

1N15-54--33-1 LA

UA 9200603

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР  
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИНФОРМАЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО АТОМНОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ**

**ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНЫХ РЕЗОНАТОРОВ  
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ ПУЧКОВ ЛИНЕЙНЫХ  
РЕЗОНАНСНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ**

1989

УДК 621.484.6

**ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКОВ ЛИНЕЙНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ: Обзор / В.А.Вишняков, В.В.Закутин, А.И.Энков, В.А.Кушнир, А.М.Шендерович. - М.: ЦНИИатоминформ, 1989. - 43 с.**

Работа представляет собой обзор методов управления и измерения параметров пучков линейных резонансных ускорителей с помощью возбуждаемых этим же пучком пассивных СВЧ-резонаторов. Показано, что в ряде случаев целесообразно использовать резонаторы, настроенные не на первую, а на более высокую гармонику рабочей частоты ускорителя. Приведены результаты расчетов и экспериментального исследования методов управления параметрами пучка: регулировки и стабилизации энергии частиц, СВЧ-развертки пучка и стабилизации его параметров на мишени. Описаны методы и реализующие их конкретные устройства для измерения тока и положения пучка, внутримпульсной нестабильности частоты следования ступок, их фазовой протяженности.

Обзор подготовлен и отпечатан в Харьковском ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции физико-техническом институте АН УССР.

Рис.18, список лит. - 41 назв.

Научный редактор кандидат физико-математических наук  
В.А.Шендрик.

Государственный комитет  
по использованию атомной энергии СССР

Центральный научно-исследовательский институт  
информации и технико-экономических исследований  
по атомной науке и технике

ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И  
ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКОВ ЛИНЕЙНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ  
УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

Обзор

По данным отечественной  
и зарубежной печати  
за 1964-1989 гг.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	3
1. Возбуждение пассивных СВЧ-резонаторов пучком линейного резонансного ускорителя электронов . . . . .	4
2. Методы управления параметрами пучка линейного резонансного ускорителя с помощью пассивных резонаторов . . . . .	9
2.1. Регулировка энергии частиц пучка ЛУЭ . . . . .	9
2.2. Стабилизация параметров пучка . . . . .	11
2.3. Фазовая развертка пучка в пассивных резона- торах. Формирование электронных сгустков . . . . .	16
3. Измерение параметров пучка ЛУЭ с помощью пас- сивных резонаторов . . . . .	25
3.1. Резонаторные датчики тока и положения пучка. . . . .	26
3.2. Измерение нестабильности частоты следования электронных сгустков . . . . .	30
3.3. Методы измерения фазовых характеристик пучка ЛУЭ с помощью пассивных резонаторов . . . . .	34
4. Заключение . . . . .	38
5. Список литературы . . . . .	38

Москва  
1989

## В В Е Д Е Н И Е

Линейные резонансные ускорители электронов (ЛУЭ) находят широкое применение в промышленности, медицине, научных исследованиях. Наибольшее распространение они получили в радиационной дефектоскопии, активационном анализе, лучевой терапии, стерилизации медицинских изделий, предпосевной обработке семян [1-4]. Линейные ускорители эффективно используются в фундаментальных и прикладных научных исследованиях, например, в физике высоких энергий, физике радиационных повреждений, биофизике [2, 5].

Поскольку использование линейных ускорителей в науке и народном хозяйстве приобрело массовый характер, весьма важным является улучшение их технико-экономических характеристик, что непосредственно связано с улучшением параметров пучка и возможностью их изменения в широких пределах, автоматизацией ускорителей с использованием ЭВМ, применением вспомогательных устройств, повышающих степень универсальности ЛУЭ, и т.д. В связи с этим

разработка простых и эффективных методов и устройств для регулировки энергии частиц, стабилизации параметров выведенного из ЛУЭ пучка, его развертки, методов измерения параметров пучка: тока, положения центра тяжести, фазовых характеристик является актуальной.

Одной из возможностей решения перечисленных задач является использование объемных пассивных СВЧ-резонаторов, возбуждаемых пучком ускорителя. Обзору методов управления и измерения параметров пучка ЛУЭ с помощью пассивных резонаторов посвящена настоящая работа.

## 1. ВОЗБУЖДЕНИЕ ПАССИВНЫХ СВЧ-РЕЗОНАТОРОВ ПУЧКОМ ЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Электронный пучок линейного резонансного ускорителя представляет собой последовательность идентичных, следующих с частотой СВЧ-питания ЛУЭ  $f_0$  сгустков. При настройке пассивного СВЧ-резонатора, в полости которого проходит пучок ЛУЭ, на частоту следования сгустков либо ее  $n$ -ю гармонику в нем возбуждается электромагнитное поле, имеющее в общем случае в области, занимаемой пучком, продольную и поперечную компоненты. Для резонатора произвольного типа с основным E-типом колебаний в приближении заданного тока выражение для продольной компоненты электрического поля в установившемся режиме может быть записано в виде

$$E_z(x, y, t) = -E_0 \cos n\omega_0 \left(t - \frac{d}{2c}\right) = - \frac{2\mu_0 c^3 I_n Q_n A_{0z}(x, y)}{n^2 \omega_0^2 \int \bar{A}_0^2 dV} \times \int_s A_{0z}(x, y) F_1(x-x_0) F_2(y-y_0) ds \cdot \sin \frac{n\omega_0 d}{2c} \cos n\omega_0 \left(t - \frac{d}{2c}\right), \quad (1)$$

где  $A_0$  - вектор-потенциал собственного поля резонатора;  $d$  - длина резонатора;  $Q_n$  - добротность резонатора;  $c$  - скорость света;

$\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума;  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ;  $F_1(x-x_0)$  и  $F_2(y-y_0)$  - функции распределения плотности частиц в поперечном направлении;  $x_0, y_0$  - координаты центра тяжести пучка.

Амплитуда  $n$ -й гармоники тока пучка  $I_n$  описывается следующими соотношениями:

$$I_n = 2I_0 \frac{\sin \frac{n\Delta\varphi}{2}}{\frac{n\Delta\varphi}{2}} \quad (2)$$

для прямоугольного распределения плотности частиц в сгустке и

$$I_n = 2I_0 \exp\left(-\frac{n^2\sigma_\varphi^2}{2}\right) \quad (3)$$

для гауссова распределения с дисперсией  $\sigma_\varphi^2$ , где  $I_0$  - импульсный ток пучка,  $\Delta\varphi$  - фазовая протяженность сгустка.

Частицы возбуждающего резонатор пучка при взаимодействии с полем в резонаторе теряют энергию. Изменение энергии частицы, которая пересекает плоскость торцевой стенки резонатора в момент времени  $t = t_i$ :

$$\Delta E_i = -\frac{2eE_0c}{n\omega_0} \cdot \sin \frac{n\omega_0 d}{2c} \cdot \cos n\omega_0 t_i. \quad (4)$$

Если в области, занимаемой пучком, существуют как продольная электрическая, так и поперечная магнитная компоненты поля, частицы пучка получают поперечный импульс:

$$\vec{P}_{1i}(x, y) = \frac{2eE_0c}{n^2\omega_0 r} \vec{\nabla}_1 A_{0e}(x, y) \sin \frac{n\omega_0 d}{2c} \sin n\omega_0 t_i, \quad (5)$$

где  $\vec{\nabla}_1 = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y}$ .

Анализ выражений (1), (4), (5) показывает возможность использования пассивных резонаторов для создания ряда измерительных устройств. Так, зависимости напряженности поля от  $I_0, X_0, y_0, \omega_0$  используются в датчиках тока и положения центра тяжести пучка

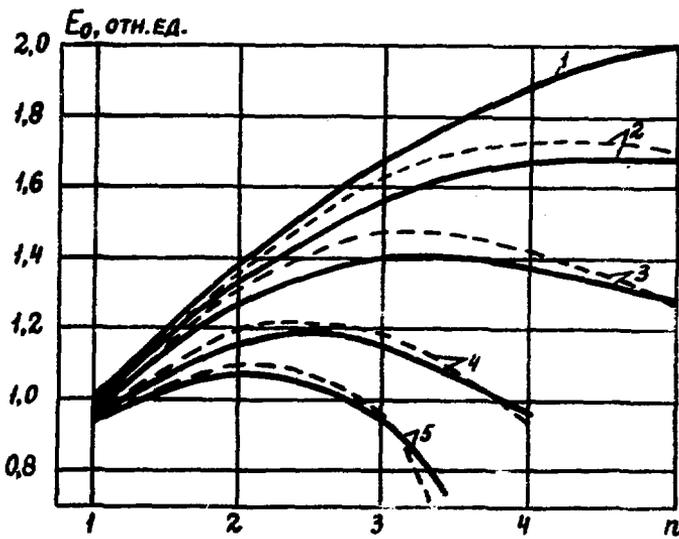
в измерителях частоты следования электронных ступок, а зависимость напряженности поля от  $\Delta\varphi$  в резонаторных датчиках их фазовой протяженности. В основе методов стабилизации параметров пучка ЛУЭ с помощью пассивных резонаторов лежит зависимость потерь энергии частиц от тока пучка. Зависимость получаемого частицами пучка поперечного импульса от фазовой протяженности ступки и фазы частицы используется в устройстве для фазового анализа пучка ЛУЭ.

Для создания компактных устройств с пассивными резонаторами для измерения параметров пучка либо для управления его параметрами важно выяснение условий, при которых напряженность поля в резонаторах при прочих равных условиях будет наибольшей, в частности, определение оптимальной частоты настройки резонатора, т.е. номера гармоники  $n$ . В работах [6-8] показано, что целесообразно настраивать резонаторы не на первую, а на более высокую гармонику частоты следования ступок. При этом уменьшается время установления колебаний в резонаторе  $\tau_y = \frac{2Q}{n\omega_0}$ , что весьма важно, поскольку большинство ЛУЭ работают в импульсном режиме с длительностью импульсов тока пучка в несколько микросекунд. Кроме того, при настройке резонаторов не на первую, а на более высокую гармонику частоты следования ступок ЛУЭ, могут быть увеличены по крайней мере на десятки процентов напряженность возбуждаемого пучком поля, изменение энергии частиц в пассивных резонаторах и приобретаемый в них частицами поперечный импульс. Это следует из анализа выражений (1), (5) с учетом известных зависимостей  $I_n$ ,  $Q_n$  и геометрических размеров резонаторов от номера гармоники. Соответствующие зависимости напряженности электрического поля  $E_0$  и максимального поперечного импульса частиц  $P_{1\max}$  для различных

