



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

М.А. Авдыев, В.Е. Балакин, В.А. Долгашев,
И.И. Иванов, Л.П. Катаенко, А.В. Минков,
С.А. Мясоедов, В.Д. Шемелин

УСКОРЯЮЩАЯ СЕКЦИЯ ВЛЭПП НА 14 ГГц

ИЯФ 93-7



НОВОСИБИРСК

УСКОРЯЮЩАЯ СЕКЦИЯ ВЛЭПП НА 14 ГГц

М.А. Авдыев, В.Е. Балакин, В.А. Долгашев, И.И. Иванов,
Л.П. Катаенко, А.В. Минков, С.А. Мясоедов, В.Д. Шемелин

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090, Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты работы по изготовлению первого десятка ускоряющих секций ВЛЭПП на рабочую частоту 14 ГГц. Описан выбор геометрических размеров, допусков, конструкции, определено влияние атмосферных условий на измеряемую частоту, изложена методика измерения собственных частот ячеек структуры. Приводятся результаты разработки трансформаторов типа волны, характеристики готовых секций.

VLEPP 14 GHz accelerating section

M.A. Avdyev, V.E. Balakin, V.A. Dolgashev, I.I. Ivanov,
L.P. Katayenko, A.V. Minkov, S.A. Myasoyedov, V.D. Shemelin

Budker Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, Russia

ABSTRACT

Results of the work for production of the first dozen of accelerating sections for VLEPP with a work frequency 14 GHz are presented.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Конструкция, выбор геометрических размеров, основные характеристики	6
2. Выбор допусков	13
3. Влияние атмосферных условий на измеряемую частоту	19
4. Измерение частоты ячеек	21
4.1. Измерительный стенд	21
4.2. Программа для комплектации секции	27
4.3. Измерительное устройство для быстрого контроля частоты ячеек (отбраковщик)	28
5. Измерение и коррекция характеристик секции	31
5.1. Стенд для нерезонансных измерений	31
5.2. Автоматизированный стенд для измерения характеристик переходных процессов в ускоряющих структурах (эхо-локатор)	32
5.3. Настройка фазовой скорости волны в секции при помощи корректирующих ячеек	33
6. Трансформаторы типа волны	36
6.1. Конструкция трансформатора типа волны	36
6.2. КСВН в полосе	36
6.3. Результаты и предложения МИФИ по ТТВ	37
6.4. Измерение размеров и пересмотр допусков	40
6.5. Измерения на стенде	40
6.6. Расчеты и сравнение с экспериментом	41
7. Серийное изготовление секций	42
7.1. Характеристики станка ОТП-2	42
7.2. Технология пайки секции	44
7.3. Измерение прямолинейности секций и призмы	44
7.4. СВЧ характеристики готовых секций	47
Заключение	48
Литература	49

ВВЕДЕНИЕ

По мере развития концепции ВЛЭПП [1, 2] некоторые параметры, названные ранее, были уточнены. Многие составные части проекта сейчас проработаны более детально [3, 4]. Получены также конкретные результаты по изготовлению и испытаниям ускоряющих структур [5, 6].

Особенностью линейного коллайдера на сверхвысокую энергию является необходимость серийного изготовления множества сложных и дорогостоящих устройств, в том числе ускоряющих секций. В этих условиях необходимы специальные решения с целью обеспечения надежности и контроля качества.

Чем выше темп ускорения, тем меньшую длину имеет ускоритель. Есть основания полагать, что достигим темп ускорения 100 МэВ/м [5]. С ростом частоты растет электрическая прочность и уменьшаются размеры структуры, но возрастают требования к точности изготовления и проблемы, связанные с генерацией СВЧ мощности.

В 1989 году начата разработка ускоряющей секции на частоту 14 ГГц [7], представляется, что эта частота близка к оптимальной [15]. В настоящее время выбраны основные размеры

и конструкция секции, рассмотрены допуски и компенсация погрешностей изготовления, способы измерений, вопросы согласования устройств ввода-вывода мощности, изготовлены более 10 секций и измерены их характеристики.

Секция представляет собой отрезок круглого диафрагмированного волновода с постоянным импедансом, на концах которого находятся трансформаторы типа волны с фланцами для подключения к каналу пучка, к СВЧ тракту и к вакуумным насосам. Секция имеет также каналы и вводы для водяного охлаждения. При изготовлении секции, таким образом, необходимо обеспечить точность размеров, прямолинейность, электродинамические характеристики и герметичность.

Представляется полезным изложить предварительные результаты проделанной работы, чтобы сопоставить разные подходы и обменяться информацией, ввиду того, что в работу по программе ВЛЭПП, в том числе и по изготовлению ускоряющей секции, вовлекается большой круг разработчиков и исполнителей.

1. КОНСТРУКЦИЯ, ВЫБОР ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ, ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ускоряющая секция (рис. 1.1) представляет собой конструкцию, состоящую из спаянных между собой ячеек, образующих отрезок круглого диафрагмированного волновода с постоянным

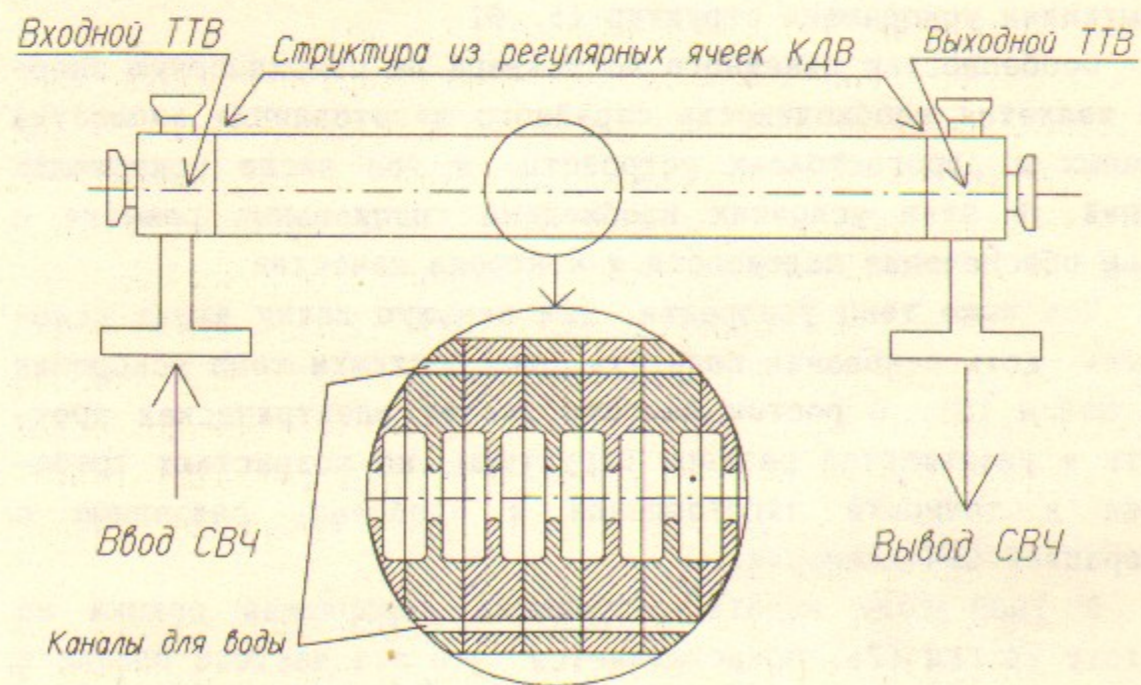


Рис. 1.1. Ускоряющая секция ВЛЭПП

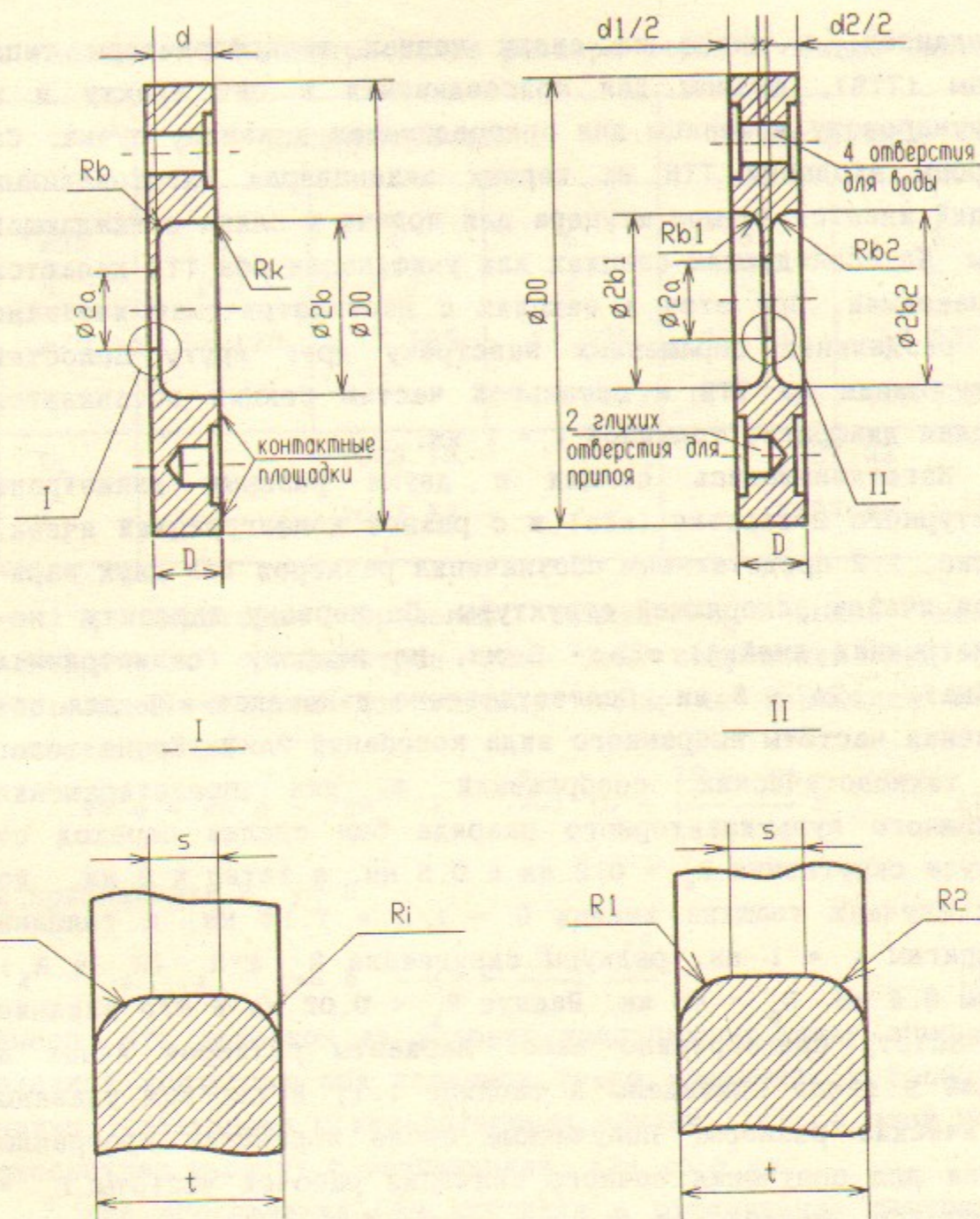


Рис. 1.2. Обозначение размеров асимметричной и симметричной ячеек.

импедансом, и имеет на своих концах трансформаторы типа волны (ТТВ), фланцы для присоединения к СВЧ тракту и к вакуумпроводу и фланцы для присоединения к каналу пучка. Со стороны входного ТТВ на первых экземплярах изготовленных секций имеется четыре штуцера для подачи и слива охлаждающей воды. На последующих секциях для унификации оба ТТВ делаются одинаковыми. При этом в секциях с несимметричными ячейками для разделения обращенных навстречу друг другу полостей между одним из ТТВ и остальной частью секции вставляется плоская диафрагма толщиной $t = 1$ мм.

Изготавливались секции с двумя разными диаметрами апертурного отверстия ($\varnothing 2a$) и с разной конфигурацией ячеек. На рис. 1.2 представлены обозначения размеров для двух вариантов ячейки ускоряющей структуры. По первому варианту (несимметричная ячейка) $\varnothing 2b = 6$ мм, по второму (симметричная ячейка) - $\varnothing 2a = 8$ мм. Соответственно изменялся $\varnothing 2b$ для сохранения частоты выбранного вида колебаний $2\pi/3$. Кроме того, из технологических соображений и для предотвращения возможного мультипакторного разряда был сделан переход от радиуса скругления $R_b = 0.2$ мм к 0.5 мм, а затем к 2 мм. Во всех случаях толщина ячейки $D = \lambda/3 = 7.14$ мм, а толщина диафрагмы $t = 1$ мм, радиусы скругления R_0 и R_1 (R_1 и R_2) равны 0.4 мм, $D_0 = 46$ мм. Радиус $R_k < 0.02$ мм и его влияние на частоту пренебрежимо мало. Варианты размеров ячеек и секций в целом приведены в таблице 1.1. В скобках указаны фактические размеры, полученные после коррекции программы станка для получения точного значения рабочей частоты $f_0 = 14.000$ ГГц. Отличие от расчета может быть связано с неточностью выполнения профиля радиусов R_0 и R_1 (R_1 и R_2), с неточностью начальной установки резца (начало отсчета) и с ошибками расчета.

Геометрические размеры несимметричных ячеек рассчитаны по таблицам и графикам Справочника [8] и проверены с помощью программы [9]. Для симметричных ячеек размеры определялись только с помощью указанной программы.

В таблице обозначено: L_0 - длина регулярной части секции без переходных ячеек трансформаторов, L_r - габаритный размер секции.

Таблица 1.1 Геометрические размеры ячеек и секции (мм).

	Несимметричные			Симметричные	
$\varnothing 2a$	6	6	6	6	8
R_b	0.2	0.5	2	2	2
$\varnothing 2b$	17.170	17.185	17.435 (17.457)	17.730 (17.722)	18.537 (18.536)
L_0	1028.16			1021.02	
L_r	1047.57			1037.88	

В некоторых пределах радиус R_b можно менять одновременно с диаметром $\varnothing 2b$. Для сохранения при этом постоянной частоты достаточно, чтобы не изменялся объем полости ячейки:

$$\pi b_0^2 d = \pi b^2 d - 2\pi R_b^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \left(b - \frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} R_b\right) \quad (1.1)$$

В приближении $R_b \ll b$

$$b = b_0 + \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \frac{R_b^2}{d} \quad (1.2)$$

Выбор $\varnothing 2a$ делается из условия компромисса между требуемой входной мощностью при заданном темпе ускорения и соображениями, связанными с кильватерными полями [14]. С этой целью рассмотрен вариант с увеличением $\varnothing 2a$ до 8 мм.

Для обеспечения СВЧ контакта и ограничения растекания припоя на поверхности ячейки имеются две контактные площадки шириной по 3 мм. Требования к чистоте обработки внутренней поверхности и контактных площадок - $R_z \leq 0.05$ мкм. В каждой ячейке имеются 4 отверстия $\varnothing 4$ мм (в последнем варианте - $\varnothing 5$) для охлаждающей воды и 2 глухих отверстия для закладки припоя.

Результаты расчета зависимости от апертуры требуемой мощности на входе, групповой скорости, затухания и времени заполнения показаны на рис. 1.3.

