

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-187

P9-97-187

А.А.Глазов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин,
В.В.Калиниченко, В.А.Кочкин, Д.Л.Новиков,
Л.М.Онищенко, Е.В.Самсонов

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ
КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НА НЕЙ
ЭФФЕКТА РАСШИРЕНИЯ ЗАМКНУТЫХ ОРБИТ

1997

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных проблем в начале 1968 года была введена в действие электронная модель ускорителя нового типа — релятивистского кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой [1]. Модель имеет одинаковую с моделируемым протонным ускорителем конечную энергию и набор энергии за оборот (в единицах энергии покоя), а также частоты бетатронных колебаний и фазовую протяженность ускоряемого сгустка пучка. Основные параметры электронной модели следующие:

Энергия инжекции — 6 кэВ; конечная энергия — 409 кэВ;
радиус инжекции — 18 см; конечный радиус — 100,7 см;
частота обращения $f = 39,625$ МГц;
 $Q_r = 1,045 + 1,9$; $Q_z = 1,15 + 1,32$.

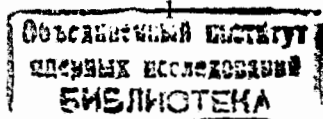
Электронная модель предназначалась для исследования динамики сильно-точного пучка в релятивистском циклотроне.

На первом этапе исследований определялись динамические характеристики пучка и влияние пространственного заряда на движение пучка и его характеристики, предельно достижимая плотность ускоряемого пучка без потерь, влияние пространственного заряда на частоту некогерентных бетатронных колебаний пучка при его ускорении от начального до конечного радиуса. В процессе исследований в конструкцию ускорителя непрерывно вносились изменения и доработки. В дальнейшем при экспериментальных исследованиях вывода пучка из циклотрона с использованием эффекта расширения орбит, открытого в ОИЯИ в 1972 г. [2], эти доработки и изменения конструкции ЭМКЦ имели кардинальный характер как при формировании нового закона магнитного поля ускорителя, так и в схеме ускоряющей высокочастотной системы, которая преобразовалась из однодуантной с 90° дуантом системы в трехдуантную, использующую режим flat-top ускорения с автоматической подстройкой основной частоты со второй гармоникой. Описанию этих изменений, внесенных в основные системы ускорителя, посвящена настоящая работа.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Магнитное поле ЭМКЦ [3] в плоскости симметрии $z = 0$ имеет вид

$$B_z(r, \Phi) = B(r) \left[1 + \varepsilon(r) \cdot \sin \left(\frac{r}{\lambda} - N\Phi \right) \right], \quad (1)$$



где $2\pi\lambda$ и $N=8$ — радиальный шаг и периодичность структуры магнитного поля, $\epsilon = B_8(r)/B(r)$. Радиальная зависимость изохронного среднего поля и требуемой вариации $\epsilon(r)$ рассчитывалась по формулам

$$B(r) = \frac{B_0 \cdot \tau(r)}{\sqrt{1 - \left[\frac{r \cdot \tau(r)}{r_\infty} \right]^2}}, \quad (2)$$

$$\epsilon(r) = \frac{N\lambda}{r} \left\{ (Q_z^2 + n) \frac{1 - \frac{1+n}{N^2}}{1 - \frac{1+n}{2N^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{N\lambda}{r} \right)^2} \right\}^{1/2}. \quad (3)$$

где

$$\tau(r) \approx 1 - \frac{\epsilon^2}{2(N^2 - 1 - n)(1 + n)} \left[2 - \frac{N^2}{2(N^2 - 1 - n)} + n + r \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right] + \frac{\epsilon^2 N^2}{4(N^2 - 1 - n)^2}. \quad (4)$$

В первом приближении n , n' , ϵ и ϵ' , необходимые для расчета $\tau(r)$, определены из (2) и (3) при $\tau(r) = 1$:

$$n = \frac{\left(\frac{r}{r_\infty} \right)^2}{1 - \left(\frac{r}{r_\infty} \right)^2}, \quad n' = \frac{2r_\infty^2}{r^3} n^2, \quad \epsilon' = \frac{\epsilon}{2(Q_z^2 + n)} \left[n' - \frac{2r}{N^2 \lambda^2} \epsilon^2 \right]. \quad (5)$$

Для параметров ускорителя, приведенных выше при выбранном значении $\Delta Q_z = \pm 0,09$, допуск на величину вариации магнитного поля на конечном радиусе равен $\pm 0,07$ Гс. Допуск на величину среднего поля при максимальном наборе энергии за оборот $\sim 1,5$ кэВ составляет $\pm 2,5 \cdot 10^{-3}$.

Магнитное поле ЭМКЦ формируется с помощью следующих систем токовых обмоток:

- 1) обмотки для создания основной гармоники магнитного поля. (8 спиралей, изготовленных из медной трубки $\varnothing 8 \times 5$ мм);
- 2) кольцевых обмоток грубой коррекции (13 пар обмоток);
- 3) кольцевых обмоток тонкой коррекции (24 пары обмоток) для коррекции «по пучку» среднего магнитного поля;

4) двух систем прямолинейных проводников для коррекции первой гармоники радиальной компоненты магнитного поля Земли и нормальной компоненты поля вдоль тракта внешней инжекции.

Обмотка для создания основной гармоники магнитного поля представляет собой систему двух симметрично расположенных относительно плоскости одиночных проводников ($\varnothing 8 \times 5$ мм), уложенных по линиям спирали Архимеда $\tau = N\lambda\Phi$ и дугам окружностей на радиусах $R_n = 10$ см и $R_k = 114$ см (рис.1). Угол между

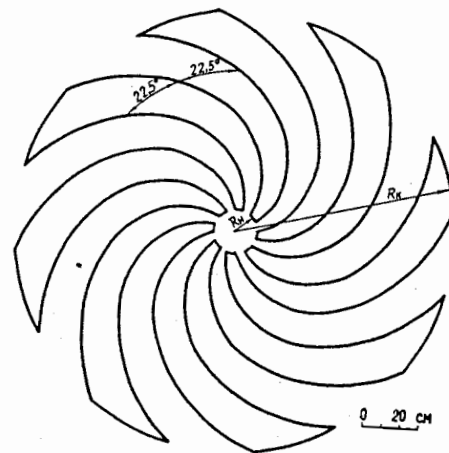


Рис.1. Форма основной вариационной обмотки

прямым и обратным проводником элемента периодичности обмотки

является постоянным и равным $\frac{\pi}{N}$. Вертикальный зазор между проводниками $2h(r)$ изменяется в соответствии с требованиями к характеру зависимости вариации от радиуса.

