

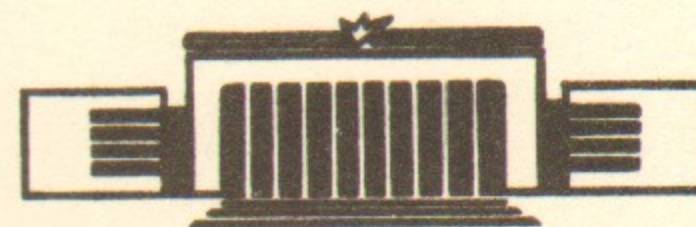


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

В.Г.Вещеревич, М.М.Карлинер, Е.В.Козырев,
И.Г.Макаров, В.М.Меджидзаде, О.А.Нежевенко,
Г.Н.Острейко, Б.З.Персов, Г.В.Сердобинцев,
И.А.Шехтман

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ
КОМПЛЕКСА ВЭПП-4.
УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА

ПРЕПРИНТ 83-140



НОВОСИБИРСК

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ КОМПЛЕКСА ВЭШ-4.
УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА

В.Г.Вешеревич, М.М.Карлинер, Е.В.Козырев, И.Г.Макаров
В.М.Меджидзаде, О.А.Нежевенко, Г.Н.Острейко, Б.З.Персов,
Г.В.Сердобинцев, И.А.Шехтман

АННОТАЦИЯ

Изложены соображения по выбору параметров и режима работы ускоряющей структуры электронного линейного ускорителя (ЛУ). Описана конструкция ускоряющей структуры, ее настройка, испытания, а также работа с пучком на комплексе ВЭШ-4. Отмечены особенности работы ЛУ в режимах инжекции позитронов и электронов.

В 1974 году в Институте ядерной физики начались работы по созданию позитронного источника, в котором позитроны получают-ся путем конверсии электронов, ускоренных в сильноточном (20+30 А) линейном ускорителе (ЛУ) до энергии 30+70 МэВ [1]. Последующее ускорение позитронов до энергии инъекции накопителя ВЭП-3 производится в синхротроне Б-4. В 1978 году система была введена в эксплуатацию на комплексе ВЭП-3-ВЭП-4 [2] и надежно работает до настоящего времени, обеспечивая необходимое число позитронов.

1. Ускоряющая структура ЛУ

Длительность импульсов электронного тока, ускоряемого в ЛУ, определяется временем однооборотной инъекции в Б-4 (~25нс). Малая длительность импульсов и большая величина ускоряемого тока обусловили режим ускорения электронов в ЛУ за счет энергии электромагнитного поля, накопленной в его ВЧ структуре. При указанных параметрах электронного пучка для его ускорения необходима энергия 20+50 Дж. Энергия, накопленная в ЛУ, должна быть в несколько раз больше, и это требует работы ВЧ структуры ЛУ в дециметровом диапазоне длин волн. Конкретное значение длины волны обусловлено тем, что к моменту начала разработки системы в Институте имелась действующая импульсная модель нового мощного ВЧ источника - гирокона, работающая на частоте 429,5 МГц.

Из двух возможных вариантов работы ускоряющей структуры ЛУ: на бегущей и на стоячей волне - последний является предпочтительным, т.к. он обеспечивает большую гибкость системы. Структура на стоячей волне [3] позволяет легко изменять длину структуры или длительность импульса накачки без ухудшения КПД системы. При этом не требуется менять связь между резонаторами структуры ЛУ, необходимо подобрать лишь связь ЛУ с гироконом.

Систему: выходной резонатор гирокона и ЛУ - при правильной настройке можно, в первом приближении, представить на рабочей частоте эквивалентным колебательным контуром. Связь ЛУ с гироконом подбирается такой, чтобы к моменту окончания импульса тока источника питания гирокона T напряжение достигало величины U_0 , определяемой энергией пучка в гирокоме, т.е. чтобы электронный КПД достигал максимальной величины.

Представляют интерес некоторые энергетические характеристики системы, важные при работе на запасенной энергии. Это, во-первых, отношение энергии, отдаваемой источником, $W_{и} = U_0 I_n T$ (I_n — ток пучка в гироконе), к энергии, накопленной в системе $W_{у} = U^2 / (2\rho\omega)$ (где ρ — характеристическое сопротивление системы):

$$\frac{W_{и}}{W_{у}} = \frac{2 \frac{T}{\tau}}{1 - e^{-T/\tau}}. \quad (1)$$

Во-вторых, это отношение мощности источника $P_{и} = U_0 I_n$ при длительности накачки T к мощности $P_{и0}$, необходимой в непрерывном режиме работы ($T \rightarrow \infty$) для получения заданного запаса энергии $W_{у}$ в системе:

$$\frac{P_{и}}{P_{и0}} = \frac{1}{1 - e^{-T/\tau}}. \quad (2)$$

Здесь, как и в (1), τ — постоянная времени ВЧ структуры ЛУ.

Графики зависимостей (1) и (2) от T/τ показаны на рис. 1.

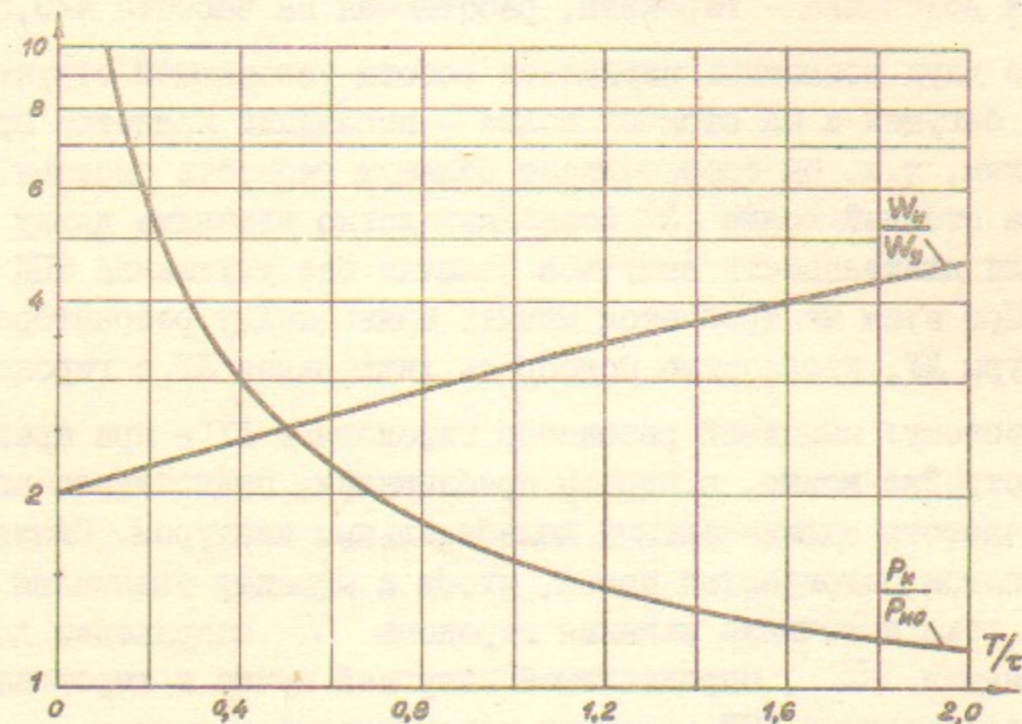


Рис. 1. Энергетические характеристики ЛУ в зависимости от длительности импульса накачки.

Из графиков видно, что энергетически выгоднее работать при малых величинах T/τ , однако при этом резко возрастает мощность источника. Из компромиссных соображений целесообразно работать в области $T/\tau = (0,3+1)$.

Ускоряющая структура ЛУ представляет собой цепочку связанных друг с другом резонаторов. Как известно, система из N связанных резонаторов имеет N резонансных частот, так называемых частот связи, одна из которых является рабочей. Вид колебаний на этих частотах характеризуется величиной φ — среднего фазового сдвига поля на один резонатор структуры. Значения φ лежат в пределах от 0 до π . Резонансные частоты определяются соотношением [3]:

$$f_q = \frac{f_0}{\sqrt{1 + k_{св} \cos \varphi_q}}, \quad (3)$$

где $k_{св}$ — коэффициент связи между резонаторами структуры, $\varphi_q = \pi q / (N-1)$, q — номер моды колебаний, $q = 0, 1, 2, \dots, N-1$; f_0 — центральная частота дисперсионной характеристики структуры, т.е. частота $\pi/2$ -моды.