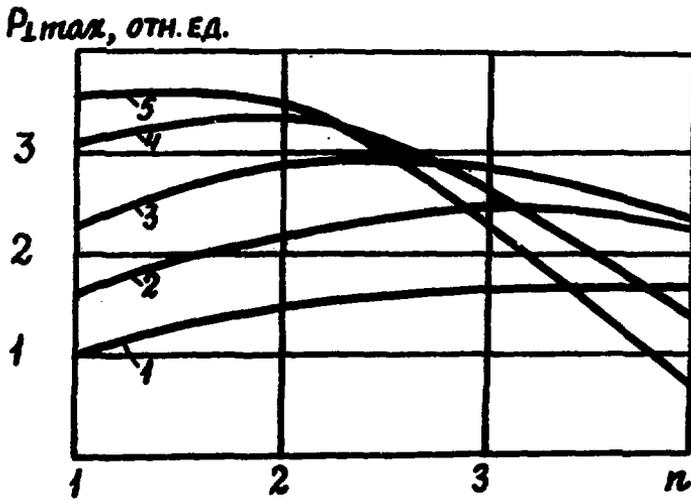
фазовых протяженностей ступек показаны на рис. 1, а, б. Из рисунков следует, что выбор  $n = 2$  или  $n = 3$  практически всегда обеспечивает получение напряженности электрического поля и поперечного импульса частиц близких к максимальным. При этом должна быть выбрана оптимальная длина резонатора  $d = d_{\text{опт}}$ , которая, как показывает анализ, для большинства используемых на практике резонаторов определяется соотношением

$$d_{\text{опт}} = (1, 2 \dots 1, 4) \frac{\lambda_0}{n\pi}. \quad (6)$$

Очевидно, что в каждом конкретном случае вопрос о выборе номера гармоники должен рассматриваться в соответствии с заданными параметрами пучка и характеристиками ускорителя. Например, при значительных поперечных размерах пучка настройка резонаторов на высокую гармонику рабочей частоты ЛУЭ может ухудшить токопрохождение и увеличить энергетический разброс частиц. Для большинства ЛУЭ десятисантиметрового диапазона, в которых радиус пучка не превышает 0,5 см, а фазовая протяженность ступек  $\Delta\varphi \leq 1$  рад, целесообразно использовать пассивные резонаторы, настроенные на вторую либо третью гармонику рабочей частоты. В этом случае при импульсных токах пучка в сотни миллиампер возможно получение электрических полей в сотни киловольт на сантиметр. В экспериментах, описанных в [7], при возбуждении пучком с импульсным током 400 мА цепочки цилиндрических резонаторов с  $E_{010}$ -типом колебаний, настроенных на вторую гармонику рабочей частоты ЛУЭ, десятисантиметрового диапазона, получена максимальная напряженность поля на оси резонаторов  $(465 \pm 40) \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ . При малых токах (единицы миллиампер) в таких резонаторах легко обеспечить поля, достаточные для уверенной индикации и обработки результатов измерений частоты следования и фазы электронных ступек, тока и положения пучка.



а



б

Рис. 1. Зависимость напряженности электрического поля (а) и максимального значения поперечного импульса (б) от номера гармоники для случая гауссового (сплошные кривые) и прямоугольного (пунктирные кривые) распределения частиц в спутке. 1 -  $\Delta\varphi = 0,3$ ; 2 -  $\Delta\varphi = 0,5$ ; 3 -  $\Delta\varphi = 0,7$ ; 4 -  $\Delta\varphi = 1$ ; 5 -  $\Delta\varphi = 1,2$  рад

## 2. МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПАССИВНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

### 2.1. Регулировка энергии частиц пучка ЛУЭ

Одной из наиболее очевидных применений пассивных резонаторов является их использование для изменения энергии электронов как в сторону увеличения (доускорение), так и в сторону ее уменьшения.

Доускорение пучка ЛУЭ в пассивных резонансных системах исследовано теоретически и экспериментально [7, 9-12]. Суть метода состоит в следующем. Последовательность электронных ступенек возбуждает в пассивной резонансной системе электромагнитные колебания. После достижения установившегося значения поля изменяют фазу последующих частиц в импульсе на  $180^\circ$  относительно поля в пассивной системе. Для этих частиц поле в резонаторе является ускоряющим, и они увеличивают свою энергию. В качестве пассивной резонансной структуры используются объемные СВЧ-резонаторы со стоячими волнами [7, 9] и с бегущими волнами (РБВ) [10, 11]. При возбуждении РБВ импульсным током 175 мА (длительность импульса  $\sim 1,2$  мкс) максимальный прирост энергии составил  $(1,7 \pm 0,5)$  МэВ. Длительность импульса ускоренного тока 0,2 мкс, его амплитуда 10 мА. В экспериментах по доускорению пучка ЛУЭ в системе из семи пассивных  $E_{010}$ -резонаторов со стоячей волной [7] получен прирост энергии частиц  $(1,8 \pm 0,3)$  МэВ. Первоначальная энергия электронов составляла 11 МэВ, импульсный ток пучка - 200 мА. При длительности импульса тока доускоренных частиц 0,1 мкс его амплитуда равнялась 200 мА.

Потери энергии частиц пучка, возбуждающего пассивные резонаторы, могут быть использованы для регулировки энергии частиц и расширения энергетического диапазона ЛУЭ в сторону меньших энергий. Известно, что для односекционных ускорителей такая регулировка, осуществляемая традиционными методами – изменением частоты или мощности СВЧ-питания, сложна и приводит, как правило, к ухудшению выходных характеристик пучка. Использование для уменьшения энергии частиц пассивных резонаторов при импульсных токах в сотни миллиампер и более позволяет решить эту задачу более простым способом. На инжекторной части ускорителя ЛУ-40 [13] используется пассивная резонансная структура, предназначенная для уменьшения энергии частиц. Структура состоит из 9 цилиндрических  $E_{010}$ -резонаторов, связь между которыми меньше критической. Резонаторы настроены на вторую гармонику рабочей частоты ЛУЭ 5594 МГц, их добротность равна  $(94 \pm 0,8) \cdot 10^3$ . Общая длина пассивной структуры 35 см. Точная настройка в резонатор проводится изменением температуры структуры с помощью системы охлаждения и термостатирования. На рис.2 показана зависимость потерь энергии частиц от импульсного тока пучка. При токе 400 мА потери энергии составляют 5,7 МэВ, что позволило уменьшить энергию частиц на мишени с 10,5 МэВ до 4,8 МэВ. Благодаря тому, что время установления колебаний в резонаторах много меньше длительности импульса ( $\tau_u = 10$  мкс), а величина нестабильности частоты много меньше полосы пропускания резонаторов, энергетический спектр пучка ЛУЭ изменяется несущественно и удовлетворяет предъявляемым к параметрам пучка требованиям. Использование пассивных резонаторов позволило расширить круг выполняемых на ускорителе исследований, в

частности, дало возможность проводить облучение и исследование свойств материалов, содержащих элементы с низким порогом активации.

## 2.2. Стабилизация параметров пучка

При использовании в ЛУЭ ускоряющих секций (или резонаторов) с высокой дисперсией основным фактором, определяющим нестабильность энергии частиц, является, как известно [14], нестабильность частоты СВЧ-питания ускорителя. Для уменьшения влияния этого дестабилизирующего фактора на энергию частиц могут быть использованы пассивные резонаторы. Суть метода стабилизации заключается в том, что изменение энергии частиц компенсируется соответствующим изменением потерь энергии в пассивной резонансной структуре, установленной на выходе ЛУЭ. При оптимальном значении рабочей частоты ускорителя  $f_0$  энергия ускоренных электронов максимальна. Если настроить пассивную резонансную структуру, состоящую из  $N$  резонаторов, на частоту  $f_0$  или ее гармонику, то потери энергии частиц в ней  $N\Delta\mathcal{E}(f_0)$  также будут максимальными. При изменении частоты СВЧ-питания ускорителя, а следовательно, и частоты следования ступок энергия ускоренных частиц уменьшается, но одновременно уменьшаются и потери энергии в пассивной структуре, что и приводит к стабилизации энергии. Можно показать, что условие стабилизации энергии частиц имеет вид:

$$\frac{4Q^2 N \Delta\mathcal{E}(f_0)}{f_0^2} = - \left. \frac{d^2\mathcal{E}(f)}{df^2} \right|_{f=f_0} \quad (7)$$

где  $\mathcal{E}(f)$  - зависимость энергии частиц от частоты на выходе ускоряющих секций;  $Q$  - добротность каждого из резонаторов.

При этом погрешность стабилизации

$$\delta\mathcal{E} = \frac{3}{8} \Delta\mathcal{E}(f_0) \left( 2Q \frac{f-f_0}{f_0} \right)^4. \quad (8)$$

$\Delta E, \text{МэВ}$

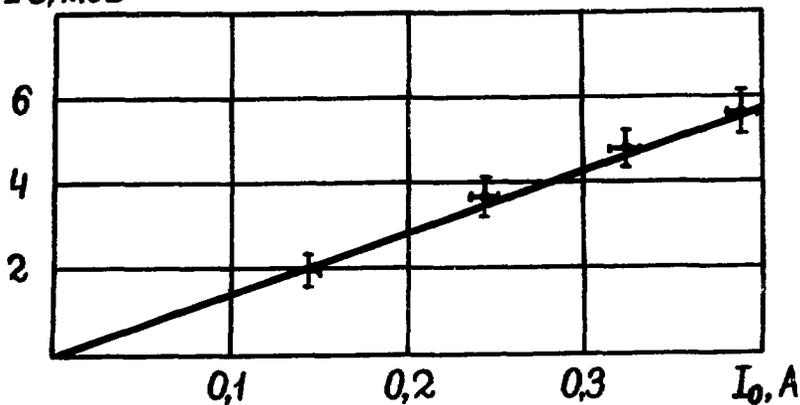


Рис.2. Зависимость потерь энергии частиц, прошедших пассивную структуру, от импульсного тока пучка

$E(f), \text{МэВ}$

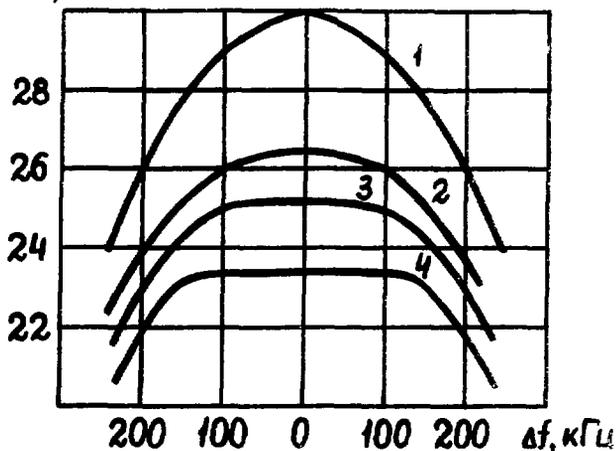


Рис.3. Зависимость энергии электронов от частоты СВЧ-питания ЛУЭ при импульсном токе пучка 300 мА. 1 - без цепочки пассивных резонаторов; 2 - с цепочкой из 7 пассивных резонаторов,  $N = 7$ ; 3 -  $N = 10$ ; 4 -  $N = 14$

В качестве примера рассмотрим возможность стабилизации энергии электронов на промежуточном выходе ускорителя ДУ-300 [15, 16]. Для рассматриваемого ДУЭ при  $\mathcal{E}(f_0) = 30 \text{ МэВ}$   $\frac{d^2 \mathcal{E}(f)}{df^2} = 200 \frac{\text{МэВ}}{\text{МГц}^2}$ . При использовании пассивных резонаторов, описанных в [19] ( $Q \approx 10^4$ ,  $\Delta \mathcal{E}(\text{МэВ}) = 1,6 I_0(\text{А})$ ), получим из (7), что для стабилизации энергии при импульсном токе пучка 0,3 А необходимо использовать цепочку из 10 резонаторов. Результаты расчета приведены на рис.3, на котором показаны зависимости энергии частиц на выходе ускорителя от частоты при отсутствии пассивных резонаторов [16] (кривая 1) и при установленной на его выходе цепочке, содержащей различное число пассивных резонаторов. Видно, что при характерной нестабильности частоты  $\pm 10^5$  Гц достигается значительное уменьшение нестабильности энергии ускоренных частиц.

