

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2011–10
ОУ У-70 ОЛУ

О.К. Беляев

**Резонанс ноги в ускоряющей структуре
с пространственно-периодической высокочастотной
квадрупольной фокусировкой (ППКФ)**

Протвино 2011

Аннотация

Беляев О.К. Резонанс ноги в ускоряющей структуре с пространственно-периодической высокочастотной квадрупольной фокусировкой (ППКФ): Препринт ИФВЭ 2011-10. – Протвино, 2011. – 13 с., 9 рис., библиогр.: 5.

Описан резонанс ноги промежуточного электрода в структуре с пространственно-периодической высокочастотной квадрупольной фокусировкой. Рассмотрены различные конструкции ноги, устраняющие влияние этого резонанса на ускорение. Предложен вариант конструкции ноги с водяным охлаждением для ускорителя, работающего в режиме малой скважности.

Abstract

Belyaev O.K. The resonance of an intermediate electrode holder in accelerating structure with spatially periodic RFQ focusing: IHEP Preprint 2011-10. – Protvino, 2011. – p. 13, figs. 9, refs. 5.

The resonance of an intermediate electrode holder in accelerating structure with spatially periodic RFQ focusing is described. The different designs of the holder to escape the influence of this resonance on acceleration are considered. The variant of water cooling design of the holder for low relative pulse duration accelerator is offered.

Ускоряющая структура с пространственно-периодической квадрупольной фокусировкой применяется в малогабаритных линейных ускорителях ионов.

Период ускорения структуры с ППКФ состоит из двух бортовых электродов (трубок дрейфа), закрепленных на противоположных краях щели резонатора с продольным магнитным полем (Н-резонатора) [1,2]. Бортовые электроды разделены промежуточным электродом, установленным на ноге, делящей площадь поперечного сечения Н-резонатора в определенном соотношении. С помощью такой системы электродов напряжение между бортовыми электродами (бортами Н-резонатора) делится на напряжение на ускоряющем, т.е. аксиальном, зазоре U_a и напряжение на фокусирующем, т.е. квадрупольном, зазоре $U_{кв}$. Ускоряющий зазор образован торцом трубки дрейфа и плоскостью промежуточного электрода, фокусирующий – четырьмя фокусирующими рогами, попарно расположенными на другой плоскости промежуточного электрода и торце второй трубки дрейфа.

На рис. 1 приведена простейшая эквивалентная схема Н-резонатора с системой электродов.

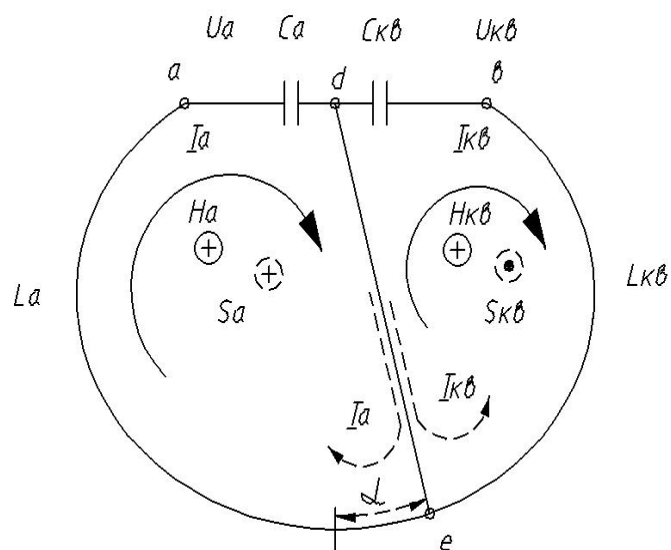


Рис. 1. Простейшая эквивалентная схема Н-резонатора с системой электродов.

На рабочем типе колебаний в резонаторе и отсутствии тока по ноге промежуточного электрода напряжения U_a и U_{kb} на зазорах обратно пропорциональны емкостям C_a и C_{kb} этих зазоров. Легко показать, что условием отсутствия тока является выполнение соотношения:

$$\frac{U_{kb}}{U_a} = \frac{C_a}{C_{kb}} = \frac{\int_{S_{kb}} \mu H_{kb} dS}{\int_{S_a} \mu H_a dS} = \frac{L_{kb}}{L_a}. \quad (1)$$

На рис. 1 направление токов и магнитных полей на рабочем типе колебаний показано сплошными линиями. Выполнение соотношения (1) обеспечивается при проведении настроечных работ путем изменения емкостей зазоров с помощью специальных подстроечных элементов. Такая операция носит название «балансировка».