При возбуждении структуры короткими ВЧ импульсами, помимо рабочего вида колебаний, могут возбуждаться и другие моды, если их частоты близки к рабочей. Это приводит к искажению правильного распределения поля в структуре и к снижению эффективности ускорения. Расстояние до соседних резонансных частот зависит от рабочего вида колебаний, количества резонаторов в структуре N и коэффициента связи $k_{св}$. Это расстояние максимально вблизи моды $\pi/2$, поэтому $\pi/2$ -мода и выбрана в качестве рабочей.

Разница между соседними частотами должна удовлетворять условию:

$$\Delta f = |f_q - f_0| \gg \frac{1}{T}, \quad (4)$$

где f_q — частота моды, ближайшей к рабочей моде $\pi/2$.

С учетом (3) получаем условие для выбора коэффициента

СВЯЗИ:

$$k_{св} \gg \frac{2}{f_0 T \sin \frac{\pi}{N-1}} \quad (5)$$

Так, при $T = 4$ мкс, $N = 23$ $k_{св} \gg 0,9\%$.

Справедливость приведенных рассуждений и оценок может быть подтверждена анализом переходного процесса в секции ЛУ. Нормированное напряжение в n -м резонаторе структуры можно представить в виде:

$$x_n = \sum_{q=0}^{N-1} A_q \cos \frac{\pi n q}{N-1} e^{-d_q t} \cos(\omega_q t + \theta_q) + B_n \cos(\omega t + \psi_n). \quad (6)$$

Здесь $d_q = \frac{1}{\tau_q} = \frac{\omega_q}{2Q}$, Q - добротность, $x_n = \sqrt{2C_n} \cdot U_n$, где U_n - напряжение на n -м резонаторе, C_n - эквивалентная емкость.

Связь между амплитудами и фазами свободных и вынужденных колебаний находится из начальных условий и выражается соотношениями:

$$\psi_n = \arctg \frac{\sum_{q=0}^{N-1} A_q \cos \frac{\pi n q}{N-1} \sin \theta_q}{\sum_{q=0}^{N-1} A_q \cos \frac{\pi n q}{N-1} \cos \theta_q} \quad (7)$$

$$B_n = -\frac{1}{\sin \psi_n} \sum_{q=0}^{N-1} A_q \cos \frac{\pi n q}{N-1} \sin \theta_q. \quad (8)$$

С учетом токов возбуждения амплитуды и фазы собственных функций структуры могут быть найдены по формулам [3]:

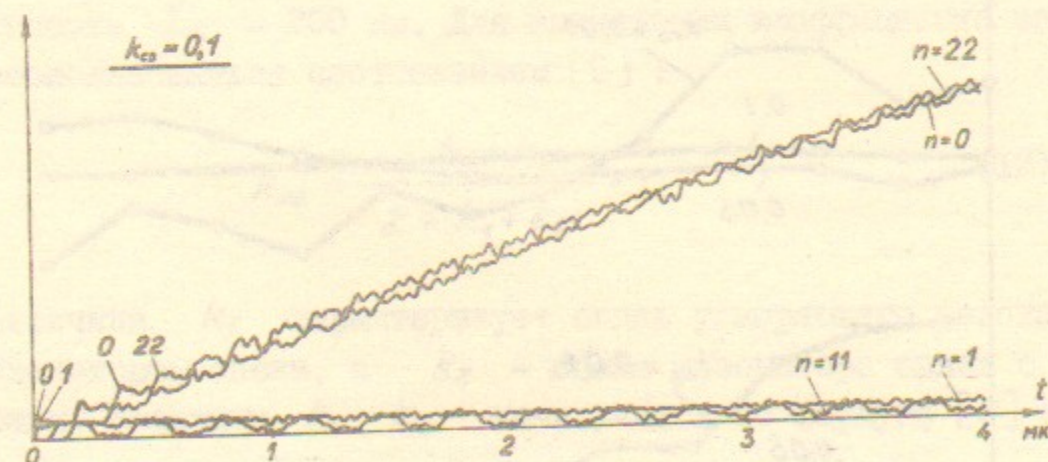
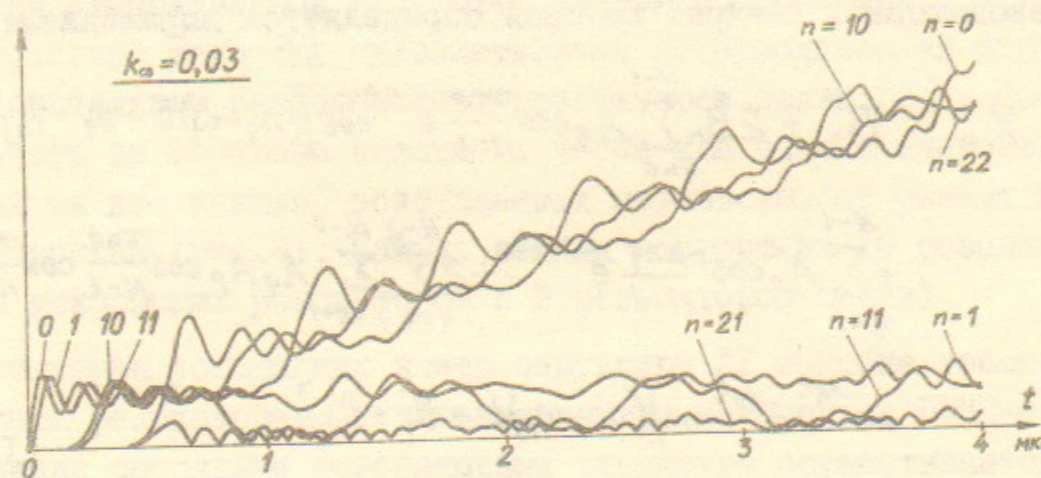
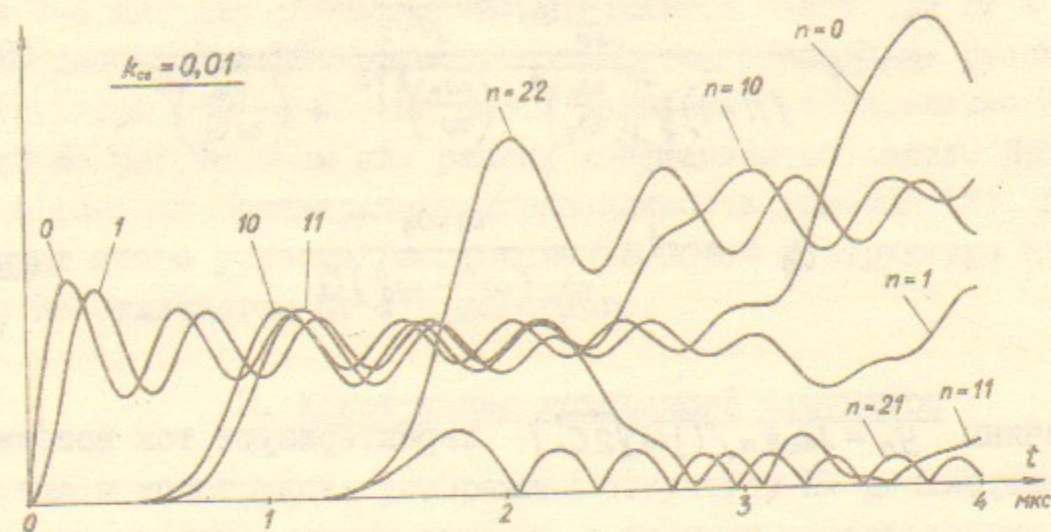


Рис.2. Огибание нормированного напряжения на резонаторах структуры ЛУ с различными коэффициентами связи при накачке.

$$A_q = \frac{2 \sum_{n=0}^{N-1} y_n \cos \frac{\pi n q}{N-1}}{(N-1) \sqrt{\left[\left(\frac{\omega_0}{\omega_q} \right)^2 - \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{\omega_0}{\omega Q} \right)^2}}, \quad (9)$$

$$\theta_q = \arctg \frac{\omega \omega_q}{\omega_0 (\omega^2 - \omega_q^2) Q}. \quad (10)$$

Величины $y_n = I_{\text{св.н.}} / (j\omega \sqrt{2C_n})$ характеризуют ток возбуждения структуры.

