



8
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

И.И. Авербух

**ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРРИТОВ
В УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРАХ
ЭЛЕКТРОННЫХ СИНХРОТРОНОВ**

ПРЕПРИНТ 91-13



НОВОСИБИРСК

Применение ферритов
в ускоряющих резонаторах
электронных синхротронов

И.И. Авербух

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены вопросы повышения добротности ускоряющих резонаторов с ферритами в качестве элементов перестройки частоты.

Предложена новая конструктивная схема резонатора, в которой за счет изменения места включения ферритов уменьшаются вносимые потери. Показано, что величина этих потерь зависит от диапазона перестройки частоты. Для небольших перестроек потери в ферритах соизмеримы с потерями в меди.

Получены расчетные соотношения для оценки добротности и диапазона перестройки.

Ferrite Application of
r. f. Cavities to Electron Synchrotrons

I.I. Averbukh

Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk 90, USSR

ABSTRACT

In this work the problems are discussed of Q-factor enhancement for r. f. cavity with ferrite which is to be used for electron synchrotrons.

A new cavity construction is suggested in which level of losses lowered because of changed position of ferrite in the cavity.

Losses are dependent on the width of tuning interval. For small intervals the losses in ferrite and in copper are nearly equal. Formulas for Q-factor and tuning interval calculation are obtained.

© Институт ядерной физики СО АН СССР

Применение ферритов в ускоряющих резонаторах для перестройки частоты связано с увеличением мощности питающих устройств. Это объясняется высоким уровнем вносимых ферритами потерь. Уменьшение вносимых потерь позволит применять ферриты в ускоряющих резонаторах электронных синхротронов, имеющих высокую собственную добротность. До сих пор в этих устройствах используются механические способы подстройки частоты, мало влияющие на добротность резонаторов.

Как известно, в электронных синхротронах с высокой энергией инжекции ($\beta=1$) не требуется перестройка частоты в процессе ускорения. Ее необходимо предусматривать для стабилизации частоты настройки ускоряющей системы в связи с температурными изменениями окружающей среды и неравномерным разогревом элементов конструкции резонатора в процессе работы.

Диапазон частотной перестройки резонатора зависит от степени заполнения ферритами, или иначе, от их объема. С другой стороны вносимые в резонатор потери также зависят от количества применяемых ферритов.

Так как с уменьшением ферритов сокращается диапазон перестройки и уменьшаются вносимые потери, то для определения минимального объема ферритов, достаточного для обеспечения нормальной работы ускоряющей системы, предварительно следует определить необходимый и достаточный диапазон частотной перестройки.

Оценку диапазона перестройки проведем на примере ускоряющего резонатора для малогабаритного электронного синхротрона [1].

Полагаем, что для обеспечения электрической прочности ускоряющего промежутка внутренний объем резонатора работает в вакууме, и вследствие этого, стабильность частоты настройки определяется только температурными уходами геометрических размеров. Относительное изменение частоты, вызываемое температурными изменениями линейных размеров резонатора при их одновременном и равномерном нагреве определяется [2] формулой

$$\frac{\Delta f}{f} = -\alpha \Delta t \quad (1)$$

Здесь $\frac{\Delta f}{f}$ — относительное изменение частоты настройки резонатора. α — температурный коэффициент линейного расширения. Для меди $\alpha = 17 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, Δt — абсолютное изменение температуры $^\circ\text{C}$.

Допуская изменение рабочей температуры в пределах $\pm 20^\circ\text{C}$ можно считать, что в резонаторе, настроенном на рабочую частоту 59 МГц, абсолютный уход частоты составляет $\pm 20 \text{ КГц}$.

Более существенную расстройку вносит неодинаковый разогрев элементов конструкции резонатора, вызванный неравномерным распределением потерь. Наиболее нагруженной частью является внутренний проводник коаксиального резонатора. Его перегрев относительно всего корпуса значительно увеличивает температурный уход частоты резонатора, который в этом случае может быть оценен по формуле

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{2} \frac{L}{d} \alpha \Delta t \quad (2)$$

Здесь $\frac{\Delta f}{f}$ — относительное изменение частоты настройки резонатора. L — длина внутреннего проводника коаксиальной линии в мм. d — длина ускоряющего зазора в резонаторе, формирующего ускоряющую емкость, в мм. α — температурный коэффициент линейного расширения $1/^\circ\text{C}$. Δt — абсолютное изменение температуры $^\circ\text{C}$.