Основные характеристики секции приведены в таблице 1.2. Ввиду сильного затухания необходима мощность, создающая на входе секции более высокий темп, с тем, чтобы средний темп

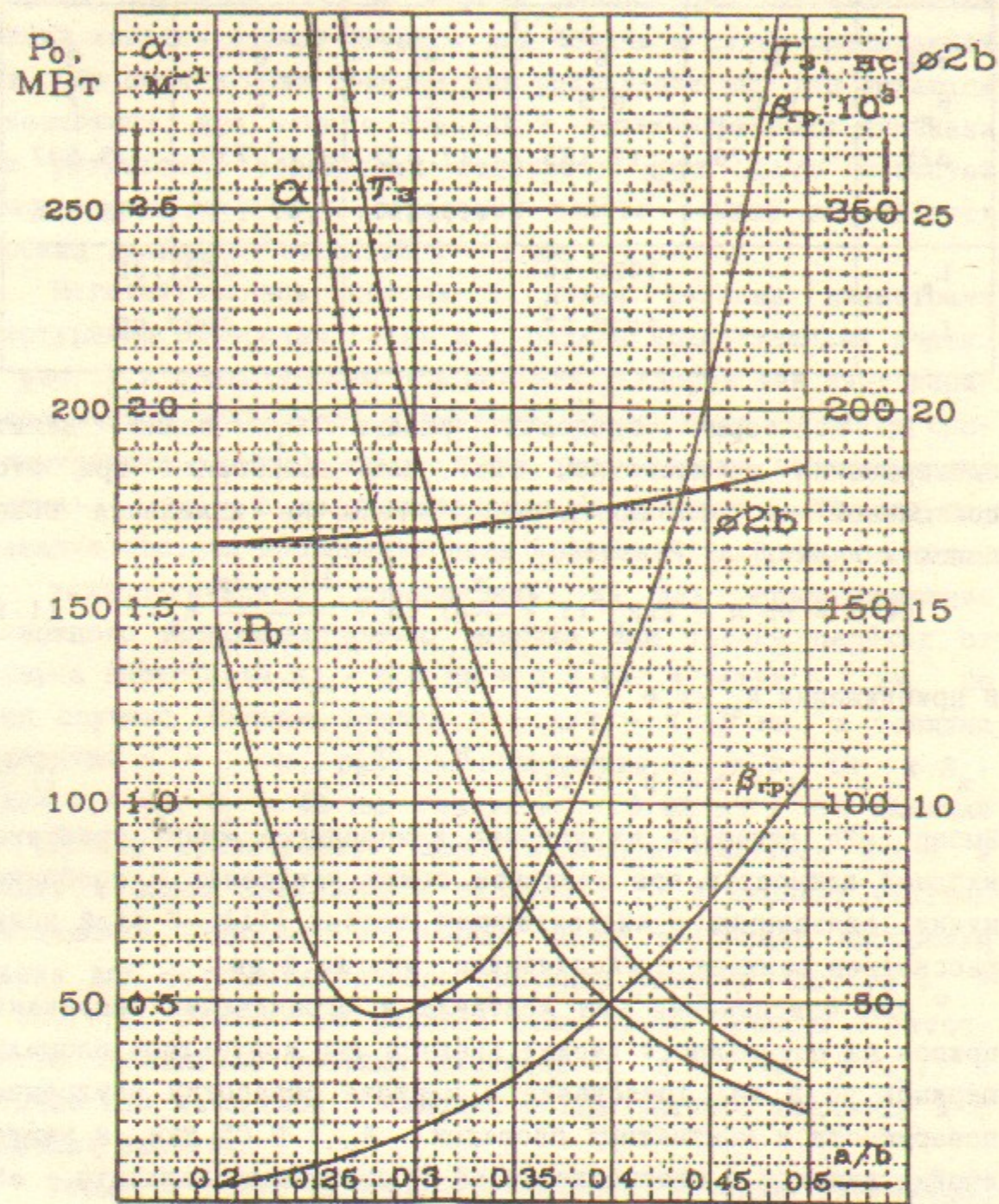


Рис. 1.3. Характеристики секции на рабочем виде колебаний. $\theta=2\pi/3$, $t/\lambda=0.0467$ ($t=1$ мм), $R_0=R_1=0.4t$, $L=1$ м, $f=14$ ГГц, τ -время заполнения P_0 - мощность, необходимая для темпа 100 МэВ/м, $\beta_{г-р}$ - нормированная групповая скорость, $\varnothing 2b$ - диаметр трубы диафрагмированного волновода при $R_0=0$, α - затухание.

ускорения составил 100 МэВ/м. Это приводит к перенапряжению первых ячеек относительно ячеек с темпом 100 МэВ/м и ослаблению поля в конце секции. Величина перенапряжения обозначена $k_{вх}$. Кроме того, существует перенапряжение на поверхности ячейки относительно поля ускоряющей волны на оси секции. Эта величина может быть уменьшена правильным выбором скругления кромки диафрагмы [22] и ее толщины и будет оптимизирована при необходимости после горячих испытаний секции.

Некоторые требования к конструкции описаны в [7].

Чтобы обеспечить прямолинейность (≤ 10 мкм) и соосность внутренней полости относительно наружного диаметра ячеек, было принято решение - базировать внутренние полости относительно наружного диаметра с точностью до 2 мкм, при этом наружные цилиндрические поверхности являются базой для установки секции в высокоточную чугунную призму.

В чугунной призме с помощью пружинного прижима ускоряющая секция фиксируется для транспортировки и устанавливается для работы.

Необходимость обеспечения рабочего вакуума не хуже 10^{-7} Торр предъявляет определенные требования к поверхностному гажению и к организации откачки.

Возможны два варианта:

а) откачка из каждой ячейки параллельно через вакуумный коллектор, идущий через всю секцию и герметично с ней соединенный;

б) откачка по концам секции.

Первый вариант эффективен по откачке, но сложен по конструкции, поэтому принят второй вариант, в котором к тому же отверстия для откачки симметризируют входной и выходной трансформаторы типа волны.

При алмазной обработке меди М06 и обеспыленной меди технологии предполагаемое гажение $q_0 = 10^{-11}$ л·Торр/см²·с, а эффективная скорость откачки диафрагмированного волновода ≈ 0.3 л/с. При этих условиях рабочий вакуум в средней части секции - 10^{-7} Торр.

Ожидаемая мощность рассеивания в ускорительной секции - около 1 кВт, допустимый температурный перепад по концам секции $\approx 3^\circ\text{C}$, а допустимая скорость охлаждающей жидкости, при

Таблица 1.2. Основные характеристики секции ВЛЭПП.

Вариант (размер апертуры)	$\varnothing 2a = 6$ мм	$\varnothing 2a = 8$ мм
Рабочая частота	14 ГГц	
Вид колебаний	2 π /3	
Число регулярных ячеек в секции	142	141
Время заполнения (τ_3)	110 нс	46 нс
Групповая скорость ($v_{гр}/c$)	$3.1 \cdot 10^{-2}$	$7.3 \cdot 10^{-2}$
Темп ускорения	100 МэВ/м	
Мощность на входе, необходимая для среднего темпа 100 МэВ/м	120 МВт	260 МВт
Затухание	0.793 м^{-1} (6.9 дБ/м)	0.332 м^{-1} (2.9 дБ/м)
Добротность	$5.9 \cdot 10^3$	$6.0 \cdot 10^3$
Энергия, запасенная в секции	9.5 Дж	11.8 Дж
Шунтовое сопротивление	106 МОм	82 МОм
Средняя входная мощность при частоте повторения 100 Гц (длительность импульса $\tau_{и} = \tau_3$)	1.3 кВт	1.2 кВт
Средняя рассеиваемая мощность в секции при 100 Гц ($\tau_{и} = \tau_3$)	1.0 кВт	560 Вт
Отношение напряженности электрического поля на входе секции к амплитуде ускоряющей гармоники 100 МэВ/м ($k_{вх}$)	1.45	1.18
То же для поля на выходе секции	0.66	0.84
Перенапряжение на диафрагме ($k_{п}$)	2.45	2.87

которой можно надеяться на отсутствие вибрации (из-за турбулентности), 1 - 1.5 м/с.

Чтобы удовлетворить этим требованиям, в первом варианте ($\varnothing 6$) сделано два параллельных канала охлаждения $\varnothing 4$ мм с поворотом охлаждающей жидкости; это дает возможность увеличить ΔT от 7°С и, следовательно, уменьшить расход охлаждающей жидкости в два раза и сделать равномерным по сечению и постоянным по длине температурный перепад.

Во втором варианте поворота воды в трансформаторах не делается, получаются четыре независимых канала, которые могут охлаждаться независимо или переключаться попарно вне трансформатора, при этом диаметр каналов увеличен до 5 мм.

Поскольку длина ускорителя ВЛЭПП велика, а длина ускоряющей секции 1 м, стыковочные фланцы существенно влияют на реальный темп ускорения, т.к. они занимают часть длины ускорителя. Поэтому в КБ принято решение отказаться от громоздкого стандартного металлического уплотнения и разработать способ уплотнения с помощью клиновых вкладышей. Это позволило сократить длину стыка до 5 мм на секцию.

При монтаже ускорителя необходимо каждую секцию выставить в линию, а в процессе работы секции необходимо подстраивать ее по пучку. Для решения этих задач в призме сделаны базовые поверхности, по которым производится выставка при монтаже, а подстройка по пучку будет производиться с помощью электродинамических подвесок с диапазоном подстройки ± 100 мкм [10].

2. ВЫБОР ДОПУСКОВ

Прирост энергии частиц при прохождении секции ускоряющего волновода может отличаться от заданного значения, если фазовая скорость волны в волноводе отличается от расчетной из-за погрешностей в размерах ячеек волновода, изменения его температуры и нестабильности СВЧ генератора.

Кроме того, электронный сгусток должен находиться в определенном фазовом положении для обеспечения подавления неустойчивости "голова - хвост". Требования точной фазировки сгустка также приводят к ограничениям допусков на размеры. Ниже рассмотрены требования к допускам, связанные только с недобором энергии. Оценки показывают, что при удовлетворении этих требований выполняются также и условия устойчивости сгустка.

Различают систематические погрешности размеров, связанные с одинаковым отклонением их в ту или другую сторону, например, при нагреве, и случайные погрешности, распределенные в окрестности заданной величины.

Систематические погрешности в геометрических размерах ускоряющего волновода приводят к большему фазовому сдвигу и, следовательно, при изготовлении секции нужно прежде всего устранить источники систематических погрешностей. Устранить систематическую погрешность можно двумя путями:

- 1) вставив в секцию корректирующие ячейки, предвари-

тельно измерив отклонение ее рабочей частоты (подробнее о коррекции фазовой скорости см. в разделе 5).

2) изменяя температуру охлаждающей воды в каждой отдельной секции на величину, зависящую от ее частотной погрешности.

Изменение фазы $\delta\theta$ на ячейку связано с изменением энергии для случайных погрешностей выражением [8]

$$\left. \frac{\Delta W}{W} \right|_{сл} = - \frac{\delta\theta^2}{2} N,$$

где N - число ячеек в секции, $\Delta W/W$ - относительное изменение прироста энергии в секции.

Недобор энергии из-за систематического изменения фазы в каждой ячейке вычисляется по формуле

$$\left. \frac{\Delta W}{W} \right|_{сист} = - \frac{\delta\theta^2 N^2}{6},$$

Допуск на систематические погрешности $\delta\theta$ в $\sqrt{N/3} = 6.9$ раза жестче ($N = 142$). Однако ввиду того, что систематические погрешности частично можно выправить за счет температурного режима охлаждающей воды, принято возможным считать допуски на систематические отклонения размеров только в 2 раза более жесткими, чем на случайные. В приведенных выше формулах не учтено также затухание СВЧ мощности в волноводе. Это ослабит требования к допускам на 15 - 20 %.

В соответствии с определением групповой скорости можно написать:

$$\delta\theta = \frac{2\pi D}{v_{гр}} \delta f = \frac{2\pi D}{v_{гр}} \frac{\delta f}{\delta T} \delta T,$$

где в качестве производной $\delta f/\delta T$ понимается изменение частоты, необходимое для сохранения сдвига фазы на ячейку, отнесенное к изменению температуры, вызвавшему изменение имевшегося сдвига фазы на ячейку при данной частоте. Поскольку

$$\frac{\delta f}{\delta T} = f \frac{\delta f/f}{\delta T} = f \frac{\delta l/l}{\delta T} = - \alpha f,$$

то
$$\delta\theta = - \frac{2\pi}{3} \frac{\alpha \delta T}{\beta_{гр}}$$

Через $\delta l/l$ обозначено относительное изменение любого линейного размера при изменении температуры.

Считая приемлемым изменение температуры охлаждающей воды, равное $\delta T = \pm 5^\circ\text{C}$, получаем

$$|\delta\theta| = \frac{2\pi}{3} \frac{1.7 \cdot 10^{-5} \cdot 5}{3.07 \cdot 10^{-2}} = 0.0058 = 0.33^\circ.$$

При этом перестройка частоты температурой воды возможна в пределах

$$\delta f = - \alpha f \delta T = - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot 14 \cdot 10^3 \cdot (\pm 5) = \pm 1.2 \text{ МГц}$$

Изменение фазы на ячейку при случайных погрешностях определяется через изменение размеров:

$$\delta\theta = \frac{2\pi D}{v_{гр}} \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial q_i} \right)^2 q_i^2} \quad (2.1)$$

где $\theta = \sqrt{\frac{2}{N} \left| \frac{\Delta W}{W} \right|_{сл}}$. При $N = 142$ и $|\Delta W/W|_{сл} = 1\%$

получаем

$$\delta\theta = \sqrt{\frac{2}{142} 10^{-2}} = 0.0119 \text{ рад} = 0.68^\circ.$$

Таким образом, допустимый сдвиг фазы на ячейку, вызванный случайными погрешностями (0.68°), как уже сказано выше, примерно в 2 раза больше, чем сдвиг фазы, вызванный систематическими погрешностями (0.33°) и компенсируемый подстройкой температуры.

Суммирование под корнем в (2.1) проводится для q_i , которые в случае несимметричных ячеек соответствуют размерам:

$$2b, 2a, D, d, R_1, R_0, R_b.$$

Влиянием радиуса R_k при его величине ≤ 20 мкм можно пренебречь. Значения $\partial f/\partial q_i$ приведены в таблице 2.1. Производные рассчитаны по программе SLANS [9].

В работе [8] указаны производные по размерам d и t . При изготовлении, однако, контролируется габаритный размер D , и поэтому удобнее использовать пару переменных D и d . При этом оказывается, что допуск на d становится менее жестким, поскольку физически более важен период структуры D .

Чтобы показать это, перейдем от переменных d_c (индексом "с" обозначим старое значение) и t к новым переменным d_n и D :

$$\begin{aligned} d_c &= d_n, \\ t &= D - d_n. \end{aligned}$$

Производная $\partial f/\partial d_c$ вычисляется при $t = \text{const}$, производная $\partial f/\partial d_n$ вычисляется при $D = \text{const}$, поэтому, вообще говоря, $\partial f/\partial d_n \neq \partial f/\partial d_c$ (см. таблицу 2.1):

$$\frac{\partial f}{\partial d_H} = \frac{\partial f}{\partial d_c} \cdot \frac{\partial d_c}{\partial d_H} + \frac{\partial f}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial d_H} = (-0.099 + 0.126) \approx + 0.026 \text{ МГц} \cdot \text{мкм},$$

$$\frac{\partial f}{\partial D} = \frac{\partial f}{\partial t} = - 0.126 \text{ МГц} \cdot \text{мкм}.$$

Итак, поскольку это ослабляет требования к допускам, предпочтительнее пользоваться независимыми переменными D и d вместо d и t.

Таблица 2.1. Производные частоты по размерам (МГц/мкм) для несимметричных ячеек. $\phi 2a = 6 \text{ мм}$, $t = 1$, $R_b = 0.2$, $D = 7.14 \text{ мм}$. Для D, d и t выбирается одна из двух пар.

$\partial f / \partial 2b$	$\partial f / \partial 2a$	$\partial f / \partial D$	$\partial f / \partial d$	$\partial f / \partial t$	$\partial f / \partial R_{1,0}$	$\partial f / \partial R_b$
-0.881	0.297	-0.126	-0.099	-0.126	0.111	0.025

В таблице 2.1 указаны производные по основным размерам ячейки. Могут иметь влияние, но не учитывались нами прогиб диафрагмы и эллиптичность полости. В первую очередь следует выяснить влияние прогиба диафрагмы – смоделировать на ЭВМ – так как геометрические измерения показали, что прогиб составлял в некоторых случаях до 40 мкм.

