

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

В.В. Подлевских

ГРУППИРУЮЩАЯ СТРУКТУРА
УСТАНОВКИ СТЕНД

ИЯФ 97-77

Новосибирск
1997

Группирующая структура установки СТЕНД

В.В.Подлевских

ИЯФ им. Г.И. Будкера, 630090 Новосибирск, Россия.

Аннотация

Группирующая структура на рабочей частоте $f_p = 2798 \text{ МГц}$ является составной частью действующей в настоящее время установки СТЕНД (Прототип форинжектора ВЭПП-5) и предназначена для отработки методов предварительного формирования электронных сгустков на входе первой ускоряющей секции форинжектора ВЭПП-5.

В данной работе приводятся расчеты распределения электромагнитного поля на оси структуры выполненные на основе модели связанных резонаторов. Проводится анализ зависимости поля в структуре от параметров ее отдельных элементов.

S-band buncher for the VEPP-5 preinjector prototype

V.V. Podlevskih

Budker Institute of Nuclear Physics
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract

The prototype of VEPP-5 preinjector include the S-band buncher on the operating frequency $f_o = 2798 \text{ MHz}$.

This works presents the calculation of field distribution along the axis of the buncher. The analysis of the dependence of the field distribution from the S-band elements parameters (coupler and cells) is also presented.

Введение

В ИЯФ им. Г.И.Будкера на установке СТЕНД продолжаются работы по созданию системы предварительного формирования электронных сгустков для форинжектора ВЭП-5.

Группирующая система состоит из резонатора, работающего на частоте 16-ой субгармоники установки СТЕНД ($f_p = 174.8 \text{ МГц}$), группирующей структуры на основной частоте ($f_p = 2798 \text{ МГц}$) и первой ускоряющей секции ($f_p = 2798 \text{ МГц}$).

В настоящее время проведены предварительные испытания с получением ускоренного электронного пучка [1] группирующей структуры на основной частоте и первой ускоряющей секции. Проводятся работы по запуску субгармонического группирователя, после завершения которых будет проведена комплексная проверка всей системы.

В данной работе представлены результаты расчета распределения электромагнитных полей вдоль группирующей структуры, которые являются исходными данными для численного моделирования процесса группировки.

Сам метод проведения расчетов, подробно изложенный в работе, позволяет конструировать структуры подобного типа с наперед заданными параметрами распределения поля.

Система предварительного формирования электронных сгустков действующей установки “СТЕНД”

Система предварительного формирования электронных сгустков действующей установки “СТЕНД” состоит из четырех последовательно связанных резонаторов (группирующей структуры) возбуждаемых на рабочей частоте установки “СТЕНД” 2798 МГц от основного источника СВЧ мощности — клистронного усилителя КИУ-12. Связь группирующей структуры с подводющим волноводом осуществляется через индуктивную диафрагму в первом резонаторе.

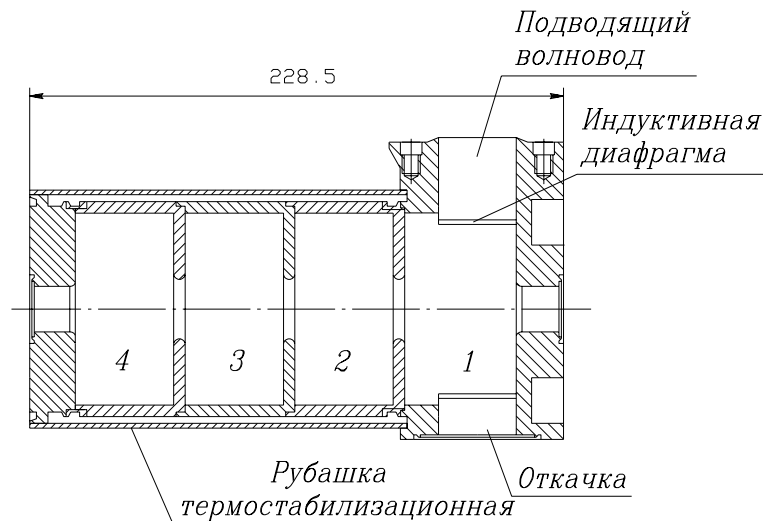


Рис. 1: Общий вид группирующей структуры.