Среднее магнитное поле, которое формируется с помощью обмоток грубой коррекции, определяется как разность между требуемым изохронным полем и суммой средних полей гармонической обмотки и вертикальной компоненты магнитного поля Земли, принятой равной 0,5 Гс. Нахождение необходимого распределения тока в этих обмотках производилось на ЭВМ. Отклонение сформированного среднего поля от заданного не превышает $\pm 0,01$ Гс. Результаты формирования среднего магнитного поля \bar{B} и основной гармоники B_8 представлены на рис.2. Как упоминалось выше, после 1972 г. на ЭМКЦ начались исследования эффекта расширения замкнутых орбит.

В первых экспериментах по исследованию эффекта расширения замкнутых орбит (ЭРО) на ЭМКЦ [4] наблюдалось увеличение разделения орбит с 3-4 мм до 3-4 см. Однако одновременно с этим было отмечено увеличение радиального размера пучка. Одной из возможных причин увеличения размера пучка могли быть «разрывы» в зависимости коэффициента расширения орбит от радиуса из-за несовершенства формирования требуемого спада вариации в районе расширения при помощи одной обмотки спада вариации № 1. В дальнейшем для обеспечения непрерывной зависимости коэффициента расширения орбиты от радиуса создана система дополнительных вариационных обмоток. Расчеты движения показали также, что в зоне действия ЭРО когерентные колебания пучка не должны превышать 5 мм, а амплитуда низших гармоник

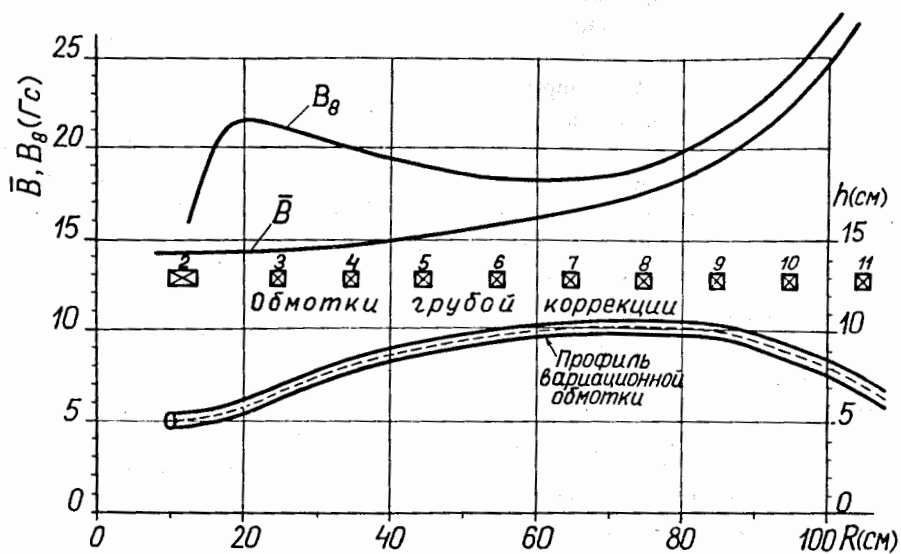


Рис.2. Среднее магнитное поле \bar{B} и основная гармоника B_8 в зависимости от радиуса

аксиальной составляющей магнитного поля не должна превышать допуска: $B_1, B_2 < 0,05$ Гс. Для выполнения этих требований была смонтирована система обмоток коррекции низших гармоник, расположенная в диапазоне радиусов ускорения.

Коэффициент расширения орбит α связан со средним радиусом орбиты R и параметрами магнитного поля следующим соотношением [5]:

$$\alpha = \frac{R}{p} \frac{dp}{dR} = \frac{1}{1+n} \frac{R}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dR}, \quad (6)$$

где $p = eBR\Lambda$ — импульс частицы, $n = \frac{R}{B} \frac{dB}{dR}$ — показатель роста магнитного поля.

$$\Lambda \approx \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{\epsilon^2}{2N^2} \left(\frac{3}{2} + n + \frac{R}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dR} \right)}. \quad (7)$$

Поскольку при уменьшении Λ разделение орбит увеличивается пропорционально коэффициенту

$$K = \alpha(1+n) \quad (8)$$

для нахождения параметров магнитного поля, обеспечивающих увеличение разделения, необходимо найти совместное решение уравнений (6)—(8) при задании соответствующего вида функций $K(R)$. Так как при $n = \text{const}$ решение системы уравнения не выражается элементарными функциями, то можно получить его путем численного интегрирования, приведя систему уравнений (6)—(8) к виду

$$\frac{d\Lambda}{dR} = \frac{\Lambda}{R} (1+n) \left(\frac{1}{k} - 1 \right),$$

$$\frac{d\epsilon}{dR} = \frac{2N^2}{R\epsilon} (\Lambda^2 - \Lambda) - \frac{3+2n}{2R} \epsilon, \quad (9)$$

На рис.3 представлены результаты интегрирования системы (9) в зоне конечных радиусов ЭМКЦ. В этих расчетах для значения n использовалось достаточное приближение, соответствующее изохронному полю в отсутствие вариации:

$$n = \frac{R^2}{\left(\frac{c}{2\pi f} \right)^2 - R^2}, \quad (10)$$

где c — скорость света, f — частота обращения частиц.

Заданная в этом расчете форма изменения $k(R)$ также показана на рис.3. Расчет движения частиц в динамическом режиме для полученной амплитуды $B_8(R)$ (рис.3, кривая 2) показывает увеличение разделения орбит в 8÷10 раз, что находится в соответствии с величиной K , заданной при интегрировании системы (9) (рис.3, кривая 2).

Расчеты системы вариационных обмоток, с помощью которой было создано требуемое изменение вариации в зоне разделения, проводились с использованием программы VACUW [6].