Из формулы (2.1) при $D = 7.14 \text{ мм}$ и $v_{гр} = 9.0 \cdot 10^9 \text{ мм/с}$ получаем для 7 размеров, указанных в таблице, сдвиг частоты, соответствующий $\delta\theta = 0.68^\circ$:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial f}{\partial q_i} \right)^2} \delta q_i^2 = 1.2 \frac{0.0119 \cdot 9 \cdot 10^9}{2\pi \cdot 7.14} = 2.86 \text{ МГц} \quad (2.2)$$

Добавленный множитель 1.2 учитывает ослабление допусков из-за затухания. При обработке на станках с ЧПУ теоретически погрешности всех размеров, кроме радиусов, одинаковы (δq_i), а погрешности радиусов примерно в $\sqrt{2}$ раз больше ($\sqrt{2} \delta q_i$). Фактически из-за неидеальной формы резца погрешности выполнения радиусов оказались существенно больше.

Определим допуски на размеры для идеального случая при обработке на станке с ЧПУ. Используя значения производных из таблицы 2.1, получаем:

$$(0.881^2 + 0.297^2 + 0.126^2 + 0.026^2 + 2 \cdot 0.111^2 + 2 \cdot 0.111^2 + 2 \cdot 0.025^2) \delta q_i^2 = 2.86^2,$$

$$\delta q_i = \pm 3.0 \text{ мкм},$$

$$\sqrt{2} \delta q_i = \pm 4.2 \text{ мкм}$$

Можно рассмотреть равные требования к допускам. Под равными требованиями к допускам понимается такое положение, когда превышение любого допуска на одинаковую относительную величину (скажем, вдвое) ведет к одинаковому увеличению $\delta\theta$. Математически это сводится к тому, что все члены суммы в (2.2) принимаются равными:

$$\pm \delta q_i = \frac{2.86^2}{8} \left/ \left| \frac{\partial f}{\partial q_i} \right| \right. = 1.01 \left| \frac{\partial f}{\partial q_i} \right|^{-1}$$

Этот подход дает следующие значения:

$$\delta(2b) = \pm 1.1 \text{ мкм}, \quad \delta(2a) = \pm 3.4, \quad \delta D = \pm 8.0, \quad \delta d = 39,$$

$$\delta R_1 = \delta R_0 = 9.1, \quad \delta R_b = 40 \text{ мкм}.$$

Возможны другие подходы к требованиям на допуски. Наиболее правильный, по видимому, – выбор допусков, минимизирующий стоимость изделия при заданном значении величины сдвига фазы на ячейку. Однако у нас нет точных методов расчета минимальной стоимости.

Другие варианты допусков можно получить как решение уравнения (2.2) при неизвестных δq_i . В таблице 2.2 представлены варианты решений уравнения (2.2). Представлено несколько вариантов допусков, названных допусками для экспертной оценки, из которых, при известном опыте, можно выбрать наиболее подходящий для имеющегося станочного оборудования.

Указаны (в мкм) симметричные расчетные допуски, знак \pm во всех строках таблицы, кроме последней, опущен; все симметричные допуски могут быть заменены на несимметричные: например, допуски ± 25 и $0 \dots +50$ эквивалентны.

Из таблицы 2.2 видно, что существующие допуски должны быть ужесточены для размеров R_1 и R_0 . В настоящий момент выполнить эти размеры на станках типа 102-CNC Schaublin с нужной точностью не удастся, это является одной из причин, за-

ставляющих идти на селективную сборку. Возможно, что использование станка ОТП-2 (см. гл. 7) позволит решить проблему допусков на радиусы скругления кромки диафрагмы.

Таблица 2.2. Варианты допусков (в мкм) на размеры для несимметричной ячейки с $\varnothing 2a = 6$ мм.

N	$\delta(2b)$	$\delta(2a)$	δD	δd	$\delta R_{1,0}$	δR_b	Примечания
1	3.0	3.0	3.0	3.0	4.2	4.2	Допуски для ЧПУ
2	1.1	3.4	8.0	39	9.1	40	Допуски равных требований
3	3.2	0	0	0	0	0	Предельный допуск на $\varnothing 2b$
4	2.0	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	Допуски для экспертной оценки
5	2.6	2.6	10	10	5	20	
6	2	2.5	5	10	10.2	50	
7	2	2	5	10	11.2	40	
8	2	2	5	10	12.3	25	
9	± 2	+5	+10	+20	± 30	+50	Существующие допуски

функции чувствительности для симметричных ячеек, рассчитанные с помощью SLANS, приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Функции чувствительности для симметричных ячеек. $D = 7.14$, $t = 1$, $R_{1,2} = 0.4$, $R_b = 2$ мм.

$\varnothing 2a$ / Ф.ч. МГц/мкм	$\frac{\partial f}{\partial 2a}$	$\frac{\partial f}{\partial 2b}$	$\frac{\partial f}{\partial d} \Big D$	$\frac{\partial f}{\partial D} \Big d$	$\frac{\partial f}{\partial d} \Big t$	$\frac{\partial f}{\partial t} \Big d$
	6 мм	0.295	-0.438	-0.058	-0.119	-0.177
8 мм	0.422	-0.455	-0.039	-0.233	-0.268	-0.233

$\varnothing 2a$ / Ф.ч. МГц/мкм	$\frac{\partial f}{\partial R_{1,2}}$	$\frac{\partial f}{\partial R_b}$
	6 мм	0.123
8 мм	0.162	0.240

Решая уравнение (2.1) для групповой скорости, соответствующей симметричным ячейкам (табл. 1.2), и для производных из таблицы (2.3), получаем, что в случае симметричных ячеек допуски становятся на 10 % свободнее при $\varnothing 2a = 6$ мм (3.4 и 4.7 мкм для ЧПУ) и почти в 2 раза свободнее при $\varnothing 2a = 8$ мм (5.8 и 8.3 мкм для ЧПУ).

3. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ НА ИЗМЕРЯЕМУЮ ЧАСТОТУ

Рабочими условиями для ускоряющей секции будет вакуум, т.е. $\epsilon = 1$ и температура, несколько выше температуры окружающего воздуха; прием для расчета в качестве рабочей температуры величину $t_p = 40^\circ\text{C}$.

Частота резонаторов, собранных из отрезков секции или отдельных ячеек, измеряется в атмосфере воздуха, которая характеризуется температурой t , влажностью ϕ и давлением p - величинами, определяющими диэлектрическую проницаемость воздуха. Кроме того, из-за линейного расширения размеры резонаторов также отличаются от рабочих.

Зависимость ϵ от атмосферных условий дается формулой А.Р. Вольперта [11]:

$$\epsilon = 1 + \frac{p}{T} \left[211 + \frac{p_{н.в.}}{p} \left(\frac{10160}{T} - 0.294 \right) \right] \cdot 10^{-6}, \quad (3.1)$$

где $p_{н.в.}$ - упругость насыщенных водяных паров при данной температуре, которая вычисляется по формуле

$$\lg p_{н.в.} = 7.45 \frac{T - 273}{T - 38.3} + 0.656; \quad (3.2)$$

p и $p_{н.в.}$ задаются в мм рт.ст., ϕ - относительная влажность воздуха, $T = t + 273$ - термодинамическая температура в кельвинах (К).

Переход к рабочей частоте от измеряемой можно выразить формулой:

$$f_p = f_{изм} [1 + \alpha(t - t_p)] \sqrt{\epsilon},$$

где $\alpha = 1.7 \cdot 10^{-5}$ - ТКР меди [12]. Поскольку ϵ мало отличается от 1, то можно заменить

$$\epsilon = 1 + \chi$$

и записать поправку к измеряемой частоте:

$$\Delta f = f_p - f_{изм} = f_{изм} [1 + \chi/2 + \alpha(t - t_p)]. \quad (3.3)$$

Поправку к частоте можно разбить на две части - на поправку, связанную с переходом к воздушной среде с температурой 20°C, давлением 760 мм и сухому воздуху, и поправку, связанную с отклонением от этих величин и с учетом влажности. В этом случае имеем

$$\chi/2 = \frac{\epsilon_n - 1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{d\epsilon}{dT} \Delta T + \frac{d\epsilon}{d\phi} \phi + \frac{d\epsilon}{dp} \Delta p \right), \quad (3.4)$$

где $\epsilon_n = 1.000536$ для указанных выше условий, [13], ΔT , ϕ и Δp - отклонения соответствующих величин.

Из (3.1) и (3.2) можно получить

$$\frac{d\epsilon}{dp} = 0.67 \cdot 10^{-6} (\text{мм рт.ст.})^{-1}, \quad \frac{d\epsilon}{dT} = 3.4 \cdot 10^{-6} (\text{K}^{-1}),$$

$$\frac{d\epsilon}{d\phi} = 2.0 \cdot 10^{-6} (\%)^{-1}.$$

Учитывая (3.4), из (3.3) получаем окончательно

$$\Delta f = -1.0 + 0.26\Delta T + 0.014\phi + 0.004\Delta p$$

(МГц, °С, %, мм рт.ст.)

Заметная поправка резонансной частоты, на 0.1 МГц, требуется при следующих отклонениях параметров среды:

$$\Delta T = 0.38^\circ\text{C}, \quad \Delta\phi = 7\%, \quad \Delta p = 25 \text{ мм рт.ст.}$$

При нормальном давлении и 50 % влажности поправки компенсируются ($\Delta f = 0$) при $t \approx 21^\circ\text{C}$.

Следует отметить, что в конкретных условиях измерений частоты довольно трудно исключить влияние оператора - возможна более высокая влажность из-за дыхания, изменение локальной температуры в месте измерения из-за присутствия человека и из-за приборов. Это влияние может быть разным при разных атмосферных условиях. Специальных мер по стабилизации влажности и температуры не предпринималось.

Для исключения названных ошибок делалось измерение частоты контрольной ячейки, не реже, чем через десять измерений проверяемых ячеек или отрезков секции. Сравнение частот разных контрольных ячеек показало, что хотя частоты меняются в пределах ± 1 МГц в разные дни, их разность сохраняется с точностью измерений, т.е. отличается не более чем на 0.2 МГц.

Предполагается, что в дальнейшем измерения будут автоматизированы, и влияние оператора будет сведено к минимуму.

4. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ЯЧЕЕК

Для контроля пригодности ячеек на начальной стадии работы и для более детальных измерений [26] используется измерительный стенд, в котором группа ячеек, сжатых между собой, измеряется в резонансном режиме. При отклонениях частот отдельных ячеек от номинала возможна селективная сборка, для ее выполнения разработана специальная компьютерная программа.

Для измерения больших количеств ячеек по техническому заданию ИЯФ в МИФИ разработана установка "МАЯК-АВТО", позволяющая проводить аттестацию ячеек со скоростью 5 штук в минуту [18].

Для обеспечения массового производства ячеек оставалась потребность в точном, дешевом и простом в обращении приборе для отбраковки ячеек сразу после их изготовления, который мог бы быть установлен "у станка". Прибор разработан, при этом была решена задача измерения частоты без сжатия ячеек, т.е. без деформации их поверхности.

4.1. Измерительный стенд

Проверка ячеек на их пригодность для использования в ускоряющей секции может быть сделана в режиме бегущей или стоячей волны. Режим бегущей волны адекватен условиям работы секции, но измерения в этом режиме более сложны при контроле отдельных ячеек. Режим стоячей волны, когда из группы ячеек образуется резонатор, или резонаторная сборка, более прост для измерений, однако, изменения частоты, связанные с отклонением размеров ячеек от номинала, так называемые функции чувствительности к размерам, будут различными в режимах бегущей и стоячей волны и это различие следует учитывать.

Частота ячейки на заданном виде колебаний может быть измерена с помощью резонаторной сборки. В сборку входят ячейки, размеры которых близки, но различаются из-за погрешностей изготовления. Если бы можно было взять сборку, состоящую из идентичных ячеек, то измеренная на заданном виде колебаний частота могла бы быть названа собственной частотой каждой из ячеек f_i на этом виде колебаний. В сборке могут использоваться полуячейки, отражающие диски, кольца и т.п. Если в схеме измерений используются полуячейки, то собственную частоту пары полуячеек $f_{п\bar{я}}$ можно определить как частоту

сборки, в которой все размеры полуячеек, кроме высоты, совпадают с размерами ячеек, а высота равна половине высоты полной ячейки.

На рис. 4.1 представлены некоторые варианты резонансныхборок. Длинаборок "а" - "в" равна длине волны, в варианте "б" использовались более простые детали - закорачивающий (отражающий) диск и кольцо, добротность сборки "б" выше, чем "а" и "в", однако геометрия в этом случае нарушается: в сборке "б" отсутствует скругление на радиусе b и необходимы углубления в торцевых дисках, соответствующие половине апертуры. Обычно использовались сборки вида "а" и "в". Для обеспечения СВЧ контакта сборки "а" - "в" сжимались с усилием около 200 кг. Выбор этой величины следует из экспериментальной зависимости измеряемой частоты и добротности от усилия прижима - рис. 4.2.

Предельные случаи сборки - одна ячейка - показаны как варианты "г" и "д". В этих случаях измерения проводятся при конфигурации поля, несколько отличной от рабочей, но сохраняющей наибольшую чувствительность частоты к тому же размеру - диаметру $2b$. Для вариантов "г" и "д" удалось обеспечить измерение частоты без сжатия ячеек, более подробное описание - в п. 4.3.

Резонансную частоту f_N сборки из $(N-1)$ ячеек и двух полуячеек можно выразить через собственные частоты f_1 входящих в нее элементов:

$$f_N = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \rho_i f_i + \rho_{\text{пя}} f_{\text{пя}}}{\sum_{i=1}^{N-1} \rho_i + \rho_{\text{пя}}} \quad (4.1)$$

Здесь введены веса ρ_i , с которыми каждая из ячеек влияет на частоту. Разные ячейки находятся в разных полях, и их влияние на частоту f_N может зависеть от их положения в сборке. Определение собственной частоты пары полуячеек дано в начале этой главы, и эта частота также может быть связана с соответствующим весом $\rho_{\text{пя}}$. Величина N зависит от вида колебаний. Для вида $2\pi/3 N$ должно быть кратно трем, при этом сумма ρ_i для любых трех ячеек, расположенных подряд, равна 3.

Если в предварительных измерениях, например, с помощью сборки "а" (рис. 4.1) отобрать $N - 3$ ячеек, таких, что резо-

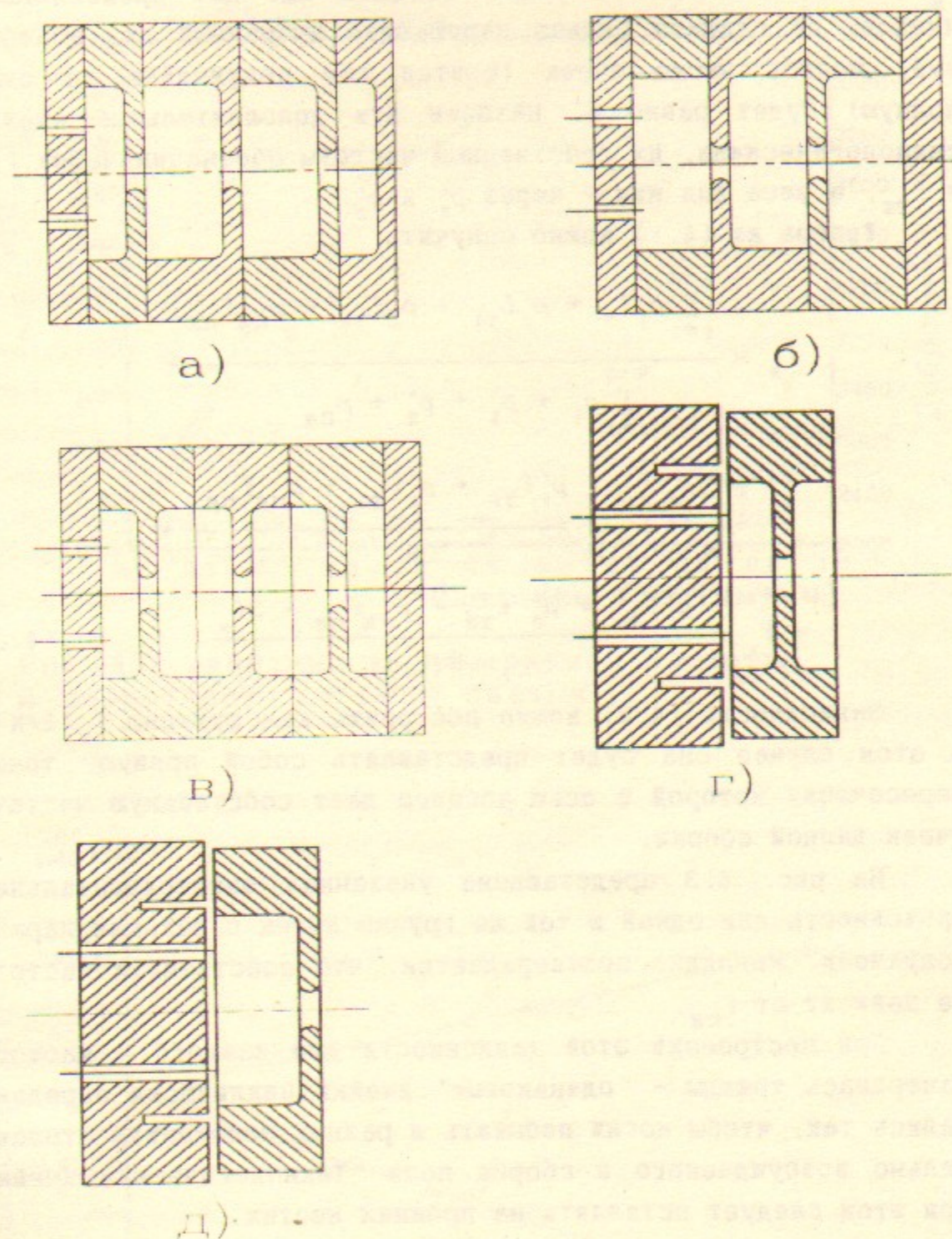


Рис. 4.1. Варианты резонансныхборок; а, б - для несимметричных ячеек; в - для симметричных ячеек; г, д - для отбраковщика.