При создании ускоряющей структуры с ППКФ было обнаружено существование и влияние типа колебания, при котором ток по ноге существует при любом соотношении емкостей зазоров [3], что объясняется не вычитанием токов зазоров по ноге, как

на рабочем типе, а их сложением. Направление токов и магнитных полей в этом случае на рис. 1 показано штриховой линией. Этот тип колебаний получил название «резонанс ноги».

Для простейшего случая равенства напряжений на зазорах при $\alpha = 0$ и «сбалансированности» ноги для схемы на рис. 1 легко показать, что частоты рабочего типа и резонанса ноги равны. Влияние резонанса ноги проявляется в резком нарушении соотношения напряжений на зазорах. Равенство частот при простейшем рассмотрении указывает на возможное влияние резонанса ноги и при других параметрах периода ускорения.

Для подавления резонанса ноги в работе [3] было предложено включение в ногу активного мастичного сопротивления ~ 100 Ом для перевода этого колебания в аperiodический режим. Но на практике при возбуждении резонатора мощным сигналом такие сопротивления сразу выходили из строя (перегорали). Положительный результат дало применение более мощного сопротивления, навитого из тугоплавкой проволоки (нихром) с большим сопротивлением.



Рис. 2. Нога крепления промежуточного электрода с проволочным сопротивлением.

На рис. 2 показан фрагмент ускоряющей структуры с проволочными сопротивлениями в ногах крепления промежуточных электродов. Сопротивления расположены в нижней части ног. В процессе эксплуатации ускорителей выявилась недостаточная электрическая прочность ноги и увеличение потерь в резонаторе, что объясняется следующим:

- при пробое любого зазора напряжение > 100 кВ прикладывается к проволочному сопротивлению, вызывая межвитковую пробой с энергией, накопленной в резонаторе (~ 10 Дж), что приводит к разрушению сопротивления;
- расположение высокоомного проволочного сопротивления в максимуме переменного

магнитного поля резонатора вызывает дополнительные токи в сопротивлении, что приводит к увеличению потерь.

Существует конструкция ноги с металлическим экраном, защищающим сопротивление от переменного магнитного поля резонатора. Внешний вид и чертеж конструкции приведены на рис. 3, 4.



Рис. 3. Нога крепления промежуточного электрода с экранированным сопротивлением.

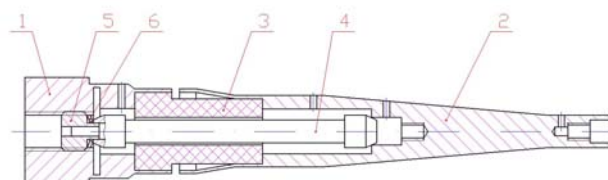


Рис. 4. Чертеж ноги крепления с экранированным сопротивлением.

Основание ноги 1 соединяется с корпусом 2 через керамическую втулку 3, внутри которой находится проволочное сопротивление 4, закрепленное с помощью прижимного винта и шайбы 5 и 6. Щель шириной ~ 1 мм между экраном и основанием ноги играет роль разрядника, который шунтирует навитое проволочное сопротивление при возникновении пробоя. Нога такой конструкции прошла успешные испытания и может быть рекомендована для применения в ускорителях, работающих в режиме большой ($\geq 10^3$) скважности, не требующем охлаждения электродов периода ускорения.

Задача повышения среднего тока пучка ионов до величины ~ 1 мА приводит к созданию ускорителей, работающих в режиме малой ($\leq 10^2$) скважности, при котором необходимо охлаждение всех элементов периода ускорения, включая промежуточные электроды.

Для объяснения влияния конструкции ноги на её резонансные свойства и разработки конструкции, позволяющей осуществлять водяное охлаждение промежуточного электрода, был проведен более подробный анализ резонанса ноги.

