

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований

дубна

С 345А1

Г-121

2/11 79

P9 - 12038

И.Габанец

1245/2-79

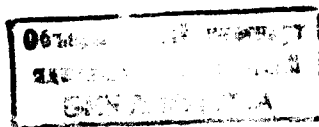
АНАЛОГОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ  
ПРОДОЛЬНОГО ИМПЕДАНСА СВЯЗИ  
МЕЖДУ ЭЛЕКТРОННЫМ КОЛЬЦОМ И КАМЕРОЙ

1979

P9 - 12038

И.Габанец

АНАЛОГОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ  
ПРОДОЛЬНОГО ИМПЕДАНСА СВЯЗИ  
МЕЖДУ ЭЛЕКТРОННЫМ КОЛЬЦОМ И КАМЕРОЙ



Аналоговый метод измерения продольного импеданса связи между электронным кольцом и камерой

Предлагается метод измерения импеданса связи между электронным кольцом и камерой, согласно которому аналогом электронного кольца является замкнутое металлическое кольцо. В этой системе возбуждаются стоячие волны, причем число волн, проходящих за оборот, целое. Это необходимо для сохранения подобия данной системы. На основе различия скорости распространения волны вдоль металлического кольца в камере адгезатора и в линии определена мнимая составляющая импеданса. Скорость распространения волны в адгезаторе рассчитывается по резонансной частоте кольца, которая измеряется с помощью радиочастотного анализатора и измерителя частоты, скорость волны в идеальной линии определяется расчетным путем. На основе измерений добротности контура получена реальная часть импеданса. Связь между генератором и кольцом, а также между анализатором и кольцом слабая и не влияет на собственные частоты кольца. Результаты измерений мнимой составляющей продольного импеданса кольцо-камера сравниваются со значениями, полученными теоретическим путем для бесконечных стенок. Получено хорошее согласие результатов.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.  
Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Analog Method for Measurement of Longitudinal Coupling Impedance between Electron Ring and Chamber

A measurement method is suggested of a longitudinal impedance, in which analog of an electron ring is a metal ring. In this system standing waves are awaken so that the wave number for one turn is a whole number. This is necessary to save the similarity of the system. From the difference of wave velocity along metal ring in adgezator chamber and wave velocity of line, is possible to receive the imaginary component of this impedance. The wave velocity in adhezator is given from the ring resonance frequency, which is measured with the aid of radiofrequency analyzer, the wave velocity in ideal line is obtained through calculation. Real part of impedance is received from quality factor measurement of circuit. Coupling between generator and ring, and analyzer and ring is weak, it does not change the own frequencies of the ring. The measuring results of imaginary part of the longitudinal impedance ring-chamber are compared with that from theoretical calculation for infinite walls. A good agreement of results has been obtained.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Показателем стабильности электронного кольца по отношению к продольным когерентным неустойчивостям является так называемый продольный импеданс связи  $Z_n$ , который связывает продольное число частиц  $N_e$  в электронном кольце с энергетическим разбросом  $\frac{\Delta E}{E}$  /1/:

$$N_e \leq |\eta| \frac{\gamma Z_0}{2\beta^3 \Gamma_e} \frac{Z_n}{n} \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 \quad /1/$$

В этой формуле  $\eta$  - относительное изменение частоты обращения за единицу изменения момента,  $\gamma$  - полная энергия электрона в единицах массы,  $\beta$  - линейная скорость вращения электрона в кольце, выраженная в единицах скорости света,  $\Gamma_e$  - классический радиус электрона. Импеданс  $Z_n$  связывает продольное электрическое поле  $\mathcal{E}_n$  с током возмущения  $I_n$  на  $n$ -й гармонике /2/:

$$Z_n = - \frac{2\pi \Gamma_e \mathcal{E}_n}{I_n}, \quad Z_0 = 377 \text{ Ом.} \quad /2/$$

Получить точное значение  $Z_n$  расчетным путем можно только при простых конфигурациях стенок, экранирующих электронное кольцо. Поэтому очень существенным является вопрос об экспериментальном измерении  $Z_n$ , особенно для реальной

камеры адгезатора с различными внутренними условиями, влияющими на результат <sup>13/</sup>.