нансные частоты сборки одинаковы при установке любой из этих ячеек в сборку, то можно считать, что их собственные частоты f_x отличаются незначительно. Возьмем еще две произвольные ячейки, не слишком сильно нарушающие выбранный вид колебаний, полное число ячеек (считая две полуячейки за одну полную) будет равно N . Назовем эти дополнительные ячейки технологическими. Их собственные частоты обозначим через f_{T1} и f_{T2} , а веса для них - через ρ'_1 и ρ'_2 .

Теперь из (4.1) можно получить

$$f_N = \frac{\sum_{i=1}^{N-3} \rho_i f_x + \rho'_1 f_{T1} + \rho'_2 f_{T2} + \rho_{\text{пя}} f_{\text{пя}}}{\sum_{i=1}^{N-3} \rho_i + \rho'_1 + \rho'_2 + \rho_{\text{пя}}}$$

$$= \frac{N-3}{N} f_x + \frac{\rho'_1 f_{T1} + \rho'_2 f_{T2} + \rho_{\text{пя}} f_{\text{пя}}}{N}$$

$$= f_x + \frac{\rho'_1 f_{T1} + \rho'_2 f_{T2} + \rho_{\text{пя}} f_{\text{пя}} - 3f_x}{N} \quad (4.2)$$

Зависимость (4.2) можно построить как функцию $f_N(1/N)$, в этом случае она будет представлять собой прямую, точка пересечения которой с осью абсцисс дает собственную частоту ячеек данной сборки.

На рис. 4.3 представлена указанная экспериментальная зависимость для одной и той же группы ячеек с разными парами полуячеек. Наглядно подтверждается, что собственная частота не зависит от $f_{\text{пя}}$.

При построении этой зависимости для каждого N частота измерялась трижды - "одинаковые" ячейки циклически передвигались так, чтобы могли побывать в разных положениях относительно возбуждаемого в сборке поля. Технологические ячейки при этом следует оставлять на прежних местах.

После того как найдено соответствие между $f_{\text{изм}}$ и $f_{\text{соб}}$ для группы ячеек с $f_{\text{изм}} = f_1$, можно выбрать другую группу ячеек - с измеряемой частотой $f_{\text{изм}} = f_2$, достаточно далеко отстоящей от f_1 , например, на другом краю распределения частот для данной партии ячеек, и найти $f_{\text{соб}}$ для этой группы. Полагая, что измеряемые частоты линейно связаны с собственными частотами, можно записать

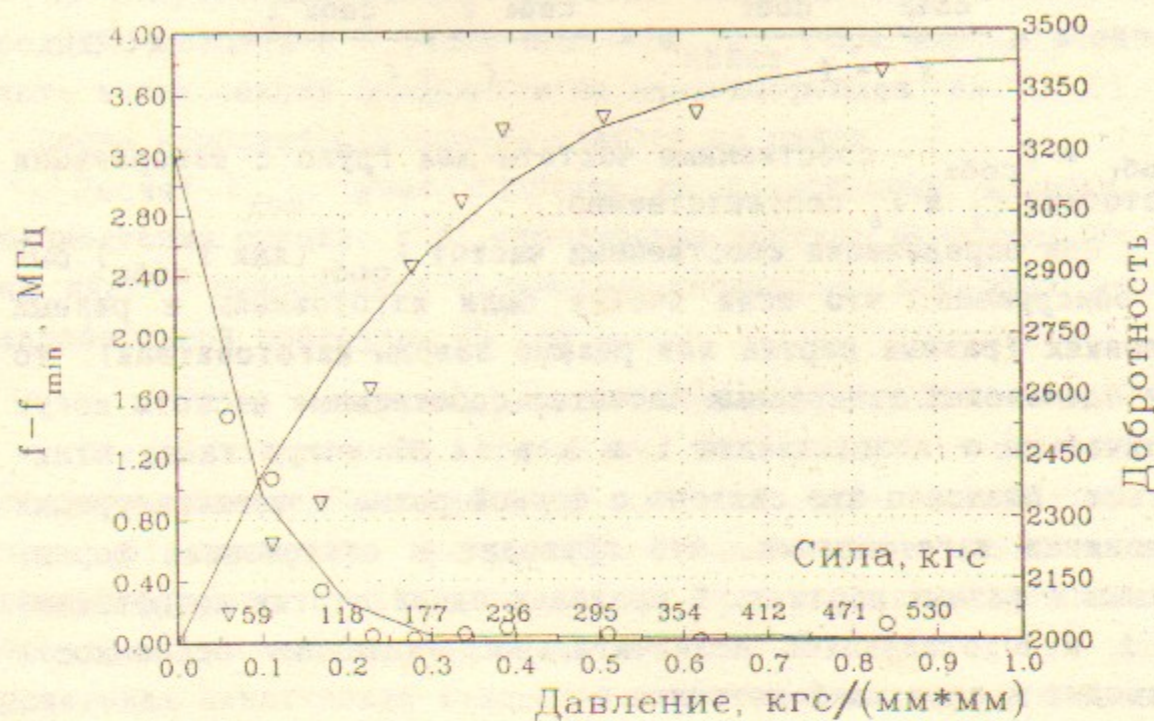


Рис. 4.2. Зависимость измеряемой частоты и добротности от силы сжатия

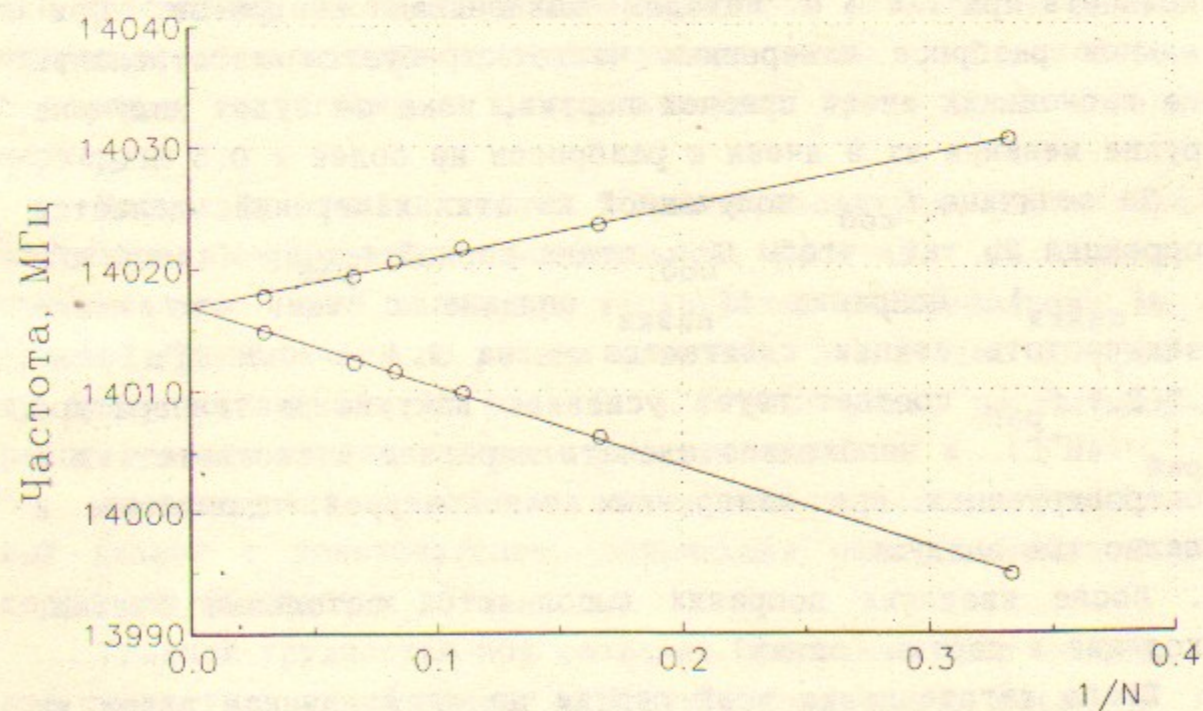


Рис. 4.3. Зависимость $f(1/N)$ для разных полуячеек.

$$f_{\text{соб}} = kf_{\text{изм}} + b.$$

$$\text{где } k = \frac{f_{\text{соб}2} - f_{\text{соб}1}}{f_2 - f_1}, \quad b = \frac{f_{\text{соб}1}f_2 - f_{\text{соб}2}f_1}{f_2 - f_1}. \quad (4.3)$$

$f_{\text{соб}1}$ и $f_{\text{соб}2}$ – собственные частоты для групп с измеряемыми частотами f_1 и f_2 соответственно.

При определении собственных частот $f_{\text{соб}1}$ (или $f_{\text{соб}2}$) было обнаружено, что если ячейки были изготовлены в разных условиях (разные партии или разные заводы-изготовители), то при одинаковых измеряемых частотах собственные частоты могут отличаться и коэффициенты k и b в (4.3) могут также отличаться. Возможно это связано с формой резца и температурными условиями изготовления, что приводит к отклонениям формы, разным в разных партиях. В пределах одной партии коэффициенты k и b отличались незначительно. Указанные особенности приводят к следующей методике.

1. Изготавливается пробная группа из 9 ячеек.
2. Если измеренные частоты этих ячеек отличаются незначительно (≤ 0.5 МГц), то находится их собственная частота путем построения прямой $f_N(1/N)$ – см. (4.2) – по точкам для $N = 6, 9, \text{ и } 12$ (рис. 4.3). $f_{\text{соб}}$ находится как предел этой зависимости при $1/N \rightarrow 0$ методом наименьших квадратов. При сильном разбросе измеренных частот требуется изготовление еще нескольких ячеек пробной партии, пока не будет получена группа минимум из 9 ячеек с разбросом не более ± 0.5 МГц.
3. По величине $f_{\text{соб}}$, полученной из этих измерений, делается коррекция $2b$ так, чтобы $f_{\text{соб}}$ стала равной $f_{\text{раб}} = (14000 \text{ МГц} - \Delta f_{\text{пайки}})$. Поправка $\Delta f_{\text{пайки}}$ связана с тем, что после пайки частота секции сдвигается – на 1.4 ± 0.8 МГц (см. п.7.2.). $f_{\text{раб}}$ соответствует условиям вакуума и температуре $t_{\text{раб}}$ (40°C), и необходимо сделать пересчет в соответствии с контролируемыми при измерениях температурой, давлением и влажностью воздуха.
4. После введения поправки выполняются остальные ячейки, входящие в партию (заказ).
5. После изготовления всей партии по двум группам ячеек из разных частей гистограммы распределения ячеек по измеренным частотам – с интервалом между группами не менее 2 МГц –

определяются коэффициенты для уравнения (4.3) и рассчитываются рабочие частоты всех ячеек.

6. По полученным рабочим частотам комплектуется секция со средней частотой $f = 14000 \text{ МГц} - \Delta f_{\text{пайки}}$. При необходимости часть ячеек секции заменяется на компенсирующие (см. п. 5).

7. После комплектации ячейки сдаются на пайку.

Расчет $f_{\text{соб}}$, учет поправок на атмосферные условия и комплектация секции, т.е. определения порядка расположения в ней ячеек, выполняются с помощью специально для этой цели разработанной программы на IBM PC.

4.2. Программа для комплектации секции

Специализированная программа CELL была создана для моделирования технологического процесса селективной сборки ячеек. Эта программа предоставляет пользователю возможность последовательно пройти все стадии при работе с ячейками: расчет относительных частот ячеек, выбор групп ячеек для проведения циклических измерений, протоколирование циклических измерений и вывод коэффициентов для формулы пересчета относительной частоты в рабочую, расчет рабочих частот ячеек и подготовка упорядоченного списка ячеек для формирования структуры.

Учитывая нетривиальность алгоритма выбора групп ячеек для проведения циклических измерений, был разработан способ визуального контроля распределения ячеек по частотам с помощью гистограмм и выбора желаемых групп графическими маркерами.

Поскольку ячейка может характеризоваться различными частотами (измеряемой, относительной, рабочей), по желанию пользователя можно наблюдать гистограммы распределения выбранной группы ячеек по разным частотам. Это делает программу более наглядной. На рисунке 4.4 дан пример гистограммы распределения группы ячеек по рабочим частотам.

Имеется развитая система меню, обеспечивающая устойчивый диалог с пользователем, включающая набор подсказок и сообщений об ошибках.

Главной трудностью при создании программы было требование совместить емкий диалог с выводом графических объектов.

Программа написана на языке Си с применением оригинальной библиотеки, разработанной в институте.

По мере эксплуатации CELL на практике разработчик программы убедился в необходимости создания СУБД для хранения протоколов лабораторных измерений, списков ячеек в секциях, подготовки отчетов в приемленной форме.

Дальнейшее развитие программы видится в упрощении ряда стадий диалога в связи с отработкой технологии изготовления, контроля качества ячеек и их комплектации в структуру. Также будет налажен учет произведенных деталей для секции.

Предполагается, что после отработки технологии изготовления и наладки быстрого контроля частоты ячеек комплектация будет упрощена и порядок расстановки ячеек для каждой партии может стать произвольным.

