры определяется особенностями этой структуры.

Описанная методика определения электродинамических параметров была применена при создании радиотехнического макета структуры с пространственно-периодической высокочастотной квадрупольной фокусировкой с нарастающим напряжением на периодах ускорения. Структура предназначена для ускорения протонов с 3 до 11 МэВ на резонансной частоте 352,2 МГц. На рис. 9 показан внешний вид структуры и периода ускорения с элементами подстройки.

Ускоряюще-фокусирующий тракт состоит из 65 периодов, установленных в 2К-резонаторе. При постоянном напряжении на фокусирующих зазорах требуемый коэффициент деления напряжения изменяется в пределах $0,88 \div 1,44$. Рассчитанные углы постановки ног промежуточных электродов изменялись от $+3,5^\circ$ до -17° . Так как макет не

предназначен для работы на высоком уровне мощности, то для подавления «резонанса ноги» применены активные сопротивления.

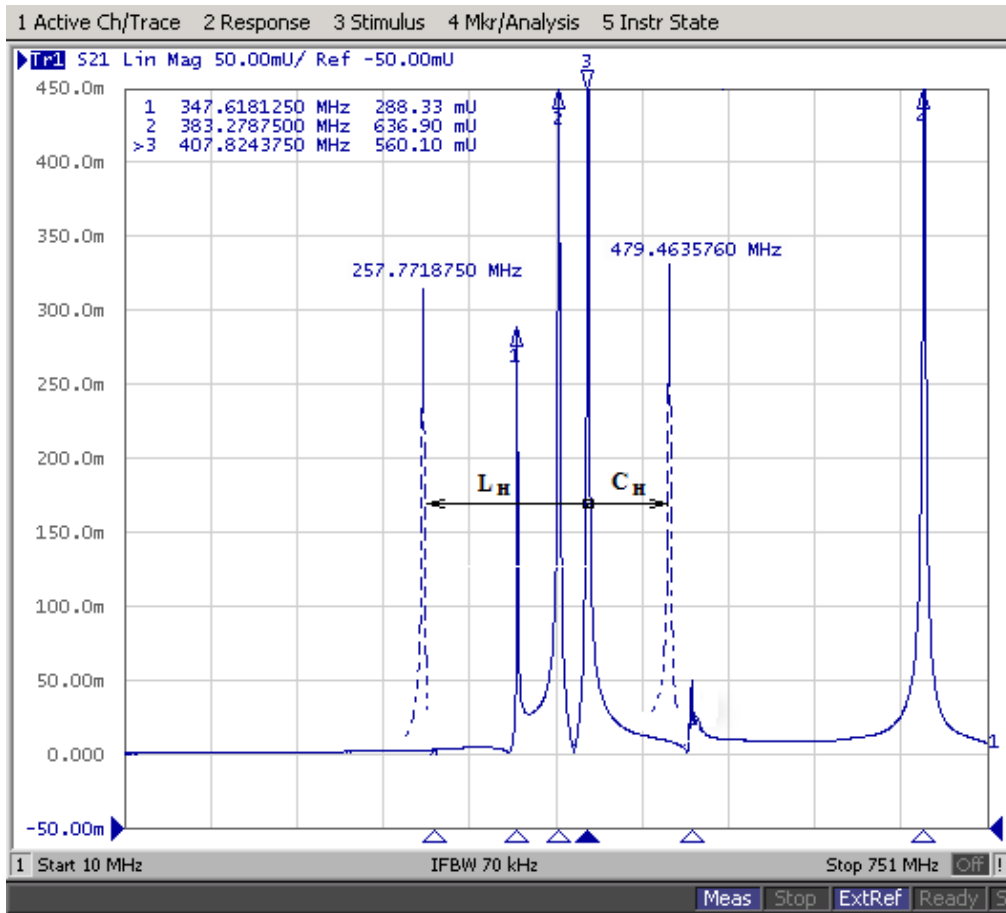


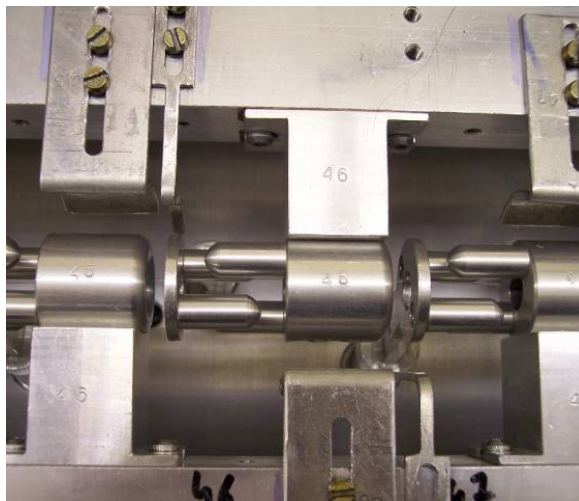
Рис. 8. Спектр колебаний периода ускорения.

Предварительно проведенные расчеты электродинамических параметров позволили исключить из процесса создания и настройки макета трудоемкие операции по измерению коэффициентов деления напряжения на периоде ускорения и нахождению угла установки ноги [4] в условиях неоднородности магнитного поля из-за малого радиуса резонатора (рис. 7), а также определить исходные положения элементов подстройки. Расчет положения подстроечных элементов коэффициента деления указал на переходы подстроечных элементов между ускоряющими и фокусирующими зазорами по длине структуры, что подтвердилось при проведении настроечных работ. Положения элементов подстройки частоты также соответствовали расчетным.

Таким образом, предварительные расчеты существенно уменьшают время и повышают качество настроечных работ, а также способствуют более глубокому пониманию процессов настройки требуемых параметров.



а)



б)

Рис. 9. Внешний вид ускоряющей структуры (а) и периода ускорения с элементами подстройки (б).

Литература

1. Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей. – М.: Энергоиздат, 1982 .
2. Егоров А.А., Зенин В.А., Ильевский С.А. Препринт ИФВЭ 79-151, Серпухов, 1979.
3. Тепляков В.А., Степанов В.Б. Радиотехника и электроника. 1968. Т. XIII вып., 11 с., 1965.
4. Беляев О.К., Клоков В.В., Севостьянов В.С., Степанов В.Б. Препринт ИФВЭ 93-140. – Протвино, 1993.
5. Беляев О.К., Рябов А.Д., Степанов В.Б. ПТЭ, № 5, 1998, стр. 96-103
6. Беляев О.К., Игошин В.Б., Пьяных С.В., Степанов В.Б. Препринт ИФВЭ 92-58, Протвино, 1992.
7. Тепляков В.А., Степанов В.Б. Препринт ИФВЭ ИНЖ 74-130. Серпухов, 1974.

Рукопись поступила 19 октября 2009 г.

О.К.Беляев, И.А.Звонарев

Определение электродинамических параметров периода ускоряющей структуры с пространственно-периодической ВЧК-фокусировкой.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Н.В.Ежела

Подписано к печати 29.10.2009.

Формат 60 × 84/8.

Офсетная печать.

Печ.л. 0, 87 Уч.–изд.л. 1,4.

Тираж 80.

Заказ 49.

Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142284, Протвино Московской обл.

