

КФТИ-89-6

ХФТИ 89-6

Харьковский
ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции
физико-технический институт АН УССР

РАСЧЕТ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
И ВЫБОР УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ
ДЛЯ НАКОПИТЕЛЯ-РАСТЯЖИТЕЛЯ (НР)

Препринт

Москва-ЦНИИатоминформ-1989

УДК 621.3.038.614

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВЫБОР УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ НАКОПИТЕЛЯ-РАСТЯЖИТЕЛЯ (НР): Препринт ХФТИ 89-6 /И.М.Карнаухов, Ю.П.Попков, Ю.Н.Телегин, Н.А.Трушкин, А.Г.Дайковский*, Л.Т.Закамская*, А.Д.Рябов*. - Харьков: ХФТИ АН УССР, 1989. - 9 с.

На основе численных расчетов, выполненных с помощью программ "PRUD-0" и "PRUD" проведен сравнительный анализ нескольких типов ускоряющих структур на стоячей E_{010} волне. Рассчитаны дисперсионные зависимости распределения электромагнитных полей, добротности и сопротивления связи как для аксиально-симметричных, так и аксиально-несимметричных типов колебаний в структурах на рабочую частоту 699,3 МГц. Показано, что структура с ячейкой, форма которой оптимизирована по шунтовому сопротивлению на основном типе колебаний, обладает минимальным паразитным импедансом на высших модах, что является решающим фактором при выборе ускоряющей структуры для накопительно-растяжительного кольца с многосгустковым режимом работы.

Рис.3, табл. 3, список лит. - 12 назв.

*

Институт физики высоких энергий, г. Серпухов

© Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИатоминформ), 1989.

В ХФТИ АН УССР разработан проект реконструкции линейного ускорителя электронов, предусматривающий сооружение накопителя-растяжителя (НР) [1]. Основной функцией НР является преобразование временной структуры пучка электронов путем инъекции импульса тока из линейного ускорителя в накопительное кольцо и последующего медленного вывода частиц из накопителя в интервал времени между двумя последовательными импульсами. Предусматривается также работа НР в накопительном режиме.

Компенсация потерь энергии электронов на синхротронное излучение и диссипативных потерь в стенках вакуумной камеры будет осуществляться с помощью высокочастотной (ВЧ) системы, основные параметры которой приведены ниже.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЧ-СИСТЕМЫ

Рабочая частота, МГц.	699,3
Число ВЧ - станций.	6
Мощность ВЧ - станции, кВт.	100
Число ускоряющих резонаторов (секций).	6

РЕЖИМ РАБОТЫ:	<u>растяжителя</u>	<u>накопителя</u>
Максимальная энергия электронов, ГэВ.	3,0	2,5
Потери на синхротронное излучение, МэВ/об.	0,81.	0,39
Амплитуда ускоряющего напряжения, МВ.	3,0	2,9
Максим. циркулирующий ток, мА.	до 160	500

Выбор рабочей частоты ВЧ-системы кроме общих соображений [2] определялся требованиями кратности частот НР и линейного ускорителя ($f_{\text{ЛУ}} = 2797,2$ МГц), а также возможностью осуществить в сжатые сроки разработку мощного ВЧ-генератора на эту частоту.

При выборе типа ускоряющей структуры необходимо учитывать особенности проектируемой установки и возможности размещения соответствующего оборудования на кольце НР. Они заключаются в следующем:

1. Ускоряющие резонаторы должны размещаться в двух прямолинейных промежутках НР на участках длиной 1,8 м (всего 6 участков). Резонаторная система, расположенная на каждом из этих участков, должна обеспечивать ускоряющее напряжение 0,5 МВ.

2. Шунтовое сопротивление на основном (рабочем) типе колебаний не является критическим параметром при выборе структуры, поскольку ускоряющие резонаторы будут работать в режиме большой токовой нагрузки.