4.3. Измерительное устройство для быстрого контроля частоты ячеек (отбраковщик) [19]

Разработан прибор для СВЧ контроля размеров ячеек ускоряющей структуры, основанный на автогенераторе с измеряемой ячейкой в цепи обратной связи, без прижима, с измерением частоты путем сравнения фазы СВЧ сигнала на входе и выходе опорного резонатора. Сравнение фазы выполняется при помощи

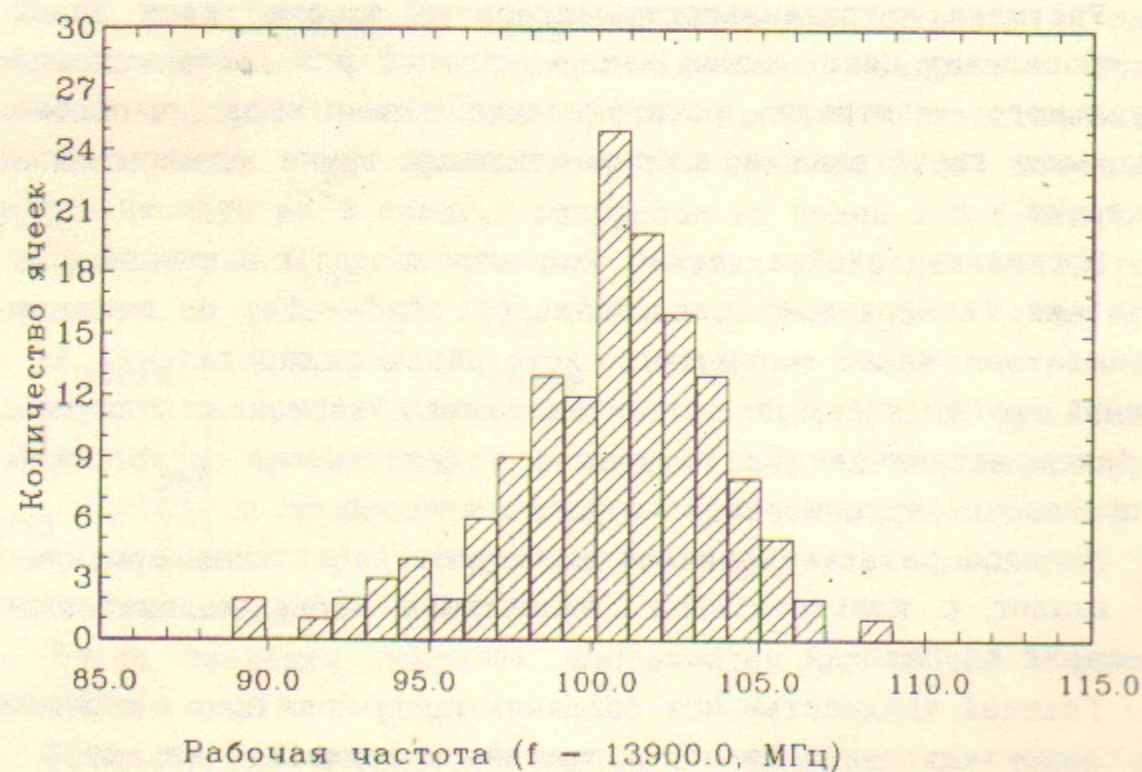


Рис. 4.4. Распределение ячеек по рабочей частоте

микрорешетчатой фазометрической схемы и радиочастотного компаратора с индикацией на стрелочном приборе. Воспроизводимость результатов измерений составляет ± 0.3 МГц.

Фазовый сдвиг электромагнитной волны в ускоряющей секции зависит от нескольких размеров ячейки: диаметров $2d$, $2a$, радиусов скруглений диафрагмы и т.д. Поэтому СВЧ измерения частот резонансных макетов контролируют выполнение всех размеров ячейки, ответственных за нужную фазовую скорость волны.

Частота резонанса зависит от внешних условий (гл. 3), которые учитываются применением опорного резонатора. Опорный резонатор имеет нужную частоту в рабочих условиях, т.е. в вакууме при рабочей температуре ускорителя. В условиях измерения частота сдвигается из-за влияния ϵ воздуха и температурного расширения ячейки. Сдвиг частоты одинаков для опорного резонатора и измеряемой ячейки, поэтому достаточно определить разность между их частотами, чтобы сделать вывод о пригодности проверяемой ячейки.

Частота резонанса и воспроизводимость измерений сильно зависят от электрического контакта, если для измерений, как обычно, [8], используется макет из нескольких ячеек, прижатых друг к другу. Для воспроизводимости измеряемых частот в этом случае требуется усилие около 200 кг. В данном приборе контакт обеспечивается дроссельной закороткой, при этом сжатие не требуется и исключается деформация ячеек. Контакт обеспечивается закороченной линией, состоящей из радиальной и коаксиальной частей, каждая из которых имеет длину, равную четверти длины волны (рис. 4.1 г, д).

Функциональная схема устройства приведена на рис. 4.5. Прибор состоит из автогенератора и измерительной схемы. Частота автогенератора изменяется фазовращателем в цепи обратной связи. СВЧ соединения выполнены коаксиальными металлическими кабелями, все СВЧ элементы (микрорешетчатая плата, опорный резонатор, фазовращатель и т.д.) жестко закреплены в корпусе прибора.

Алгоритм измерения:

1. После обработки на станке ячейка моется и сушится. При измерении температура ячейки не должна отличаться от температуры калибровочной ячейки больше чем на 0.5°C .

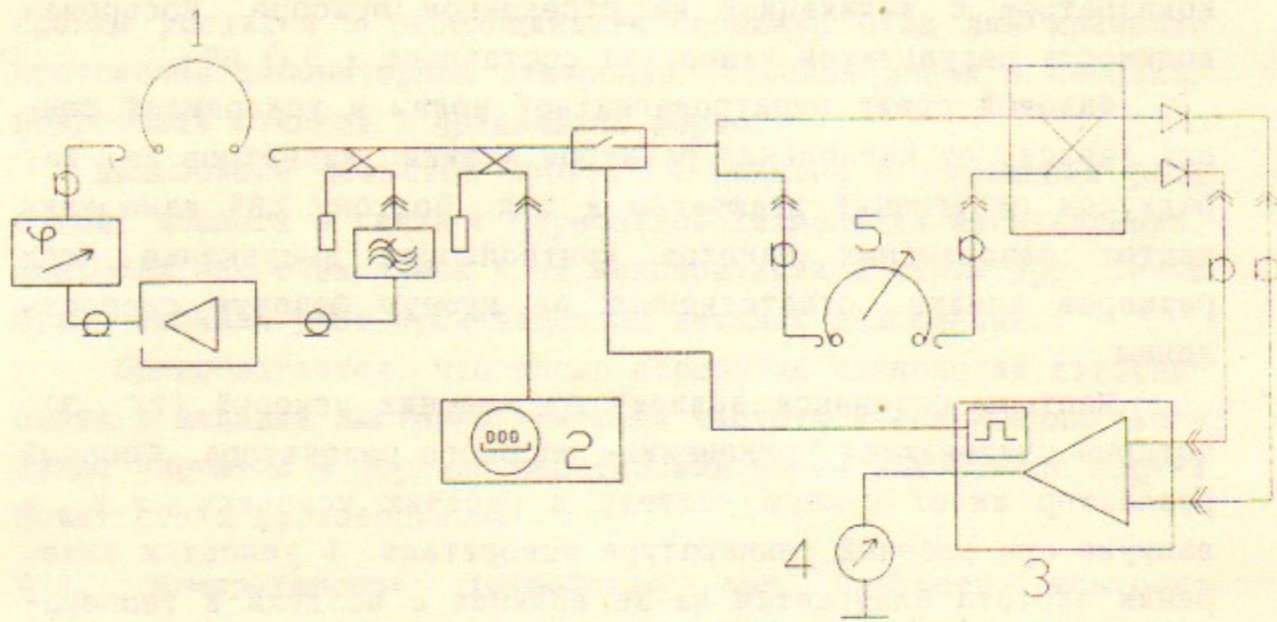


Рис. 4.5 функциональная схема устройства для отбраковки ячеек. 1 - резонансный стенд с измеряемой ячейкой. 2 - частотомер (для отладки устройства). 3- радиочастотная схема компаратора и генератора прямоугольных импульсов для модулятора. 4- измерительный стрелочный прибор. 5 - "относительный" резонатор.

2. В прибор вставляется калибровочная ячейка. Затем, при индикации генерации на лицевой панели прибора, вращением ручки фазовращателя стрелка прибора устанавливается в 0.

3. В прибор вставляется измеряемая ячейка. Стрелка прибора при индикации генерации должна попадать в заданный диапазон (например ± 2 МГц).

Резонансный макет прибора с дроссельной закороткой состоял из одной измеряемой ячейки, в которой измерялась частота вида, близкого к $\pi/2$. При проверке воспроизводимость измерений составляла (с учетом калибровочной ячейки) ± 0.3 МГц. Особенностью этого прибора является наклонное гнездо ячейки для того, чтобы обеспечить однозначность ее положения относительно антенн связи. Резонансная частота в этом макете наиболее чувствительна к изменению размера $2b$. Для сравнения в таблице 4.1 представлены производные частоты по изменению размеров в стенде с дроссельной закороткой (рассчитано программой SLANS) и в структуре на виде $2\pi/3$:

Таблица 4.1. Функции чувствительности к размерам при измерениях на отбраковщике и на резонансном стенде с видом колебаний $2\pi/3$.

Производная (МГц/мкм)	Отбраковщик	$2\pi/3$
$df/d(2b)$	-0.65	-0.87
$df/d(2a)$	0.08	0.30
df/dd	-0.10	-0.11
df/dt	-	-0.135

5. ИЗМЕРЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЕКЦИИ

5.1. Стенд для нерезонансных измерений

Для экспериментального определения электродинамических характеристик структуры и отработки технологии изготовления секции (локализация и определение масштаба неоднородностей в структуре) разработан и изготовлен автоматизированный стенд. Стенд управляется с помощью компьютера типа IBM PC и включает в себя шаговый двигатель для перемещения нити с пробным телом и фазометр ФК2-33. Данные фазометра снимаются с помощью интерфейса КОП.

Требования к точности измеряемых на стенде величин следуют из допусков на размеры ячейки и секции. Точность определения разности фаз между ячейками должна быть не хуже 0.1° фазы, такое же требование на определение разности фаз на отрезках секции. Точность установки пробного тела в секции - 0.1 мм.

Функциональная схема стенда показана на рис. 5.1. К особенностям конструкции стенда можно отнести вертикальное расположение секции, фиксацию нити с пробным телом в центре апертуры с помощью пробок с отверстием, оптические концевые выключатели. Управление шаговым двигателем осуществляется КАМАК-блоком УШД, считывание данных (отношение амплитуд и разность фаз СВЧ сигналов) - блоком "интерфейс КОП" в компьютере.

Для того, чтобы измерять коэффициент отражения менее 0.1, в схеме используется направленный ответвитель с направленностью не хуже 30 дБ.

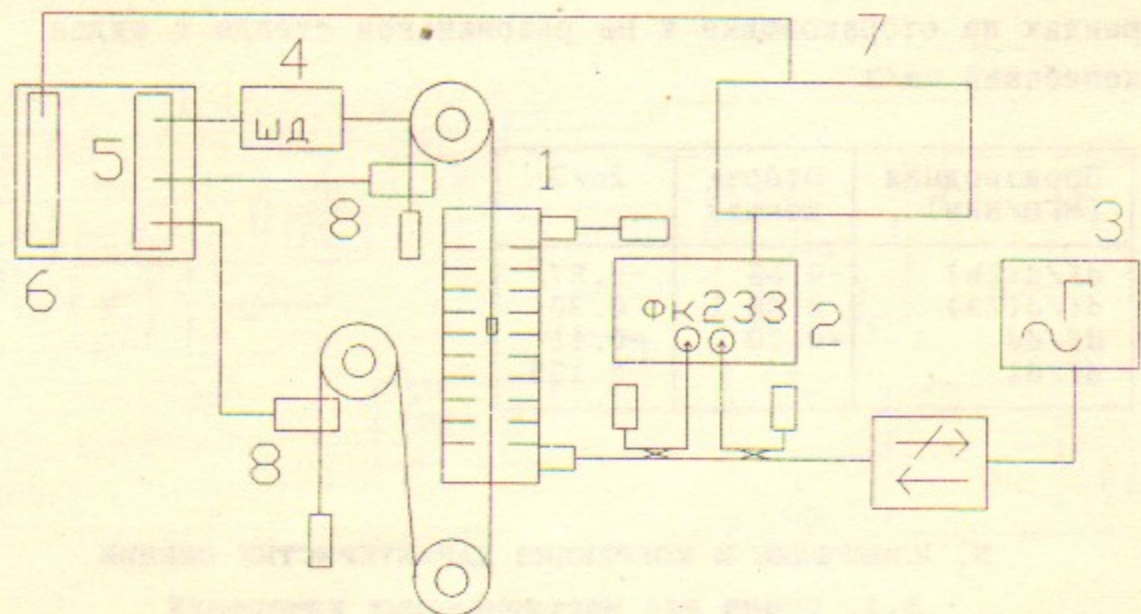


Рис. 5.1. Функциональная схема стенда для измерения характеристик ускоряющих секций. 1 - исследуемая секция, 2 - измеритель отношения амплитуд и фаз сигналов ФК2-33, 3 - генератор СВЧ, 4 - шаговый двигатель, 5 - блок управления шаговым двигателем, 6 - крейт КАМАК, 7 - компьютер IBM PC, 8 - концевые переключатели.

5.2. Автоматизированный стенд для измерения характеристик переходных процессов в ускоряющих структурах (эхо-локатор)

Расчетная напряженность поля на поверхности диафрагмы ячейки ускоряющей структуры достигает 3 МэВ/см. Поэтому методы контроля электродинамических характеристик структуры не должны нарушать чистоту поверхности ячеек, вносить в секцию пыль и т. п.

Ранее [23] был разработан стенд для контроля секций путем импульсных измерений. При переходе на частоту 14 ГГц вновь реализован стенд для измерения характеристик переходных процессов в ускоряющих структурах. Используется метод локализации и определения масштаба неоднородностей в ускоряющей секции по отраженной волне, при этом измеряется амплитуда отраженной волны в зависимости от времени.

Измерения основаны на регистрации с помощью стробоскопического цифрового осциллографа коротких фронтов СВЧ сигналов. Может регистрироваться зависимость от времени как отраженной так и прошедшей волны. Короткий фронт (2 нс) форми-

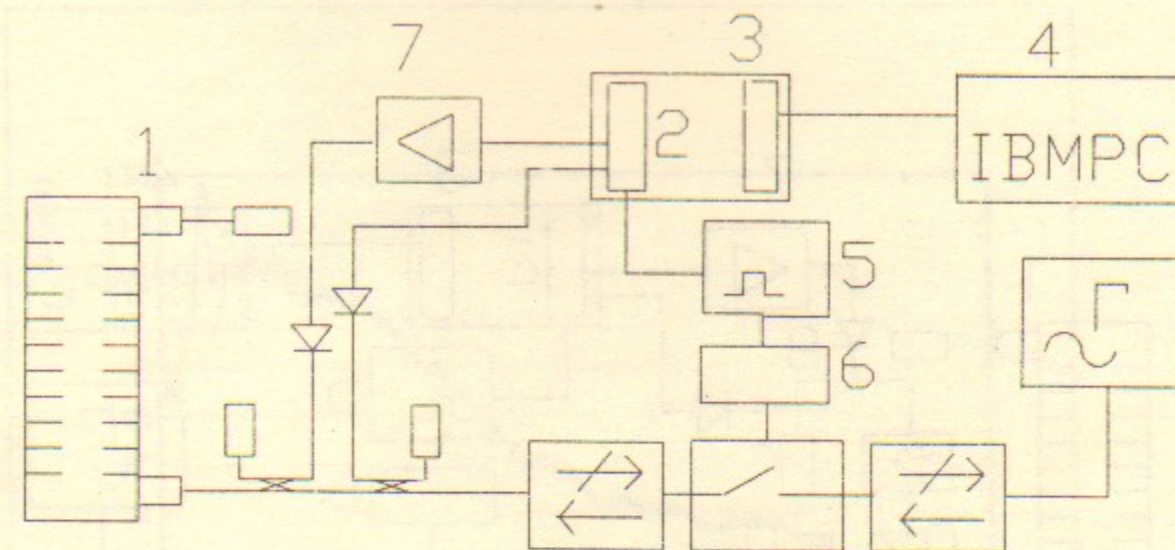


Рис. 5.2. Функциональная схема стенда для измерения характеристик в ускоряющих структурах.

1 - исследуемая секция, 2 - цифровой осциллограф STROB-s, 3 - крейт КАМАК, 4 - компьютер IBM PC, 5 - генератор прямоугольных импульсов, 6 - формирователь импульса включения волноводного ключа, 7 - видеоусилитель.

руется волноводным ключом. Функциональная схема стенда показана на рис. 5.2.

Исходя из того, что групповая скорость в ускоряющей структуре $v_{гр}/c = 0.03$ и полосовая характеристика структуры позволяет пропускать фронты СВЧ сигнала 10 нс, можно определять место неоднородности с точностью до 7 ячеек. Реализована также схема, показанная на рис. 5.3, она отличается от предыдущей тем, что позволяет определять фазу отраженного сигнала. Пример полученных данных - на рис. 5.4.