Общий вид структуры представлен на рис.1, а основные геометрические размеры составляющих ее элементов (резонаторов) приведены в таб.1

Табл. 1

$R_1,$ см	$D_1,$ см	$R_2,$ см	$D_2,$ см	$R_3,$ см	$D_3,$ см	$R_4,$ см	$D_4,$ см
4.21	3.92	4.21	3.92	4.21	3.92	4.02	4.87

R_n, D_n - радиус и длина n-го резонатора.

Все элементы структуры изготовлены из специально подобранного материала — стали марки 12Х18Н10Т, электротехнические свойства которой (большое поверхностное сопротивление) существенным образом влияют на распределение электромагнитного поля вдоль структуры. Использование низкодобротных резонаторов с малыми коэффициентами связи должно было по первоначальному замыслу ее автора [1]:

а) создать распределение поля в структуре близкое к распределению поля бегущей волны круглого диафрагмированного волновода с большим коэффициентом затухания:

б) сократить характерное время протекания переходных процессов в резонаторах структуры до величины существенно меньшей длительности возбуждающего СВЧ импульса, которая после системы умножения мощности составляет 0.5 мкс.

Для вычисления распределения электрического поля вдоль группирующей структуры в данной работе используется метод эквивалентных схем, который в сочетании с хорошо развитыми в настоящее время, программными средствами (SLANC,

URMEL и др.) обеспечил приемлемую точность расчетов , а также позволил получить численные оценки зависимости распределения ускоряющего поля в структуре от параметров ее отдельных элементов.

Проведенные вычисления в сочетании с данными экспериментальных измерений позволили отработать алгоритм создания группирующих структур подобного типа с максимально близкими к требуемым (наперед заданными) параметрами ускоряющего поля.

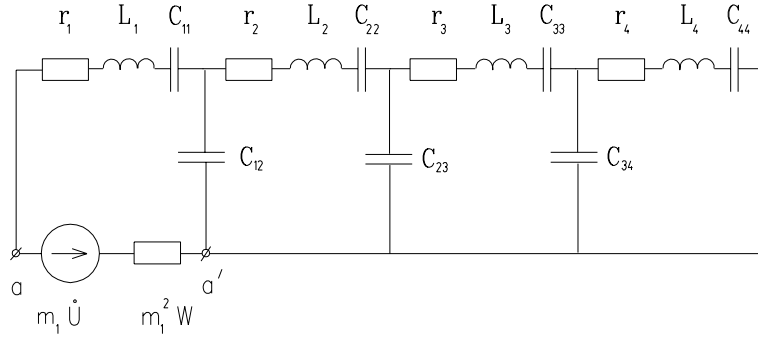


Рис. 2: Эквивалентная схема группирующей структуры.

Эквивалентная схема группирователя приведена на рис.2. Связь первого резонатора с подводящим волноводом осуществляется посредством индуктивной диафрагмы, которая представлена на эквивалентной схеме в виде идеального трансформатора с коэффициентом трансформации равным m . Для элементов приведенной выше эквивалентной схемы справедливо соотношение: $\beta = m^2 Z_0 / r_1$, где β — коэффициент связи первой ячейки с подводящим волноводом, Z_0 — волновое сопротивление подводящего волновода. Система уравнений для схемы рис.2 может быть записана в виде (1.1):

$$\begin{cases} [1 - \frac{f^2}{f_1^2} + i \frac{f}{f_1} \frac{(1+\beta)}{Q_1}] X_1 + \frac{k_1}{2} X_2 = iw \sqrt{\beta C_1 r_1} \frac{U}{\sqrt{Z_0}} \\ \frac{k_1}{2} X_1 + [1 - \frac{f^2}{f_2^2} + i \frac{f}{f_2} \frac{1}{Q_2}] X_2 + \frac{k_2}{2} X_3 = 0 \\ \frac{k_2}{2} X_2 + [1 - \frac{f^2}{f_3^2} + i \frac{f}{f_3} \frac{1}{Q_3}] X_3 + \frac{k_3}{2} X_4 = 0 \\ \frac{k_3}{2} X_3 + [1 - \frac{f^2}{f_4^2} + i \frac{f}{f_4} \frac{1}{Q_4}] X_4 = 0 \end{cases} \quad (0.1)$$

$$X_n = \frac{J_n}{\sqrt{C_n}};$$

J_n — ток в n -м контуре эквивалентной схемы;

$$\frac{1}{C_n} = \frac{1}{C_{n,n-1}} + \frac{1}{C_{n,n}} + \frac{1}{C_{n,n+1}};$$

f_n, Q_n — резонансная частота и собственная добротность n -й ячейки;

k_n — коэффициент связи n и $(n+1)$ -й ячейки;

w — круговая частота генератора.