Полагая, что внутренний проводник, как и весь корпус коаксиального резонатора, охлаждается водой и допуская его максимальный перегрев относительно других элементов конструкции не более 10°C , что вполне допустимо, можно считать, что абсолютный уход частоты составляет 150 кГц.

Пренебрегая абсолютным уходом частоты при равномерном нагреве по сравнению с полученной величиной 150 кГц можно считать, что в рассматриваемом ускоряющем резонаторе для электронного синхротрона с частотой обращения частиц 59 МГц должна быть предусмотрена относительная перестройка частоты — 0,25%. Учитывая возможные технологические подстройки частоты в процессе наладки и эксплуатации ускорителя, эту величину следует увеличить в 2 ÷ 3 раза и принять равной 0,5 ÷ 0,75%.

Поиск путей уменьшения вносимых ферритами потерь в ускоряющих устройствах электронных синхротронов был направлен на разработку такой конструкции резонатора, которая, с одной стороны, позволяет использовать преимущества ферритов для осуществления быстрой, бесконтактной и немеханической подстройки частоты, а с другой, обладая потерями, соизмеримыми с потерями в меди, позволяет ограничить объем ферритов минимальной величиной, необходимой только для обеспечения требуемого диапазона перестройки частоты.

Как показали исследования, эффективным способом уменьшения вносимых потерь оказалось изменение места включения ферритов в резонаторе.

В рассмотренной ранее конструкции перестраиваемого резонатора [3] ферриты располагались концентрически на центральном проводнике коаксиальной линии и охватывались полным высокочастотным током возбуждения. Но можно расположить ферриты в резонаторе таким образом, чтобы они охватывались только частью общего высокочастотного тока. В этом случае удастся уменьшить вносимые в резонатор потери даже при использовании ферритов с низкой добротностью.

Такое расположение ферритов приводит, кроме уменьшения вносимых потерь, и к уменьшению возможного диапазона перестройки, но как будет показано ниже, требуемые перестройки могут быть вполне обеспечены.

Одним из возможных мест размещения ферритов является торцевая короткозамыкающая стенка коаксиального резонатора.

Изменение частоты настройки резонатора достигается путем подмагничивания ферритов. С этой целью ферриты в резонаторе размещаются таким образом, чтобы одновременно можно было расположить их между полюсами электромагнита. По предложению П.А. Довгерда оказалось целесообразным устанавливать полюса электромагнита на плоскости кольцевого ферритового сердечника. Конструктивная схема резонатора с размещением ферри-

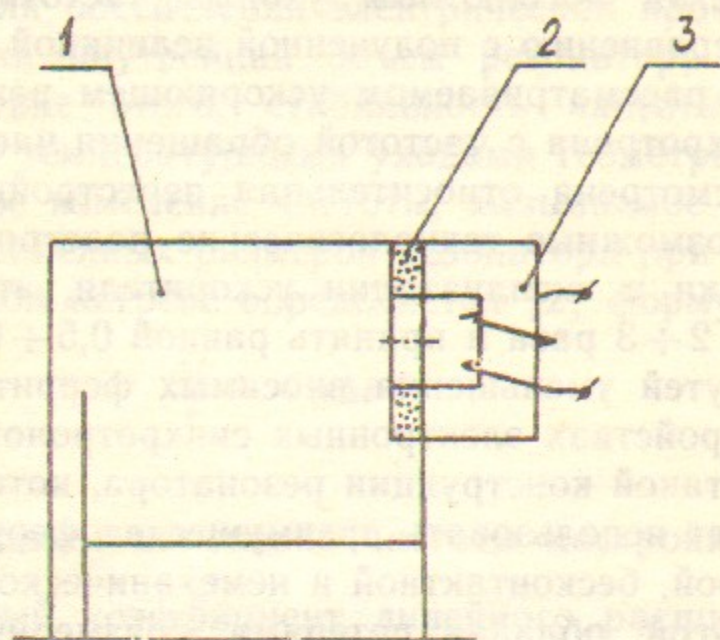


Рис. 1. Конструктивная схема резонатора:
1 — корпус резонатора, 2 — феррит, 3 — электромагнит.

тов на торцевой короткозамыкающей поверхности коаксиальной линии изображена на рис. 1.