5.3. Настройка фазовой скорости волны в секции при помощи корректирующих ячеек [25]

Допуски на размеры ячеек ускоряющей структуры близки к предельным при существующей технологии, поэтому необходим метод настройки секции, требующий наименьших затрат при изготовлении и измерениях.

Предполагается настраивать секцию специальными (корректирующими) ячейками следующим образом:

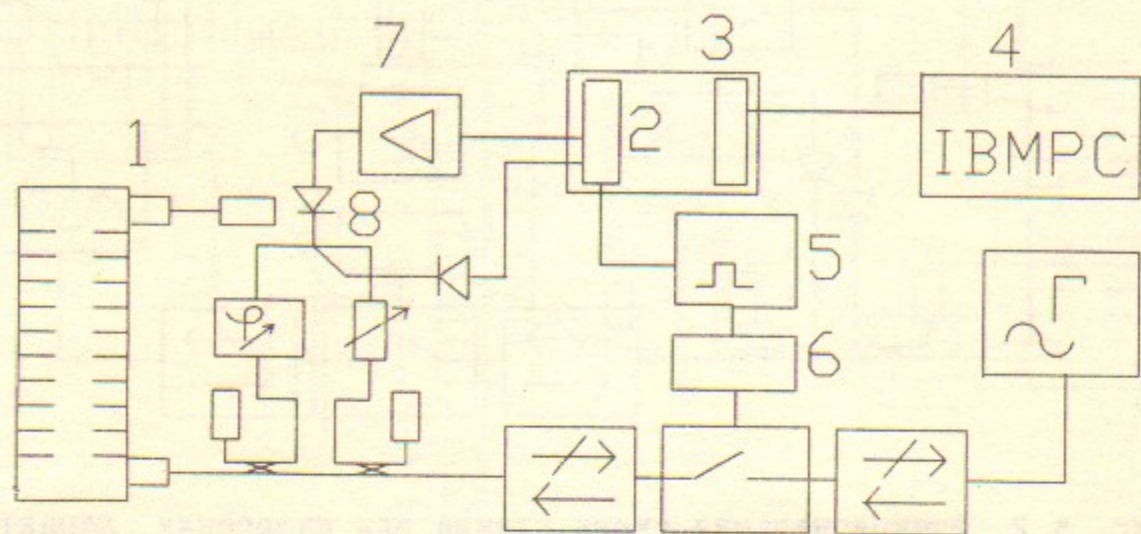
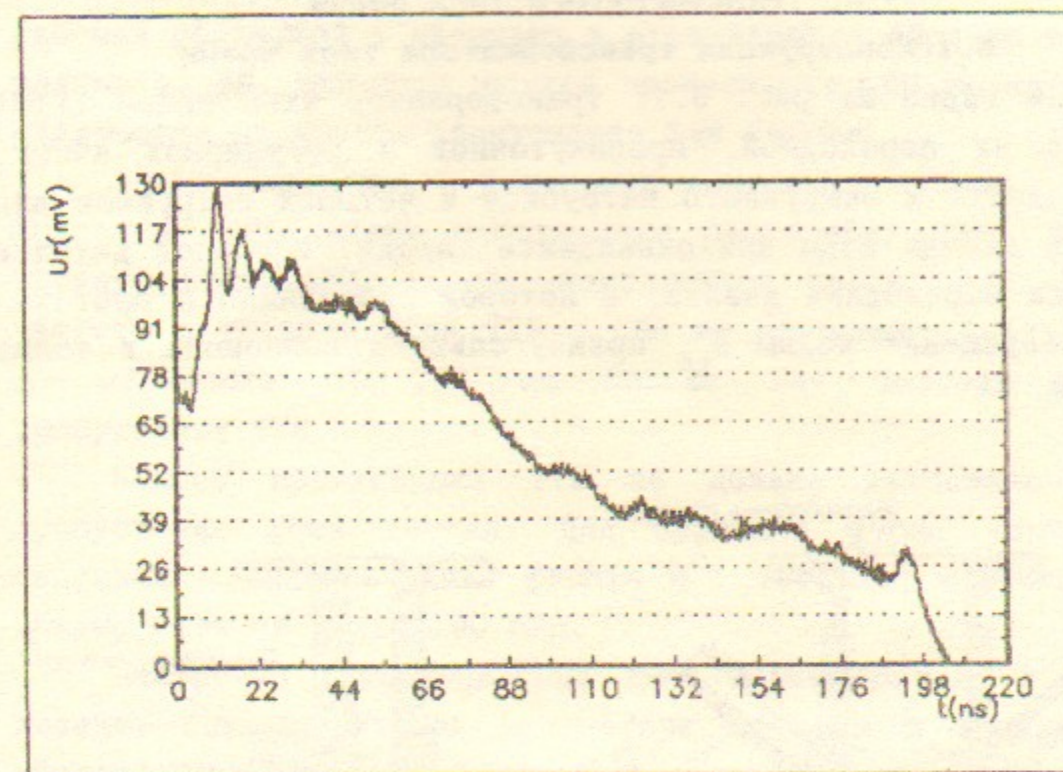


Рис. 5.3. Функциональная схема стенда для измерения характеристик в ускоряющих структурах. Схема с измерением фазы СВЧ сигнала.

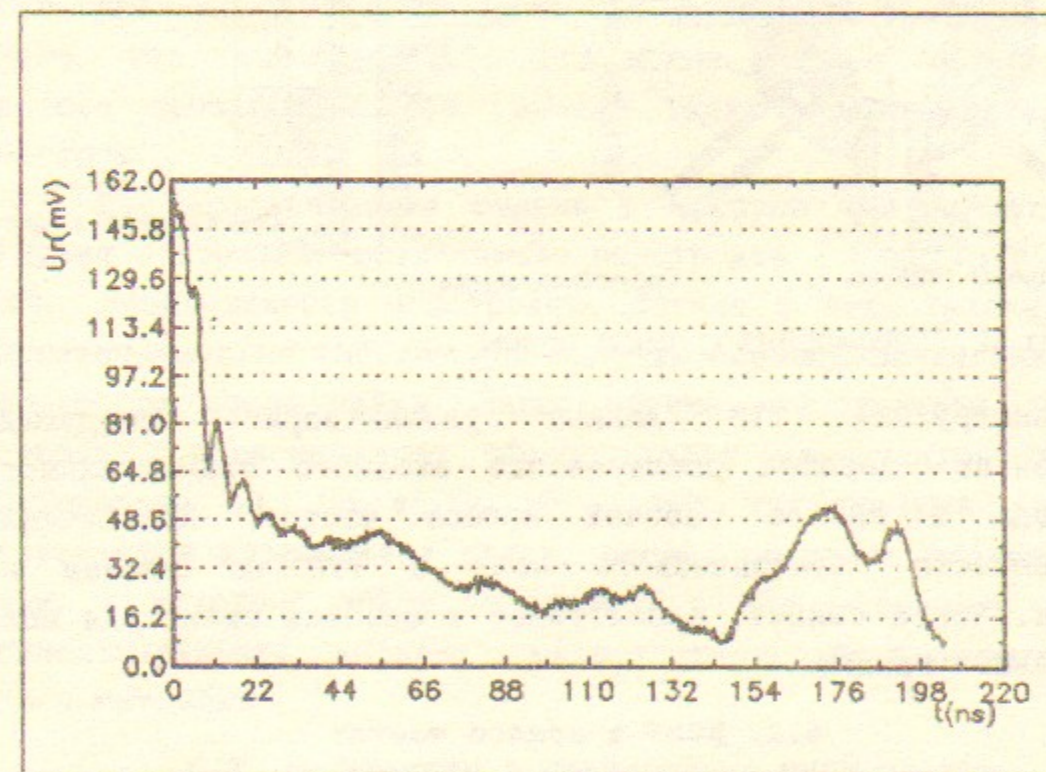
1 - исследуемая секция, 2 - цифровой осциллограф STROB-s, 3- крейт КАМАК, 4 - компьютер IBM PC, 5 - генератор прямо- угольных импульсов, 6 - формирователь импульса включения волноводного ключа, 7 - видеоусилитель, 8 - двойной T-мост.

Ячейки для секции при изготовлении проходят предварительный контроль с помощью СВЧ измерений, и отбраковываются выходящие за допуск. Затем секция собирается в резонансном стенде и измеряется частота вида $2\pi/3$. С учетом этих данных в секцию вставляются корректирующие ячейки так, чтобы с учетом сдвига частоты после пайки фазовая скорость бегущей волны вида $2\pi/3$, приведенная к условиям вакуума и температуре секции 40°C , была равна скорости света.

Для определения допустимой начальной расстройки секции были проведены измерения коэффициента отражения от ячейки с измененной частотой и расчет отражений и потерь энергии пучка. Расчеты, основанные на модели связанных резонаторов, показывают, что корректирующими ячейками можно настроить секцию с отклонением рабочей частоты до 2 МГц при потере энергии меньше 1.5 % (без подстройки - 20 %).



a)



b)

Рис. 5.4. Пример данных, полученных схемой с измерением фазы. График зависимости напряжения на детекторе (мВ) в зависимости от времени (нсек).

- a) - отраженный сигнал от ускоряющей секции,
- b) - отраженный сигнал от секции с неоднородностью.

6. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТИПА ВОЛНЫ

6.1 Конструкция трансформатора типа волны

Как видно из рис. 6.1, трансформатор типа волны (ТТВ) состоит из переходной, промежуточной и регулярной ячеек, волноводного и вакуумного патрубков и четырёх патрубков для ввода и вывода воды для охлаждения секции. Основной деталью является переходная ячейка, в которой собственно и происходит превращение волны H_{10} прямоугольного волновода в волну E_{01} КДВ.

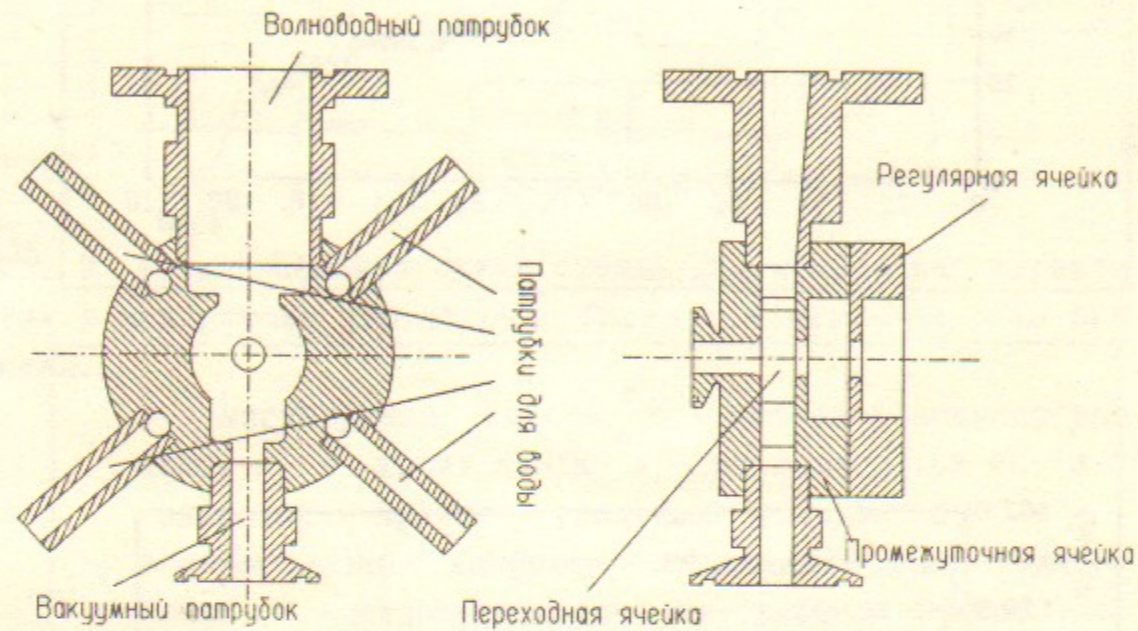


Рис. 6.1. Трансформатор типа волны.

Конструкция ТТВ должна удовлетворять следующим требованиям: хорошее согласование входного прямоугольного волновода и КДВ в рабочей полосе частот, обеспечение напряжённости электрического поля в ТТВ на уровне не больше, чем в секции, амплитудная и фазовая симметрия поля в пролётном канале.

6.2. КСВН в полосе частот

Качество согласования входного волновода и КДВ в рабочей полосе частот определяется из зависимости КСВН от частоты для ТТВ с согласованной диафрагмированной нагрузкой (СДН).

СДН состоит из двух медных и 36 ячеек из стали 20Х13, одинаковых по форме с регулярными медными ячейками. Добротность стальных ячеек на порядок меньше, чем у медных и

это обеспечивает суммарное затухание в полосе частот вблизи рабочей прошедшей в нагрузку и отразившейся обратно волны на уровне 40 дБ. При этом полоса пропускания СДН незначительно отличается от полосы пропускания КДВ секции.

Таким образом, измерения трансформаторов с СДН позволяют определить собственную расстройку ТТВ, исключая влияние каких-либо ячеек, находящихся после него. Полосу частот, в которой КСВН ТТВ с СДН не превышает 1.22 (потери на отражение от ТТВ не больше 1%) назовём полосой пропускания ТТВ.

Полоса пропускания ТТВ не должна уменьшать полосу пропускания всей секции. Для передачи формы ускоряющего импульса с длительностью фронта 0.1 мкс полоса пропускания должна быть не менее 100 МГц.

Настройка трансформатора типа волны состоит в продавливании боковых стенок резонатора переходной ячейки (ПЯ), которое увеличивает собственную резонансную частоту ПЯ и совмещает полосу пропускания ТТВ с рабочей полосой частот. Ясно, что так подстроить ТТВ можно лишь в случае, когда полоса пропускания ТТВ смещена вниз относительно рабочей частоты.

Для продавливания стенки в корпусе ТТВ предусмотрены глухие отверстия, позволяющие подстроить его частоту до +100 МГц. Необходимость подстройки связана с недостаточной воспроизводимостью собственной частоты переходной ячейки трансформатора после пайки. Запас объема, необходимый для подстройки, первоначально обеспечивался увеличением диаметра резонатора ПЯ. Но из-за того, что при проточке диаметра изменяется коэффициент связи, решено оставить диаметр прежним, а исходный объем переходной ячейки увеличить за счет симметрирующего "кармана", расположенного со стороны вакуумного патрубка.

6.3. Результаты и предложения МИФИ по ТТВ

В 1990-92 годах в МИФИ [16,17] были проведены комплексные исследования трансформатора типа волны к ускоряющему волноводу линейного коллайдера, включающие измерение перенапряжённости поля, исследование амплитудной и фазовой симметрии поля в месте пролёта пучка, расчёт и измерение импедансной характеристики ускоряющей секции с ТТВ.

Перенапряжённость поля измерялась на резонансном макете из ТТВ и переменного количества ячеек и полужеек на частоте 2918.4 МГц. Размеры ТТВ, с учётом масштабного коэффициента, соответствовали размерам последней конструкции ТТВ ВЛЭПП. Измерялось два КДВ: с высотой D , равной периоду КДВ D_0 и с высотой $D_0/2$.

Как известно, наиболее опасными местами в КДВ и ТТВ с точки зрения концентрации электрического поля являются поверхности скругления отверстий в диафрагмах. Отношение напряжённости поля в этих местах к амплитуде основной гармоники электрического поля на оси определяет коэффициент перенапряжённости (K_{Π}). В ТТВ требуется обеспечить K_{Π} не выше, чем в КДВ.

Измеренное в МИФИ значение коэффициента перенапряжённости в КДВ для структуры ВЛЭПП оказалось равным 2.25. Значение K_{Π} в первой диафрагме ТТВ с $D = D_0$ равнялось 2.44, а для первой диафрагмы ТТВ с $D = D_0/2$ было равно 2.13. В измерениях K_{Π} в КДВ и в ТТВ использовалось одно и то же возмущающее диэлектрическое тело.