Электротехнические параметры отдельных резонаторов связаны с параметрами элементов эквивалентной схемы следующими соотношениями:

$$f_n = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_n C_n}}$$

$$Q_n = \left(\frac{L_n}{C_n} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{r_n} \quad (0.2)$$

$$k_n = \frac{2\sqrt{C_n C_{n+1}}}{C_{n,n+1}}$$

Связь между P_0 — мощностью падающей волны на входе первой ячейки группирующей структуры и U — напряжением эквивалентного генератора в схеме (2):

$$P_0 = \frac{U^* \cdot U}{8Z_0} \quad (0.3)$$

Тогда из решения системы (1.1) находим W_n, E_n ($n = 1, 2, 3, 4$) — запасаемую энергию и напряженность электрического поля внутри каждого резонатора:

$$W_n = \frac{X_n^* \cdot X_n}{2w^2} \quad (0.4)$$

$$E_n = \sqrt{\epsilon_0 \pi R_n^2 L_n} J_1(\nu_{01}) \frac{X_n}{w} \quad (0.5)$$

ϵ_0 — электрическая постоянная ,

R_n, L_n — радиус и длина n -й ячейки ,

J_1 — функция Бесселя первого порядка,

ν_{01} — первый корень функции Бесселя нулевого порядка.

Коэффициент отражения на входе группирователя со стороны подводящего волновода определяется из матрицы коэффициентов системы (1.1):

$$\Gamma = -1 - 2i \frac{f_1}{f} \frac{\beta}{Q_1} \frac{\Delta'}{\Delta}$$

Δ — определитель матрицы коэффициентов системы (1.1),

Δ' — определитель матрицы коэффициентов системы (1.1) без первого столбца и первой строки.

Собственные частоты отдельных резонаторов f_n и коэффициенты связи между ними k_n были рассчитаны с использованием программы SLANC.

В качестве примера, более подробно рассмотрим четвертый и третий резонаторы структуры (см. рис.3). Система линейных уравнений для двух связанных резонаторов с учетом введенных ранее обозначений записывается в виде:

$$\begin{cases} [1 - \frac{f^2}{f_3^2}]X_3 + \frac{k_3}{2}X_4 = 0 \\ \frac{k_3}{2}X_3 + [1 - \frac{f^2}{f_4^2}]X_4 = 0 \end{cases} \quad (0.6)$$

Затуханием в стенках резонаторов в данном случае (при определении собственной частоты и коэффициента связи) можно пренебречь. Подставляя в программу SLANC точные геометрические размеры обоих резонаторов (рис.3а), находим $f_{3,4}^1$ и $f_{3,4}^2$ — резонансные частоты системы из двух резонаторов, численные значения которых получились равны 2765.1МГц и 2993.2МГц соответственно.

После этого отдельно определяются f_3 и f_4 резонансные частоты 3-го и 4-го резонатора. По схеме указанной на рис.3а и рис.3б подставляем в программу SLANC

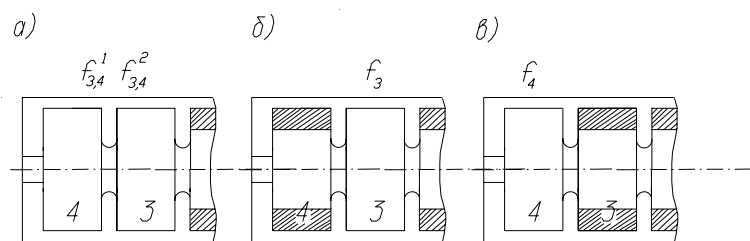


Рис. 3: Схема определения параметров отдельных резонаторов .

последовательно геометрические размеры каждого из резонаторов (при сильной расстройке соседних с ним резонаторов) получаем: $f_4 = 2772$, $f_3 = 2786.12$.

Коэффициент связи k_3 определяется из системы (1.6) при подстановке в нее найденных ранее величин: $f_{3,4}^1$, $f_{3,4}^2$, f_3 , f_4 и в данном случае принимает значение: $k_3 = 0.018$.

При определении величин Q_n – собственной добротности каждого из резонаторов были использованы экспериментальные данные работы [1] из которой следует, что R_{st} – величина поверхностного сопротивления стали марки 12X18H10T на частоте 3 ГГц, при используемой в изготовлении элементов структуры технологии обработки внутренней поверхности, составляет: $R_{st} = 15.8R_{Cu}$, (R_{Cu} — поверхностное сопротивление меди).