В работах [18-20] предложен и экспериментально исследован метод стабилизации параметров пучка ДУЭ при нестабильности его импульсного тока. Метод основан на изменении энергии частиц на выходе пассивных резонаторов при нестабильности тока пучка. Например, при увеличении тока пучка  $I_0$  происходит уменьшение энергии частиц  $\mathcal{E}$  за счет увеличения потерь их энергии в пассивных резонаторах. Путем выбора числа и параметров резонаторов можно добиться, чтобы при этом произведение  $I_0 \mathcal{E}$  оставалось неизменным, т.е. тем самым достигается стабилизация мощности пучка. Аналогичным образом могут быть стабилизированы плотность тока и плотность мощности пучка на мишени. Это вытекает из следующих соображений. Для формирования поля облучения пучок из ускорителя выводят обычно через металлические фольги, при прохождении которых он приобретает расходимость на угол  $\psi \sim \frac{1}{\mathcal{E}}$ . Поэтому площадь поперечного сечения пучка в плоскости мишени  $\sim \frac{1}{\mathcal{E}^2}$ , плотность тока пучка на

мишени  $j \sim I_0 \varepsilon^2$ , а плотность мощности пучка на мишени  $j \varepsilon \sim I_0 \varepsilon^3$ . Таким образом, задача стабилизации мощности пучка, плотности тока и плотности мощности выведенного пучка на мишени сводится к задаче стабилизации произведения  $I_0 \varepsilon^k$  при различных значениях  $k \geq 1$ , которая и может быть решена с помощью цепочки пассивных резонаторов, установленной между ускоряющей структурой ЛУЭ и устройством для выпуска пучка. Условие стабилизации перечисленных параметров пучка для представляющей наибольший практический интерес области вблизи оси ускорителя имеет вид [19]:

$$4Q^2 \left( \frac{\kappa f_0 - f_p}{f_p} \right)^2 = \left[ \frac{I_0 N R_p (\kappa + 1)}{\varepsilon(0) - (\kappa + 1) I_0 R_c} \right]^2 - 1, \quad (9)$$

где  $f_p$ ,  $Q$  - собственная частота и добротность резонаторов;  $\varepsilon(0)$  - значение  $\varepsilon$  при  $I \rightarrow 0$ ;  $R_c$  и  $R_p$  - эквивалентные сопротивления ускоряющей структуры ЛУЭ и каждого из  $N$  пассивных резонаторов,  $\frac{\text{МэВ}}{\text{А}}$ . При этом точность стабилизации величины  $I_0 \varepsilon^k$

$$\frac{\Delta(I_0 \varepsilon^k)}{I_0 \varepsilon^k} = \frac{1 + \kappa}{2\kappa} \left( \frac{\Delta I_0}{I_0} \right)^2. \quad (10)$$

Описанный метод был исследован экспериментально [20]. В качестве стабилизирующей структуры использовалась цепочка из 9 пассивных слабосвязанных  $E_{010}$ -резонаторов, настроенных на вторую гармонику частоты следования сгустков. Из результатов измерений (см. рис. 4) следует, что описанный метод позволяет осуществлять стабилизацию плотности тока пучка в широких пределах. Например, в случае точного резонанса (кривая I) при изменении импульсного тока пучка от 150 мА до 250 мА, т.е. в  $\approx 1,7$  раза, плотность тока пучка на мишени изменяется лишь в пределах  $\pm 3\%$ . Диапазон токов, в котором имеет место стабилизация, может смещаться путем

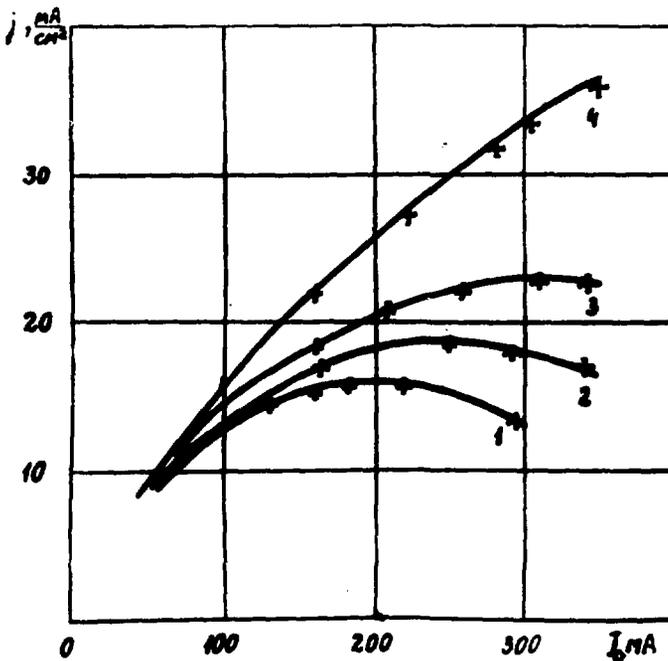


Рис.4. Зависимость плотности тока пучка  $j$  на мишени от импульсного тока пучка при различной расстройке резонаторов  $\Delta f = |2f_0 - f_p|$ . 1 -  $\Delta f = 0$ ; 2 -  $\Delta f = 300$ ; 3 -  $\Delta f = 600$  кГц; 4 -  $\Delta f = 3$  МГц (точки - экспериментальные данные, сплошные линии - расчет)

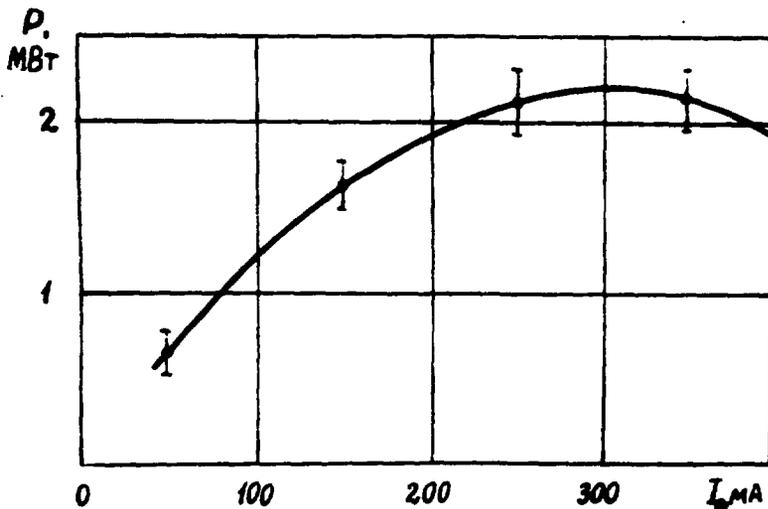


Рис.5. Зависимость мощности пучка от его импульсного тока при  $f_p = 2f_0$  (точки - экспериментальные данные, сплошная линия - расчет)

расстройки резонаторов. Разработанная пассивная резонансная структура позволяет также осуществить стабилизацию полной мощности пучка и плотности мощности пучка на мишени, но в других диапазонах изменения тока пучка. Из рисунков 5 и 6 видно, что стабилизация этих величин также имеет место при изменении тока пучка в широких пределах. Проведенное экспериментальное исследование показало эффективность метода и возможность его практического использования в линейных ускорителях с импульсным током пучка  $\sim 100$  мА и энергией частиц  $\sim 10$  МэВ.

### 2.3. Фазовая развертка пучка в пассивных резонаторах. Формирование электронных сгустков

Из результатов теоретического анализа (см. формулу (5)) следует, что взаимодействие пучка с возбужденным в пассивных резонаторах полем может быть использовано для осуществления поперечной развертки пучка [21]. При этом для получения частицами максимального поперечного импульса последовательность электронных сгустков, с одной стороны, должна эффективно возбуждать поле в резонаторе, поэтому пучок должен пролетать в области с большой продольной составляющей электрического поля. С другой стороны, в области пролета пучка должно существовать достаточно большое поперечное поле. Таким образом, существует оптимальная область пропускания пучка, обеспечивающая получение максимального поперечного импульса.

Из формулы (5) следует, что при малых поперечных размерах пучка:  $F_1(x - x_0) = \delta(x - x_0)$ ,  $F_2(y - y_0) = \delta(y - y_0)$  оптимальные значения  $x_0$  и  $y_0$  могут быть определены из условия:

$$A_{0z}(x_0, y_0) \left| \nabla_{\perp} A_{0z}(x, y) \right|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} = \max. \quad (II)$$

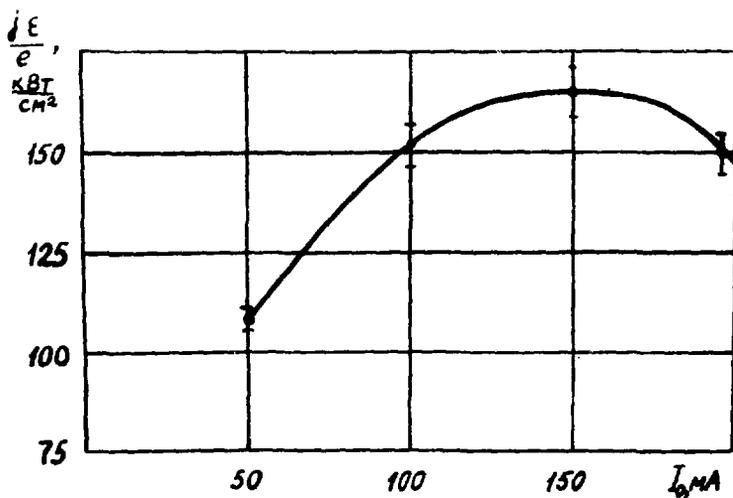


Рис.6. Зависимость плотности мощности пучка ЛУЭ на мишени от импульсного тока пучка при  $f_p = 2f_0$  (точки - экспериментальные данные, сплошная линия - расчет).  
 $e$  - заряд электрона