Как видно из результатов, использование ТТВ с половинной высотой кажется более предпочтительным, хотя K_{Π} ТТВ с $D = D_0$ превосходит K_{Π} в КДВ не более, чем на 10%. Но конструкция ТТВ с половинной высотой несколько сложнее, и пока использование этого варианта отложено.

Асимметрия поля исследовалась методом нерезонансных возмущений в двух ТТВ. В качестве возмущающего тела использовалось диэлектрическое ($\epsilon = 20$) цилиндрическое тело диаметром 1.75 мм и высотой 10 мм. Амплитудная асимметрия характеризуется относительной величиной

$$\frac{A}{h} = \frac{\partial E_z / \partial x}{E_z} = \frac{2(E_+ - E_-)}{h(E_+ + E_-)},$$

где E_+ и E_- - напряжённости поля, полученные при протягивании возмущающего тела параллельно оси z на расстоянии $x = \pm h/2$ при $y = 0$. Ось z направлена вдоль пролётного канала, ось x - вдоль широкой стенки подводющего прямоугольного волновода. Значения E_+ и E_- пропорциональны квадратному корню из изменения коэффициента отражения, если используется метод нерезонансных возмущений или квадратному корню из сдвига

частоты в случае резонансного метода. Возмущающее тело перемещалось вдоль оси z при значениях координат $x = \pm 1.5, \pm 2.5, \pm 3.5, \pm 4.5$ мм ($y = 0$). Среднее значение A/h для первого ТТВ составило 0.0063 1/мм. Аналогичные измерения во втором трансформаторе дали среднее значение $A/h = 0.003$ 1/мм.

Фазовая асимметрия поля характеризуется аналогичным образом величиной

$$\frac{\phi}{h} = \frac{2(\phi_+ - \phi_-)}{h(\phi_+ - \phi_-)},$$

где ϕ_+ и ϕ_- - значения фазы при $x = \pm h/2$. У первого трансформатора среднее значение ϕ/h для $h = 7$ мм оказалось равным 0.0034 1/мм. У второго - 0.0024 1/мм.

Для расчёта импедансной характеристики КДВ с ТТВ имеется методика, базирующаяся на представлении ускоряющей секции в виде цепочки связанных резонансных контуров [20]. Согласно этой методике каждая ячейка секции является резонансным контуром и характеризуется собственной частотой, добротностью и коэффициентами связи (K_0) с двумя соседними ячейками. Первая и последняя ячейки секции (т.е. ТТВ) кроме регулярной ячейки КДВ связаны с прямоугольным волноводом (коэффициент связи β). Ячейки связаны не только с двумя соседними, но и через одну (коэффициент связи K_1), через две (K_2) и т.д. Но для структуры с диаметром апертуры 6 мм, как следует из работы [20], K_1, K_2 и т.д. пренебрежимо малы по сравнению с K_0 . Тогда, решая систему уравнений с трёхдиагональной матрицей, можно по заданным параметрам ячеек определить отражения от секции на произвольной частоте и, наоборот, потребовав отсутствия отражений от секции на рабочей частоте, определить параметры ячеек. Для этого написана программа, позволяющая вводить случайный разброс резонансных частот ячеек и коэффициентов связи, а также рассчитывать распределение напряжённости ускоряющего поля по длине секции.

Результаты расчётов [16] показали, что уменьшение собственной частоты ТТВ приводит к расширению полосы пропускания секции со стороны частот ниже рабочей, а для коэффициента связи трансформатора с прямоугольным волноводом β существует оптимальное значение, при котором полоса пропускания секции максимальна и КСВ на рабочей частоте минимален.

6.4. Измерение размеров и пересмотр допусков

В октябре-декабре 1991 года в ЭП ИЯФ были изготовлены 14 трансформаторов типа волны для секций ВЛЭПП. Для контроля качества изготовления и определения влияния того или иного размера на полосовую характеристику ТТВ были проведены измерения основных размеров деталей ТТВ на контрольно-измерительной машине НММ-965 с точностью ± 4 мкм. Было определено влияние отклонений размеров от номиналов на полосовые характеристики. В результате большая часть допусков оказалась соответствующей требованиям, часть допусков была ослаблена и некоторые допуски потребовалось ужесточить.

6.5. Измерения на стенде

Схема стенда для измерения полосовых характеристик изображена на рис. 6. 2.

СВЧ сигнал от генератора качающейся частоты (ГКЧ), пройдя через вентиль и три направленных ответвителя, подаётся на нагрузку, полосовую характеристику которой нужно

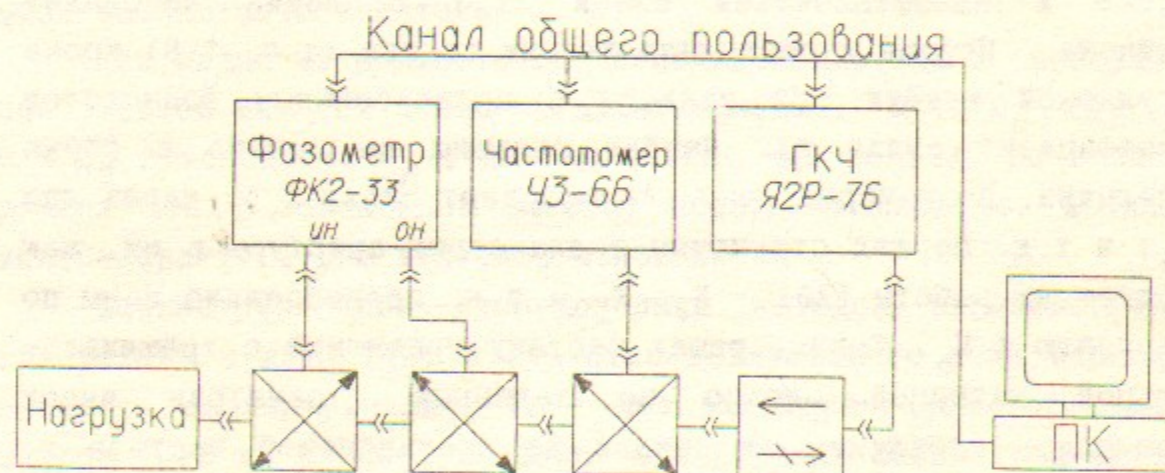


Рис. 6. 2. Схема стенда для измерения полосовых характеристик.

получить. В качестве нагрузки включаются либо ТТВ с согласованной диафрагмированной нагрузкой, либо ТТВ с расстроенной второй ячейкой, либо полная секция с согласованной нагрузкой. От первого ответвителя падающий сигнал подаётся на частотомер ЧЗ-66, а от второго — на вход "Опорное напряжение" фазометра ФК2-33. Отражённый от нагрузки сигнал выделяется ещё одним направленным ответвителем и подаётся на вход "Измеряемое напряжение" фазометра, позволяющего измерять модуль

коэффициента отражения и разность фаз в опорном и измеренном каналах. Установка частоты на ГКЧ, её измерение на частотомере, считывание данных о фазе и модуле коэффициента отражения $|\Gamma|$ с фазометра осуществляются компьютером IBM PC AT 286 через канал общего пользования. Данные записываются в файл и обрабатываются в системе MathCAD для получения графиков зависимостей $|\Gamma|^2$ и фазы от частоты.

Измерения фазовой полосовой характеристики ТТВ с расстроенной промежуточной ячейкой позволяют вычислить нагруженную добротность Q и собственную резонансную частоту f_0 ПЯ, которые используются как входные параметры при расчётах. Значения Q , f_0 и φ_0 подбираются компьютером так, чтобы минимизировать среднеквадратичное отклонение экспериментальной кривой от теоретической частотной зависимости фазы отражённой волны, определяемой по формуле

$$\varphi(f) = 2 \arctg \left[Q \cdot \left(\frac{f^2}{f_0^2} - 1 \right) \right] + \varphi_0,$$

где φ_0 — начальный набег фазы.

6.6. Расчёты и сравнение с экспериментом

Результаты компьютерных расчётов, сделанных на основе модели связанных резонансных контуров, удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными. На рис. 6.3 представ-

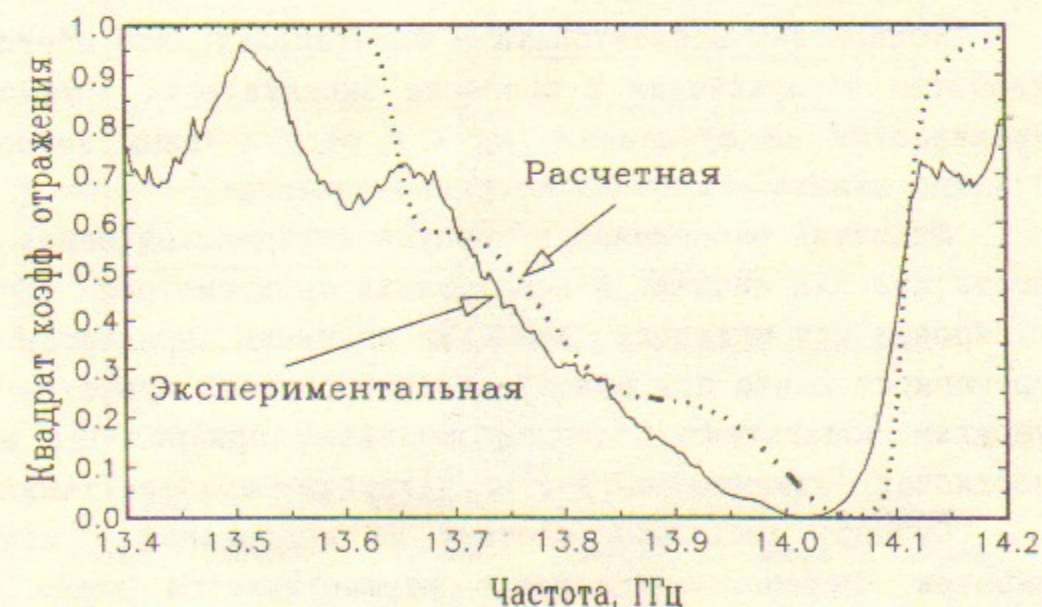


Рис. 6. 3. Экспериментальная и расчетная частотные характеристики для ТТВ с согласованной нагрузкой

лены измеренная и расчётная полосовые характеристики ТТВ, нагруженного на согласованную диафрагмированную нагрузку.

По данным измерений лучшие ТТВ с СДН имеют на резонансной частоте КСВ 1.02 - 1.10 и полосу пропускания порядка ± 50 МГц, что хорошо согласуется с расчётами.

7. СЕРИЙНОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЕКЦИЙ [24]

7.1. Характеристики станка ОТП-2

По техническому заданию ИЯФ на Одесском станкостроительном заводе была проведена разработка станка для массового производства ячеек ускоряющей структуры. Полуавтомат специальный токарный прецизионный с ЧПУ модели ОТП-2 установлен на Бердском электромеханическом заводе для проведения испытаний. Станок обеспечивает изготовление ячеек структуры алмазным резцом с достаточной производительностью при точности 1 мкм.

Основные технические данные станка

- | | |
|---|---------------------|
| 1. Предельные размеры устанавливаемой заготовки и обрабатываемых поверхностей, мм | |
| - диаметр | - 80 |
| - длина | - 40 |
| 2. Дискретность задания перемещения, мкм | |
| - продольное | - 1 |
| - поперечное (на диаметр) | - 1 |
| 3. Пределы частот вращения шпинделя, об/мин | - 30...3500 |
| 4. Наибольший крутящий момент на шпинделе, Нм | - 6 |
| 5. Наибольшее усилие подачи, Н | - 500 |
| 6. Габаритные размеры станка, мм | - 1090 × 835 × 1245 |
| 7. Масса станка с электрооборудованием, кг | - 980 |

Компоновка полуавтомата - фронтальная, что обеспечивает удобство обслуживания в процессе эксплуатации. Станок устанавливается на фундаменте на 4-х регулируемых виброопорах. Станина станка - жесткая чугунная отливка.

Шпиндель расположен в корпусе шпиндельной бабки на гидростатических опорах. В конструкции предусмотрена точная регулировка оси шпинделя. Вращение шпинделю передается от нагруженного шкива при помощи комбинированной зубчатой муфты с упругим элементом. К фланцу шпинделя прикреплен многолепестковая зажимная цапга с регулируемым усилием зажима.

Суппорт крестовый состоит из продольной и поперечной кареток. Перемещение кареток осуществляется через шариковую винтовую пару и плоскозубчатую ременную передачу. На направляющих суппорта предусмотрено покрытие поверхностей трения

антифрикционным эпоксидным компаундом.

В составе полуавтомата имеются два холодильника для поддержания стабильной температуры в гидросистеме станка и системе подачи СОЖ.

На рис. 7.1 представлены результаты испытаний. Показано распределение рабочих частот ячеек, изготовленных на станке ОТП-2, и ячеек, изготовленных по той же технологии на прецизионном станке общего назначения 102-CNC фирмы Schaublin (Швейцария). Среднеквадратичные отклонения от среднего значения частоты партии составляют $\sigma = 0.92$ МГц для ОТП-2 и $\sigma = 2.6$ МГц для центральной группы ячеек (до разрывов), изготовленных на 102-CNC. Для всей этой партии ячеек $\sigma = 6.8$ МГц. Количество ячеек - 166 (ОТП-2) и 242 (102-CNC). Таким образом, удалось в несколько раз улучшить точность изготовления. Максимальную чувствительность к отклонению размера имеет большой диаметр ячейки: $\partial f/\partial 2b = - 0.87$ МГц/мкм для данной геометрии. В целом же на частоту существенно влияют 7 внутренних размеров ячейки, не считая отклонений формы.

Вывод: станок ОТП-2 позволяет изготавливать ячейки ускоряющей структуры с требуемой при массовом производстве точностью.