В таблице 1 использованы следующие обозначения: $R_{\text{н}}$ и $R_{\text{к}}$ — начальный и конечный радиусы обмо-

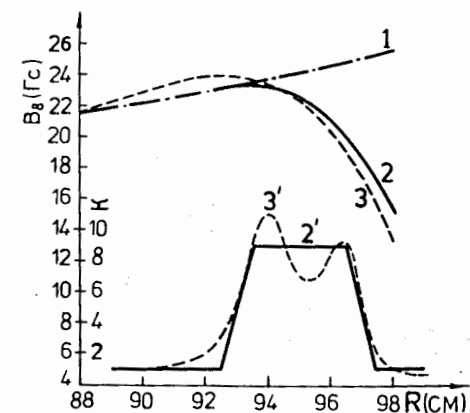


Рис.3. Характеристики магнитного поля в зоне действия эффекта расширения: 1 — амплитуда восьмой гармоники $B_8(R)$ в режиме без расширения орбит; 2 и 2' — расчетные зависимости $B_8(R)$ и $K(R)$ в режиме расширения; 3 и 3' — экспериментальные зависимости $B_8(R)$ и $K(R)$ в режиме расширения

Таблица 1. Параметры вариационных обмоток, формирующих спад вариации в зоне разделения орбит

	R_{II} , см	R_k , см	$2h$, см	Φ , град.	θ , град.	$I_{ном}$, А	Материал
1	100,0	115,5	14,1	9,5	45	469,5	Трубка м8х5
2	99,5	106,5	9,0	3,3	45	122,5	Трубка м6х4
3	94,5	88,5	9,0	2,2	45	37,5	Трубка м6х4
4	93,5	95,5	11	1,4	45	7,5	Провол. м-4,00

ток; $2h$ — зазор между обмотками; Φ — угол, отсчитываемый от оси камеры, проходящей через центр инжектора, до середины элемента периодичности обмоток по направлению вращения спиралей основной вариационной обмотки; θ — период; $I_{ном}$ — номинальный ток. Один полюс вариационной обмотки состоит из двух идентичных ветвей, уложенных по дугам окружности и радиальным линиям (рис.4). Ветви сдвинуты друг относительно друга на половину периода системы — $22,5^\circ$, и по ним пропускаются токи противоположного направления. Это приводит к компенсации среднего поля и к удвоению амплитуды вариации по сравнению с обмоткой, состоящей из одной ветви. На рис.3 и (кривые 3 и 3') показаны результаты измерений магнитного поля при токах вариационных обмоток, указанных в табл.1. На рис.3(3) видно, что экспериментально полученная кривая зависимости коэффициента расширения орбит имеет вид непрерывной функции, а максимальное значение

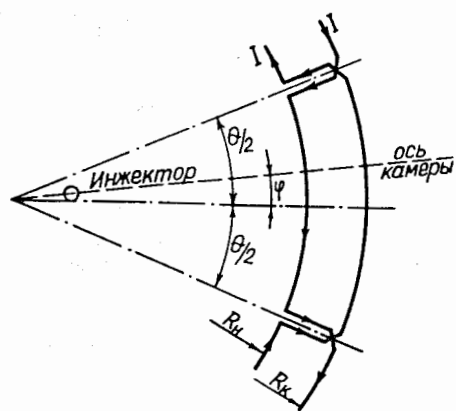


Рис.4. Геометрия дополнительных вариационных обмоток

коэффициента расширения соответствует увеличению энергетического шага орбит в 8+10 раз.

Возмущения сформированного магнитного поля ЭМКЦ, вызываемые неточностями изготовления и изменениями геометрии ускорительной камеры при вакуумной откачке, влияют на ЭРО двояким образом:

а) на начальных и средних радиусах, где частота свободных радиальных колебаний близка к 1, возмущения вызывают раскачку когерентных колебаний, которые замывают эффект расширения в зоне конечных радиусов, даже в случае идеально сформированного поля в этой зоне;

б) в зоне действия эффекта расширения возмущения они вызывают увеличение радиального эмиттанса пучка, несмотря на отсутствие когерентных колебаний пучка в зоне, предшествующей расширению.

Анализ расчетов на ЭВМ эффекта расширения показал, что когерентные колебания пучка в зоне конечных радиусов не должны превышать 5 мм, а амплитуды первой и второй гармоник магнитного поля должны быть не более 0,05 Гс. Для компенсации первой гармоники возмущения аксиальной составляющей магнитного поля на планировке вакуумной камеры расположены 12 пар обмоток, параметры которых приведены в табл.2.

Таблица 2

№ пары	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R_{II} , см	22	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	95
ΔR , см	2,5	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	5
$2h$, см	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
θ , град.	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Φ , град.	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
W	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
I_{max}	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
k	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

В табл.2 использованы следующие обозначения: R_{II} — начальный радиус обмотки; ΔR — радиальная протяженность; $2h$ — зазор между обмотками, θ — угловая протяженность; Φ — угол между осью камеры и осью обмотки; W — число витков; I_{max} — максимальный ток через обмотку, k — номер гармоники магнитного поля, создаваемого обмоткой. На рис.5 приведена геометрия пары таких обмоток, обеспечивающих вращение фазы первой гармоники в интервале $0 \pm 360^\circ$. Для жесткости все обмотки компенсации компаундированы эпоксидной смолой и закрыты медными плакировками по всей плоскости их расположения.

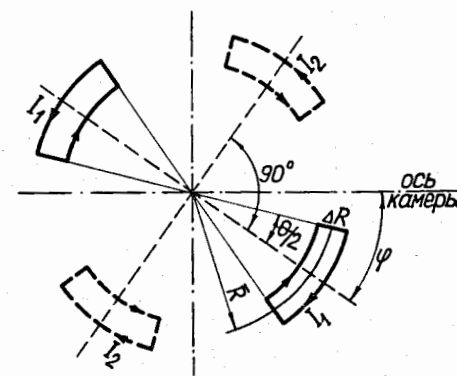


Рис.5. Геометрия обмоток компенсации низших гармоник

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА

Для проявления эффекта разделения помимо допусков на амплитуды вынужденных и свободных колебаний частиц пучка, а также допусков на низшие гармоники магнитного поля существуют ограничения на энергетический разброс частиц в ускоряемом пучке, который на конечном радиусе ЭМКЦ в зоне вывода не должен превышать $\Delta W/W \leq 10^{-3}$. Это жесткое требование приво-