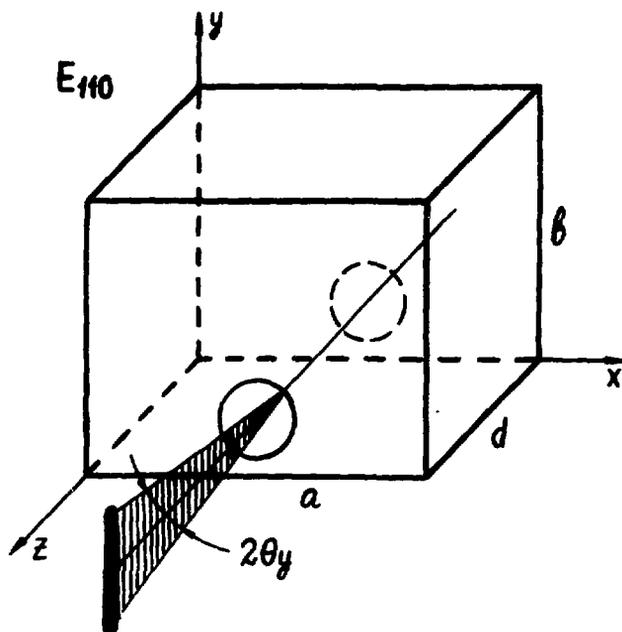
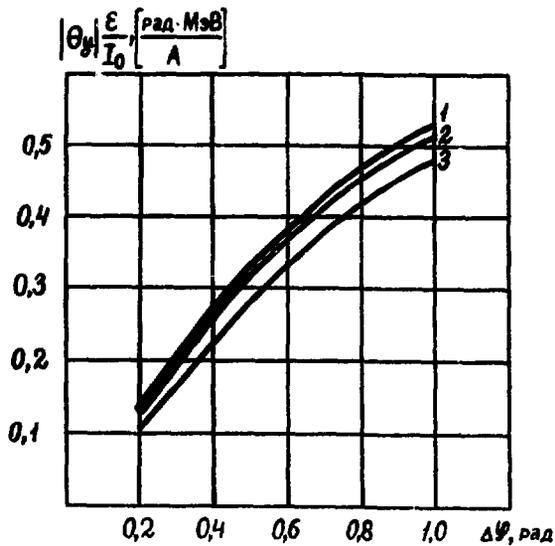


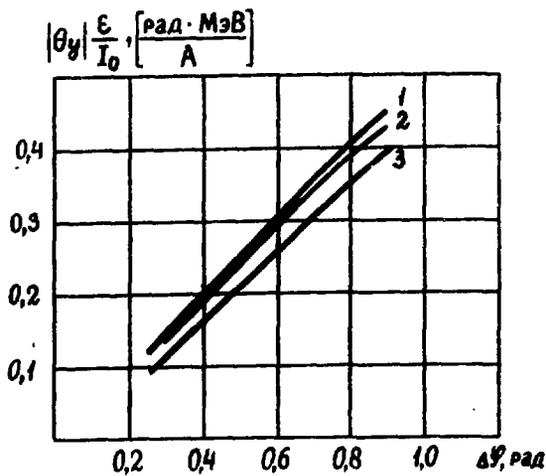
Рис.7. Конфигурация пассивного резонатора для развертки пучка ЛУЭ

Выбор типа пассивных резонаторов определяется функциональными требованиями к устройству для развертки пучка. Так, для получения линейной развертки целесообразно использовать прямоугольные резонаторы с  $E_{II0}$ -типом колебаний, в которых можно обеспечить однородность поперечного поля в области, занимаемой пучком (конфигурация резонатора показана на рис.7). Как следует из (II), в этом случае максимальный поперечный импульс частицы получают при  $x_0 = \frac{a}{2}$  и  $y_0 = \frac{b}{4}$ . Результаты расчета максимального угла отклонения частиц (соответствующего  $t_i = \frac{\Delta \varphi}{2\omega_0}$ ) в резонаторе рассматриваемого типа приведены на рис.8. Расчеты проведены в приближении гауссова распределения частиц в пучке ЛУЭ в поперечном направлении ( $\sigma_x = \sigma_y = 2 \cdot 10^{-3}$  мм). Как следует из рисунка, угол отклонения частиц в резонаторе может достигать значительной величины. Например, при энергии частиц 5 МэВ, импульсном токе пучка 0,5 А и фазовой протяженности сгустка 0,6 рад в резонаторе, настроенном на вторую гармонику частоты следования сгустков ( $f = 5,6 \cdot 10^9$  Гц), при  $b = 3,5$  см,  $a = 4,2$  см максимальный угол составляет  $\pm 38$  мрад. Из приведенных графиков следует также, что угол отклонения в резонаторе слабо зависит от соотношения его поперечных размеров  $a$  и  $b$  и имеет большую величину при настройке резонатора на вторую гармонику, чем при настройке на первую гармонику частоты следования сгустков.

СВЧ-развертка пучка ЛУЭ в пассивных резонаторах была исследована экспериментально. С этой целью была разработана и изготовлена структура (см. рис.9), состоящая из четырех слабосвязанных резонаторов с  $E_{II0}$ -типом колебаний. Структура рассчитана на осуществление линейной развертки пучка ЛУЭ десятисантиметрового диапазона с энергией частиц порядка 10 МэВ, импульсным током в сотни миллиампер и фазовой протяженностью сгустков (0,2...1)рад.



а



б

Рис.8. Зависимость максимального угла отклонения частиц пучка с энергией  $\epsilon$  и импульсным током  $I_0$  при  $x_0 = \frac{q}{4}$ ,  $y_0 = \frac{\theta}{4}$  от фазовой протяженности сгустка.  $f = 5,6 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ ;  $Q = 8 \cdot 10^3$ ; 1-  $\ell = 3,5$ ; 2-  $\ell = 3$ ; 3-  $\ell = 4$  см (а);  $f = 2,8 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ ,  $Q = 1 \cdot 10^4$ , 1-  $\ell = 7$ ; 2-  $\ell = 6$ ; 3-  $\ell = 8$  см (б)

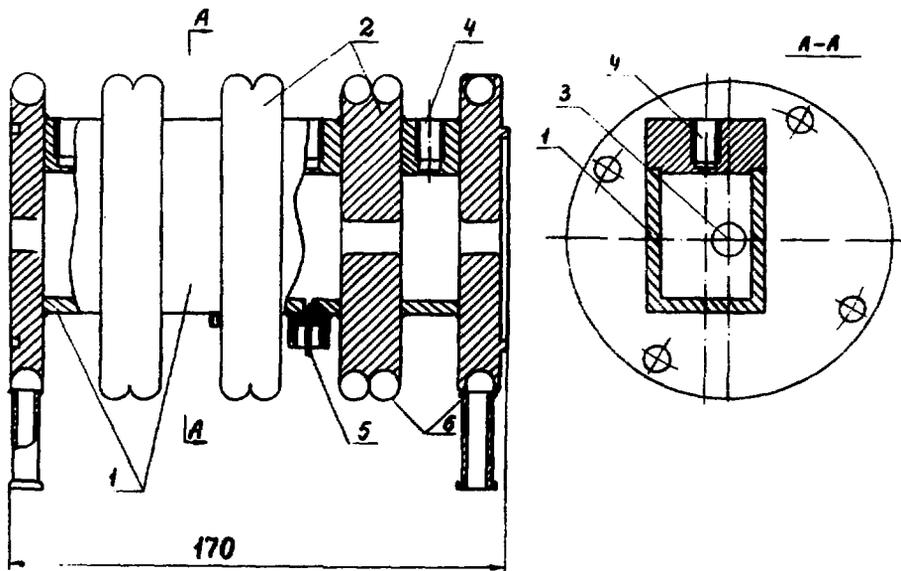


Рис.9. Пассивная резонансная структура для развертки пучка ЛУЭ.  
 1 - корпуса резонаторов; 2 - диски; 3 - пролетные отверстия;  
 4 - отверстия для установки подстроечных винтов; 5 - СВЧ-зонд;  
 6 - трубки термостатирования

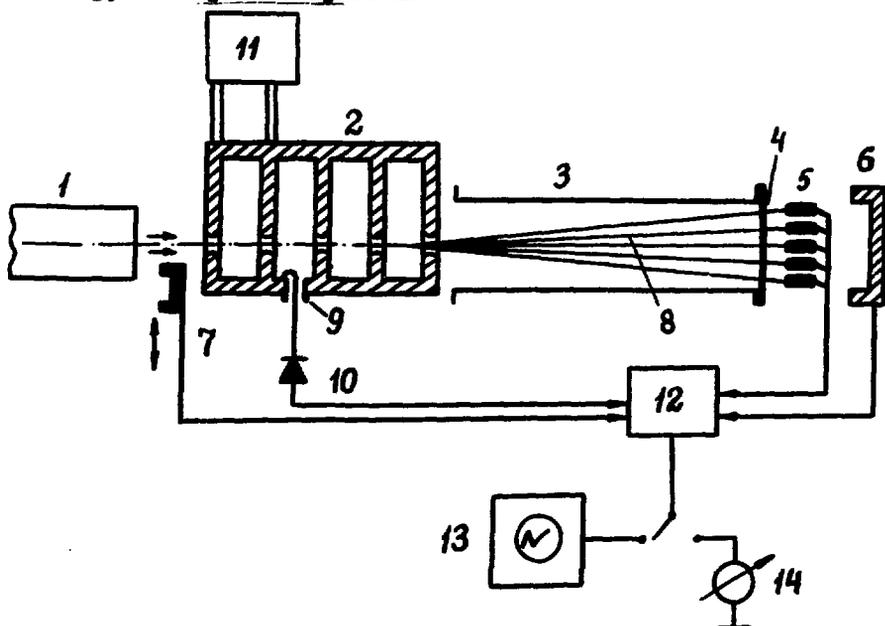


Рис.10. Схема экспериментальной установки: 1 - ЛУЭ; 2 - пассивная резонансная структура; 3 - пролетный промежуток;  
 4 - выпускная фольга; 5 - ламельные датчики; 6,7 - цилиндры Фарадея; 8 - электронный пучок; 9 - индуктивный СВЧ-зонд;  
 10 - СВЧ-детектор; 11 - система терморегулирования; 12 - коммутатор; 13 - осциллограф; 14 - измеритель среднего тока  
 20

Резонаторы настроены на вторую гармонику частоты следования ступок ( $\kappa = 2$ ), при этом оптимальное значение длины резонатора составляет 2 см. Поперечные размеры резонатора  $a = 4,4$  см,  $b = 3,4$  см, координаты центров пролетных отверстий  $x_0 = \frac{a}{2} = 2,2$  см,  $y_0 = \frac{b}{4} = 0,8$  см. Добротность каждого из резонаторов составляла  $(8 \pm 0,6) \cdot 10^3$ .