3. Ускоряющая структура НР должна иметь минимальное число нерабочих типов колебаний в области частот ниже частоты отсечки вакуумной камеры ($f_{отс.} = 2294$ МГц); импедансы связи для этих типов колебаний должны быть минимальны.

4. Ускоряющая система НР должна быть по возможности малочувствительной к эффектам нестационарной нагрузки пучком.

В результате предварительного анализа нами выбрана ускоряющая секция на стоячей волне, состоящая из пяти сильносвязанных полуволновых резонаторов. Настоящая работа посвящена исследованию электродинамических характеристик нескольких типов ускоряющих структур и выбору оптимального варианта структуры для НР. Расчеты выполнены с помощью программы "PRUD-C" и "PRUD", разработанных в ИФЭЭ [3,4].

1. ТИПЫ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР. ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ РЕЗОНАТОРОВ

Рассматривались следующие типы структур на стоячей волне:

- структура с цилиндрической ячейкой (структура А);
- структура с ячейкой оптимизированной формы (структура В);
- бипериодическая структура (БПС) с ячейками связи на оси.

Профили рассматриваемых ячеек (1/2 периода структуры), а также параметризация их характерных размеров приведены на рис. 1. Выбор структуры данного типа определялся следующими соображениями:

1. Рассматривалась возможность использования как простых периодических структур (А и В), так и БПС, обладающей меньшей чувствительностью к эффектам расстройки ускоряющих резонаторов пучком.

2. Структуры А и БПС по форме резонансных ячеек можно отнести к простейшим. Отсутствие емкостных носиков в этих структурах позволяет обеспечить необходимую связь между ячейками через апертурное отверстие для пучка. Таким образом, отпадает необходимость в щелях связи, которые нарушают осевую симметрию структуры и затрудняют ее расчет. К числу достоинств этих структур следует также отнести простоту изготовления.

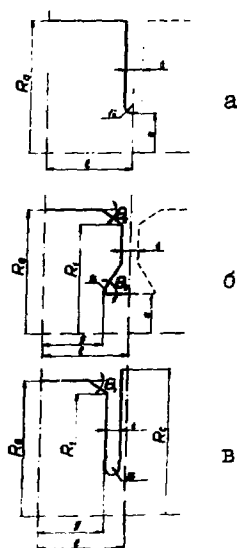


Рис. 1. Профили ячеек рассматриваемых структур ($l/2$ периода структуры): а) цилиндрическая ячейка (А); б) ячейка оптимизированной формы (Б); в) БИС с ячейкой связи на оси

3. Структура с ячейкой, форма которой оптимизирована по шунтовому сопротивлению на основной моде (структура Б), в настоящее время наиболее широко используется как на действующих циклических ускорителях и накопителях [5-7], так и на строящихся и проектируемых установках [8,9]. В настоящих расчетах за основу была взята форма ячейки ускоряющей секции РЕТРА на 500 МГц [5]. При выборе параметров ускоряющих структур учитывались следующие конструктивные ограничения:

- для обеспечения синхронизма между волной и частицей длина периода структуры $2l$ выбиралась равной $\lambda/2$, где λ - длина волны в вакууме на основном типе колебаний;
- радиус пучковой апертуры был выбран 50 мм исходя из величины огибающей бетатронных колебаний на участках орбиты, где расположены резонаторы;

облающей бетатронных колебаний на участках орбиты, где расположены резонаторы;

- толщина диафрагмы t задавалась исходя из требований обеспечения жесткости конструкции и эффективного теплоотвода;
- радиус скругления диафрагм r_0 выбирался равным $t/2$.