Важным преимуществом такой конструкции резонатора является то обстоятельство, что подмагничивающее поле находится в стороне от центрального проводника коаксиальной линии и не попадает в канал синхротрона. При этом отпадает необходимость компенсации влияния подмагничивающего поля на ускоряемые частицы, усложняющая конструкцию устройства.

На макете резонатора, настроенном на частоту 55 МГц с одним ферритовым кольцом из материала 10ВН с размерами $126 \times 81 \times 18$ мм и расположенном на торцевой короткозамыкающей стенке получена абсолютная перестройка частоты 200 кГц. Наибольшие подмагничивающие ампервитки 5000 соответствуют величине напряженности подмагничивающего поля в ферритах ~ 300 А/см.

Для увеличения диапазона перестройки резонатора можно увеличить количество ферритовых колец на торцевой поверхности короткозамыкающей стенки до 2—4 и более штук.

Как показали измерения, увеличение числа ферритовых колец позволяет пропорционально увеличить перестройку резонатора.

Расположение ферритов на торцевой поверхности не является единственно возможным. Можно расположить ферриты на боковой поверхности резонатора, примыкающей к торцевой короткозамкнутой стенке. В конструктивном отношении такое расположение фер-

ритов может оказаться более предпочтительным так как позволяет не увеличивать длину резонатора, которая часто бывает ограничена длиной промежутка. В то же время вертикальный размер ускоряющей системы имеет меньше ограничений со стороны конструктивно сопряженных устройств ускорителя.

Конструктивная схема такого резонатора с подмагничивающим электромагнитом показана на рис. 2.

Одно ферритовое кольцо из материала 10ВН с размерами $126 \times 81 \times 18$ мм размещенное на боковой поверхности резонатора, настроенного на частоту 55 МГц, позволяет перестроить его на 150 кГц. Наибольшие подмагничивающие ампервитки такие же, как и в предыдущем случае — 5000 ампервитков.

В рассматриваемой конструкции резонатора предполагается подмагничивать ферриты постоянным магнитным полем. В этом

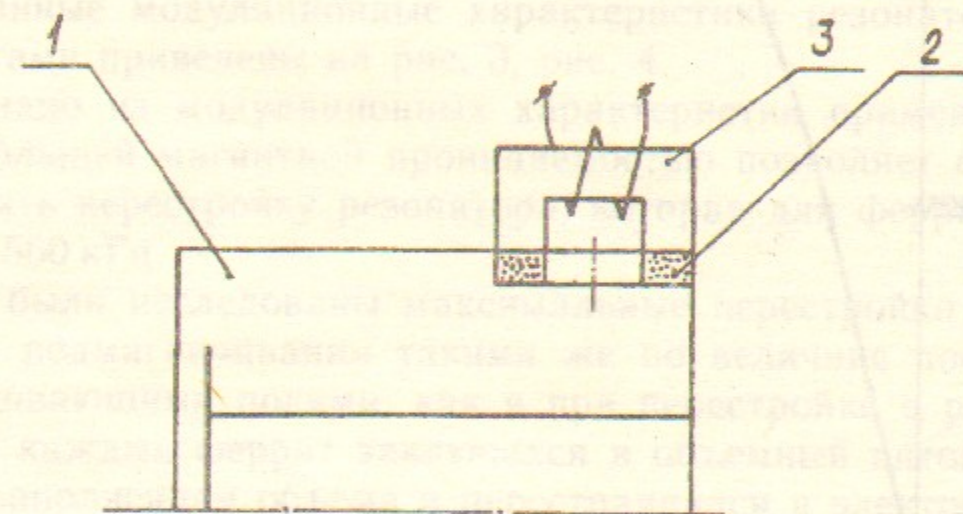


Рис. 2. Конструктивная схема резонатора:
1 — корпус резонатора, 2 — феррит, 3 — электромагнит.

случае, в связи с импульсной работой ускоряющего устройства, система автоматической подстройки частоты резонатора должна содержать две параллельные ветви обратной связи: медленную и быструю. Для работы быстрой ветви обратной связи система подмагничивания должна быть широкополосной. Для обеспечения широкополосности, кроме применения шихтованных электромагнитов, следует исключить образование корпусом резонатора короткозамкнутых витков на пути подмагничивающего потока. С этой целью на обечайке резонатора должны быть предусмотрены специальные разрезы в местах расположения полюсов электромагнита. Разрезы проходят под полюсами и соединяются между собой. Суммарный подмагничивающий поток в разрезе равен нулю. Такой же разрез должна иметь обечайка резонатора при подмагничивании ферритов импульсными полями.