Схема экспериментальной установки для исследования развертки пучка ЛУЭ приведена на рис.10. В качестве источника электронного пучка использовалась инжекционная часть ускорителя ЛУ-40 [13]. Энергия электронов в отсутствие нагрузки током составляла 15 МэВ, длительность импульса тока пучка 7,5 мкс. Величина импульсного тока пучка регулировалась в пределах 0...350 мА. Пучок ускорителя возбуждал электромагнитные колебания в пассивной структуре. После прохождения пролетного участка электропровода длиной 65 см угловое распределение частиц трансформировалось в пространственное, которое измерялось с помощью системы коммутируемых ламповых датчиков, либо путем фотометрирования отпечатков, полученных на устанавливаемых непосредственно перед ламелями стеклах.

В ходе экспериментов были исследованы зависимости распределения электронов в поперечном направлении от величины импульсного тока пучка и от времени в течение импульса ускорителя.

Наблюдаемые характерные осциллограммы импульсов тока пучка с ламелей при настроенных резонаторах и соответствующий отпечаток пучка на стекле показаны на рис.11 и рис.12. Обработка результатов измерений с учетом реальных поперечных размеров пучка ( $2b_x = 2b_y = 0,5$  см) показала, что при энергии частиц 12 МэВ и импульсном токе пучка 200 мА максимальный угол развертки пучка

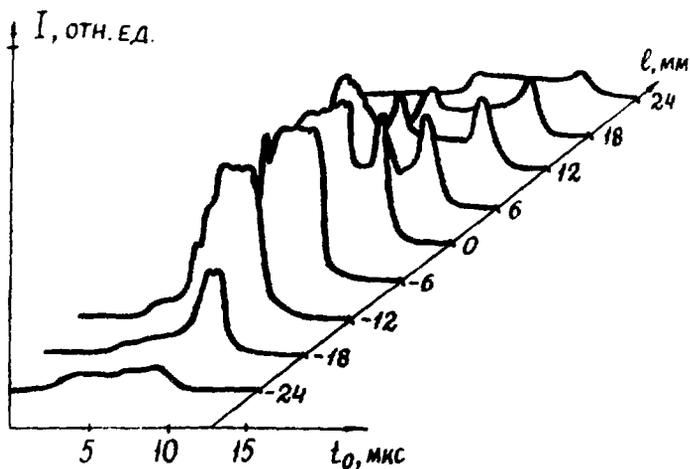


Рис.11. Осциллограммы импульсов тока пучка на ламелях при настроенных резонаторах.  $l$  - расстояние от ламелей до оси пучка.  $\varepsilon = 12$  МэВ,  $I_0 = 200$  мА

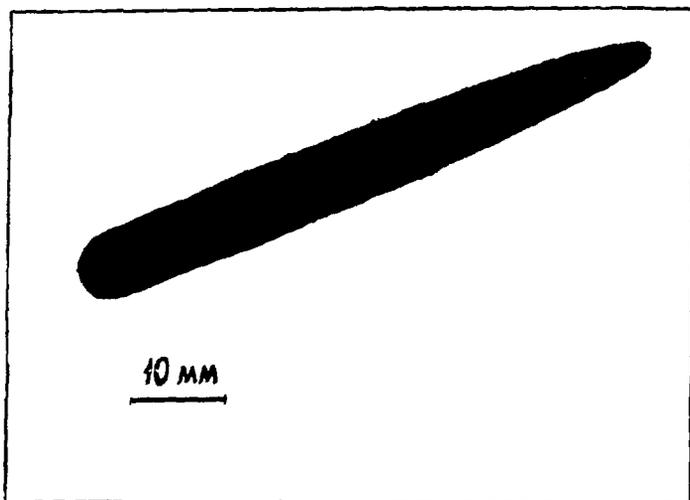


Рис.12. Отпечаток развернутого пучка на стекле

в резонаторах составляет 65 мрад. На рис.13 приведена зависимость угла развертки пучка от величины его импульсного тока. Под углом развертки  $2\theta_y$  на этом рисунке понимается угол, заключающий в себя 90% частиц пучка. Видно, что экспериментальные результаты соответствуют расчетным данным, полученным для  $\Delta\varphi = 0,7$  рад. Указанная величина фазовой протяженности сгустка согласуется с результатами измерений, приведенных в [7].

Таким образом, проведенные исследования показали, что развертка релятивистского пучка ЛУЭ при импульсном токе в сотни миллиампер может быть легко реализована в компактной цепочке из небольшого числа резонаторов. Существенное увеличение поперечных размеров пучка ЛУЭ может быть использовано, в частности, для облегчения выпуска пучка с значительной средней интенсивностью через металлические фольги, для создания в сочетании с уже используемыми устройствами определенного поля облучения и т.д. Поскольку развертка в пассивных резонаторах является по сути фазовой разверткой, то она может быть использована для измерения фазовых характеристик пучка (более подробно этот вопрос будет рассмотрен ниже), а также для выделения на выходе инжекторов ЛУЭ сгустков с малой фазовой протяженностью, т.е. играть роль используемых на многих ЛУЭ чоперов СВЧ-резонаторов с поперечным полем. При этом отпадает необходимость во внешнем источнике СВЧ-колебаний и соответствующих СВЧ-элементах, что делает устройство для фазовой развертки пучка простым и надежным.

В работах [22, 23, 24] показана возможность формирования заданных фазоэнергетических распределений электронов в сгустках на выходе резонаторного автоэмиссионного инжектора путем

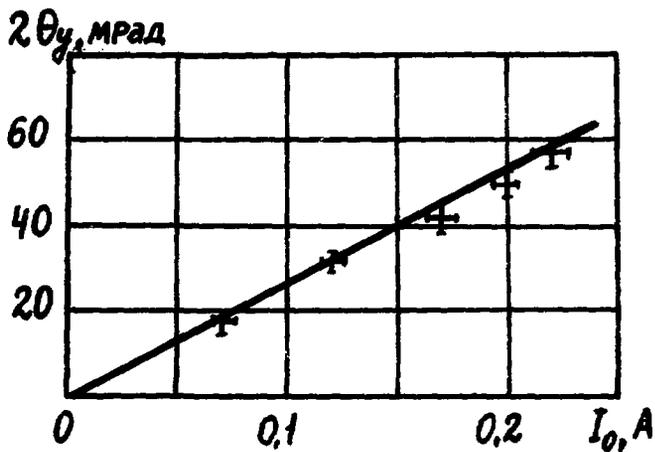


Рис.13. Зависимость угла развертки  $2\theta_y$  от импульсного тока пучка. Точками показаны результаты эксперимента, прямая - расчет при  $\Delta\varphi = 0,7$  рад

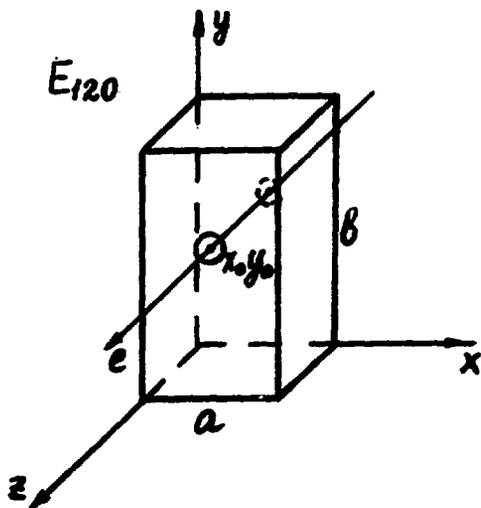


Рис.14. Конфигурация резонатора с  $E_{120}$  типом колебаний

изменения продольного импульса частиц с помощью пассивных резонаторов. С этой целью предложено [22,23] за основным резонатором с автокатодом расположить один или несколько пассивных резонаторов, настроенных на различные гармоники частоты СВЧ-сигнала, вводимого в основной резонатор ( $n = 2, 3, \dots$ ). Собственные частоты и добротности каждого из пассивных резонаторов можно изменять с помощью вспомогательных дистанционно управляемых элементов. При прохождении электронных сгустков через пассивные резонаторы в последних возбуждаются СВЧ-колебания соответствующей частоты ( $2f_0, 3f_0, \dots$ ). Подбирая амплитуду поля и фазовый сдвиг в резонаторах путем изменения их добротности и собственной частоты, можно получать необходимые для инжекции в ЛУЭ фазоэнергетические распределения. Построенные по этому принципу системы формирования электронных сгустков, как показано в [24], могут быть использованы при создании ЛУЭ с прецизионными параметрами, например, для электронной микроскопии.

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА ЛУЭ С ПОМОЩЬЮ ПАССИВНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Пассивные СВЧ-резонаторы, возбуждаемые пучком ЛУЭ, нашли широкое применение в информационных и измерительных системах ускорителей. Они используются в качестве основных элементов датчиков тока, положения пучка, частоты следования и фазы электронных сгустков. В качестве вспомогательных устройств эти же элементы применяются в более сложных комплексных измерительных системах, системах фазирования, стабилизации.

### 3.1. Резонаторные датчики тока и положения пучка

Принцип действия резонаторных преобразователей тока пучка ЛУЭ основан на зависимости амплитуды возбуждаемых пучком в резонаторе колебаний от величины импульсного тока пучка.

Простота, надежность, возможность работы в условиях сильных магнитных помех в сочетании с высокой точностью измерений являются основными достоинствами резонаторных преобразователей, послужившими причиной их широкого использования как в односекционных ЛУЭ на малые энергии, так и в многосекционных ускорителях [25 - 38] .

Конструктивно датчики тока представляют собой цилиндрические резонаторы с  $E_{010}$ -типом колебаний. Добротность резонатора и коэффициент связи с СВЧ-трактом выбирают исходя из конкретных характеристик пучка и требований к преобразователю - диапазону измеряемых токов и точности воспроизведения формы токового импульса. Очевидно, что последнее требование будет выполнено при условии малости постоянной времени резонатора  $\tau_p = \frac{2Q_N}{\omega_0}$  по сравнению с длительностью импульса тока пучка  $\tau_u$  . (Здесь

$Q_N$  - нагруженная добротность резонатора  $Q_N = Q_0(1 + \beta_c)$ , где  $Q_0$  - собственная добротность резонатора,  $\beta_c$  - коэффициент связи с СВЧ-трактом). С другой стороны, амплитуда колебаний в резонаторе пропорциональна его добротности. Таким образом, требования высокой чувствительности преобразователя и его быстродействие противоречат друг другу и выбор величин  $Q_0$  и  $\beta_c$  производится в каждом случае в зависимости от конкретных условий. Для уменьшения  $\tau_p$  в некоторых случаях [25, 26] выбирают коэффициент связи  $\beta_c = 2, \dots, 7$ , что позволяет, например,

при  $f_0 = 3 \cdot 10^9$  и  $Q_H = 350$  получить  $\tau_p \approx 40$  нс. Другой возможностью повышения быстродействия является применение резонаторов с низкой собственной добротностью. В работе [27] для наблюдения формы импульсов тока длительностью  $5 \cdot 10^{-8} \dots 5 \cdot 10^{-6}$  с использован задающий резонатор клистрона КИУ-12 с  $Q_0 \approx 3 \cdot 10^2$ . Такой датчик передает форму огибающей импульса тока ЛУЭ начиная с  $\tau_u \approx 10^{-7}$  с. Резонаторный датчик, описанный в [28, 29], представляет собой  $\text{ЭОЮ}$ -резонатор, изготовленный из нержавеющей стали. Как отмечалось, постоянная времени резонатора может быть уменьшена путем его настройки не на первую, а на более высокую гармонику частоты следования электронных сгустков. В работе [30] описан датчик тока, установленный на позитрон-электронном источнике ВЭП-4 ( $f_0 = 430$  МГц,  $\tau_u = 30$  нс). Собственная частота  $\text{ЭОЮ}$ -резонатора  $f_p = 2f_0 = 860$  МГц. С помощью описанного датчика проведено измерение тока позитронов  $\approx 1$  мА. Использование резонаторов с  $n > 1$  позволяет, уменьшая постоянную времени резонатора, по крайней мере, обеспечить такую же амплитуду возбуждаемых пучком колебаний, как и при настройке резонатора на частоту следования сгустков. Естественным ограничением на номер гармоники в данном случае служат требования к диаметрам пролетных отверстий в резонаторе, которые, в свою очередь, определяются эмиттансом пучка ускорителя.