В процессе расчета изучалось влияние формы периферической части ускоряющей ячейки в структурах Б и БИС на их электродинамические характеристики. Собственная частота ускоряющей моды поддерживалась постоянной за счет изменения величины R_0 при сохранении всех основных размеров неизменными. Расчеты показали, что при изменении угла Θ_2 в пределах $35 \dots 55^\circ$, а также при замене плоского склона на сферическую поверхность шунтовые сопротивления на основном и высших типах колебаний меняются не более, чем на 0,5%, а собственные частоты высших типов колебаний смещаются менее, чем на 50 кГц.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Геометрические размеры рассматриваемых структур на частоту 690,3 МГц, полученные с помощью программы "PRUD -0", приведены в табл. I.

Таблица I

П а р а м е т р ы	Тип структуры		
	А	Б	БПС
Длина ячейки, $2l$, мм	214,5	214,5	214,5
Радиус апертуры, a , мм	50	50	50
Внутренний радиус ускоряющей ячейки, R_a , мм	167,91	157,58	170,14
Радиус ячейки связи, R_c , мм	-	-	180,97
Длина ускоряющего зазора, $2g$, мм	196,50	147,24	166,50
Толщина диафрагмы, t , мм	18	20	18
Радиус скругления диафрагмы (носика), r_0 , мм	9	3	9
Угол скоса носика, θ_1 , град	-	60	-
Угол скоса между диафрагмой и внешней стенкой, θ_2 , град	-	35	35
Радиус начала скоса на стенке диафрагмы, R_T , мм	-	140,08	152,64
Пролетный фактор, T	0,748	0,768	0,762
Эффективное шунтовое сопротивление, ZT^2 , Ом/м	24,4	29,1	26,3
Добротность, Q	36400	33600	36200
Коэффициент связи между ячейками, $k_{св}$, %	1,45	0,24	1,33

В таблице также приведены основные электродинамические характеристики структур на основной моде E_{010} для рабочего вида колебаний $\varphi = \pi$ (φ - сдвиг фазы колебаний на периоде структуры). Размеры ячейки связи в БПС подбирались так, чтобы удовлетворить условию кофлюэентности $f_a - f_c$ в рабочей точке $\varphi = \pi$ (f_a и f_c - собственные частоты E_{010} типа колебаний для ускоряющей ячейки, и ячейки связи, соответственно).

Как и следовало ожидать, структура Б обладает максимальным шунтовым сопротивлением ZT^2 и минимальным коэффициентом связи между ячейками $k_{св}$. Однако более существенными параметрами, определяющими выбор структуры, являются характеристики высших монопольных - E_{0np} и дипольных - E_{H1np} типов колебаний с собственными частотами, лежащими ниже

частоты отсежки вакуумной камеры. Возбуждение этих колебаний при прохождении высокопоточного сгруппированного пучка через резонатор может привести к возникновению неустойчивостей, которые ограничивают длину предельного тока в ускорителях с многорезонаторным режимом.

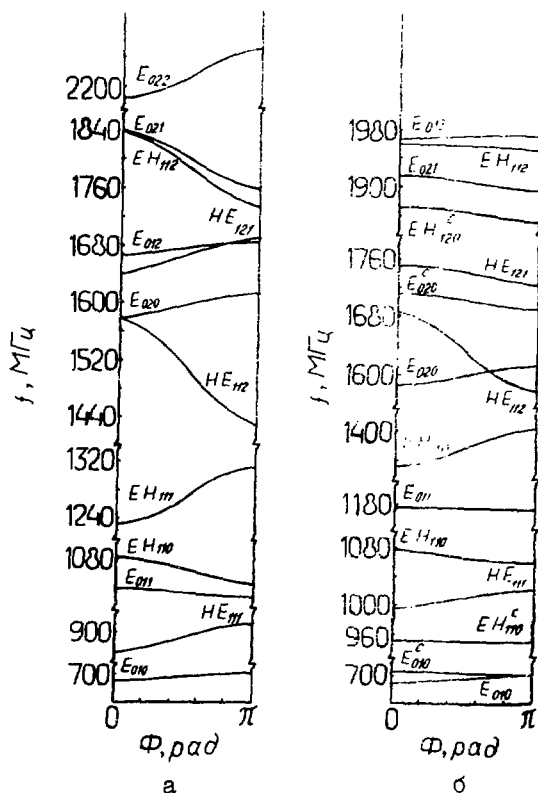


Рис. 2. Дисперсионные зависимости монополярных и дипольных типов колебаний в структурах А (а) и БПС (б)