Представляет интерес огибающая нормированного напряжения на резонаторах, квадрат которой определяется выражением:

$$\begin{aligned} X_n^2 = & B_n^2 + 2B_n \sum_{q=0}^{N-1} A_q \cos \frac{\pi n q}{N-1} e^{-dq t} \cos [(\omega_q - \omega)t + \theta_q - \psi_n] + \\ & + \sum_{q=1}^{N-1} A_q^2 \cos^2 \frac{\pi n q}{N-1} e^{-2dq t} + 2 \sum_{q=0}^{N-2} \sum_{p=q+1}^{N-1} A_q A_p \cos \frac{\pi n q}{N-1} \cos \frac{\pi n p}{N-1} \times \\ & \times e^{-dq t} e^{-dp t} \cos [(\omega_q - \omega_p)t + \theta_q - \theta_p]. \end{aligned} \quad (11)$$

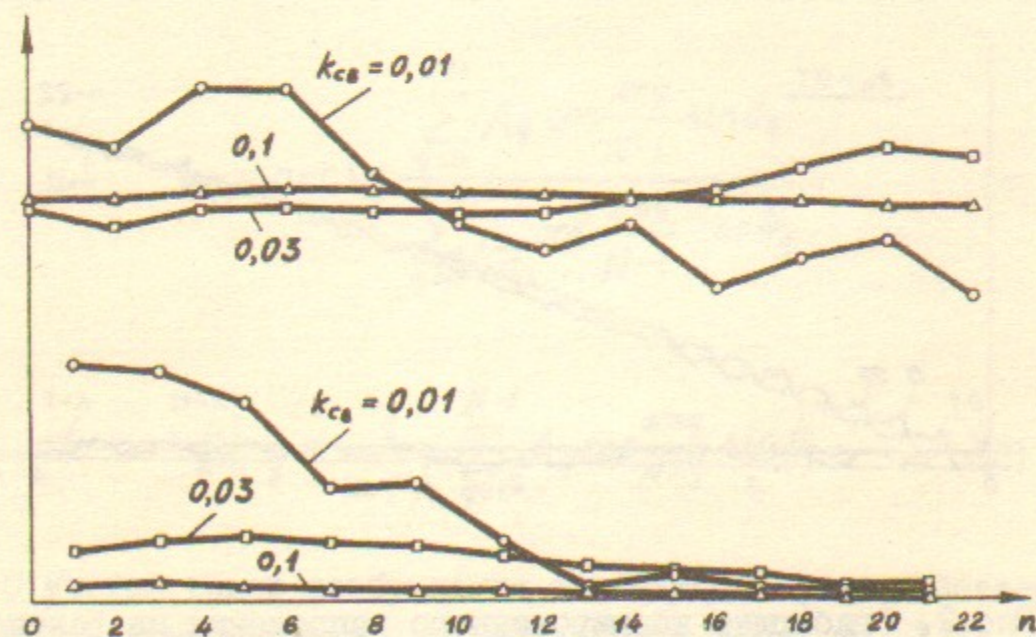


Рис.3. Распределение нормированных амплитуд напряжения по резонаторам структуры в конце импульса накачки $T = 4$ мкс.

На рис.2 показаны временные зависимости огибающих нормированного напряжения на резонаторах структуры ЛУ в интервале времени 0–4 мкс для различных коэффициентов связи при $N = 23$. Предполагается, что ВЧ мощность подводится к крайнему резонатору структуры ($n = 0$). На рис.3 показано распределение напряжений по резонаторам для разных коэффициентов связи. Приведенные рисунки подтверждают справедливость условия (5). При выполнении этого условия распределение полей в структуре практически не отличается от стационарного.

2. Конструкция ускоряющей структуры

Схема и конструкция ускоряющей структуры ЛУ должны обеспечивать большую накопленную энергию и высокую электрическую прочность при относительной простоте. Данным требованиям при выбранной рабочей моде $\pi/2$ удовлетворяет бипериодическая структура с аксиальным расположением резонаторов связи [4]. Поскольку мощность из гироконя выводится через два вывода энергии, ЛУ разделен на две секции, возбуждаемых независимо от разных выводов гироконя (рис.4). Каждая секция состоит из 19 резонаторов (10 ускоряющих резонаторов и 9 резонаторов связи).

Геометрия ускоряющих ячеек структуры ЛУ подобна геометрии ускоряющих резонаторов, установленных на накопителе ВЭП-4 [5]. Связь между соседними резонаторами структуры осуществляется при помощи двух щелей в боковых стенках, имеющих азимутальную протяженность $l_{\text{щ}} = 200$ мм. Для вычисления коэффициента связи можно воспользоваться соотношением [6]:

$$k_{\text{св}} = \frac{k_1 + k_2}{2 + k_1 + k_2}. \quad (12)$$

Здесь величина k_1 характеризует связь ускоряющего резонатора с резонатором связи, а k_2 – связь резонатора связи с ускоряющим. Величины k_1, k_2 вычисляются по формуле [6]:

$$k_{1,2} = \frac{N_{\text{щ}} \tilde{H}_{1,2}^2(r_{\text{щ}}) \lambda^3}{44,8 V_{1,2}} \left(2 \operatorname{tg} \frac{2\pi l_{\text{щ}}}{\lambda} - \frac{2\pi l_{\text{щ}}}{\lambda} \right), \quad (13)$$