Крутизна вольт-амперных характеристик резонаторных преобразователей, используемых в ЛУЭ, определяется как параметрами резонатора, так и характеристиками усилительных устройств. Резонаторные преобразователи, описанные, например, в работах [25, 26, 30, 31], обладают чувствительностью  $180 \dots 460 \frac{\text{В}}{\text{А}}$ . При этом минимальное значение измеряемых токов составляет несколько

миллиампер, что полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к измерителям тока существующих ЛУЭ.

Резонаторные преобразователи могут обеспечить высокую точность измерений. В работе [32] приведен расчет погрешностей измерения тока пучка, обусловленных нестабильностью следующих параметров: формы сгустков, поперечных размеров пучка, скорости частиц, собственной частоты резонаторов. Показано, что в случае релятивистских пучков при нестабильности фазовой протяженности сгустков  $\Delta\varphi < 0,1$  рад. и относительной нестабильности частоты  $\frac{\Delta f_0}{f_0} \sim 10^{-4}$  максимальная суммарная погрешность измерений не превышает 1,5%. На практике достигнута точность измерения тока не хуже 10%. Так, описанная в [33] система измерения токов встречных сгруппированных пучков ЛУЭ с энергией частиц до 40 МэВ обеспечивала измерение токов в диапазоне 3...100 мА с погрешностью, не превышающей 6%. Резонаторный датчик тока разрезного микротрона [29] позволяет проводить измерения с точностью 5%.

Принцип действия резонансных датчиков положения пучка [25, 26, 29, 34-38, 41] основан на зависимости амплитуды колебаний, возбуждаемых в пассивных резонаторах пучком ЛУЭ, от поперечных координат  $x_0, y_0$  центра тяжести пучка. Сравнительный анализ резонаторов, проведенный в [34, 35], показал, что целесообразно использовать в качестве датчиков положения пучка призматические резонаторы с  $E_{120}$ - и  $E_{210}$ -типом колебаний. Рассмотрим принцип действия этих устройств более подробно. Из выражения I следует, что для  $E_{120}$ -резонатора (см. рис.14) возбуждаемое пучком поле может быть записано в виде

$$E_z(x, y) = E_{zmax} \sin \frac{2\pi y}{b} \cdot \sin \frac{\pi x}{a} \cdot \sin \frac{2\pi y_0}{b} \cdot \sin \frac{\pi x_0}{a}. \quad (12)$$

Если пропускать пучок по оси с координатами  $y_0 = \frac{b}{2}$ ,  $x_0 = \frac{a}{2}$ , амплитуда возбуждаемого поля равна нулю. При смещении оси пучка

относительно первоначального положения, например, на величину  $\delta y_0 \ll b$  изменение амплитуды электрического поля  $\delta E_z \sim \delta y_0$ .

Кроме того, при изменении знака  $\delta y_0$  имеет место инверсия фазы возбуждаемого пучком поля. Заметим, что рассматриваемый преобразователь не чувствителен к малым изменениям положения оси пучка по  $x$  ( $\delta x_0 \ll a$ ), поскольку  $\frac{dE_z}{dx_0} \Big|_{x_0 = a/2} = 0$ .

Аналогичным образом, с помощью резонатора с  $E_{210}$ -типом колебаний может быть реализован датчик смещения пучка вдоль оси  $x$ . Анализ одновременно возбуждаемых пучком ускорителя в резонаторах  $E_{120}$  и  $E_{210}$  комбинаций позволяет получить информацию как о величинах отклонений центра тяжести пучка  $\delta x_0$  и  $\delta y_0$ , так и о их знаке. Можно показать, что в качестве датчиков положения пучка могут быть использованы и резонаторы других типов, например, цилиндрический резонатор с  $E_{110}$ -типом колебаний [29]. Как правило, датчики положения используют в сочетании с резонатором с  $E_{010}$ -типом колебаний, который выполняет роль датчика тока и служит источником опорной фазы. Используемые на ускорителях системы измерения, построенные по такой схеме, обладают высокой чувствительностью и точностью, которые определяются как параметрами резонаторов, так и характеристиками схем усиления и обработки сигналов. В работах [36, 37] описаны различные схемные решения системы преобразования и обработки сигналов с датчиков. Их использование на ускорителе У-28 (энергия электронов 1...6 МэВ, импульсный ток не менее 5 мА) позволило проводить измерения смещения центра тяжести пучка в диапазоне 0,5...5 мм. При этом, как отмечено в [36], погрешность измерений не превышает 2%. Чувствительность датчика положения пучка, описанного в [26], составляет  $10 \frac{B}{A}$  мм при постоянной времени резонатора 70 нс, что позволяет, например, при импульсных токах в сотни

миллиметров измерять смещение центра "тяжести" пучка с точностью в десятые доли миллиметра. В работах [28, 29] описан датчик положения пучка, выполненный с использованием цилиндрического резонатора с  $E_{110}$ -типом колебаний. В качестве датчика опорной фазы служит резонаторный измеритель тока пучка. СВЧ-сигналы с резонаторов поступают через усилители на измерители ослаблений и разности фаз ФК2-18. Значения ослаблений и разности фаз передаются в ЭВМ для последующей обработки. Точность определения положения пучка в диапазоне смещений  $\pm 4$  мм составляет 0,1 мм.

Опыт эксплуатации резонаторных датчиков тока и положения пучка показал их высокую надежность и простоту в эксплуатации. Они позволяют осуществлять непрерывный контроль за параметрами пучка, их выходные сигналы легко поддаются обработке и анализу с помощью ЭВМ. Это позволяет широко использовать резонаторные датчики в системе автоматического контроля и управления ускорителем.

### 3.2. Измерение нестабильности частоты следования электронных сгустков

Пассивные СВЧ-резонаторы, возбуждаемые пучком ЛУЭ, могут быть использованы для определения внутримпульсной нестабильности частоты следования электронных сгустков. В качестве примера рассмотрим устройство для измерения нестабильности частоты, содержащее один пролетный цилиндрический  $E_{010}$ -резонатор, установленный на выходе ЛУЭ. Собственная частота резонатора близка к  $n$ -й гармонике рабочей частоты ускорителя  $f_0$ , т.е.

$f_p \approx n f_0$ , и может плавно изменяться в пределах предполагаемого изменения частоты следования сгустков  $f_c$ . В случае, когда изменения частоты происходят за время, большее времени установ-

ления колебаний в резонаторе, зависимость амплитуды колебаний от времени  $t_0$  (отсчитываемого от начала импульса) может быть записана в виде

$$E(t_0) = \frac{E}{\sqrt{1 + 4Q^2 \alpha_f^2(t_0)}}, \quad (13)$$

где величина  $E$  определяется из выражения (1) с учетом зависимости тока пучка от времени, а  $\alpha_f(t_0) = \frac{n f_c(t_0) - f_p}{f_p}$ .

Проводя сравнительный анализ огибающих СВЧ-сигналов, возбуждаемых пучком в резонаторе в различные моменты времени  $t_0$  при различных значениях его собственной частоты, из выражения (13) можно определить  $f_c(t_0)$ . Погрешность измерений существенно зависит от характера изменения частоты следования сгустков во времени. Если постоянная времени резонатора  $\frac{Q}{\pi n f}$  мала по сравнению с характерным временем изменения частоты следования сгустков, то инерционность резонатора не влияет на результат измерений, и погрешность определяется погрешностью измерений относительного значения амплитуды возбуждаемого СВЧ-сигнала и величины импульсного тока. В случае необходимости постоянную времени резонатора можно, как указывалось выше, сделать достаточно малой. Так, например, для ускорителей с  $f_0 \approx 3 \cdot 10^9$  Гц можно использовать резонатор с  $n = 3$  и  $Q = 10^3$ , что обеспечивает возможность измерения нестабильности частоты с характерным временем  $\sim 10^{-7}$  с. При этом в резонаторе при импульсном токе пучка  $I_0 = 0,1$  А напряженность электрического поля составляет  $\sim 1 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ , что достаточно для индикации и измерения амплитуды поля.

Описанный метод был применен для определения внутримпульсной нестабильности рабочей частоты ускорителя ЛУ-40 [13] с автогенераторной схемой СВЧ-питания [39]. Собственная частота резонатора  $f \approx 5594,3$  равна второй гармонике рабочей частоты

ускорителя. Перестройка резонатора в пределах  $\pm 1,2$  МГц осуществлялась изменением его температуры, измерение которой производилось с точностью  $\pm 0,05$  °С. При измерении амплитуды импульсов огибающей СВЧ-сигналов с резонатора одновременно контролировалась амплитуда и форма импульса тока пучка, что позволило при обработке результатов учесть непостоянство тока за время проведения измерений. С учетом этого обстоятельства при времени усреднения  $\sim 1$  мкс погрешность измерения относительной нестабильности частоты в условиях эксперимента определялась погрешностью измерения относительной амплитуды поля в резонаторе и не превышала  $1 \cdot 10^{-5}$ . Наблюдаемые при измерениях осциллограммы и результат их обработки приведены на рис.15 и рис.16.

Анализ приведенной на рис.16 зависимости с учетом реального распределения тока пучка в течение импульса показал, что более 80% частиц сосредоточены в ступках, относительная нестабильность частоты следования которых не превышает  $3 \cdot 10^{-5}$ , что находится в соответствии с результатами измерений внутриимпульсной нестабильности частоты, проведенными другим методом [39].

Приведенные выше результаты измерений достоверны, если закон изменения частоты в течение импульса не изменяется от импульса к импульсу, что практически всегда имеет место. В случае же, когда это условие не выполняется, целесообразно использовать два или более резонаторов собственных частоты, которых отличаются на заданную величину, например, для описанного выше эксперимента - около 100 кГц. При этом измерение нестабильности частоты следования ступков может быть осуществлено в течение одного импульса ускорителя.