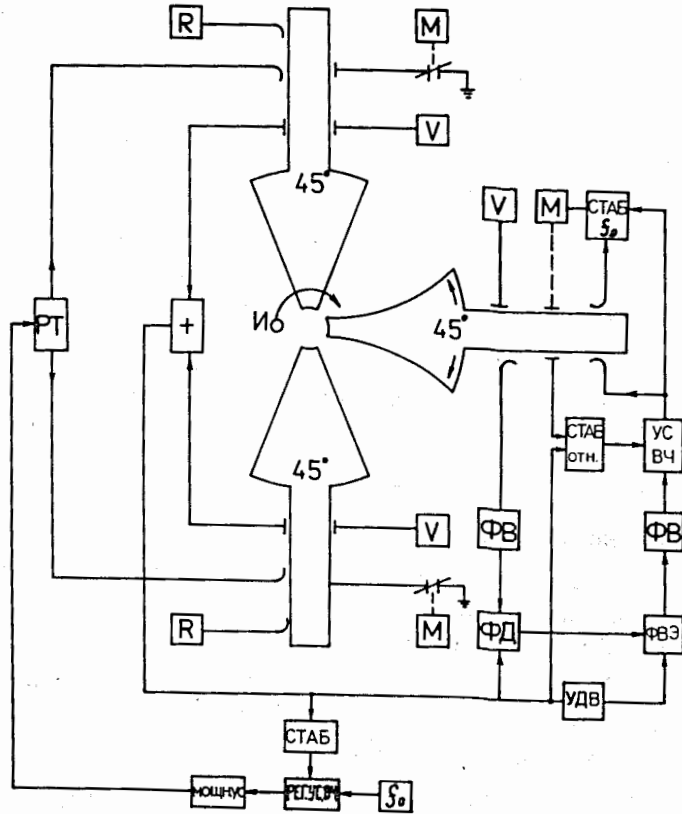


Рис.6. Блок-схема ускоряющего высокочастотного питания ЭМКЦ. Обозначения: R — активная согласующая нагрузка, М — моторный привод, V — вольтметр, СТАБ — блок автоматической подстройки частоты, РТ — резонансный трансформатор, И — источник электронов, УС ВЧ — усилитель ВЧ, ФВ — фазовращатель, ФД — фазовый детектор, ФВЭ — фазовращатель электронный, УДВ — удвоитель частоты, МОЩН.УС — мощный усилитель, РЕГУС.ВЧ — регулируемый усилитель ВЧ

дит к необходимости использовать при ускорении режим flat-top ускорения [7], а также аппаратные методы стабилизации параметров ВЧ-системы с применением автоматических каналов с обратной связью. ВЧ-система ЭМКЦ из однодуантной с 90° дуантом системы была преобразована и модернизирована в систему, состоящую из двух 45° дуантов с дополнительным гармоническим дуантом сложной формы, обеспечивающую при определенных условиях разброс энергии частиц в ускоряемом пучке, не превышающий 10^{-3} . Полная блок-схема высокочастотного питания ЭМКЦ представлена на рис.6.

Основные дуанты ускоряющей системы возбуждаются от одного генератора высокой частоты ($f = 39,609$ МГц). Для независимого изменения высокочастотного напряжения на основных дуантах ЭМКЦ разработан резонансный трансформатор, позволяющий получить на его выходе два разных значения напряжения с возможностью подбора величины V_1 и V_3 и разности фаз между ними в пределах заданных допусков. Разность фаз между основными дуантами поддерживалась при помощи подстройки ручным приводом дополнительных конденсаторов, позволяющих настраивать на резонансную частоту каждый дуант. Принципиальная схема резонансного трансформатора приведена на рис.7.

Резонансный трансформатор представляет собой коаксиальную линию, замкнутую на одном конце подвижной закороткой, служащей для настройки резонансного трансформатора на рабочую частоту. Второй конец коаксиальной линии нагружен на переменный вакуумный конденсатор C_1 точной подстройки и двух емкостных делителей, содержащих два переменных конденсатора C_4 и C_5 , позволяющих изменять коэффициент трансформации. Эксплуатация описанной системы показала, что она выполняет предназначенную для нее роль, обеспечивая на реальной нагрузке равенство ускоряющих напряжений $V_1 = V_3 = 1440$ В с точностью ± 5 В и стабильность разности фаз между ними с точностью $\pm 1^\circ$ за время работы порядка нескольких часов после двухчасового прогрева всей системы.

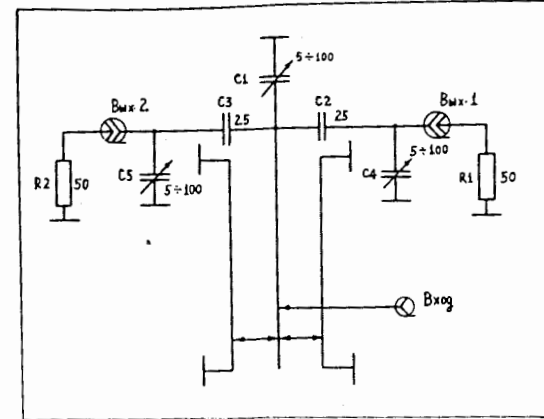


Рис.7. Принципиальная схема резонансного трансформатора

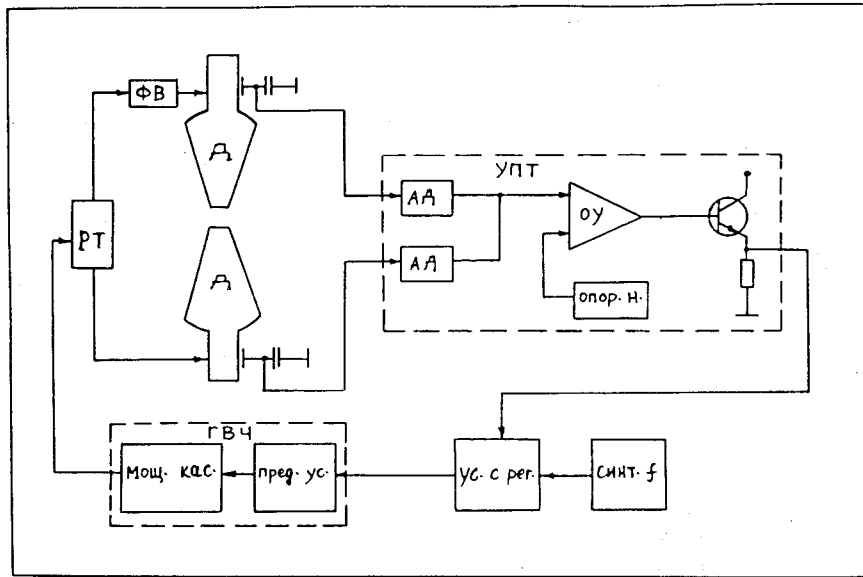


Рис.8. Функциональная схема устройства стабилизации ВЧ-напряжения

Функциональная схема устройства стабилизации высокочастотного напряжения приведена на рис.8. Ранее использованная схема стабилизации ВЧ-напряжения обладала тем недостатком, что обратная связь по стабилизации была задействована только на один дуант ускоряющей системы. Для повышения надежности эксплуатации и стабильности ВЧ-напряжения на основных дуантах блок маломощных каскадов (БМК) высокочастотного генератора «Пингвин» с электровакуумных ламп старого образца переведен на современную полупроводниковую элементную базу [8]. Для передачи ВЧ-мощности от предварительного усилителя на сетку лампы ГУ-43Б предоконечного каскада генератора применено согласующее устройство. Усилитель позволяет развивать на сетке лампы ГУ-43Б ~ 25 В, что достаточно для возбуждения на основных дуантах ВЧ-напряжения до ~ 2 кВ. После двухчасового прогрева элементов генератора и стабилизирующего устройства стабильность ускоряющего ВЧ-напряжения на дуантах ускоряющей системы ЭМКЦ не хуже 0,1%.