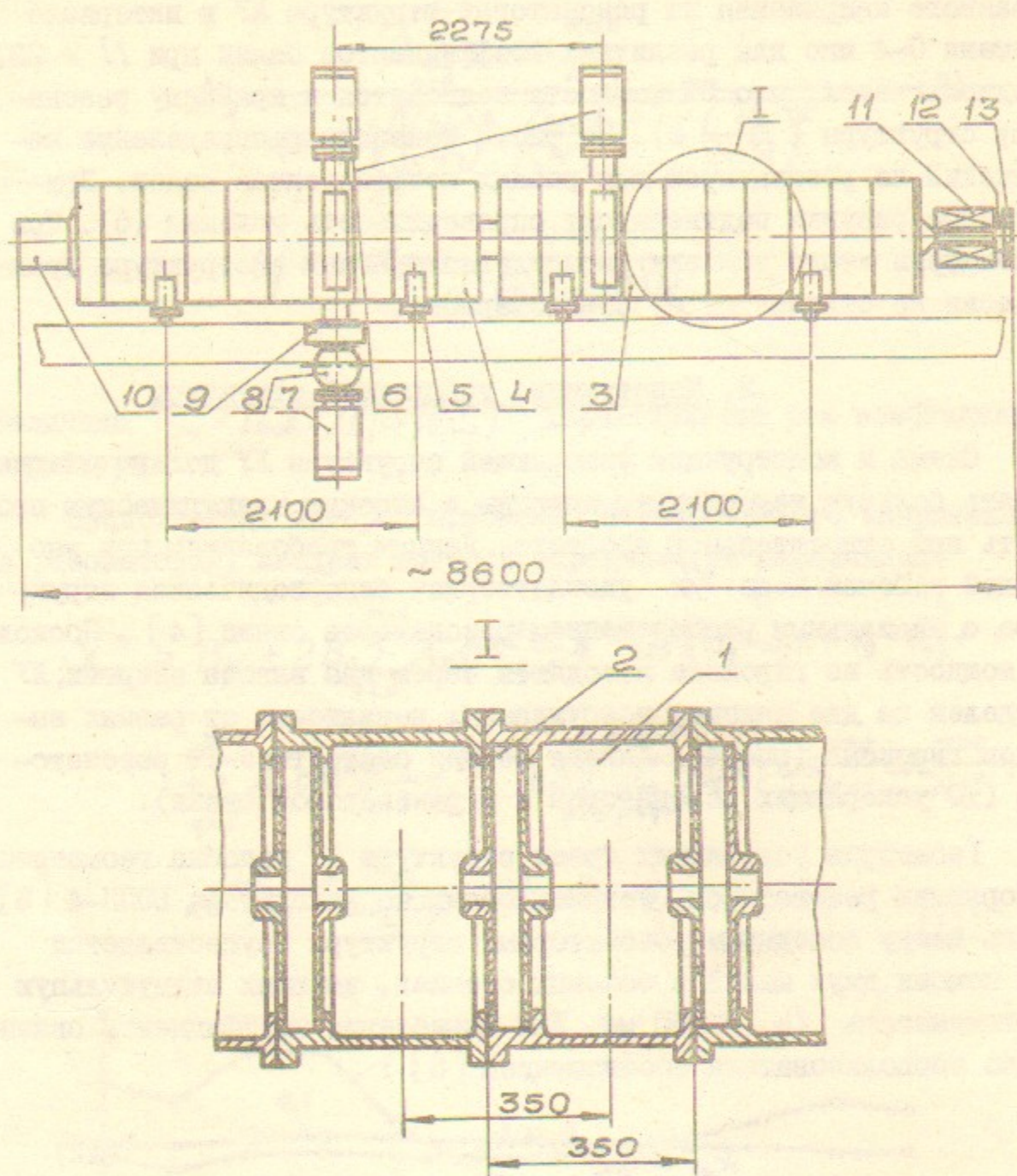


Рис.4. Линейный ускоритель (конструктивная схема).

I — ускоряющий резонатор; 2 — резонатор связи;
 3,4 — секции ЛУ; 5 — регулируемые опоры; 8 — азотная ловушка; 9 — вакуумный шибер; 10 — инжектор;
 II, I3 — магнитные линзы; I2 — конвертер.

где λ — длина волны, $N_{\text{ш}}$ — число щелей связи, V_1, V_2 — объемы ускоряющего резонатора и резонатора связи соответственно, $\tilde{H}_1(r_{\text{ш}}), \tilde{H}_2(r_{\text{ш}})$ — отношения величины магнитного поля на радиусе щели $r = r_{\text{ш}}$ к магнитному полю при $r = r_{\text{max}}$ в каждом из резонаторов.

Вычисления для резонаторов ЛУ дают величины:

$$k_1 = 0,0335; \quad k_2 = 0,1728; \quad k_{\text{св}} = 0,0935 = 9,35\%.$$

Поскольку потери в структуре ЛУ не являются параметром первостепенной важности, цилиндрические детали наружного корпуса ЛУ изготовлены из алюминиевого сплава АК6. Этот сплав имеет удельную проводимость в 2,3 раза меньше, чем медь, но позволяет облегчить и удешевить конструкцию. Торцевые стенки резонаторов изготовлены из меди М1, т.к. она обеспечивает большую электрическую прочность. С этой же целью медные стенки обработаны путем механической полировки вольфрамовой проволокой и электрохимической полировки до шероховатости, соответствующей $R_a = (0,16-0,32)$ мкм. Стенки соединяются с обечайками через прокладки из индиевой проволоки, обеспечивающей высококачественный ВЧ контакт [7].

Конструктивно каждая секция ЛУ собирается из отдельных блоков длиной $\lambda/2$, в состав которых входят ускоряющий резонатор и резонатор связи. Блоки соединены между собой также через индиевые прокладки. В состав структуры ЛУ входят блоки трех типов: основные блоки (рис.5) — 17 штук, технические блоки (рис.6) — 2 шт. и инжекционный блок (рис.7) — 1 шт. В каждом блоке предусмотрены измерительные петли для контроля напряжения в резонаторах и неоперативные элементы подстройки индуктивного характера типа плунжеров для компенсации разбросов собственных частот резонаторов. Инжекционный блок представляет собой половину основного ускоряющего резонатора. В ускоряющем резонаторе технического блока установлен подстроечный элемент большого объема с электромеханическим приводом, предназначенный для коррекции частоты секции в целом. В этом же резонаторе предусмотрены отверстия для вакуумной откачки всей секции и отверстие связи с вакуумированным прямоугольным волноводом сечения 420×80 мм², по которому подводится ВЧ мощность от гирокорректора.

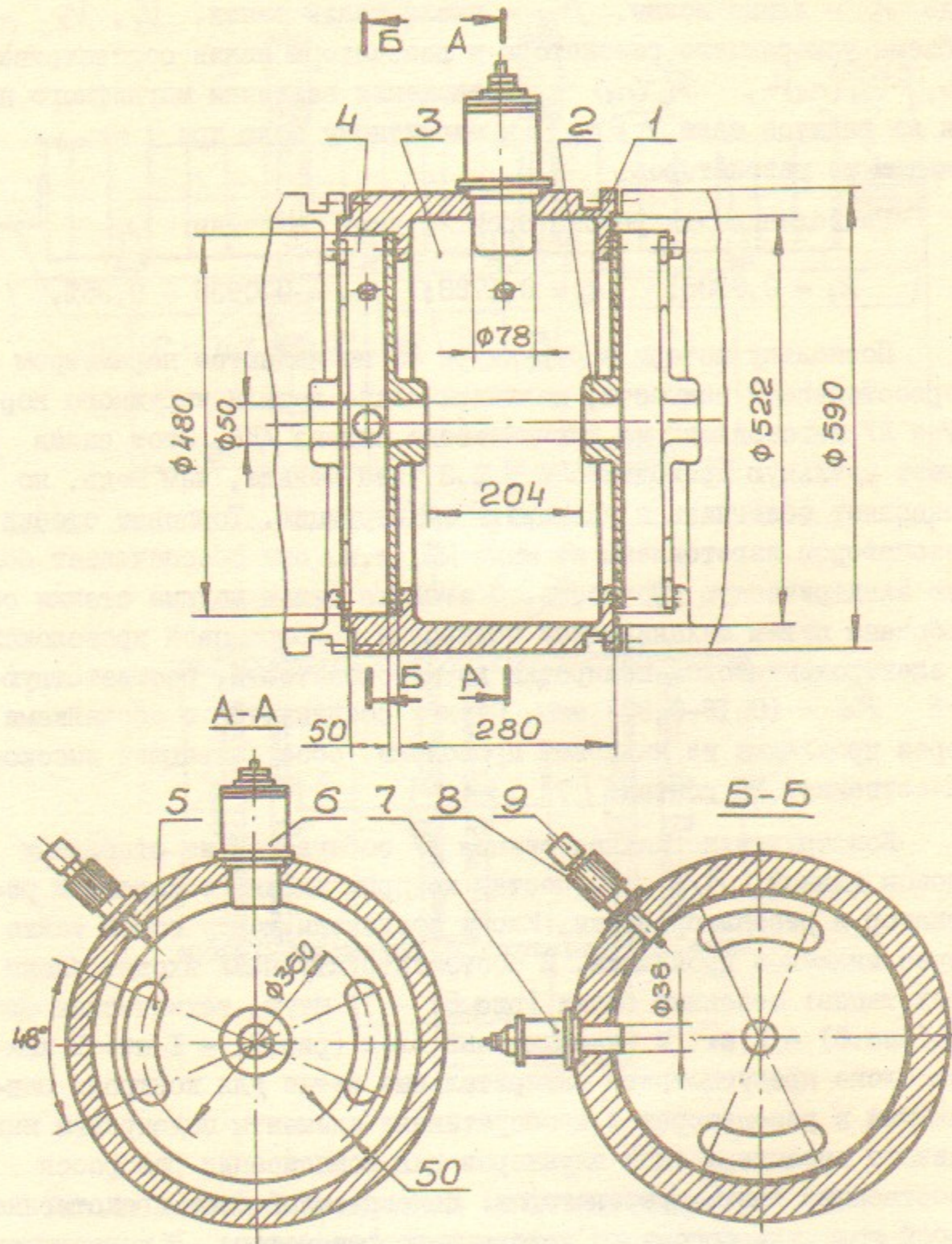


Рис.5. Основной резонаторный блок.

1 - корпус; 2 - торцевая стенка; 3 - полость ускоряющего резонатора; 4 - полость резонатора связи; 5 - щели связи; 6 - устройство подстройки частоты ускоряющего резонатора; 7 - устройство подстройки частоты резонатора связи; 8 - измерительная петля; 9 - ВЧ разъем.