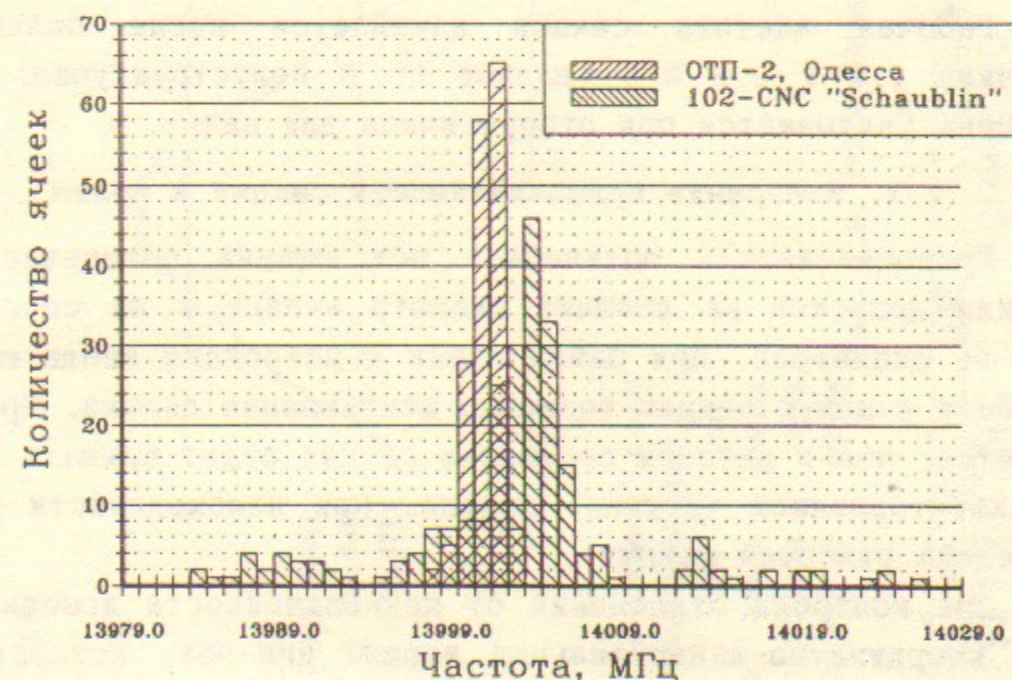
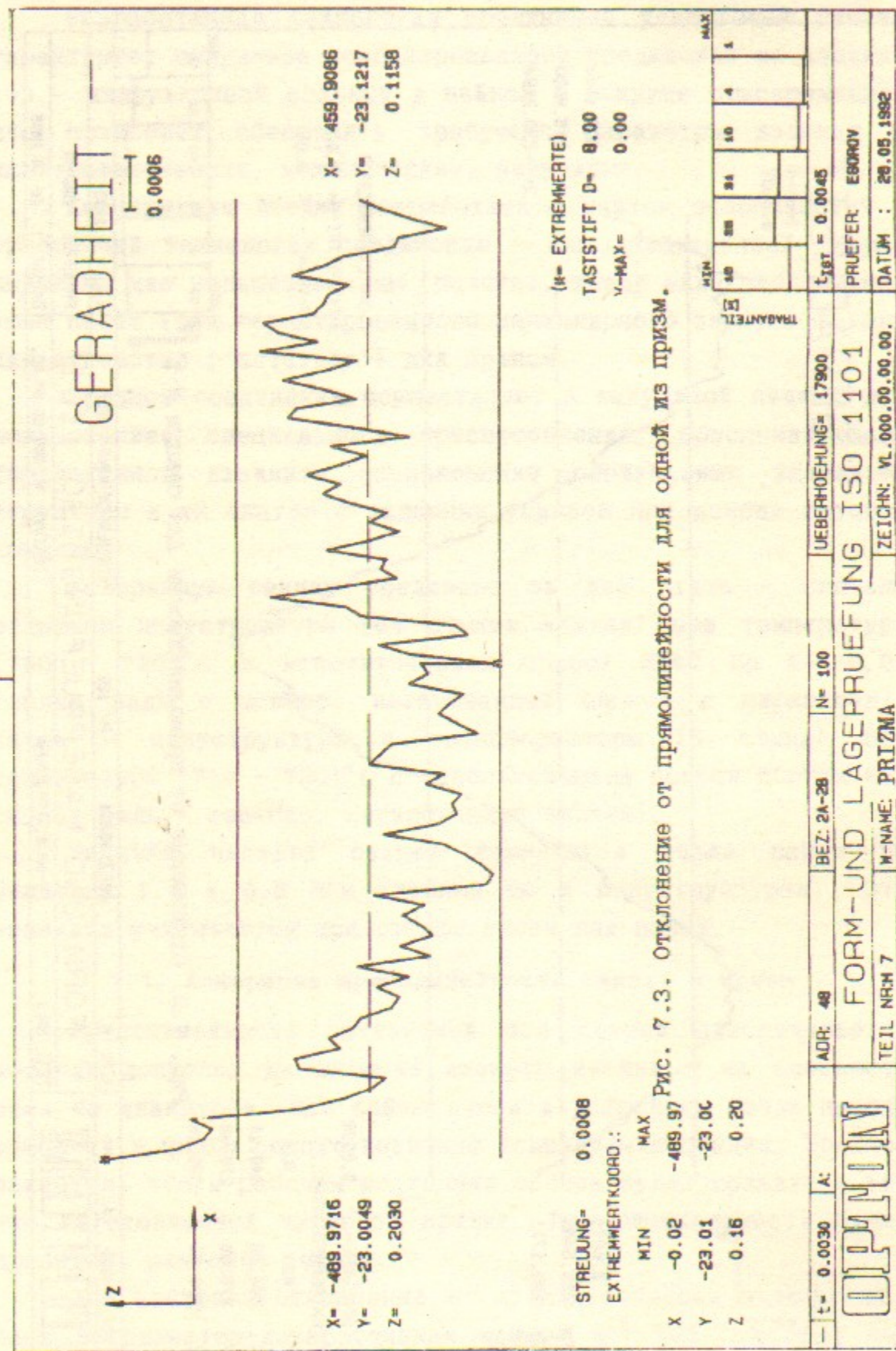


Рис. 7.1. Распределение рабочей частоты для двух партий ячеек.



секций и призм, а также улучшить оснастку для пайки секций.

На рис. 7.2 показаны результаты проверки прямолинейности одной из секций, на рис. 7.3 - призмы. Измерения проводились в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, здесь для примера показаны результаты только для одной из плоскостей.

Предварительно паялись две полуструктуры (что и видно на рис. 7.2), затем из полуструктур и трансформаторов паялась секция.

Для достижения нужной прямолинейности начата работа по рихтовке секций. При начальном отклонении от прямолинейности около 200 мкм (общий изгиб) после рихтовки получена непрямолинейность 40 мкм при среднеквадратичном отклонении центра ячеек от оси 10 - 20 мкм.

Для призмы непрямолинейность составила 4.5 мкм по одной и 12 мкм - по другой направляющей. Это первые результаты по контролю прямолинейности, сейчас ведутся работы по ее улучшению.

7.4. СВЧ характеристики готовых секций

Технология изготовления отработывалась на секциях с апертурой 6 мм. Этот размер отверстия был выбран из соображений минимальной мощности для достижения требуемого темпа ускорения. Полностью готовы 11 и имеются ячейки для изготовления еще 17 таких секций.

Сейчас идет изготовление ячеек с апертурой 8 мм. Такая структура позволит уменьшить влияние кильватерных полей и ускорить больший ток.

Коэффициент отражения в полосе пропускания секции с апертурой 6 мм показан на рис 7.4. Измерения проводятся на специальном стенде с цифровым съемом информации. Стенд включает в себя панорамный измеритель КСВН Р2-104, измеритель разности фаз ФК2-33, два направленных ответвителя, СВЧ вентиль и кабели. Информация снимается и обрабатывается компьютером IBM PC.

При использовании диафрагмированной согласованной нагрузки, изготовленной из стали с высоким поглощением, на стенде, кроме готовых секций, измеряются и настраиваются трансформаторы типа волны.

На основе модели связанных резонаторов [20] разработана

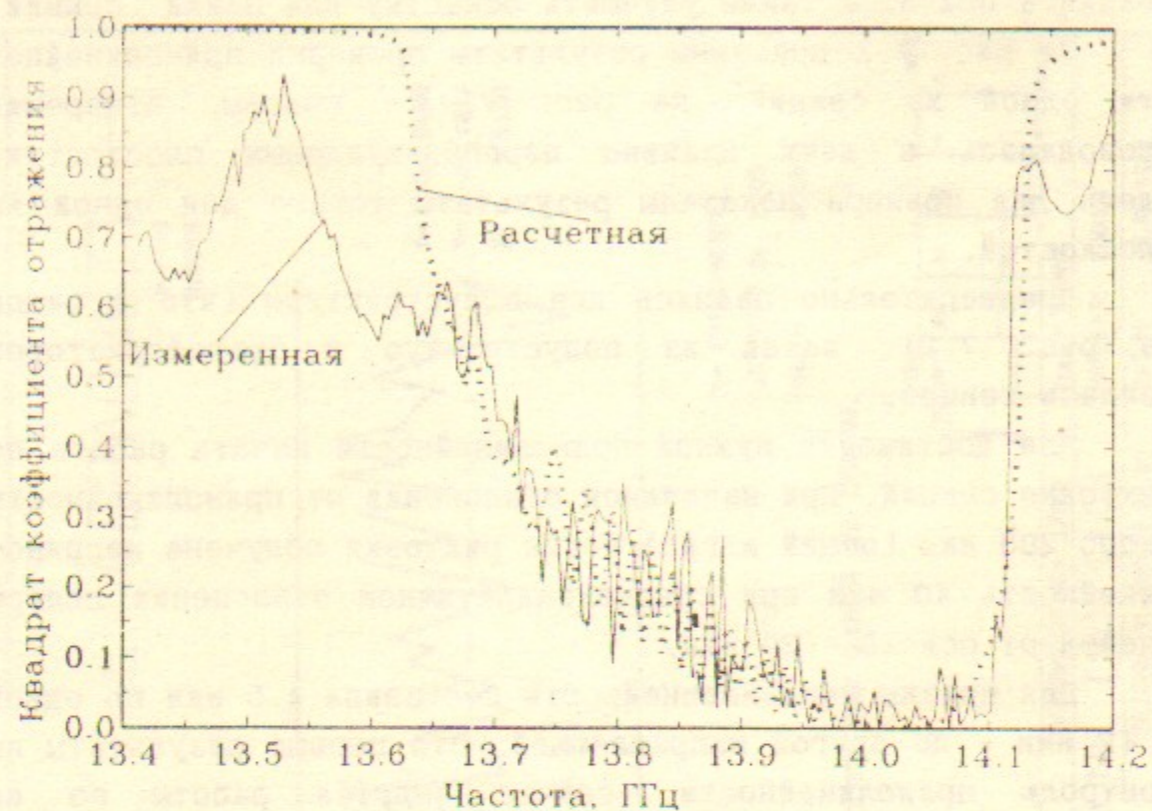


Рис. 7.4. Экспериментальная и теоретическая полосовая характеристика секции.

Секция 7, входной ТТВ-А4, выходной ТТВ-А6.

программа расчета характеристик секции. Результаты счета также показаны на рис. 7.4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сделан выбор геометрических размеров, определены допуски и конструкция секции ВЛЭПП на 14 ГГц с темпом ускорения 100 МэВ/м.

Рассмотрены методики измерения собственных частот ячеек структуры и секции в целом. Определено влияние атмосферных условий на измеряемую частоту.

Разработан токарный станок, обеспечивающий выполнение требований к точности изготовления при серийном производстве.

Разработаны трансформаторы типа волны, рассчитаны и измерены их характеристики.

Предложены методы коррекции характеристик ТТВ и секции в целом.

Разработан прибор, обеспечивающий быстрый контроль раз-

меров готовых ячеек по интегральной характеристике - резонансной частоте на выбранном виде колебаний.

Найдена технология соединения секции из её элементов, обеспечивающая механические и вакуумные параметры и сохраняющая электродинамические характеристики.

Изготовлено 11 секций полностью и готовы ячейки для пайки 20 секций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В.Е., Будкер Г.У., Скринский А.Н. О возможности создания установки со встречными электрон-позитронными пучками на сверхвысокие энергии // Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц: Дубна, 1978. (В 2 т.) - Дубна: ОИЯИ, 1979. - Т.1. - С.27-34.
2. Балакин В.Е., Скринский А.Н. Проект ВЛЭПП // Вестник АН СССР. - 1983. - Т.3. - С.66-77.
3. Balakin V.E. VLEPP Status. Second International Workshop on Next-Generation Linear Collider, March 28 - April 5, 1990, KEK, Tsukuba, Japan. - KEK Internal 90-22. August 1990.
4. Balakin V.E. Status VLEPP. Third International workshop on linear colliders, LC91. September 17 - 27, 1991, BINP, Protvino, USSR. Branch of Institute of Nuclear Physics. - V.1. - P.302 -342.
5. Балакин В.Е., Брежнев О.Н., Новохатский А.В., Семенов Ю.И. Ускоряющая структура ВЛЭППа. Исследования максимально достижимого темпа ускорения // Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц: Дубна, 1978. (В 2 т.) - Дубна, ОИЯИ, 1979. - С.140-142.
6. Балакин В.Е. и др. Испытание ускоряющей секции линейного ускорителя ВЛЭПП // Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц: Протвино, 19-21 окт. 1984. (В 2 т.) - Дубна, ОИЯИ, 1983. - Т.2. - С.410-413.
7. Арапов Л.Н., Балакин В.Е., Фогель В.Ф., Фоминых В.И., Шемелин В.Д. Разработка ускоряющей секции ВЛЭПП // Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц: Москва, 3-5 окт. 1990 г. (В 2 т.) - Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 1992. - Т.1. - С.191-194.
8. Вальднер О.А., Собенин Н.П., Зверев Б.В., Щедрин И.С.

Справочник по диафрагмированным волноводам. Изд. 2, М.: Атомиздат, 1977.

9. *Myakishev D.G., Yakovlev V.P.* An Interactive Code SUPERLANS for Evaluation of RF-Cavities and Acceleration Structures / Conference Record of the 1991 IEEE Particle Acceleration Conference. Acceleration Science and Technology. May 6-9, 1991. San Francisco, California. Vol. 5 of 5, pp. 3002-3004.

10. *Балакин В.Е., Валяев Ю.Д., Колмагоров А.В. и др.* Прецизионный привод системы позиционирования элементов ВЛЭПП. - Новосибирск, 1992. - 36 с. - (Препринт / Ин-т ядер. физики СО РАН; 92-50).

11. Справочник по электротехническим материалам / Под общей ред. К.А. Андрианова и др. (В 2 т.) Т.1, М. - Л.: ГЭИ, 1958.

12. Таблицы физических величин / Справочник под редакцией И.К. Кикоина. Москва, Атомиздат, 1976.

13. *Гороновский У.Т.* и др. Краткий справочник по химии - Киев: Наукова Думка, 1987. С.540, С.615.

14. *Novokhatski A.V.* On the estimation of the wake potential for an ultrarelativistic charge in an accelerating structure. - Новосибирск, 1988. - 16 с. - (Препринт/Ин-т ядер. физики СО АН СССР; 88-39).

15. *Guignard G.* High-gradient linac studies in the frequency range of CLIC. - CERN, Geneva, Switzerland. August 1992. CERN SL/92-36 (AP). CLIC Note 177.

16. Исследование ускоряющих и фокусирующих структур линейного коллайдера. Часть I. Отчет N 89-3-532 / Моск. инж.-физ. ин-т; Руководители: Диденко А.Н., Собенин Н.П. - М., 1992. - 174 л.: ил. - Исполн.: Главатских К.В., Зверев Б.В., Милованов О.С. и др.

17. Разработка и исследование ускоряющих и фокусирующих волноводных структур и системы фазирования секций линейного коллайдера. Отчет N 89-3-532 / Моск. инж.-физ. ин-т; Руководители: Диденко А.Н., Собенин Н.П. - М., 1991. - 175 л.: ил. - Исполн.: Главатских К.В., Милованов О.С., Зверев Б.В. и др.

18. Разработка и исследование ускоряющих и фокусирующих волноводных структур и системы фазирования секций линейного коллайдера. Часть II. Отчет N 89-3-014-532 / Моск. инж.-физ.

ин-т; Руководители: Диденко А.Н., Собенин Н.П. - М., 1992. - 110 л.: ил. - Исполн.: Главатских К.В., Зверев Б.В., Милованов О.С. и др.

19. *Balakin V.E., Dolgashev V.A., Fominykh V.I., Pokhlebenin E.I., Vogel V.F.* Fast Checking of Cells for VLEPP. //Third international workshop on linear colliders, LC91, Protvino, 1991.

20. *Викулов В.Ф., Калюжный В.Е.* Исследование высокочастотных характеристик ускоряющих секций с бегущей волной на основе резонаторной модели. // ЖТФ, 1982, т.52, вып.11, с.2168-2176.

21. *Арапов Л.Н., Балакин В.Е., Фогель В.Ф., Фоминых В.И., Шемелин В.Д.* Разработка ускоряющей секции ВЛЭПП. // 12 Всесоюзная конференция по линейным ускорителям заряженных частиц, Харьков, 1990.

22. *Карлинер И.М., Нежевенко О.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П.* К вопросу о сравнении ускоряющих структур, работающих на накопленной энергии. - Новосибирск, 1986. - 40 с. - (Препринт/Ин-т ядер. физики СО АН СССР; 86-146).

23. *Волкова А.И., Кулаков А.А., Новохатский А.В. и др.* Частотно-селективный контроль ускоряющих секций ВЛЭПП // Вопросы атомной науки и техники. Серия: техника физического эксперимента, 1988, вып. 2(37).

24. *Балакин В.Е., Соляк Н.А., Арапов Л.Н., Гостеев В.К., Долгашев В.А., Косарев А.Н., Куклин Д.Е., Минков А.В., Шемелин В.Д., Манохин В.И.* Состояние работ по серийному изготовлению ускоряющих секций ВЛЭПП. // XIII Совещание по ускорителям заряженных частиц: Дубна, 1992 г.

25. *Balakin V.E., Dolgashev V.A.* Correction cells for VLEPP structure // Third international workshop on linear colliders, LC91, Protvino, 1991.

26. *Minkov A.V., Sobenin N.P., Phokin E.I., Shemelin V.D.* Dimension checking of disk loaded waveguide // Ibid.