В связи с наличием запаса мощности у основного ВЧ-генератора для режима flat-top ускорения было решено использовать набор из первой и второй гармоник ускоряющего напряжения, как обеспечивающий максимальную угловую протяженность зоны «постоянного» набора энергии. Подобный выбор диктуется также соображениями радиотехники, так как ввиду конструктивных особенностей ЭМКЦ ускорения в ней может осуществляться толь-

ко с помощью дуантов, протяженность которых даже для первой гармоники соизмерима с рабочей длиной волны ускоряющего напряжения, что приводит к заметному радиальному распределению напряжения.

В случае использования первой и второй гармоник ускоряющего напряжения при оптимальных фазовых соотношениях набор энергии за оборот будет равен

$$\Delta W / \Delta W_{01} = \cos \phi - \frac{1}{a} \cos 2\phi, \quad (11)$$

где ΔW_0 определяется амплитудой ускоряющего напряжения U_0 и фазовой протяженностью дуанта θ

$$\Delta W_{0i} = 2U_{0i} \sin \theta_i / 2, \quad (12)$$

«а» — отношение наборов: $a = \Delta W_{01} / \Delta W_{02}$.

В зависимости от «а» выражение (11) определяет симметричную относительно $\phi = 0$ однокорбую ($a \geq 4$) или двугорбую ($a < 4$) кривые. Положение и величина экстремумов и диапазон фаз, в котором разброс энергии при наборе не будет превышать допустимого, могут быть определены аналитически.

У двугорбой кривой экстремумы будут при $\phi_1 = 0$ (min) и $\cos \phi_2 = \pm a/4$ (max).

Относительный энергетический разброс между максимумом и минимумом двугорбой кривой

$$\delta_{\min} = 2 \left[\left(\frac{\Delta W}{\Delta W_{01}} \right)_{\phi_2} - \left(\frac{\Delta W}{\Delta W_{01}} \right)_{\phi_1} \right] / \left[\left(\frac{\Delta W}{\Delta W_{01}} \right)_{\phi_2} + \left(\frac{\Delta W}{\Delta W_{01}} \right)_{\phi_1} \right] \quad (13)$$

ограничивает возможный выбор значений «а», т.к. допустимое значение разбросов δ должно быть больше или равным δ_{\min} : $\delta \geq \delta_{\min}$.

Наличие малого паразитного фазового сдвига трансформирует (11) в

$$\begin{aligned} \Delta W / \Delta W_{01} &= \cos \phi - \frac{1}{a} \cos (2\phi + 2\psi) = \\ &= \cos \phi - \frac{\cos 2\psi}{a} \cos 2\phi + \frac{\sin 2\psi}{a} \sin 2\phi, \end{aligned} \quad (14)$$

то есть появляется сдвиг экстремумов и асимметричная часть, приводящая к перекосу плато, что, в свою очередь, приводит к сужению допустимой области фаз.

Положение экстремумов и ширина допустимой фазовой области для задаваемых значений фазового сдвига « ψ » и относительного разброса наборов « δ » могут быть найдены в этом случае путем численного решения трансцендент-

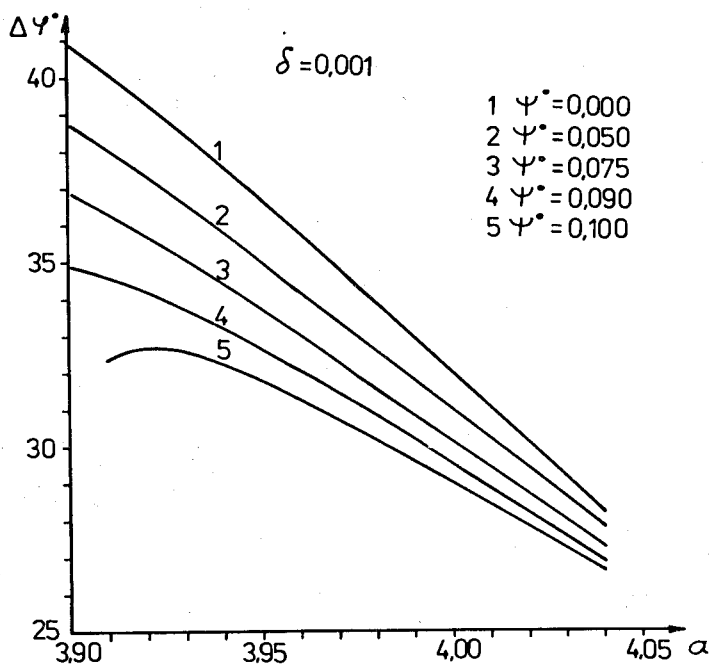


Рис.9. Отношение наборов $a = \Delta W_{01} / \Delta W_{02}$, $\Delta\psi$ — азимутальная протяженность сгустка пучка, θ — фазовая протяженность дуанта, δ — относительный энергетический разброс между максимумом и минимумом, ψ — фазовый сдвиг относительно основного ускоряющего напряжения

ных уравнений. Результаты расчета допустимой области фаз в зависимости от отношения наборов «а» для $\delta = 0,001$ и ψ в диапазоне от 0 до $0,1^\circ$ ($0 \leq \psi \leq 0,1^\circ$) представлены на рис.9.

Как уже отмечалось выше, благодаря высокой рабочей частоте $f_{\text{обр}} = f_1 = 39,6$ МГц, вдоль радиуса на ускоряющей кромке имеется заметное падение ускоряющего напряжения, причем на второй гармонике оно должно быть значительно большим, чем на первой. В этом случае варьированием угловой протяженности дуанта второй гармонике можно поддерживать оптимальные значения наборов энергии на дуантах первой и второй гармоник: $a \sim 4$.