На рис. 2 представлены дисперсионные зависимости структур А и БПС. Расчетные дисперсионные зависимости для структуры Б практически не имеют, поскольку в реальной структуре с индуктивными целями связи они существенным образом трансформируются. Идентификация типов колебаний проводилась на основе классификации мод цилиндрического резонатора. Для дипольных мод тип колебаний — EH или HE — определялся по преобладанию E_z — или H_z — компоненты на оси структуры.

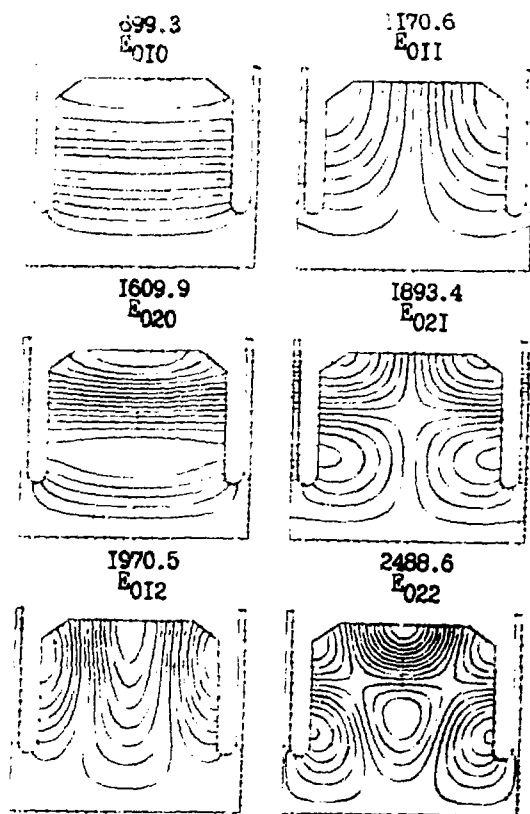


Рис. 3. Топография поля монополярных резонаторных мод в БПС. Линии соединяют точки с $\rho H_e = \text{const}$

На рис. 3 приведены распределения полей ρH_e в ускоряющей ячейке и ячейке связи БПС для монополярных мод (вид колебаний $\Phi = \pi$). Интересно отметить, что для типов колебаний с четным ρ поля локализованы в соответствующих ячейках (E_{010} , E_{020} , E_{012} , E_{022} - в ускоряющей ячейке, E_{010}^c и E_{020}^c в ячейке связи), для нечетных ρ (E_{011} и E_{021}) - возбуждаются обе ячейки.

Взаимодействие пучка с окружающими стенками обычно описывается в частотном представлении в терминах продольного $-Z_{||}(\omega)$ и поперечного $-Z_{\perp}(\omega)$ импедансов связи [10]. В случае высокодобротных резонаторных систем в области частот $\omega < \omega_{\text{отс.}}$ $Z_{||}(\omega)$ и $Z_{\perp}(\omega)$ можно представить в виде ряда изолированных узкополосных импедансов, описывающих взаимодействие пучка с собственными модами резонатора,

а само взаимодействие характеризовать действительными величинами - сопротивлениями связи R_{II}^i и R_I^i и добротностями Q^i (i - индекс моды). Для монополярных мод, не имеющих поперечных составляющих поля на оси, рассматривают обычно следующую величину:

$$R_{II}^i/Q^i = \frac{\left| \int_{-z}^z E_z^i(z, \varphi, z=ct) e^{i\omega_i t} c dt \right|^2}{\omega_i \int |E_z^i(z, \varphi, z)|^2 dV}, \quad (1)$$

где $\omega_i = 2\pi f_i$ - циклическая частота i -ой моды; интеграл в числителе берется по длине ускоряющей структуры, в знаменателе - по ее объему. Для монополярных типов колебаний величина, определяемая соотношением (1), при $kz_1 = \frac{\omega}{c} z, \ll 1$ не зависит от пути интегрирования, т.е. от выбора координат z_1, φ , и совпадает с определением геометрического шунтового сопротивления резонатора.