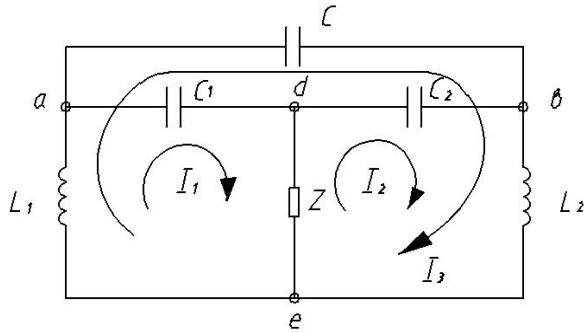


Рис. 5. Эквивалентная схема периода ускорения.

Анализ проводился методом контурных токов для эквивалентной схемы периода ускорения с учетом межбортовой емкости C и реактивности Z ноги крепления промежуточного электрода. На рис. 5 показана анализируемая эквивалентная схема.

Согласно [4] расчет собственных частот колебаний цепи методом контурных токов проводится при отсутствии источников э.д.с. Собственные частоты находятся из условия равенства нулю определителя системы уравнений контурных токов. Система уравнений токов для схемы рис. 5 имеет вид:

$$\begin{cases} \left(j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + Z \right) I_1 - Z I_2 + j\omega L_1 I_3 = 0, \\ -Z I_1 + \left(Z + \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 \right) I_2 + j\omega L_2 I_3 = 0, \\ j\omega L_1 I_1 + j\omega L_2 I_2 + \left(j\omega L_1 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C} \right) I_3 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Система решается при условии баланса ноги на рабочем типе колебаний, что выполняется в соответствии с (1) при

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{L_2}{L_1}, \quad (3a)$$

$$I_{de} = I_1 - I_2 = 0. \quad (3b)$$

При введении обозначений:

$$C_1 L_1 = C_2 L_2 = \frac{1}{\omega_0^2}; \quad C_0 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (3c)$$

для рабочего типа колебаний система (2) принимает вид:

$$\begin{cases} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) I_1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} I_3 = 0, \\ -\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{C}{C_0} I_1 + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{C}{C_0}\right) I_3 = 0, \end{cases} \quad (4)$$

из условия

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} & -\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \\ -\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{C}{C_0} & 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{C}{C_0} \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

находится частота рабочего типа колебаний

$$\omega_{\text{раб}}^2 = \frac{\omega_0^2}{1 + \frac{C}{C_0}}. \quad (6)$$

Этот же результат получается из анализа схемы рис. 5 при исключении из неё цепи de (условие баланса 3в).

Для резонанса ноги условие (3а) выполняется, условие (3в) не выполняется.

В этом случае система (2) выглядит так:

$$\begin{cases} \left(-\frac{\omega^2}{\omega_0^2} + 1 + j \frac{\omega}{\omega_0^2} \frac{Z}{L_1}\right) I_1 - j \frac{\omega}{\omega_0^2} \frac{Z}{L_1} I_2 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} I_3 = 0, \\ -j \frac{\omega}{\omega_0^2} \frac{Z}{L_2} I_1 + \left(j \frac{\omega}{\omega_0^2} \frac{Z}{L_2} + 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) I_2 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} I_3 = 0, \\ -\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{C}{C_1} I_1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{C}{C_2} I_2 + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{C}{C_0}\right) I_3 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Частота резонанса ноги находится из условия:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{\omega_0^2} \frac{Z}{L_1} & -j \frac{\omega}{\omega_0^2} \frac{Z}{L_1} & -\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \\ -j \frac{\omega}{\omega_0^2} \frac{Z}{L_2} & 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{\omega_0^2} \frac{Z}{L_2} & -\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \\ -\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{C}{C_1} & -\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{C}{C_2} & 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{C}{C_0} \end{vmatrix} = 0. \quad (8)$$

Решение этого определителя обычным способом приводит к громоздким вычислениям. Если учесть, что определитель равен нулю при равенстве элементов двух строк (столбцов), то из сравнения первой и второй строк получается выражение

$$1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{\omega_0^2} \frac{Z}{L_{\Pi}} = 0, \quad (9)$$

где $L_{\Pi} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$.