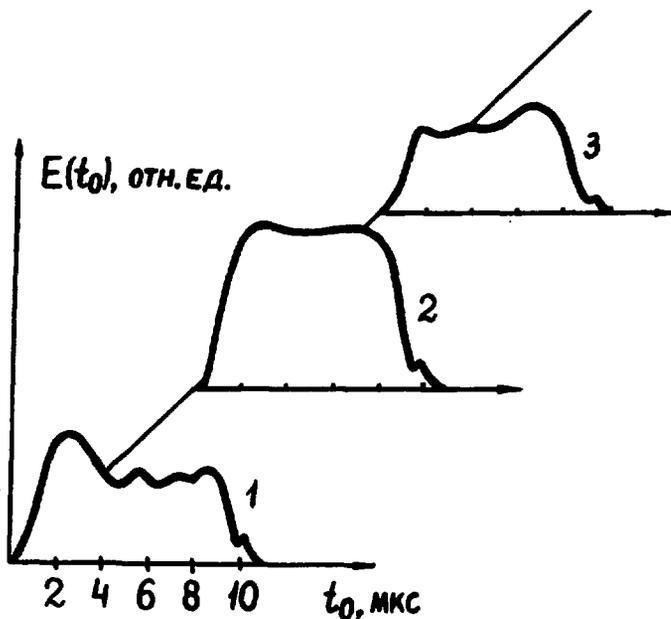


Рис. 15. Временная зависимость амплитуды СВЧ-сигнала в резонаторе при различной его собственной частоте. 1 -  $f_p - 2f_c = 200$  кГц, 2 -  $f_p = 2f_c$ ; 3 -  $f_p - 2f_c = -200$  кГц

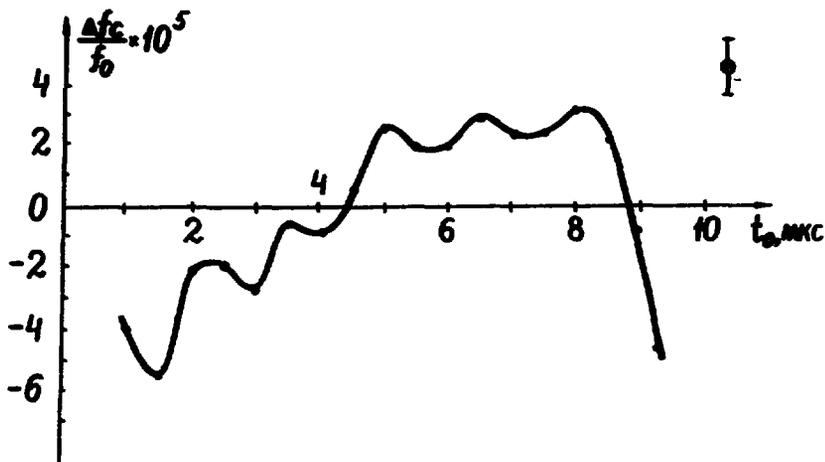


Рис. 16. Зависимость относительного изменения частоты следования электронных сгустков от времени в течение импульса.  $t_0 = 0$  соответствует началу токового импульса ЛУЭ

### 3.3. Методы измерения фазовых характеристик пучка ЛУЭ с помощью пассивных резонаторов.

Измерение фазовых характеристик пучков ЛУЭ; фазовой протяженности сгустка, функции распределения частиц по фазам в сгустке является весьма важной задачей при разработке и исследовании инжекторов ЛУЭ, систем формирования сгустков, при проведении исследовательских работ на ускорителях.

Один из методов определения фазовых характеристик пучка основан на использовании поперечной развертки пучка в возбуждаемом этим пучком пассивном резонаторе [21]. Возможность таких измерений вытекает из того факта, что поперечный импульс, приобретаемый частицей, зависит от ее фазы. При этом выражение для угла отклонения частицы с фазой  $\varphi_i$  в пассивном резонаторе, настроенном на  $n$ -ю гармонику частоты следования сгустков, можно записать в следующей форме:

$$\theta_i = \frac{P_{\perp i}}{P_{\parallel}} = D_n I_n \cdot \sin n \varphi_i, \quad (14)$$

где  $P_{\parallel}$  - продольный импульс частицы;  $D_n$  - является для заданного резонатора постоянной величиной.

Амплитуда  $n$ -й гармоники тока пучка  $I_n$ , вообще говоря, зависит как от фазовой протяженности сгустка  $\Delta\varphi$ , так и от закона распределения частиц по фазам в сгустке. Проведенные расчеты, однако, показали, что последняя зависимость является весьма слабой. Например, как следует из рис.17, различие величин  $I_n$  для гауссова и прямоугольного распределений при одном и том же значении  $I_0$  составляет десятые доли процента (при расчетах под фазовой протяженностью сгустка в случае гауссова распределения принимался диапазон фаз, содержащий 90% частиц сгустка). Таким образом, можно считать, что величина  $I_n$  опре-

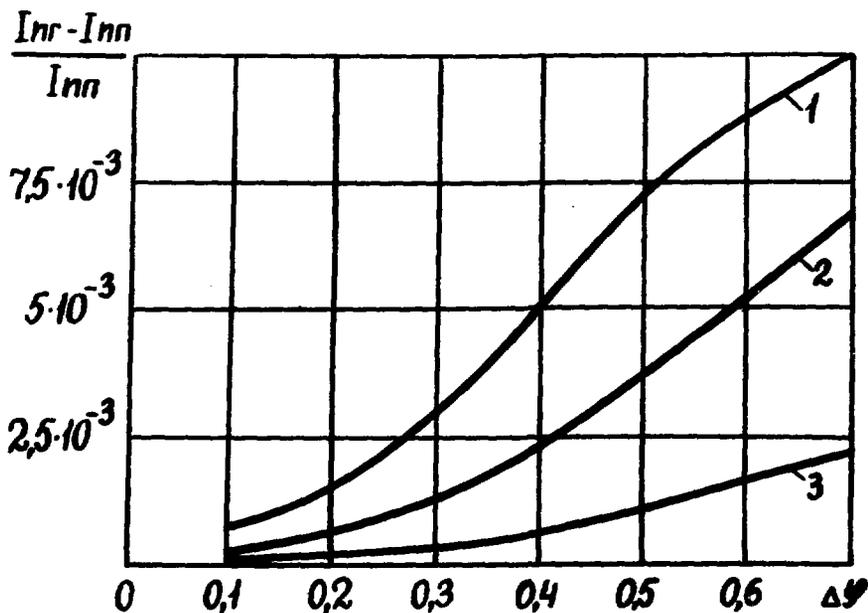


Рис.17. Зависимость относительной разности амплитуд  $n$ -гармоники тока пучка для гауссова ( $I_{ng}$ ) и прямоугольного ( $I_{nr}$ ) распределений частиц в сгустке от фазовой протяженности сгустка. 1 -  $n = 3$ ; 2 -  $n = 2$ ; 3 -  $n = 1$

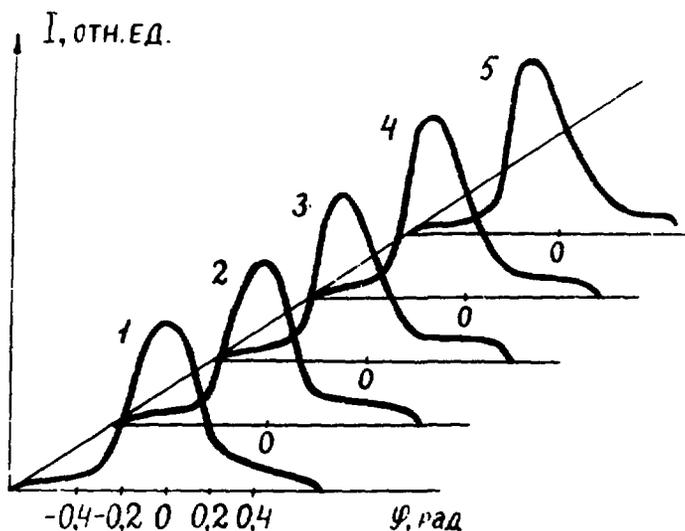


Рис.18. Распределение частиц по фазам в различные моменты времени, отсчитываемые от начала импульса тока пучка: 3 (1), 4 (2), 5 (3), 6 (4), 7 мкс (5)

делается только фазовой протяженностью ступки и практически не зависит от вида фазового распределения. В связи с этим, измерив угловое распределение электронов, прошедших резонатор, можно определить форму фазового распределения частиц в ступке. В частности, при малой фазовой протяженности ступков, когда  $\sin n\varphi_i \approx n\varphi_i$ ,  $\theta_i \sim \varphi_i$  и эти распределения совпадают.

Из формулы (14) следует также возможность измерения фазовой протяженности ступки. Подставляя в (14)  $\varphi_i = \frac{\Delta\varphi}{2}$ , получаем для максимального угла отклонения:

$$\theta_{\max} = 2I_n(\Delta\varphi) \cdot \sin \frac{n\Delta\varphi}{2}. \quad (15)$$

Измеряя  $\theta_{\max}$ , с помощью этого выражения и (2) или (3) можно определять  $\Delta\varphi$ .

Возможность определения фазовых характеристик пучка этим методом была подтверждена в экспериментах, проведенных на инжекционной части ускорителя ЛУ-40 и описанных в разделе (схема экспериментальной установки показана на рис.10). Исследование пространственно-временного распределения частиц на выходе пассивных резонаторов позволяет определить характеристики пучка в любой момент времени в течение импульса ЛУЭ. Обработка импульсных сигналов с ламелей (см.рис.11) в фиксированные моменты времени дает возможность изучить фазовые распределения частиц в ступке в эти моменты и исследовать динамику продольного распределения частиц в ступке в течение импульса. Это можно осуществить, если в течение импульса времени измерений частота следования ступков и ток пучка ЛУЭ остаются неизменными. Проведенные измерения отблужающих наведенных пучком СВЧ-сигналов показали, что это имеет место в течение времени от 2 до 6 нс от начала импульса тока пучка (длительность импульса  $\tau_u = 7,5$  нс)

Результаты измерений фазовых распределений частиц в ступке ЛУЭ в различные моменты времени в течение указанного интервала, полученные при обработке импульсов тока с ламелей, приведены на рис.18. Погрешность измерения фазы частиц в условиях эксперимента в основном определяется конечными размерами пучка и составляет  $6 \cdot 10^{-2}$  рад. Полученные результаты согласуются с данными измерений фазовых характеристик пучка на выходе инжектора ЛУ-40, описанных в [40].