Резонансная частота первой ячейки и величина коэффициента связи первой ячейки с подводящим волноводом определялась из условия полного согласования группирующей структуры со стороны подводящего волновода на рабочей частоте $f_p = 2798.0$ МГц. Проведенные расчеты показали, что согласование структуры с подводящим волноводом достигается при $f_1 = 2803.2$ МГц и $\beta = 4.37$.

В таблице 2 приведены значения параметров всех резонаторов входящих в конструкцию группирующей структуры.

Табл. 2

f_1 , МГц	Q_1	k_1	f_2 , МГц	Q_2	k_2
2903.2	850	0.014	2786.12	950	0.016

f_3 , МГц	Q_3	k_3	f_4 , МГц	Q_4
2786.12	950	0.018	2772	900

Для оценки точности используемой модели предварительно было произведено сравнение результатов расчета распределения электрического поля вдоль оси структуры, получаемое с использованием программы SLANC для случая бесконечно малых потерь в стенках резонаторов (при сохранении внутренней геометрии структуры) с результатами численного решения системы (1.1) (при величине $1/Q_n = 0, n = 1, 2, 3, 4$). Соответствующие графики представлены на рис.4 (плавная кривая — распределение продольной составляющей электрического поля на оси структуры полученное с использованием программы SLANC, а ломанная, состоящая из прямых отрезков - распределение поля полученное из решения (1.1)). Оба распределения были нормированы на величину запасаемой в структуре энергии равную 0.001 Дж.

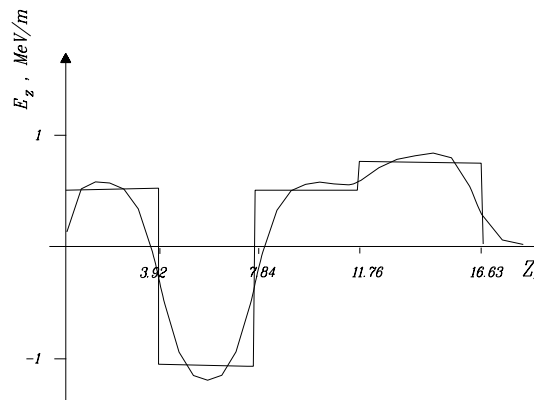


Рис. 4: Распределение электрического поля на оси структуры

Численное моделирование, проведенное для моноэнергетичного пучка ($U_k = 100 \text{ КэВ}$) на входе группирователя показало, что выходные параметры пучка для обоих распределений поля практически совпадают.

После этого были проведены вычисления распределения поля вдоль оси структуры при реальных параметрах затухания во всех резонаторах с учетом возбуждения структуры через отверстие связи в первом резонаторе. Результаты расчетов, представленные в виде :

$$E_z(z) = E_n \exp(i\phi_n), \quad \text{если } z \in (z'_{n-1}, z'_n) \quad (0.7)$$

, где (z'_{n-1}, z'_n) — интервал на оси структуры принадлежащий n-му резонатору, приведены в таблице 3.

Табл. 3

$E_1, \text{ МэВ/м}$	$E_2, \text{ МэВ/м}$	$E_3, \text{ МэВ/м}$	$E_4, \text{ МэВ/м}$
1.2	$1.1 \cdot e^{-i0.18\pi}$	$1.8 \cdot e^{-i0.85\pi}$	$0.8 \cdot e^{i0.14\pi}$

Из полученного распределения поля находим U_a — амплитуду гармоники с фазовой скоростью, равной скорости движения электронного сгустка (гармоника взаимодействия) и шунтовое сопротивление структуры для данной гармоники:

$$U_a = \int_0^L E(z) \cdot \exp(-ik_a z) dz \quad (0.8)$$

$$R_{ш} = \frac{U_a^* U_a}{P_p} \quad (0.9)$$

L — полная длина структуры;

$k_a = \frac{\omega}{v}$ — волновой вектор синфазной пучку гармоники;

$v = 0.548c$ — скорость движения частиц с кинетической энергией 100кэВ;

P_p — мощность, рассеиваемая в структуре, которая в случае полного согласования структуры с подводимым волноводом совпадает по величине с мощностью падающей волны на входе структуры P_o .

Так, при $P_p = P_o = 100 \text{ Вт}$ определяемые формулами (1.7), (1.8) величины оказались равны: $|U_a| = 47 \text{ кэВ}$, $R_{ш} = 0.0224 \text{ МОм}$.