Для индуктивного характера сопротивления ноги:

$$Z = j\omega L_n; \quad \omega_{p.n}^2 = \frac{\omega_0^2}{1 + \frac{L_n}{L_{\Pi}}}. \quad (10)$$

Для емкостного характера сопротивления ноги:

$$Z = \frac{1}{j\omega C_n}; \quad \omega_{p.n}^2 = \omega_0^2 + \frac{1}{C_n L_{\Pi}}. \quad (11)$$

В частном случае эквипотенциальности точек а и б (рис. 5) для резонанса ноги, что соответствует равенству напряжений на зазорах, выражения (10) и (11) легко получаются из эквивалентной схемы рис. 5 при закорачивании точек а и б.

Из сравнения выражений (6), (10), (11) следует, что при индуктивном характере сопротивления ноги частота резонанса ноги может быть выше, ниже или равной рабочей частоте в зависимости от соотношения величин $\left(\frac{C}{C_0}\right)$ и $\left(\frac{L_n}{L_{II}}\right)$.

При емкостном характере сопротивления ноги частота резонанса ноги всегда выше частоты рабочего колебания, что объясняется последовательным включением емкости ноги с емкостями зазоров.

Необходимо отметить, что в проведенном рассмотрении речь идет о характере реактивности ноги, а не о конструкции.

В работе [5] приведены экспериментальные данные о частотах резонанса ноги при индуктивном и емкостном характере сопротивления.

На основании полученных результатов можно сделать некоторые выводы относительно резонансных свойств описанных конструкций ног:

- включение в ногу активного мастичного сопротивления не приводило к изменению реактивности ноги и, следовательно, её резонансной частоты. Мощность высокочастотного сигнала, возбуждающего резонатор на рабочей частоте, поглощалась активным сопротивлением, что приводило к его выходу из строя;

- применение сопротивления, навитого из тугоплавкой проволоки, приводило к изменению реактивности, т.е. смещению резонансной частоты ноги относительно рабочей частоты резонатора, что давало положительный эффект.

Вследствие неопределенности положения частоты резонанса ноги относительно рабочей частоты при индуктивном характере сопротивления ноги предпочтительным является емкостный характер сопротивления. Конструктивно емкостный характер можно обеспечить изготовлением ноги из двух деталей, соединенных через полую втулку, т.е. удалением из конструкции рис. 4 сопротивления. При этом полая втулка позволяет организовать систему водяного охлаждения промежуточного электрода с помощью трубки Фильда. Однако в такой конструкции отсутствует гальваническая связь электрода с корпусом резонатора. Это может привести к накоплению заряда на промежуточном электроде и изменению его потенциала за счет осаждения на нем ускоряемых частиц.

В основу конструкции ноги с емкостным характером реактивности, гальванической связью и возможностью водяного охлаждения может быть положено свойство короткозамкнутой длиной линии. Известно, что входное сопротивление короткозамкнутой линии

$$Z_{\text{вх}} = jZ_0 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} l, \quad (12)$$

где Z_0 – волновое сопротивление, λ – длина волны, l – длина линии.

При значениях $0 < l < \frac{\lambda}{4}$ $Z_{\text{вх}}$ имеет индуктивный характер и изменяется от 0 до $+\infty$, при $\frac{\lambda}{4} < l < \frac{\lambda}{2}$ характер $Z_{\text{вх}}$ емкостный и диапазон изменения от $-\infty$ до 0.

Длина линии, имеющей емкостный характер, превосходит длину ноги крепления промежуточного электрода в применяемых резонаторах с продольным магнитным

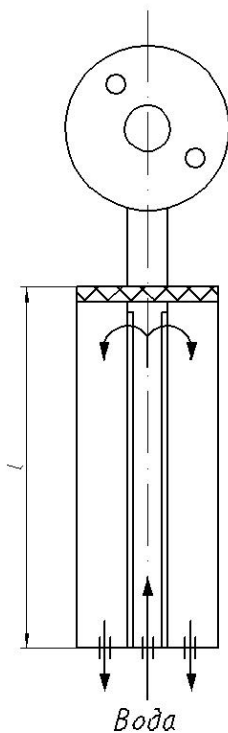


Рис. 6. Эскиз охлаждаемой ноги.