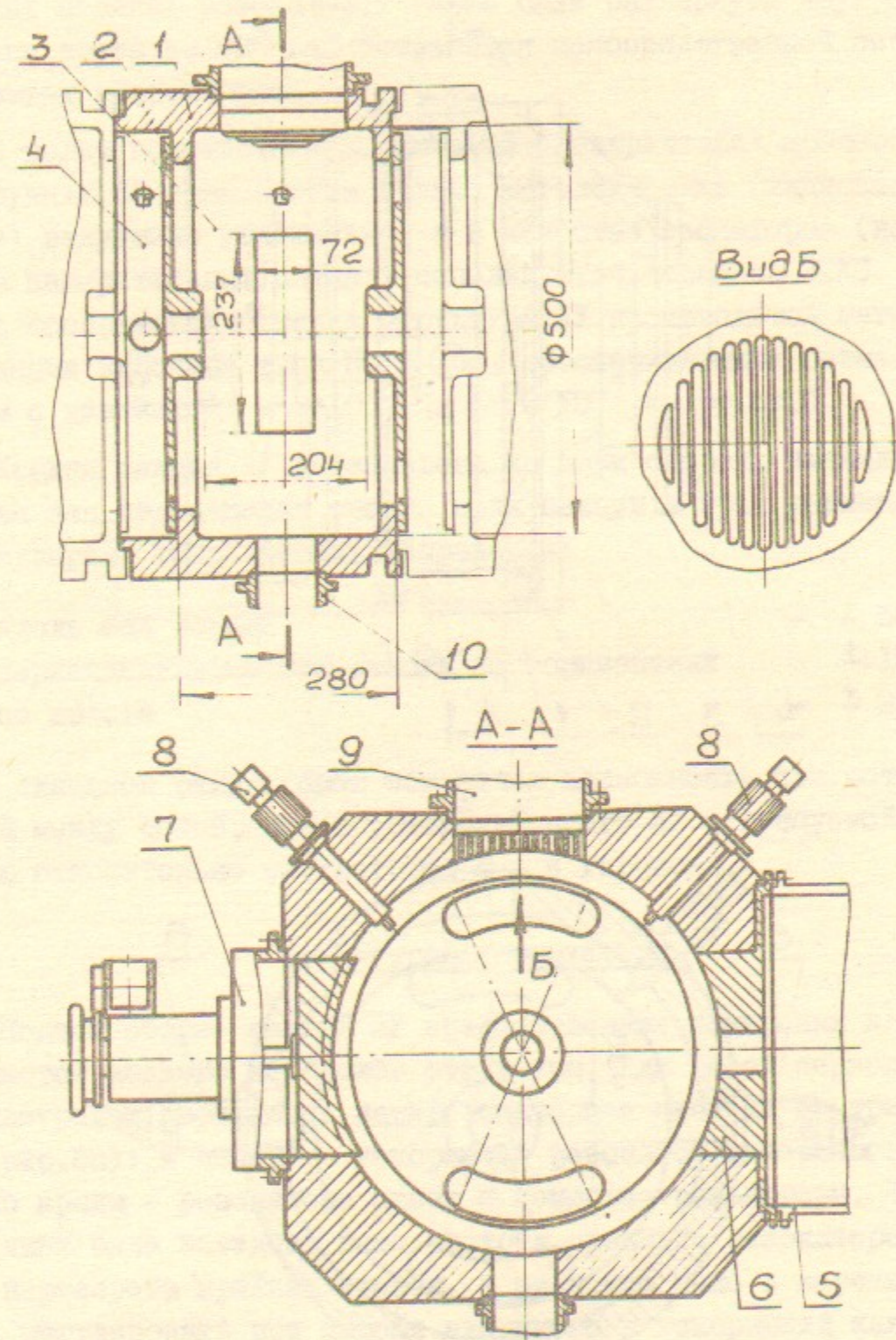


Рис.6. Технический резонаторный блок.

1 - корпус; 2 - торцевая стенка; 3 - полость ускоряющего резонатора; 4 - полость резонатора связи; 5 - волновод; 6 - вставка с отверстием связи; 7 - механизм подстройки частоты секции; 8 - измерительные петли; 9,10 - патрубки для подсоединения вакуумных насосов.

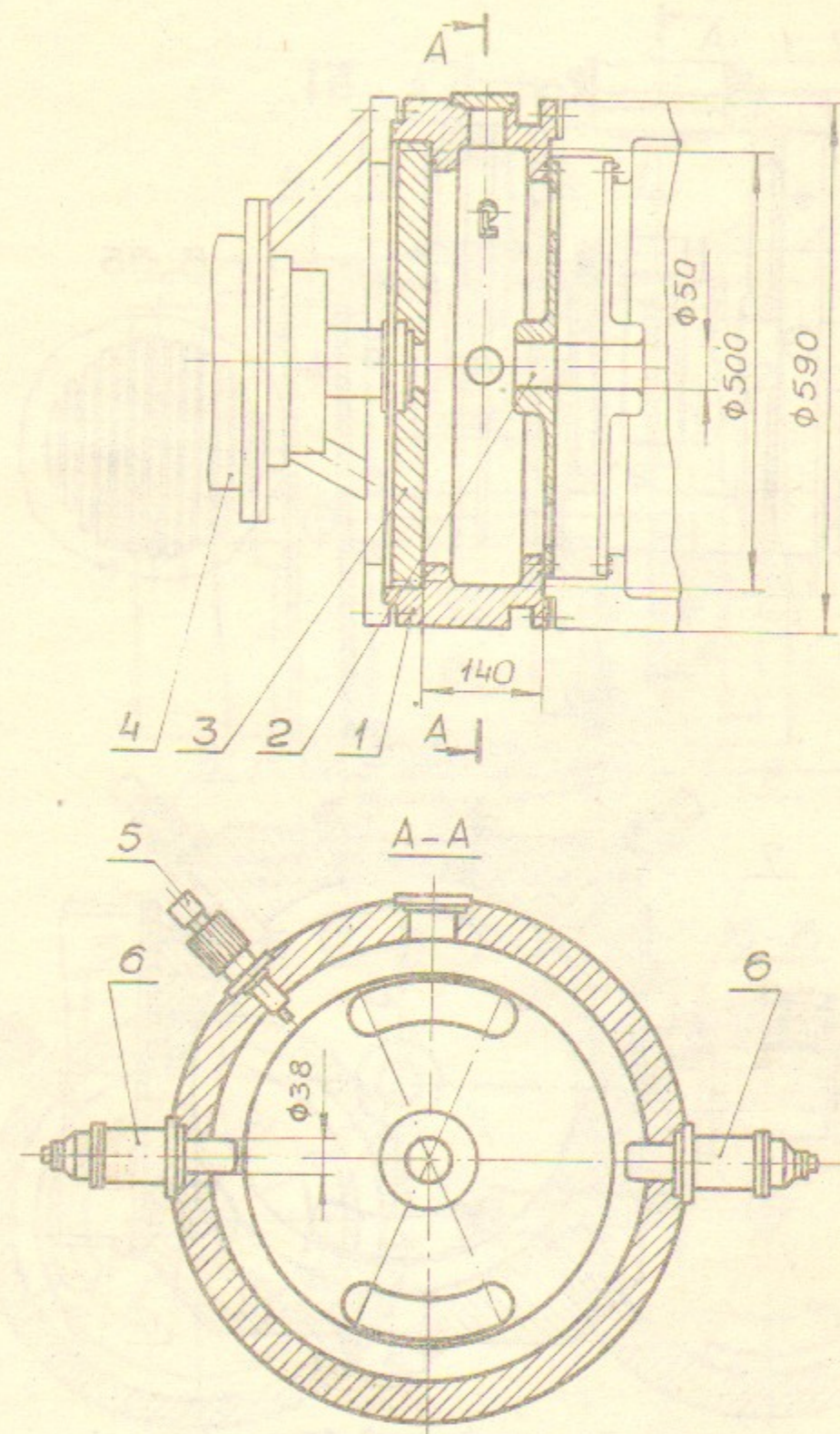


Рис.7. Инжекционный резонаторный блок.
 1 - корпус; 2 - торцевая стенка со щелями связи;
 3 - наружная торцевая стенка; 4 - инжектор; 5 - измерительная петля; 6 - устройство подстройки частоты.