Необходимая угловая протяженность гармонического дуанта $\theta(r)$ была определена путем последовательных приближений экспериментально-расчетным способом исходя из условия, что при $r = r_{\text{max}}$ «а» = 4, а $\theta(r_{\text{max}}) = 45^\circ$.

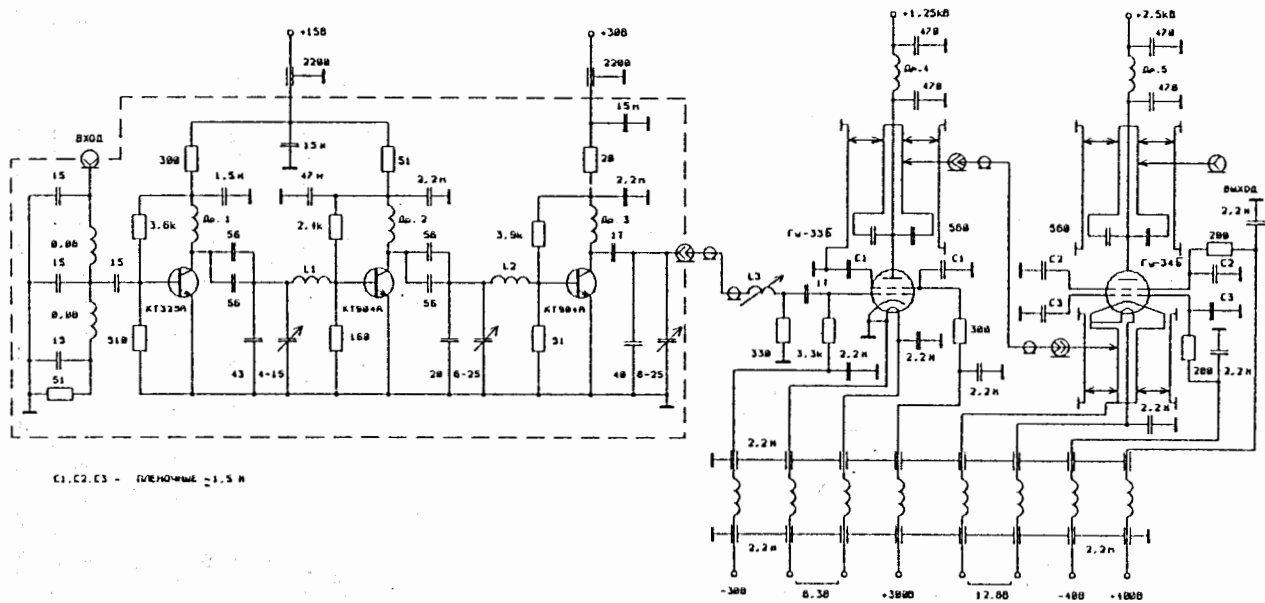


Рис.10. Принципиальная схема ВЧ-генератора второй гармоники

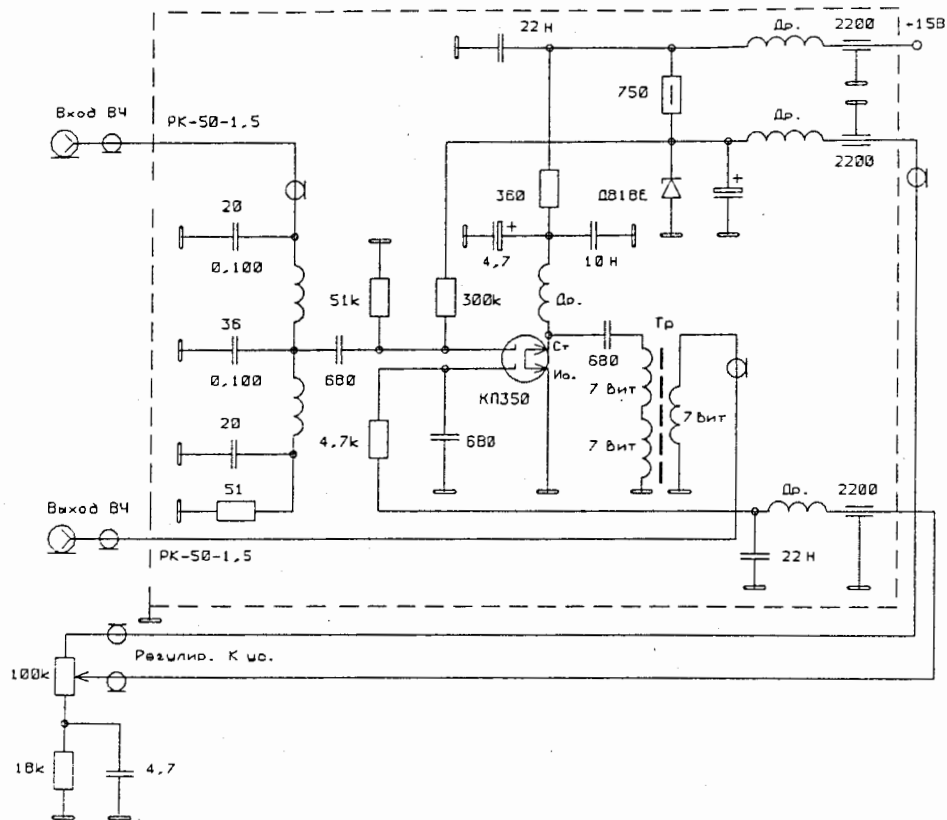


Рис.11. Принципиальная схема регулируемого усилителя мощности на 80 МГц

При этом $\theta(r_{\min})$ составляет около 20° , и при отношении амплитуд ускоряющего напряжения $V_{01}(r_{\min})/V_{02}(r_{\min}) = 3,32$ экспериментальные значения «а» лежат в диапазоне $3,904 \leq a \leq 4,018$.

Из графика рис.9 следует, что в этом случае допустимый фазовый диапазон для $\delta = 0,001$ будет:

$$30,3 \leq \varphi_{\text{доп.}} \leq 40,5 \text{ при } \psi = 0,$$

$$28,3 \leq \varphi_{\text{доп.}} \leq 34,5 \text{ при } \psi = 0,09.$$

Вертикальные размеры ускорительной камеры позволяют разместить в ней дуант второй гармоники с расстоянием до плакировки $h = 23$ мм. Увеличение этого размера целесообразно с точки зрения уменьшения мощности потерь и, следовательно, мощности генератора второй гармоники. Однако серьезным препятствием для получения необходимого напряжения

может стать резонансный высокочастотный разряд, условия для возникновения которого перестают удовлетворяться только при $h \leq 10$ мм. Специально проведенный эксперимент на макете дуанта подтвердил справедливость этих опасений, поэтому в качестве рабочего варианта был принят дуант с зазором до плакировки, равным 8 мм.