полем. Однако если учесть, что длина волны в среде в $\sqrt{\epsilon}$ (ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды) короче длины волны в вакууме, то выбором диэлектрика, заполняющего линию, можно получить размеры линии соизмеримые с длиной ноги крепления. При выборе в качестве диэлектрика дистиллированной воды с $\epsilon = 81,1$ длина волны и соответственно длина линии укорачиваются в 9,006 раза. В этом случае, замещая часть ноги отрезком коаксиальной короткозамкнутой линии соответствующей длины, заполненной водой, можно обеспечить емкостный характер сопротивления ноги, гальваническую связь и возможность водяного охлаждения. Емкостный характер обеспечивается выбором длины l , гальваническая связь – замкнутостью линии, охлаждение – трубкой Фильда.

На рис. 6 приведено схематическое изображение охлаждаемой ноги с участком коаксиальной короткозамкну-

той линии. Со стороны промежуточного электрода коаксиал закрыт вакуумноплотной керамической крышкой, через которую проходит центральный проводник с радиусом r . Вода поступает в полую часть центрального проводника, через отверстия переходит в область, ограниченную внешним проводником с радиусом R , и выходит через отверстия в стенке резонатора. Значения R и r определяются, с одной стороны, требованиями к системе охлаждения, а с другой стороны – величиной волнового сопротивления (12), т.е. емкостью ноги, так как

$$Z_0 = 138 \lg \frac{R}{r} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}, \quad (13)$$

и напряженностью электрического поля на поверхности центрального проводника коаксиала

$$E = \frac{U}{\varepsilon \ln \frac{R}{r}} \frac{1}{r}. \quad (14)$$

Необходимо отметить, что при высоком уровне мощности ВЧ-сигнала, возбуждающего резонатор, такая конструкция может работать только с протоком воды. В противном случае при возможном электрическом пробое коаксиала из-за парообразования произойдет разрушение керамической крышки.

Для экспериментальной проверки возможности управления характером реактивности ноги промежуточного электрода был создан специальный стенд, состоящий из резонатора с продольным магнитным полем, нагруженного периодом ускорения с элементом настройки баланса и параллельными пластинами, имитирующими емкостную нагрузку резонатора. На рис. 7 показан стенд для исследования резонанса ноги, на рис. 8 – нога промежуточного электрода периода ускорения с петлями связи резонатора с измерительной аппаратурой.



Рис. 7. Стенд для исследования резонанса ноги.

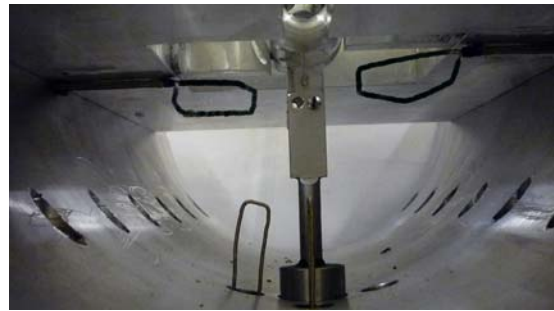


Рис. 8. Нога промежуточного электрода периода ускорения.

В процессе измерений определялась зависимость частоты резонанса ноги от длины l коаксиального участка ноги, заполненного водой, при $R/\gamma = e$, что соответствует минимуму напряженности поля (14). Измерения проводились для замкнутого и разомкнутого на входе коаксиала, т.е. в первом случае имитировалась цельнометаллическая нога, имеющая индуктивный характер. На рис. 9 представлены полученные результаты.

Кривая 1 соответствует замкнутому входу коаксиала, т.е. цельнометаллической ноге, у которой при уменьшении l увеличивается индуктивность за счет увеличения длины тонкого участка ноги с радиусом r . Согласно (10) при увеличении индуктивности ноги её резонансная частота должна уменьшаться, что и имеет место – кривая 1.