## 2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

В работе <sup>12/</sup> предложен метод измерения продольного импеданса. В его основе лежит определение скорости гибридной ТЕМ-волны, которая распространяется между кольцом и камерой. Систему "кольцо-камера" можно заменить двухпроводной линией с индуктивностью  $L'$ , сопротивлением  $R'$  и емкостью  $C'$  /рис. 1/. Первый проводник представляет собой камеру, второй - кольцо. Штрих означает, что все величины берутся на единицу длины.  $Z'_1$  и  $Z'_2$  - мнимые составляющие продольных импедансов камеры и кольца соответственно, определяемые сопротивлением и кривизной системы. Учитывая разную направленность токов в камере и кольце, получим суммарное значение индуктивности и импеданса:

$$L'_t = L'_1 + L'_2, \quad Z'_t = Z'_1 + Z'_2. \quad /3/$$

Теперь, используя уравнение для линии <sup>5/</sup>, найдем отношение скорости распространения электромагнитной волны в системе без учета  $Z'_1$  и  $Z'_2$  к фазовой скорости волны с учетом сопротивления и кривизны. Если  $Z'_1 = Z'_2 = 0$ , то в такой системе будет распространяться только ТЕМ-волна с частотой  $\omega_0$  и фазовой скоростью, равной скорости света. Сопротивление и кривизна изменяют скорость распространения волны на  $v_\phi$  и ее частоту - на  $\omega$ . Найдем отношение  $\frac{c}{v_\phi}$ . С одной

стороны,  $\frac{c}{v_\phi} = \frac{\omega_0}{\omega}$ , с другой -

$$\frac{c}{v_\phi} = \frac{\omega_0 \sqrt{j\omega C'(j\omega L'_t + Z'_t)}}{\omega \sqrt{j\omega_0 C' j\omega_0 L'_t}}$$

Приравняв эти два выражения, получим

$$Z'_t = j\omega L'_t \frac{(\omega_0 + \omega)(\omega_0 - \omega)}{\omega^2}. \quad /4/$$

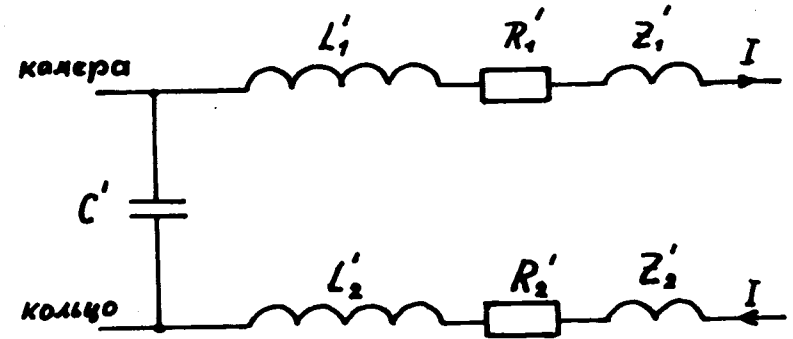


Рис.1. Электрическая схема линии, эквивалентной системе "электронное кольцо-камера".

Так как  $\omega_0 - \omega$  очень мало и  $Z'_t$  в формуле /4/ определяет импеданс на единицу длины, получим полный импеданс:

$$\frac{Z_n}{n} = Z'_t \frac{2\pi r}{n} = 4\pi j r L'_t \frac{\omega_0 - \omega}{n}. \quad /5/$$

Сделаем предположение, что  $Z'_1 \gg Z'_2$ . Тогда  $Z'_t = Z'_1$ , и формула /5/ будет определять импеданс камеры. При экспериментальном определении импеданса нужно следить за выполнением этого неравенства.