Сборка структуры производится так, чтобы щели на противоположных стенках резонаторов связи были развернуты друг относительно друга на 90° для устранения непосредственной связи ускоряющих резонаторов.

С целью получения максимальной электрической прочности в конструкции ЛУ применяются только металлические (индиевые и медные) вакуумные уплотнения, а в качестве изоляторов (например, в измерительных петлях) используется керамика 22ХС. Из тех же соображений откачка структуры ЛУ производится магнито-разрядными насосами типа НОРД-250, обеспечивающими безмасляный вакуум с давлением $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ Па ($\sim 3 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст.).

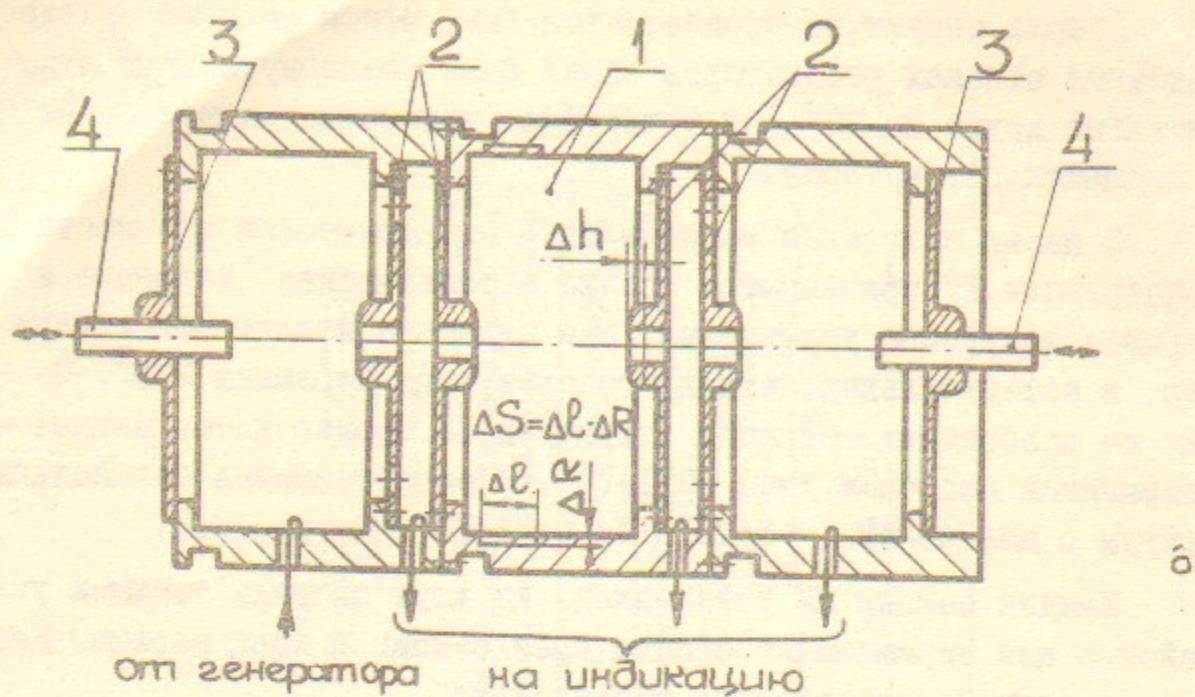
Каждая секция ЛУ установлена на двух опорах, имеющих устройства для перемещения своего края секции в трех взаимно перпендикулярных направлениях в пределах:

вдоль оси секции	- ± 50 мм
перпендикулярно оси секции по горизонтали	- ± 15 мм
по высоте	- ± 25 мм

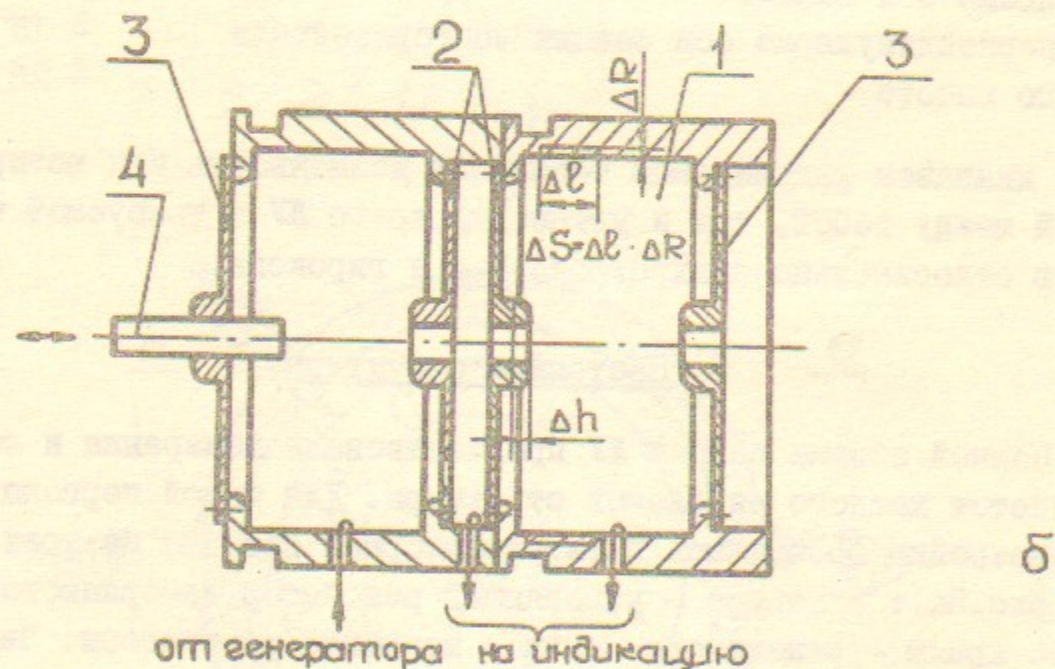
Такой диапазон регулировок обеспечил возможность как юстировки секций между собой, так и установки всего ЛУ с требуемой точностью относительно синхротрона Б-4 и гироконя.

3. Настройка структуры

Полной сборке секций ЛУ предшествовали измерения и коррекция частот каждого из блоков структуры. Для такой первоначальной настройки собиралась пятирезонаторная система из трех блоков (рис.8а): в центре - ускоряющий резонатор измеряемого блока, по краям - резонаторы связи и концевые резонаторы. Частота последних была заведомо выше частоты среднего резонатора за счет переворота крайних стенок, и ее можно было в широких пределах регулировать при помощи вводимого в ускоряющий зазор емкостного штыря. Таким способом, по минимуму сигнала в резонаторах связи на частоте моды $\pi/2$, крайние резонаторы настраивались на частоту среднего, затем рассчитывалась коррекция размеров среднего резонатора. Правильность настройки резонаторов связи оценивалась по симметричности дисперсионной характеристики структуры. Частоты концевых резонаторов измерялись и



от генератора на индикацию



от генератора на индикацию

Рис.8. Сборки для измерения частот резонаторов структуры ЛУ.
 1 - измеряемый резонатор; 2 - стенки со щелями связи;
 3 - стенки без щелей связи; 4 - емкостный штырь.
 Указаны области проточек для подгонки частоты.

подгонялись по измерениям частоты $\pi/2$ - моды трехрезонаторной системы (рис.8б).

Подгонка частоты резонаторов осуществлялась проточкой обечайки или укорочением центральных выступов (см.рис.8). Для ускоряющих резонаторов ЛУ соответствующие коэффициенты коррекции составляют:

$$\frac{\Delta h}{\Delta f} = -0,68 \text{ мм/МГц}, \quad (14)$$

$$\frac{\Delta S}{\Delta f} = 1,78 \text{ см}^2/\text{МГц}.$$

Здесь $\Delta f = f - f_0$ - отклонение частоты f резонатора от заданной частоты $f_0 = 429,5$ МГц.