Мощность потерь в дуанте и входное сопротивление со стороны резонансной линии рассчитывались разбиением дуанта на короткие отрезки, волновые сопротивления которых считались постоянными, и путем сшивания решений на границе. Рассчитанная подобным образом мощность потерь, без учета поперечных швов и потерь в закорачивающем устройстве, составила ~ 80 Вт при амплитуде в центре, равной ~ 1 кВ.

Для реализации режима flat-top изготовлен сложный комплекс аппаратуры в дополнение к существующему на ЭМКЦ. На рис.10 приведена принципиальная схема ВЧ-генератора второй гармоники, а на рис.11 — регулируемого усилителя мощности на 80 МГц. Генератор второй гармоники, возбуждаемый на частоте 79,218 МГц, на самосогласованную нагрузку 50 Ом может развивать мощность до 500 Вт, обеспечивая на кромке гармонического дуанта напряжение до 1 кВ.

Автоматическая подстройка частоты гармонического дуанта к основной частоте ускоряющей системы производится переменным конденсатором, установленным в вакуумном объеме камеры на стебле гармонического дуанта. Ротор конденсатора передвигается приводом с двигателем УР-6, управляемым двухканальной электронной схемой с фазовым детектором, работа которой подробно описана в [8].

ИНЖЕКТОР

Система внешней инжекции ЭМКЦ [9,10] состоит из четырех самостоятельных узлов: 1) электронной пушки, 2) системы формирования коротких электронных сгустков наносекундной длительности, 3) электростатического тракта с периодической фокусировкой, 4) электростатического устройства поворота пучка с двойной фокусировкой.

Использование системы формирования электронных сгустков во внешнем инжекторе ЭМКЦ обеспечивает вывод на первую орбиту циклотронного ускорения импульсов тока длительностью $2,5 \pm 4$ нс ($36 \pm 57,5^\circ$) на полувысоте микроимпульса, при периоде основной частоты ускоряющего поля 25 нс. При ускорении пучка частиц до конечного радиуса циклотрона длительность микроимпульса оставалась практически постоянной в широком диапазоне изменения среднего тока пучка [11]. Микроимпульсы длительностью до 1,5 нс по основанию были получены при переходе системы формирования сгустков с частоты дробления 20 МГц на частоту 40 МГц. При среднем токе ускоренного пучка до 120 мкА на радиусах 80+100 см наблюдались микроимпульсы

ускоренного пучка с длительностью $\tau = (2,2 \pm 0,2)$ нс. Однако увеличение среднего тока свыше 220 мкА приводило к уширению длительности микроимпульса до величины $(3,5 \pm 0,3)$ нс. После анализа возможных причин увеличения длительности микроимпульса ускоренного пучка в зависимости от величины среднего тока было сделано предположение, что уширение микроимпульса происходит на участке тракта инжекции до перевода пучка в режим циклотронного ускорения. Как уже отмечалось выше, для 100% отделения орбиты с использованием эффекта расширения орбиты требуется моноэнергетичность частиц в пучке $\sim 10^{-3}$, что приводит к требованию иметь длительность микроимпульса в пределах $0,3 \pm 0,7$ нс ($4 \pm 8^\circ$) для синусоидальной формы ускоряющего высокочастотного поля либо до $10 \pm 20^\circ$ — для ускоряющего поля с плоской вершиной (flat-top). Этим требованиям существующая система внешней инжекции удовлетворить не могла.

Рассмотрение альтернативных вариантов инжекции в циклотрон, обладающих возможностью формирования микроимпульса с длительностью до десятых долей нс, привело к созданию оригинального высокочастотного инжектора на основе четвертьволнового коаксиального резонатора. На рис.12 показана конструкция высокочастотного инжектора, примененная на ЭМКЦ. В коаксиальном цилиндрическом четвертьволновом резонаторе, состоящем из соосных медных труб, при помощи петли связи возбуждается высокочастотное поле на частоте, равной частоте ускоряющего напряжения циклотрона. Поле коаксиального резонатора распределено таким образом, что способно эффективно вытягивать ионы или электроны из источника, расположенного на разомкнутом конце центрального электрода в пучности напряжения, и ускорять их до энергии инжекции. Выпуск ускоренных частиц осуществляется через эмиссионное отверстие в виде прорези в наружном электроде резонатора. При этом эмиссионное отверстие расположено так, что его центральная ось совпадает с медианной плоскостью магнита циклотрона. В центральном электроде резонатора ЭМКЦ размещен источник электронов в виде нагреваемой постоянным током вольфрамовой нити накала диаметром 0,5 мм. В мед-

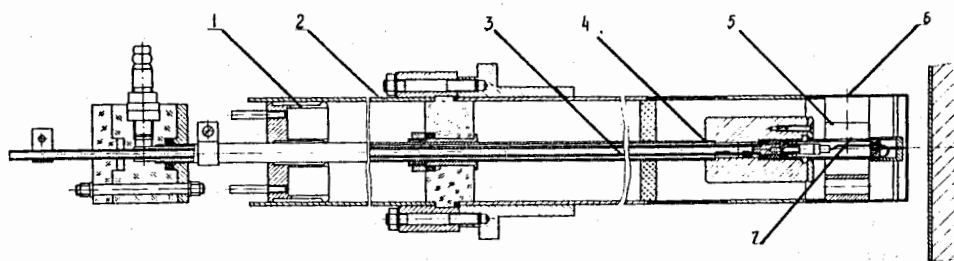


Рис.12. Конструкция ВЧ-инжектора электронной модели кольцевого циклотрона. 1 — закоротка, 2 — наружный электрод, 3 — центральный электрод, 4 — резонатор, 5 — головка, 6 — эмиссионное отверстие, 7 — нить накала