Полученное выражение /5/ совпадает с уравнением /3.11/ из работы <sup>12/</sup> при замене  $j$  на  $-i$  и определяет мнимую часть продольного импеданса. При этом  $\omega$  определяется из

измерения, а  $\omega_0 = \frac{c}{r}$  есть круговая частота без учета кривизны, сопротивления и возможного вклада сосредоточенного импеданса.

Реальную часть импеданса можно получить из измерения добротности линии кольцо-камера /см. рис. 1/. Добротность определяется отношением запасенной энергии контура к энергии потерь:

$$Q = \frac{\rho}{R} \frac{I^2}{I^2} = \frac{\rho}{R} = \frac{\omega_0 L}{R}.$$

В этой формуле сопротивление  $R$  определяет реальную часть импеданса. Из резонансной кривой имеем  $Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1}$ , где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — частоты, соответствующие 0,707 амплитуды напряжения. В результате получим

$$R = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} \omega_0 L.$$

Для практического определения  $R$  можно положить  $L = L_t \frac{2\pi}{n}$ , поскольку  $\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx 1$  и вся запасенная энергия сосредоточена в  $L_1'$  и  $L_2'$ .

$$R = 2\pi L_t' (\omega_2 - \omega_1). \quad /6/$$

В соответствии с работой [4] продольный импеданс можно представить состоящим из статической /определяемой квазистатической частью электромагнитного поля/ и волновой частей. Статическая часть импеданса пропорциональна  $\frac{1}{\gamma^2}$  и при скоростях, равных скорости света, пренебрежимо мала по сравнению с волновой. Именно такой случай предполагается в работе [2]. Поэтому в дальнейшем мы будем сравнивать измеряемый импеданс с рассчитанной волновой частью импеданса:

$$\frac{Z_n^{\text{волн}}}{n} = i \left( \frac{h}{\pi \Gamma} \right)^2 \left[ 1 - 3 \left( \frac{nh}{\pi \Gamma} \right)^2 \right]. \quad /7/$$

При этом  $h$  — ширина цилиндрической камеры, а обечайка камеры находится далеко от кольца.

### 3. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Из формулы /5/ следует, что мнимая часть продольного импеданса /в волновой области/ пропорциональна смещению частоты кольца, связанному с присутствием экранов и отли-

чем системы от идеальной линии. Измерение такого смещения можно сделать, если использовать собственные частоты стоячих волн, возникающих между металлическим кольцом и стенками /рис. 2/. Для создания определенной конфигурации поля кольцо в одном месте было соединено с экраном, при этом обеспечивалось отсутствие переходных сопротивлений в месте крепления. В качестве закоротки между кольцом и стенками использовалась медная трубка  $\varnothing 10$  мм. Было проверено, что она не меняет собственной частоты кольца.

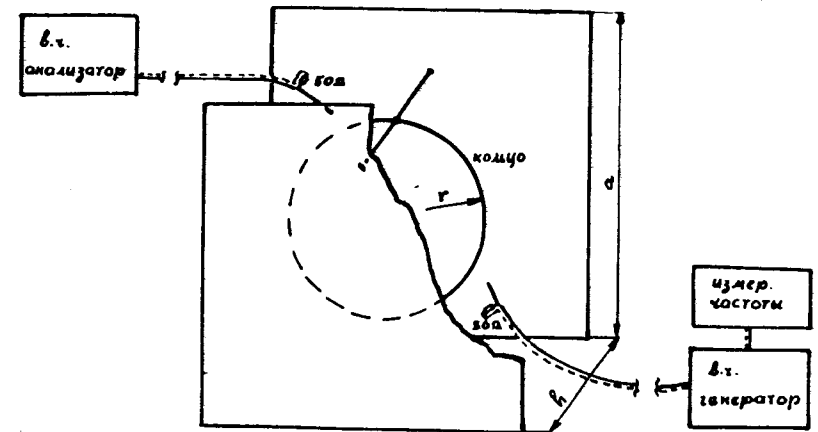


Рис. 2. Аппаратура для измерения продольного импеданса системы "кольцо-камера".