Окончательная настройка секций в сборе производилась с помощью конструктивных подстроечных элементов. На рис.9 показана дисперсионная кривая одной из секций ЛУ до и после настройки. Коэффициент связи структуры, вычисленный по результатам измерений дисперсионной характеристики с помощью формулы

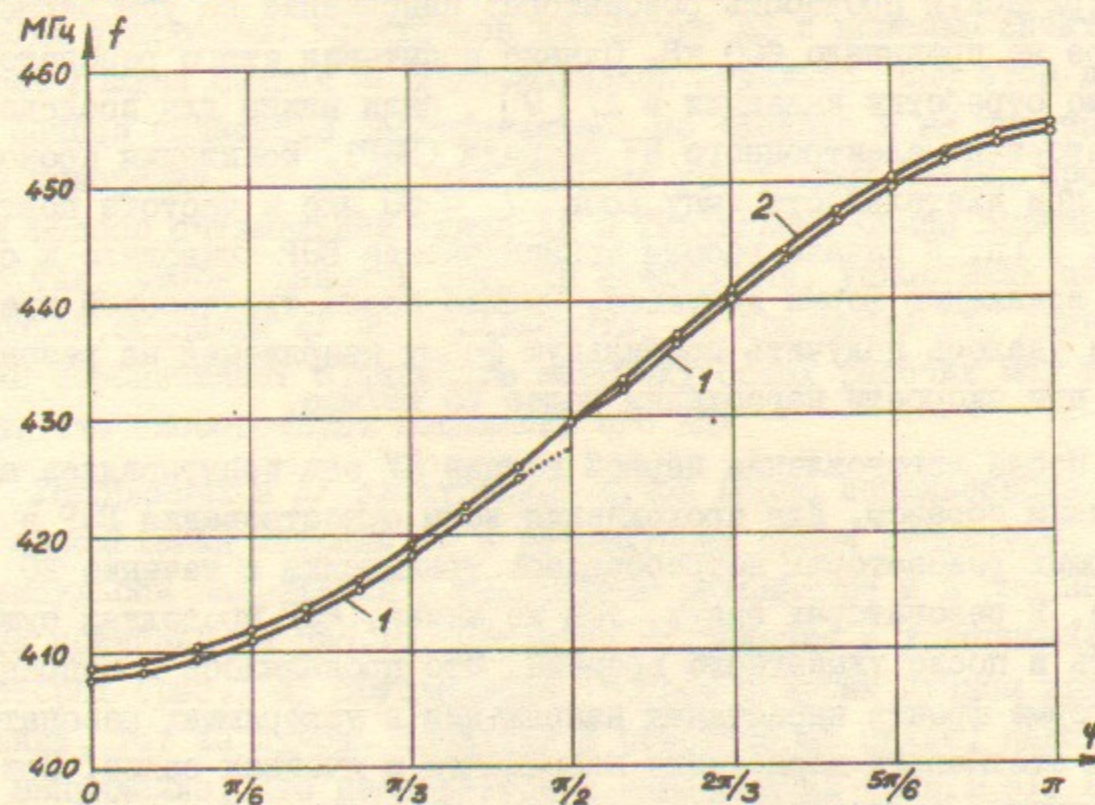


Рис.9. Дисперсионная характеристика одной из секций ЛУ.
 Кривая 1 - до настройки.
 Кривая 2 - после настройки.

$$k_{св} = \frac{f_{\pi}^2 - f_{2\pi}^2}{f_{\pi}^2 + f_{2\pi}^2}, \quad (15)$$

составляет $k_{св} = 10,6\%$, что хорошо согласуется с расчетом по выражению (12). В формуле (15) f_{π} и $f_{2\pi}$ — частоты π -моды и 2π (или нулевой) моды соответственно.

Добротность структуры ЛУ на моде $\pi/2$ составляет 20100, что примерно на 9% ниже добротности отдельного резонатора с глухими стенками ($Q_{об} = 22000$). Это уменьшение добротности, т.е. увеличение ВЧ потерь, обусловлено, в основном, искажением линий ВЧ токов в боковых стенках щелями связи.

4. Испытания структуры и работа с пучком

До испытания структуры в целом были проведены испытания отдельного инжекционного резонатора, который отличался от рабочего тем, что был изготовлен целиком из алюминиевого сплава. Ограниченная ВЧ мощность (< 200 кВт) не позволяла проверить электрическую прочность резонатора: напряжение на ускоряющем зазоре не превышало 600 кВ. Однако испытания этого резонатора, помимо отработки инъекции в ЛУ [9], были важны для исследования вторично-электронного ВЧ разряда (ВЭР). Испытания проводились при длительности импульсов $T = 50$ мкс и частоте повторения 5 Гц. В начале работы возникновение ВЭР приводило к сильному искажению формы импульса. Однако после трехчасовой тренировки удалось получить правильную форму напряжения на резонаторе при скорости нарастания более 40 кВ/мкс.

После изготовления первой секции ЛУ она испытывалась аналогичным образом. Для прохождения зоны существования ВЭР в ускоряющих резонаторах потребовалась тренировка в течение 20 часов. В резонаторах связи, тем не менее, ВЭР продолжал существовать и после указанного времени. Это проявлялось в неправильной форме фронта нарастания напряжения в ускоряющих резонаторах и отставании нарастания напряжения в ячейках связи. При последующих включениях без развакуумирования время тренировки ВЭР было существенно меньше (1+3 часа). Данные результаты поз-

воляли надеяться на то, что ВЭР не будет препятствовать нормальной работе ЛУ, несмотря на отсутствие специальных мер для его подавления.

Действительно, возбуждение обеих ускорительных секций от гирокона на высоком уровне мощности (до 65 МВт при $T = 11$ мкс) показало, что ВЭР не препятствует нормальной работе ЛУ, хотя после сборки (или переборки) требуется тренировка структуры ЛУ в течение суток. В начале тренировки возникающий ВЭР вызывает значительное ухудшение вакуума, что ограничивает частоту повторения импульсов на уровне 0,1 Гц. По мере тренировки частоту повторения постепенно повышают до 1 Гц, при этом поднимают и напряжение на резонаторах структуры. В конце тренировки, при выходе на максимальную мощность, наблюдаются пробои, но их число невелико и они вскоре пропадают. Развакуумирование ЛУ без переборки практически не ухудшает тренированность структуры, и при новом цикле работы повторная тренировка не требуется, на максимальном уровне наблюдается лишь около десятка пробоев. Это говорит о запасе электрической прочности структуры ЛУ.

Первоначальная калибровка датчиков напряжения, установленных в ускоряющих резонаторах ЛУ, производилась по измерению энергии ускоренных электронов на выходе ЛУ с помощью спектрометра. Каждая секция ЛУ калибровалась отдельно, при этом другая секция полностью расстраивалась по частоте и не участвовала в ускорении. По измерению энергии ускоренных частиц проводилась и подбор оптимальной связи ЛУ с гироконом. Связи выравнивались так, чтобы разность энергий электронов, ускоренных первой и второй секциями ЛУ по отдельности, не превышала 4%. Данный режим обеспечивает одинаковую загрузку обеих рабочих мод гирокона, что способствует повышению его КПД.