Для дипольных мод основную роль играет поперечное взаимодействие, которое можно характеризовать величиной [11]:

$$R_I^i/Q^i = (1/kz_1)^2 \cdot R_{II}^i/Q^i. \quad (2)$$

В табл. 2 приведены результаты расчета собственных частот и параметров R_{II}^i/Q^i для аксиально-симметричных типов колебаний. Здесь же даны суммы $\sum_i R_{II}^i/Q^i$ по всем модам с $\omega_i < \omega_{отс.}$ и отношения этих сумм к R_{II}/Q для основного типа колебаний, характеризующие величину паразитных потерь в резонаторе. Из таблицы следует, что структура Б обладает наименьшими сопротивлениями связи и наименьшим отношением $(\sum_i R_{II}^i/Q^i)/(R_{II}/Q)_{осн.}$ и является поэтому наиболее предпочтительной для использования ее в ПР.

Результаты расчета для дипольных типов колебаний, приведенные в табл. 3, позволяют сделать вывод, что структура Б имеет и минимальные поперечные сопротивления связи на высших модах, хотя преимущество в этом случае не столь существенное.

Проведенные расчеты показывают, что наиболее опасными с точки зрения возбуждения неустойчивостей связанных пучков являются монополярная мода E_{0II} и дипольные моды $E_{H_{IIO}}$ и $E_{H_{III}}$, имеющие наибольшую величину сопротивления связи. Как известно, именно эти резонаторные моды ответственны за возбуждение продольных (E_{0II}) и поперечных ($E_{H_{IIO}}$ и $E_{H_{III}}$) неустойчивостей пучка в электронных накопителях [12].

Таблица 2

Граничные условия	Тип колеб. цилиндр. резонат.	А		Б		ВПС	
		$f, \text{МГц}$	$R_{II}^i/Q^i, \text{Ом/м}$	$f, \text{МГц}$	$R_{II}^i/Q^i, \text{Ом/м}$	$f, \text{МГц}$	$R_{II}^i/Q^i, \text{Ом/м}$
EM	E_{010}	699,3	669	699,3	864	699,3	727
ME	E_{010}^C	-	-	-	-	699,3	81
ME	E_{011}	1026,9	372	1050,3	234	1170,6	250
EM	E_{020}	1609,2	41	1736,5	38	1609,9	34
ME	E_{020}^C	-	-	-	-	1687,6	37
EM	E_{012}	1682,1	14	1741,1	5	1970,5	33
ME	E_{021}	1758,5	177	1986,1	74	1893,4	117
EM	E_{022}	2247,9	92	-	-	-	-
$\sum R_{II}^i/Q^i$		-	696	-	351	-	552
$(\sum R_{II}^i/Q^i)/(R_{II}/Q)_{\text{осн.}}$		-	1,04	-	0,41	-	0,76

Таблица 3

Граничные условия	Тип колеб. цилиндр. резонат.	А		Б		ВПС	
		$f, \text{МГц}$	$R_I^i/Q^i, \text{Ом/м}$	$f, \text{МГц}$	$R_I^i/Q^i, \text{Ом/м}$	$f, \text{МГц}$	$R_I^i/Q^i, \text{Ом/м}$
ME	EH_{110}^C	-	-	-	-	922,8	4,4
ME	HE_{111}	911,6	1,8	1001,4	3,3	1017,4	21,9
EM	EH_{110}	1044,8	156,6	1122,2	140,8	1056,7	212,1
ME	EH_{111}	1311,0	193,9	1387,1	169,7	1401,1	138,6
EM	HE_{112}	1422,6	8,1	1657,0	2,9	1572,0	16,4
ME	HE_{121}	1688,0	0,09	1796,8	0,4	1722,7	$5 \cdot 10^{-3}$
ME	EH_{120}^C	-	-	-	-	1851,9	32,0
EM	EH_{112}	1731,0	18,8	1803,2	9,3	1933,0	2,3