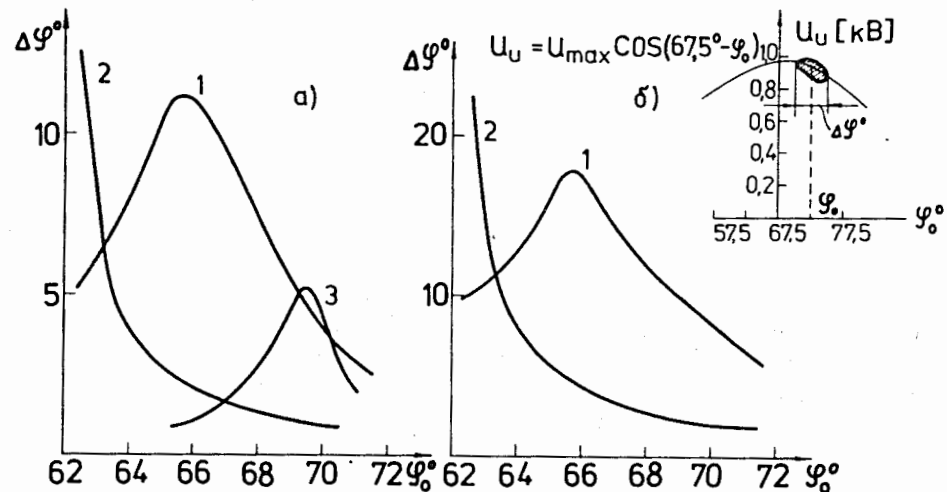


Рис.13. Зависимость длительности микроимпульса от фазы инжекции: а) апертура диафрагмы — 0,5 мм, б) апертура диафрагмы — 1 мм, 1 — зависимость длительности от фазы инжекции при прохождении первой диафрагмы $\alpha = 90^\circ$, 2 — зависимость длительности при прохождении второй диафрагмы $\alpha = 180^\circ$, 3 — зависимость длительности микроимпульса от фазы инжекции, при которой энергетический разброс в пучке $\leq 10^{-3}$

ном экране на конце четвертьволнового резонатора укреплен головка с эмиссионным отверстием, обеспечивающим первоначальную коллимацию электронного пучка. Амплитуда ускоряющего вытягивающего напряжения выбрана равной 6 кВ. Так как частота ускоряющего высокочастотного поля на электронной модели близка к 40 МГц (39,609), то вся конструкция высокочастотного инжектора имеет габариты 2 м при диаметре наружного электрода, равном 55 мм. Внутри коаксиального резонатора размещена цилиндрическая закоротка для настройки резонатора на рабочую частоту, а также калибровочная петля для контроля напряжения резонатора в рабочей зоне. Для обеспечения требуемой пространственной и временной структуры пучка, идущего в ускорение, кроме головки инжектора используются пассивные элементы, размещенные в камере циклотрона (диафрагмы первого оборота, которые устанавливаются в местах максимальной пространственной и энергетической дисперсии пучка — 90° и 180° от вертикальной оси инжектора соответственно), а также анализирующие свойства магнитного поля циклотрона.

Как показали расчеты движения частиц в ускорителе [12], изменяя апертуру диафрагмы от 0,5 мм до 2 мм, а также фазу инжекции центра тяжести микросгустка ϕ_0 от 62° до 72° , можно изменять длительность микросгустка ускоренных частиц от 1° до 20° ($0,07 \pm 1,4$ нс). На рис.13 показаны

зависимости длительности микроимпульса $\Delta\varphi$ от фазы инжекции центра тяжести ускоряемого сгустка, пропускаемого через диафрагму, установленную на азимуте 90° (кривые 1), и через диафрагму, установленную на азимуте 180° (кривые 2). На рис.13 а показаны зависимости для диафрагм с апертурой 0,5 мм, а на рис.13 б — те же зависимости для диафрагм с апертурой 1 мм. На этом же рисунке показана допустимая длительность микроимпульса в зависимости от фазы инжекции центра тяжести сгустка, для частиц которого выполняется требование на разброс по энергии $\Delta W/W \leq 10^{-3}$ (кривая 3). Как видно из рис.13, фазу инжекции можно изменять в пределах от 67° до 72° , и при этом энергетический разброс частиц в пучке, прошедших через диафрагмы, будет находиться в заданных пределах. В системе питания и контроля высокочастотного инжектора имеется фазовращатель, позволяющий сдвигать фазу центра сгустка относительно фазы ускоряющего напряжения на 125° с точностью установки и контроля фазы $\pm 2^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменения в конструкции ЭМКЦ позволяют обеспечить параметры магнитного поля, ускоряющего напряжения и инжектируемого пучка, необходимые для проведения тщательных исследований эффекта расширения замкнутых орбит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аносов В.Н. и др. — АЭ, 1968, 25, в.6, с.539.
2. Дмитриевский В.П. и др. — ОИЯИ, Р9-6733, Дубна, 1972.
3. Ворожцов С.Б. и др. — ОИЯИ, Р9-2852, Дубна, 1966.
4. Василенко А.Т. и др. — В сб.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: «Наука», 1975, с.205.
5. Заплатин Н.Л. и др. — ОИЯИ, Р9-82-416, Дубна, 1982.
6. Заплатин Н.Л., Самсонов Е.В. — ОИЯИ, Р9-8257, Дубна, 1974.
7. Аккуратов В.А. и др. — ОИЯИ, Р9-84-169, Дубна, 1984.
8. Глазов А.А. и др. — ОИЯИ, 9-89-864, Дубна, 1989.
9. Глазов А.А. и др. — В сб.: Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: ВИНТИ, 1970, т.1, с.485.
10. Глазов А.А. и др. — В сб.: Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: ВИНТИ, 1970, т.1, с.433.
11. Глазов А.А. и др. — ОИЯИ, 9-5206, Дубна, 1970.
12. Глазов А.А. и др. — ОИЯИ, 9-82-188, Дубна, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 июня 1997 года.

Модернизация электронной модели кольцевого циклотрона для исследования на ней эффекта расширения замкнутых орбит

В работе приведено описание изменений и дополнений, внесенных в основные узлы электронной модели кольцевого циклотрона: систему магнитного поля, ускоряющую высокочастотную систему, в инжекционный комплекс. Внесенные в конструкцию ЭМКЦ изменения позволяют обеспечить параметры ускоряемого пучка, необходимые для проведения тщательных исследований эффекта расширения замкнутых орбит.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1997

Improvement on the Electron Model of the Ring Cyclotron for Investigation of the Closed Orbit Expansion Effect

This paper describes the improvements introduced into main components on the electron model of the cyclotron, namely its magnetic system, high-frequency system, injection complex. These improvements provided the parameters of the accelerated beam which are stable enough for the accurate investigation of the closed orbit expansion effect.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1997