Раскачка кольца осуществлялась ВЧ-генератором, без прямой связи через штырь, при напряжении несколько вольт. Штырь запитывался через кабель, на конце которого расположено согласующее сопротивление. Оплетка кабеля присоединена к одной из стенок экрана. Длина штыря подбиралась значительно меньшей, чем четверть длины волны. Частоту точно определяли с помощью измерителя частоты.

На противоположной стороне кольца располагался приемный штырь /длина  $\approx \lambda/4$  /, который через согласующее сопротивление и кабель был соединен с приемником - радиочастотным анализатором.

Очень важную роль в этом методе играет точное определение собственной частоты  $\omega_0 = \frac{c}{r}$ , поскольку металлическое

кольцо делается из трубки конечных размеров, сечение которой после сворачивания в кольцо деформируется. Это заставляет вносить коррекцию в параметры кольца. В нашем случае мы определяли радиус как радиус геометрического места точек, максимально приближенных к экранирующим стенкам. Значение радиуса проверялось также по совпадению собственных частот при замене толстого кольца ( $Z'_1 \gg Z'_2$ ) на очень тонкое.

При измерениях важно также исключить собственные частоты экранирующих стенок, поскольку они имеют в эксперименте реальные границы. Это накладывает ограничение на возможные расстояния  $h$  между стенками при заданных размерах экрана, а также на размеры самого экрана. Необходимо провести измерения собственных частот стенок без кольца и полученные частоты исключить из области частот измерений импеданса.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В наших измерениях металлическое кольцо было сделано из медной трубки  $\varnothing 15$  мм. Измерения проводились с двумя кольцами: одно - с радиусом накопления электронов после инжекции  $r/\gamma = 32,55$  см,  $f_0 = 146,68$  МГц/, второе - с радиусом, в 2 раза меньшим  $r/\gamma = 16,95$  см,  $f_0 = 281,7$  МГц/. Для второго кольца пренебрежение статической частью импеданса более приемлемо, чем для первого, поскольку меньшему радиусу соответствует  $\gamma \approx 10$ .

С помощью приемника и измерителя частот определяем частоты резонанса кольца  $\omega$  и частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$  /соответствующие 0,707 амплитуды резонансной кривой/ при различных расстояниях  $h$  между экранами. Результаты обработаны по формулам /5/, /6/ и /7/ и приведены на рис. 3, 4, 5, 6 и в таблицах 1 и 2. Для мнимой части импеданса приведено сравнение с теоретическими значениями. Видно, что теоретические результаты хорошо согласуются с ожидаемыми.

Таблица 1

Кольцо  $r = 32,55 \pm 0,05$  см,  $f_1 = 146,68 \pm 0,25$  МГц  
 $f_3 = 440,04 \pm 0,75$  МГц

I гармоническая частота

$h_{\text{см}}$	$iZ_n$		$R/n$
	экспер. $\Omega$	теор. $\Omega$	экспер. $\Omega$
7	+ 1,26 $\pm$ 0,9	+ 1,74	0,17 $\pm$ 0,3
12,2	+ 4,6 $\pm$ 2,3	+ 5,14	0,29 $\pm$ 0,06
16	+ 9,6 $\pm$ 3	+ 8,6	0,48 $\pm$ 0,19
21	+13 $\pm$ 3,2	+13,9	1,05 $\pm$ 0,21
31	+17,7 $\pm$ 3,5	+25	3,6 $\pm$ 0,7
41	+22,9 $\pm$ 4,6	+31,4	6,4 $\pm$ 1,28