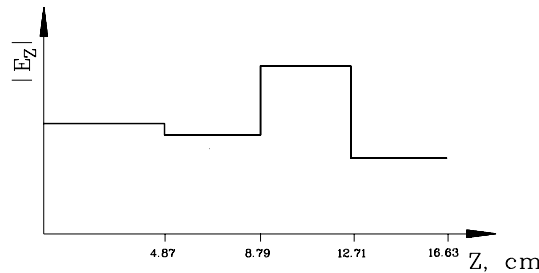


Рис. 5: Абсолютное значение напряженности электрического поля на оси структуры

График зависимости напряженности электрического поля на оси структуры приведен на рис.5 и рис.6.

На рис.7 приведена зависимость модуля коэффициента отражения на входе структуры от частоты генератора, полученная по формуле (1.2) при параметрах указанных в таблице 2.

Сравнение полученных результатов с данными экспериментальных измерений [1] показало удовлетворительное совпадение резонансных частот группирующей структуры с результатами расчета (максимальное отклонение не превышало 0.75 МГц).

Численное моделирование динамики электронного пучка с энергией частиц на входе группирователя $U_k = 100 \text{ КэВ}$ проведенное при различных уровнях мощности входного СВЧ импульса показало существенно более низкую эффективность группировки по сравнению с первоначально предполагаемой.

Указанный недостаток в значительной мере связан с низкой амплитудой синфазной относительно электронного пучка гармоники по сравнению с амплитудой поля в отдельных резонаторах и, по мнению автора, не может быть полностью устранен при данной конструкции группирующей структуры.

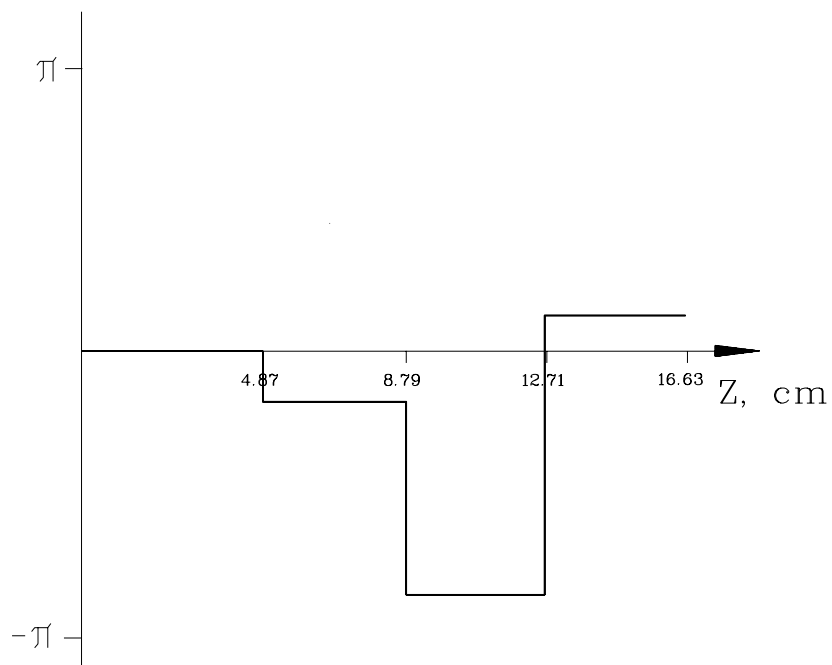


Рис. 6: Зависимость фазы электрического поля на оси структуры.

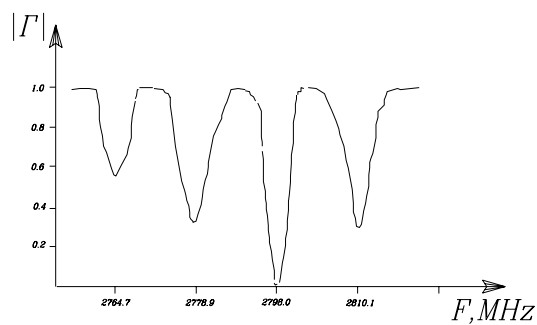


Рис. 7: Зависимость модуля коэффициента отражения от частоты.

Литература

- [1] М.С.Авилов и др., "Испытание прототипа форинжектора ВЭПП-5", ИЯФ 97-64, Новосибирск, 1997.
- [2] M.S.Avilov, A.V.Novokhatski, "A Singl Bunch Compression in the Exponential Field". Proc. EPAC 1994, London, June 27, p971.