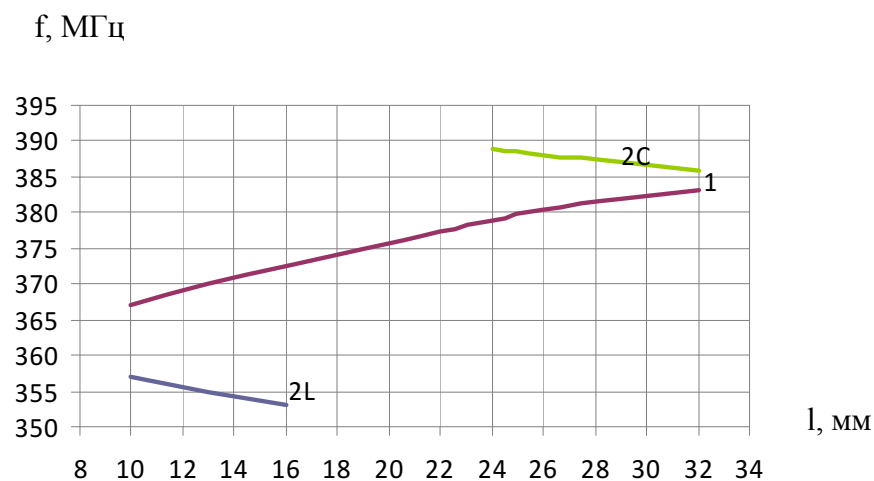


Рис. 9. Зависимость частоты резонанса от реактивности ноги.

Кривая 2 соответствует разомкнутому входу коаксиала. Видно, что при изменении l произошло расщепление зависимости на две ветви. Ветвь при изменении l от 24 мм $\left(\frac{l}{\lambda} = 0,28\right)$ до 32 мм $\left(\frac{l}{\lambda} = 0,37\right)$ соответствует емкостному характеру реактивности ноги, так как уменьшение l в указанном диапазоне приводит, согласно (12), к уменьшению величины емкости ноги и увеличению частоты её резонанса в соответствии с (11), что и отображает экспериментально полученная кривая 2С на рис. 9.

Ветвь при уменьшении l от 16 мм $\left(\frac{l}{\lambda} = 0,16\right)$ до 10 мм $\left(\frac{l}{\lambda} = 0,1\right)$ соответствует уменьшению индуктивности ноги, что согласно (10) повышает её резонансную частоту – кривая 2L на рис. 9.

В диапазоне $0,16 < \frac{l}{\lambda} < 0,28$ результаты измерений были нестабильны, что объясняется высокой крутизной зависимости входного сопротивления коаксиала от l .

На основании полученных результатов можно сделать вывод о возможности применения предлагаемой коаксиальной конструкции ноги промежуточного электрода с водяным охлаждением для работы ускорителя в режиме малой скважности. Требуемый емкостный характер сопротивления ноги соответствует относительной длине коаксиального участка $\frac{l}{\lambda} = 0,32 \div 0,33$, где λ – длина рабочей волны резонатора.

В представленной работе рассмотрены конструкции ног крепления промежуточных электродов в ускоряющих структурах с ППКФ. На основе анализа эквивалентной схемы периода ускорения выявлены основные закономерности резонанса ноги и показаны условия устранения влияния этого резонанса на рабочий тип колебаний резонатора. Предложена конструкция ноги для ускорителя, работающего в режиме малой скважности.

Литература

- [1] Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей. – М.: Энергоиздат, 1982.
- [2] Тепляков В.А., Степанов В.Б.. Исследование Н-резонатора. // Радиотехника и электроника, т. XIII, 11, 1968, с. 1965–1975.
- [3] Степанов В.Б., Тепляков В.А. Методика экспериментального изучения Н-резонатора. – Препринт ИФВЭ 74-130, Серпухов, 1974.
- [4] Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1965.
- [5] Беляев О.К., Звонарев И.А. Определение электродинамических параметров периода ускоряющей структуры с пространственно-периодической высокочастотной фокусировкой. // ПТЭ, № 3, 2010, с. 13–19.

Рукопись поступила 14 июня 2011 г.

О.К. Беляев

Резонанс ноги в ускоряющей структуре с пространственно-периодической высокочастотной квадрупольной фокусировкой (ППКФ).

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 20.06.2011.	Формат 60 × 84/16.	Офсетная печать.
Печ.л. 0, 94. Уч.– изд.л. 1,44.	Тираж 80.	Заказ 52. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2011-10, ИФВЭ, 2011