III гармоническая частота

7	+ 2,7 $\pm$ 1,9	+ 1,5	0,55 $\pm$ 0,1
12,2	+ 3,8 $\pm$ 2,7	+ 3,3	1,45 $\pm$ 0,3
16	+ 6,2 $\pm$ 3,1	+ 3,13	3,8 $\pm$ 0,76
21	0 $\pm$ 1,6 - 1,1	- 2,23	9,5 $\pm$ 0,95
31	-18 $\pm$ 3,6	- 51,5	44 $\pm$ 2
41	+262 $\pm$ 52	-203	92 $\pm$ 19

Таблица 2

Кольцо  $r = 16,95 \pm 0,025$  см,  $f_1 = 281,7 \pm 0,4$  МГц  
 $f_2 = 563,4 \pm 0,8$  МГц

I гармоническая частота

$h_{\text{см}}$	$iZ/n$		$R/n$	
	экспер. $\Omega$	теор. $\Omega$	экспер. $\Omega$	
7,2	+ 4 $\pm 2$	+ 5,9	0,12 $\pm 0,04$	
12	+11,6 $\pm 2,3$	+ 15,8	0,3 $\pm 0,06$	
16	+18 $\pm 4,5$	+ 24	0,2 $\pm 0,04$	
21	19 $\pm 3,8$	+ 30,7	0,6 $\pm 0,12$	
31	-14 $\pm 3,5$	- 1,5	4,6 $\pm 0,46$	
41	+83 $\pm 1,7$	-168	18 $\pm 1,8$	

II гармоническая частота

7,2	+ 1,4 $\pm 0,84$	+ 5,0	0,5 $\pm 0,25$
12	0 $\pm 3$	+ 7,4	0,32 $\pm 0,07$
16	- 12,5 $\pm 2,5$	- 2,6	0,9 $\pm 0,3$
21	- 45 $\pm 9$	- 49	3,8 $\pm 1,1$
31	-167 $\pm 33$	-380	9,6 $\pm 3$
41	- 8,5 $\pm 3,4$		

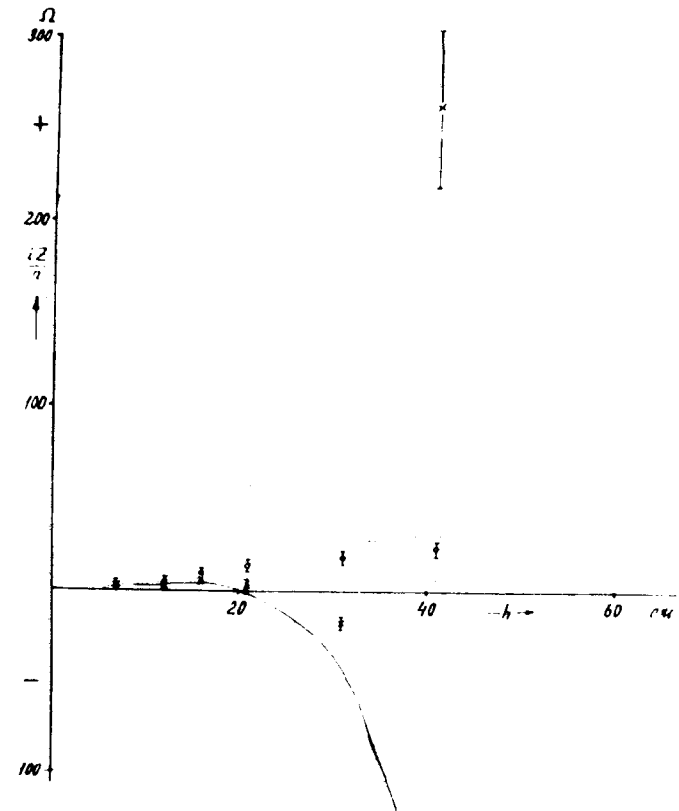


Рис.3. Мнимая составляющая продольного импеданса системы "кольцо-камера". Кривые показывают расчетные значения. Радиус кольца - 32,55 см, --- 0-1 гармон., - - - 3 гармон.