Другой метод определения фазовой протяженности ступков пучка ЛУЭ основан на зависимости амплитуды поля возбуждаемого пучком в пассивном резонаторе от фазовой протяженности ступка. С этой целью используют несколько пассивных резонаторов, настроенных на различные гармоники частоты следования электронных ступков. Сравнительный анализ сигналов, пропорциональных напряженности поля в каждом из резонаторов, позволяет получить информацию о фазовой протяженности ступков. Так, в работах [34, 41] описан датчик фазовой протяженности ступков, используемый на ускорителе *SLAC*. Основными его элементами являются два пролетных резонатора, настроенных на первую и пятую гармоники рабочей частоты ЛУЭ. Достоинством датчиков этого типа является простота и возможность осуществлять непрерывный контроль за величиной фазовой протяженности электронных ступков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в настоящем обзоре результаты расчетов, экспериментального исследования и практического использования пассивных резонаторов показывают их широкие возможности при решении задач управления параметрами пучков линейных ускорителей и измерения их параметров. В связи с этим пассивные резонаторы, установленные на выходе линейных ускорителей, значительно расширяют возможности их практического использования. Являясь простыми, компактными, высокоэффективными, не требующими применения внешних источников питания, пассивные резонаторы находят все большее распространение, круг решаемых с их помощью задач постоянно расширяется.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Рябухин Ю.С., Шальнов А.В. Ускоренные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1980.
3. Вахрушин Ю.П., Глухих В.А., Гусева О.Л. и др. Терапевтические комплексы с использованием линейных ускорителей электронов // Труды десятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 21-23 октября 1986 г. / Дубна, 1987. Т.П. С.151-154.
4. Березина Н.М., Клушанский Д.А. Предпосевное облучение семян сельскохозяйственных растений. М.: Атомиздат, 1975.
5. Неклюдов И.М., Петрусенко Ю.Г., Резниченко Э.А. и др. Радиационные дефекты в металлах, облученных высокоэнергетичными электронами // ВАНТ. Сер.: ФРП и РМ. 1984. Вып. 4(32). С.28-35.

6. А.с. 782713 СССР, МКИ Н05Н. Способ создания ускоряющего поля/  
В.А.Вишняков, А.А.Ракитянский, Б.А.Терехов, А.М.Шендерович // Открытия. Изобретения. 1981. № 40.
7. Вишняков В.А., Закутин В.В., Кушнир В.А., Шендерович А.М. и др. Экспериментальное исследование получения больших ускоряющих полей и доускорения пучка линейного резонансного ускорителя в системе пассивных резонаторов // ЕТФ. 1987. Т.57, Вып.8. С.1549-1555.
8. Вишняков В.А., Закутин В.В., Кушнир В.А., Шендерович А.М. Методы увеличения энергии существующих линейных резонансных ускорителей: Обзор. М.: ЦНИИатоминформ, 1984.
9. Вишняков В.А., Ракитянский А.А., Терехов Б.А., Шендерович А.М. Автоускорение электронных пучков линейных ускорителей на бегущей волне с помощью резонаторов с фольгами: Препринт ХФТИ 81-18. Харьков: ХФТИ АН УССР, 1981.
10. Богданович Б.Ю., Голякин С.А., Игнатъев А.С. и др. Экспериментальное исследование ЛУЭ с накоплением поля излучения пучка // Теория, расчет и экспериментальные работы по ускорителям заряженных частиц. М.: Энергоиздат, 1982. С.49.
11. Богданович Б.Ю., Игнатъев А.П., Останин В.А. и др. Автоускорение релятивистского сгруппированного пучка в резонансных системах: Препринт 036-86. М.: МИФИ, 1986.
12. Вишняков В.А., Закутин В.В., Кушнир В.А., Шендерович А.М. и др. Экспериментальное исследование доускорения пучка в системе пассивных резонаторов//Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, октябрь 1986 г./Дубна, 1987. Т.1. С.257-259.
13. Грижко В.М., Гришаев И.А., Фурсов Г.Л. и др. Линейный ускоритель на средний ток 1 мА//Атомная техника. 1979. Т.46. Вып. 5. С.336-340.

14. Вальднер О.А., Шальнов А.В., Диденко А.Н. Ускоряющие волноводы. М.: Атомиздат, 1973. 216 с.
15. Вальтер А.К., Гришаев И.А., Демьяненко Г.К. и др. Линейный ускоритель электронов на бегущей волне с энергией на выходе 360 МэВ // Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 21-27 августа 1963 г./М.: Атомиздат, 1964. С.435-439.
16. Белоглазов В.И., Вишняков В.А. Частотные характеристики много-секционных линейных ускорителей // ЖТФ . 1978. Т.48. Вып. 2. С.397-400.
17. Вишняков В.А., Закутин В.В., Кушнир В.А., Шендерович А.М. и др. Получение ускоряющих полей в цепочке пассивных резонаторов, возбуждаемых модулированным электронным пучком // ВАНТ. Сер.:ТФЭ. 1984. Вып. 2(19). С.37-39.
18. А.С. 1365378 СССР, МКИ Н05Н. Линейный резонансный ускоритель электронов/ В.А.Вишняков, В.А.Кушнир, В.П.Ромасько, А.М.Шендерович // Открытия. Изобретения. 1988. № 1.
19. Вишняков В.А., Кушнир В.А., Ромасько В.П., Шендерович А.М. Применение пассивных резонаторов для изменения параметров пучков линейных резонансных ускорителей // ВАНТ. Сер.: ТФЭ, 1987. Вып. 3(3). С.33-34.
20. Вишняков В.А., Закутин В.В., Кушнир В.А., Шендерович А.М. и др. Стабилизация параметров пучка линейного ускорителя с помощью возбуждаемого им в пассивных резонаторах электрического поля // Аннотации докладов XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 25-27 октября 1988 г./Дубна, 1988.С.44.
21. Зыков А.И., Кушнир В.А., Ромасько В.П. и др. Фазовый анализ пучка линейного резонансного ускорителя с помощью пассивных резонаторов// ВАНТ. Сер.: ЯФИ. 1989г. Вып. 5(5). С.65-68.

22. А.С. 329869 СССР, МКИ Н05Н. Электронный инжектор / Б.Ю.Богданович, В.Ф.Гасс, И.А.Смирнов// Открытия. Изобретения. 1973. № 4.
23. Богданович Б.Ю., Гасс В.Ф., Смирнов И.А. Электронный инжектор с пассивными резонаторами // Ускорители. М.: Атомиздат, 1974. Вып. 18. С.7-13.
24. Орлов А.К. Анализ динамики частиц в линейном ускорителе для электронной микроскопии // Труды 7-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, октябрь 1980 г./Дубна: ОИЯИ, 1981. Т.1. С.248-251.
25. Глазов А.И., Шестак В.П., Викулов В.Ф. Резонаторные датчики тока и положения пучка электронов в линейных ускорителях // Ускорители. М.: Атомиздат, 1976. Вып. 15. С.28-30.
26. Алексеев Л.К., Викулов В.Ф., Глазов А.И. и др. // Многофункциональная система измерения параметров пучка ЛУЭ на малые энергии // ВАНТ. Сер.: ТФЭ. 1981. Вып. 3(9). С.34-35.
27. Рудычев В.Г., Ушаков В.И. Формирование и измерение временных характеристик токовых импульсов ЛУЭ // Тезисы докладов 6 Всесоюзного совещания по применению ускоряющих частиц в народном хозяйстве, Ленинград, 11-13 октября 1988 г./М.: ЦНИАтоминформ, 1988. С.302.
28. Алимов А.С., Говоркян В.Г., Грибов И.В. и др. Датчики параметров пучка разрезного микротрона непрерывного действия // Аннотации докладов XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 25-27 октября 1988 г./Дубна, 1988. С.15.
29. Алимов А.С., Грибов И.В., Корнеев В.А. и др. Резонаторный датчик положения, тока и фазы пучка электронов//ПТЭ. 1989. № 3. С.28-31.
30. Острейко Г.Н., Сердобинцев Г.В., Шубин Е.И. Измерение тока малой длительности резонаторным датчиком // ВАНТ. Сер.: ТФЭ. 1981. Вып. 1(7). С.28.

31. Васильев Е.П., Вишняков В.А., Муфель В.Б. Система автоматического удержания фазы электронных слустков на выходе инжекторного ускорителя // ВАНТ. Сер.: ФЭЭ. 1972. Вып. I(1). С.15-17.
32. Гармаш А.Г., Глазов А.И. Погрешность измерения тока пучка при использовании резонаторных преобразователей // Разработка, эксплуатация и применение линейных ускорителей. М.: Энергоатомиздат, 1984. С.76-79.
33. Алексеев Л.К., Викулов В.Ф., Гармаш А.Г. и др. Измерение токов встречных пучков заряженных частиц // ВАНТ. Сер.: ТФЭ. 1983. Вып. 2(14). С.82.
34. The Stanford two-mile accelerator. R.B.Neal, General Editor. 1968. W.A.Benjamin. Inc. New York, Amsterdam.
35. Farinholf E.W., Parkas Z.D., Hogg H.A. Microwave beam positron monitors at SLAC // IEEE Trans. 1967. Vol. NS-14(3). P.1127-1131.
36. Алексеев Л.К., Гармаш А.Г., Глазов А.И. и др. Система измерения положения пучка на основе резонаторных преобразователей// ВАНТ. Сер.: ТФЭ. 1983. Вып. 2(14). С.82.
37. Алексеев Л.К., Гармаш А.Г., Глазов А.И. и др. Измерение положения центра тяжести пучка заряженных частиц с помощью резонаторных преобразователей // Разработка, эксплуатация и применение линейных ускорителей. М.: Энергоатомиздат, 1984. С.68-71.
38. RF beam-current, -phase, and position monitors. Joung L. Los-Alamos National Lab. NM (USA). 12 Dec. 1984. 12 P. Available from NTIS, pc A 02/MF. A01 as DE 86002847, DOE/ER/10527T6.
39. Белоглазов В.И., Вишняков В.А., Гришаев И.А. и др. Опыт использования клистронного автогенератора в схеме возбуждения многосекционного ускорителя // ВАНТ. Сер.: Линейные ускорители. 1976. Вып. I(2). С.14-15.

40. Белоглазов В.И., Бондаренко А.В., Вишняков В.А. и др. Конструкция и характеристики инжекторного ускорителя со ступенчатым изменением фазовой скорости волны // Препринт ХФТИ 71-32. Харьков: ХФТИ АН УССР, 1971.
41. Miller R.H. Proposed Bunch Monitor. Tech. Note. SLAC-TN-63-65. Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, California.

Вадим Александрович Вишняков, Валерий Викторович Закутин,  
Артур Иванович Зыков, Владимир Абрамович Кушнир,  
Александр Маркович Шендерович

ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ  
И ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКОВ ЛИНЕЙНЫХ  
РЕЗОНАНСНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

Ответственный за выпуск Л.М.Ракивненко

Редактор, корректор Т.В.Ситнянская

---

Подписано в печать 10.II.89. БЦ - 23446. Формат 60x84/16.  
Бум.писч. №1. Офсетн.печ. Усл.п.л. 2,8. Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 180,  
Заказ № 1165. Цена 40 коп. Индекс 4629.

---

Харьковский ордена Ленина  
и ордена Октябрьской Революции физико-технический институт АН УССР.  
310108, Харьков, ул. Академическая, 1

40 коп.

Индекс 4629

Обзор, 1989, 1-43.