Низкий коэффициент связи между ячейками в структуре Б делает необходимым введение индуктивных щелей связи, которые могут существенным образом повлиять на ее электродинамические характеристики. Поэтому окончательный выбор будет сделан после проведения "колодных" измерений на полномасштабных макетах структур Б и БПС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдышев В.Ф., Гладких П.Н., Гончар В.Ю. и др. Харьковский накопитель-растяжитель пучка электронов НР-2000 на энергию 2 ТэВ// Труды XIII Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий. Новосибирск: Наука, 1987. С. 300-303.
2. Финкельштейн И.И. Радиотехнические системы электронных синхротронов и накопительных колец: Препринт НИИЭФА 0В-39, Ленинград, 1981.
3. Абрамов А.Г., Дайковский А.Г., Ершов С.Ю. и др. Пакет программ "PRUD-0" для расчета ускоряющих структур: Препринт ИФЭЭ 83-3 ОМВТ, Серпухов, 1983.
4. Дайковский А.Г., Португалов Ю.И., Рябов А.Д. Вычисления электромагнитных полей с вариациями по φ в осесимметричных резонаторах: Препринт ИФЭЭ 80-107, Серпухов, 1980.
5. Gerke H. et al. Das PETRA-cavity. Interner Bericht DESY-PET-77/08, 1977. P.10.
6. Allen M.A. et al. RF-system for the PEP storage ring. IEEE Trans. NS-24. 1977. N 3. P.1780-1782.
7. Husmann D. ELSA. Astretcher ring and post accelerator for the Boon 2,5 GeV electron synchrotron. IEEE Trans. NS-30. 1983. N 4. P.3252-3256.
8. Henke H. and Wilson I. Thermal analysis and loss in shunt impedance of the LEP accelerating cell. IEEE Trans. NS-30. 1982. N 4. P.3590-3592.
9. Thompson J.J. The proposed European synchrotron Radiation Facility // Nucl.Instrum.Meth. 1980. Vol.177. N 1. P.43-51.
10. Zotter B. The effective coupling impedance for bunched beam instabilities. CERN/ISR-TH/78-16, Geneva, 1978.
11. Klatt R. and Weiland T. Comparison of six accelerating cavities with respect to collective effects. DESY M-84-06, 1984.
12. Kobayakawa M., Izagawa M., Kamiya Y. et al. Beam instabilities in the PF storage ring. Proc of the 5-th Symp. Acc. Science and Tech. 1984, KEK, Tsukuba. P.281-291.

Иван Михайлович Карнаухов, Юрий Павлович Попков,
Юрий Николаевич Телегин, Николай Александрович Трушкин,
Александр Григорьевич Дайковский, Людмила Трофимовна Закамская,
Александр Дмитриевич Рябов

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
И ВЫБОР УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ
ДЛЯ НАКОПИТЕЛЯ-РАСТЯЖИТЕЛЯ (НР)

Редактор, корректор Т.И.Бережная

Подписано в печать 19.01.89. Т - 04090. Формат 60x84/16. Бум.писч.М1.
Офсетн.печ. Усл.п.л. 0,9. Уч.-изд.л. 0,6. Тираж 220. Заказ №184.
Цена 12 коп. Индекс 3624.

Отпечатано в Харьковском ордена Ленина
и ордена Октябрьской Революции физико-техническом институте АН УССР
ЗІОІО8, Харьков, ул. Академическая, 1

12 коп.

Индекс 3624

Препринт, 1989, 1-9.