Суммарная ошибка складывается из ошибки измерения, ошибки при определении радиуса кольца - частоты  $\omega_0$  и неточности геометрии оборудования. Расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями при увеличении  $h$  можно объяснить следующим образом. С одной стороны, увеличивается неточность формул /7/ и /5/, поскольку при их

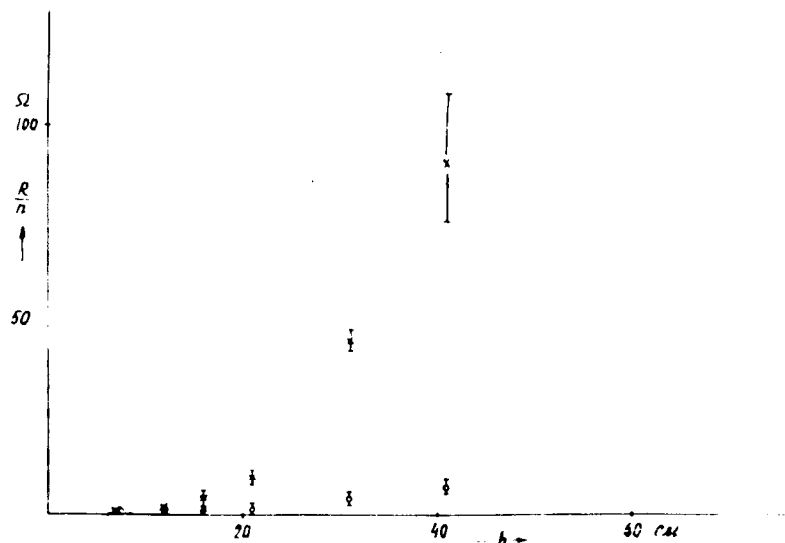


Рис.4. Реальная составляющая продольного импеданса системы "кольцо-камера". Радиус кольца - 32,55 см.

выводе предполагалось  $\frac{h}{\pi r} \ll 1$ . С другой стороны, увеличивается несоответствие, связанное с конечными размерами и формой экранирующих стенок.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагается простой метод аналогового измерения продольного импеданса системы "кольцо-камера", мнимой и реальной составляющей в волновой зоне. Метод можно использовать для оценки свойств системы "камера-электронное кольцо" непосредственно в камере адгезатора со всем необходимым оборудованием. Полезно также и то, что метод дает возможность обнаруживать собственные колебания некоторых деталей в камере в отсутствие кольца и добиваться их устранения.