Ускоряемый в ЛУ электронный пучок можно использовать и для определения напряжений в резонаторах связи структуры. Форма импульсов напряжения в ускоряющем резонаторе и в резонаторе связи показана на рис.10. Подсадка напряжения в ускоряющих резонаторах (рис.10а) обусловлена отбором энергии пучком при ускорении. Тот же пучок, пролетая в резонаторах связи, наводит на них напряжение, что наблюдается в виде скачка (рис.10б). Величина подсадки измеряется с помощью датчиков в ускоряющих резонаторах, прокалиброванных по энергии частиц. Величина скачка в

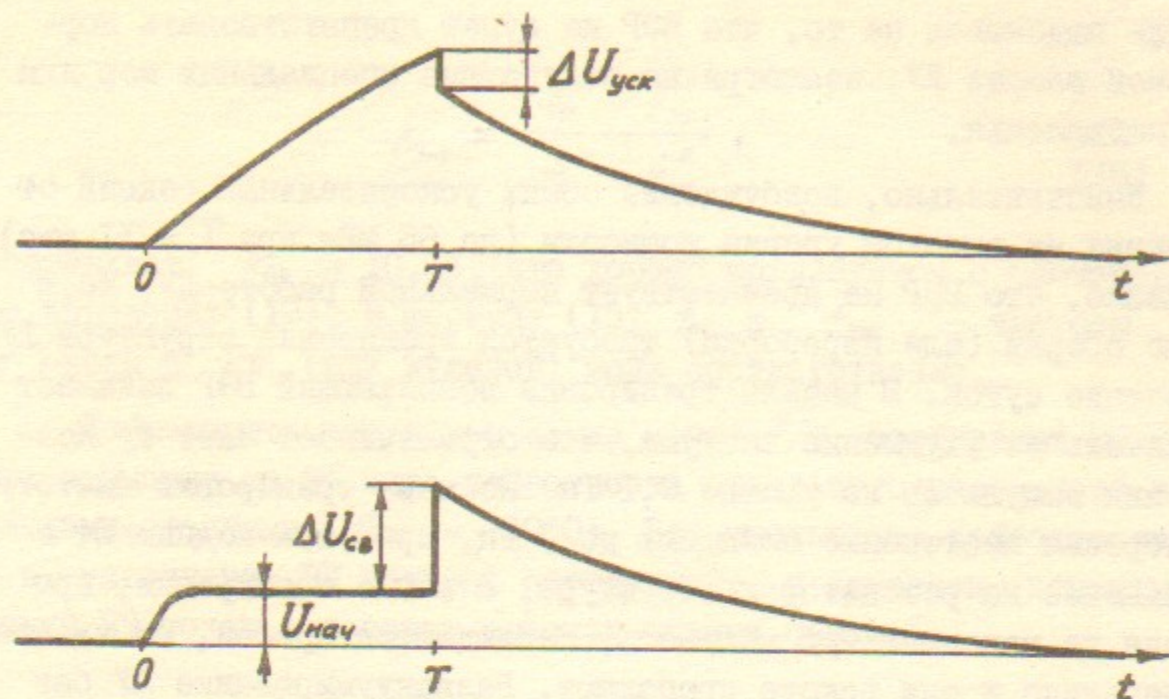


Рис.10. Форма импульсов напряжения в резонаторах ЛУ при ускорении пучка:

- а) в ускоряющем резонаторе;
 б) в резонаторе связи.

резонаторах связи связана с подсадкой в ускоряющих резонаторах следующим образом:

$$\Delta U_{св} = \frac{r_{св}}{r_{уск}} |\Delta U_{уск}| = 0,17 |\Delta U_{уск}| \quad (16)$$

где $r_{св}$ и $r_{уск}$ — характеристические сопротивления резонаторов.

Затем по соотношению $\Delta U_{св}$ и начального уровня $U_{нач}$ (рис.10б) можно найти $U_{нач}$, т.е. напряжения в резонаторах связи без пучка, обусловленные проходящей ВЧ мощностью и неточностями настройки. Согласно измерениям, напряжения в резонаторах связи при максимальной мощности составляют 25 ± 100 кВ. Суммарная энергия, содержащаяся в резонаторах связи, составляет при этом ~ 6 Дж. Напряжение в ускоряющих резонаторах в данном режиме достигает 3,2 МВ, что соответствует максимальной напряженности поля на поверхности 31 МВ/м. Запасенная энергия во

всех ускоряющих резонаторах составляет 180 Дж.

При первоначальной сборке структуры ЛУ щели связи в противоположных стенках ускоряющих резонаторов были развернуты друг относительно друга на 90° . Оказалось, что искажение электрического поля щелями заметно влияет на пучок, приводя к сильной вытянутости пучка в поперечном направлении, в отношении более 5:1 [8], что снижает эффективность конверсии. После переборки структуры ЛУ, в процессе которой щели в ускоряющих резонаторах были сориентированы одинаково (а в резонаторах связи оставлены по-прежнему развернутыми на 90°), поперечная асимметрия пучка полностью исчезла, что увеличило выход позитронов в 1,7 раза.

В режиме инжекции электронов пучок ускоряется в первой секции ЛУ и тормозится во второй. В результате энергия электронов на выходе ЛУ составляет 7 МэВ, что соответствует энергии инжекции в синхротрон Б-4. Работа ЛУ на накопленной энергии позволяет реализовать такой режим после окончания импульса накачки, когда в ускоряющей структуре остаются только затухающие свободные колебания. При этом вторая секция перестраивается по частоте относительно первой, а ускорение электронов производится в момент времени, когда напряжения в секциях оказываются противофазными. Перестройка осуществляется прогибом стенки последнего ускоряющего резонатора второй секции ЛУ.

В настоящее время на ЛУ получена энергия ускоренных электронов до 54 МэВ при токе в импульсе до 33 А.

В таблице I приведены параметры линейного ускорителя и его резонансной структуры.

Таблица I

Параметры линейного ускорителя источника позитронов
комплекса ВЭШ-4

I. Рабочая частота, f_0	429,5 МГц
2. Мода колебаний в структуре	$\pi/2$
3. Коэффициент связи, $k_{св}$	10,6%
4. Число резонаторов в секции, N	19(10+9)
5. Характеристическое сопротивление ускоряющего резонатора, $\rho_{уск}$	200 Ом
6. Коэффициент пролетного времени, $T_{пр}$	0,84
7. Добротность на рабочей моде, Q_0	20100
8. Добротность отдельного резонатора, Q_{00}	22000
9. Постоянная времени структуры, τ	15 мкс
10. Коэффициент перенапряжения, $K_{пер} = E_{max}/E_{уск}$	4,1
11. Максимальная ВЧ мощность гирокона, $P_{и}$	65 МВт
12. Длительность импульса ВЧ накачки, T	11 мкс
13. Максимальное напряжение на одном ускоряющем зазоре, U_1	3,3 МВ
14. Максимальная напряженность электрического поля на поверхности, E_{max}	32 МВ/м
15. Максимальная энергия ускоренных электронов, \mathcal{E}_{max}	54 МэВ
16. Максимальный ускоренный ток в импульсе, I_y	33 А

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.И.Будкер и др. Источник позитронов для накопителя ВЭШ-4. - Труды Пятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, с.280. - М.: "Наука", 1977.
2. С.Б.Вассерман и др. Запуск позитрон-электронного источника для ВЭШ-4. - Труды Шестого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, с.128. - Дубна, 1979.
3. E.A. Knapp et al. Standing wave high energy accelerator structures. - Rev. Sci. Instr., 1968, Vol. 39, No. 7, p. 979.
4. В.Г.Вещеревич и др. Резонансная структура линейного ускорителя электронов на стоячей волне. - Вопросы атомной науки и техники. Серия: линейные ускорители, вып. 2(5), с.17, Харьков, 1977.
5. В.Г.Вещеревич и др. Высокочастотная система накопителя ВЭШ-3 на энергию 3 ГэВ. - Труды четвертого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, с.337. - М.: "Наука", 1975.
6. Справочник по диафрагмированным волноводам. - М.: "Атомиздат", 1977 г.
7. И.Г.Макаров, Б.З.Персов. О переходном сопротивлении разъемных контактов с индиевой прокладкой на высокой частоте. - Препринт ИЯФ 79-15, Новосибирск, 1979.
8. М.М.Карлинер и др. Влияние электромагнитных полей отверстий связи резонаторов на движение частиц в линейном ускорителе электронов. - Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента, вып.1(7), с.16, Харьков, 1981.
9. М.М.Карлинер и др. Сильноточный линейный ускоритель комплекса ВЭШ-4. Динамика пучка. - Препринт ИЯФ 82-18, Новосибирск, 1982.

В.Г.Вещеревич, М.М.Карлинер, Е.В.Козырев,
И.Г.Макаров, В.М.Меджидзаде, О.А.Нежевенко,
Г.Н.Острейко, Б.З.Персов, Г.В.Сердобинцев,
И.А.Шехтман

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ КОМПЛЕКСА
ВЭП-4.
УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА

Препринт
№ 83-140

Работа поступила - 28 октября 1983 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 16.II-1983 г. МН 03399
Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.1,3 печ.л., 1,0 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 140.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90