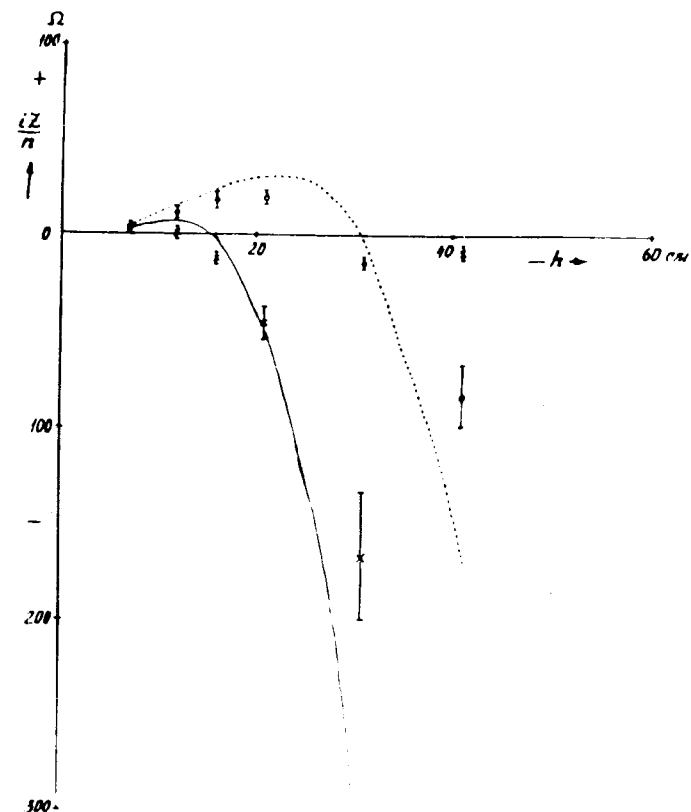


Рис.5. Мнимая составляющая продольного импеданса системы "кольцо-камера". Кривые показывают расчетные значения. Радиус кольца - 16,95 см, --- o-1 гармон., — x-2 гармон.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность И.Н.Иванову за постоянный интерес к работе, Ю.И.Алексахину за обсуждение проблемы и полезные дискуссии, С.Б.Рубину, Г.А.Иванову, З.Г.Гавриловой за обсуждения в процессе проведения экспериментов. В.А.Дрожжину и Н.И.Жарову за подготовку аппаратуры. В.П.Саранцева благодарю за поддержку и внимание к работе.



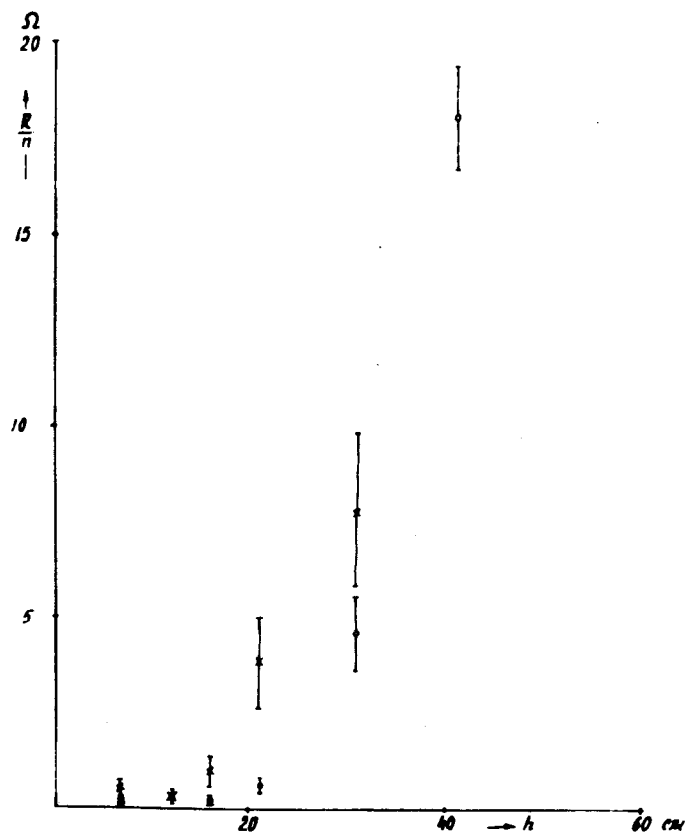


Рис.6. Реальная составляющая импеданса системы "кольцо-камера". Радиус кольца - 16,95 см.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ruggiero A.G., Vaccaro V.G. CERN, Report ISR-TH/68-33, 1968.
2. Faltens A. et al. Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, UCRL-20607, 1971.
3. Faltens A. et al. Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, LBL-2488, 1974.

4. Алексахин Ю.И., Корнев И.Л., Юдин Л.А. ОИЯИ, Р9-7065, Р9-7066, Дубна, 1973.
5. Крылов Н.Н. Теоретические основы радиотехники. Изд. Мор. трансп., М.-Л., 1953.
6. Барабаш Л.С., Доля С.Н., Петров В.А. ОИЯИ, Р9-7700, Дубна, 1974.
7. Fartushny V.P. et al. Czech. Journal Physics, 1976, B26, p. 1200.

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 декабря 1978 года.