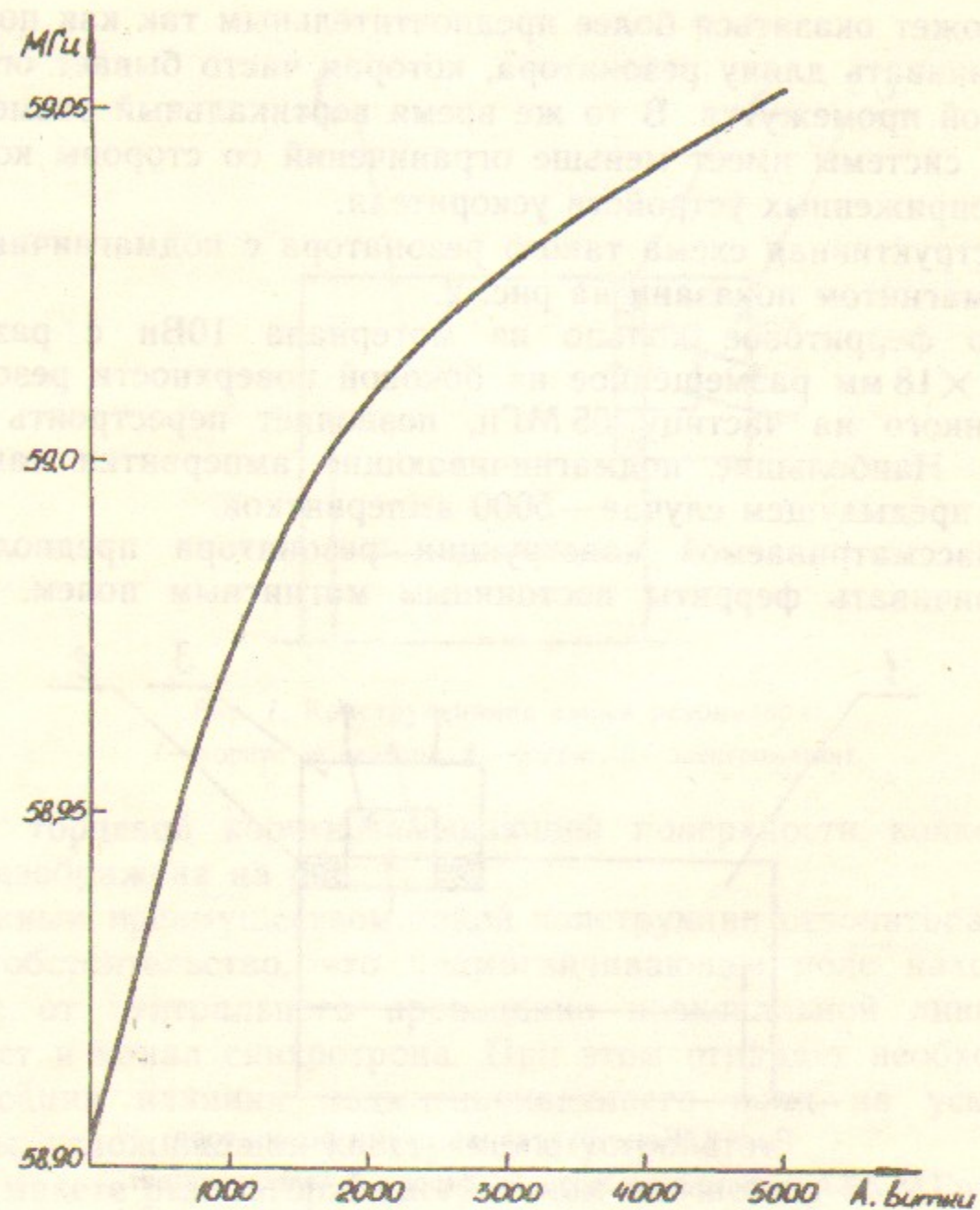


Рис. 3. Модуляционная характеристика резонатора с ферритом 10ВН.

Поскольку поперечный разрез увеличивает потери в резонаторе, то целесообразно подмагничивающий электромагнит устанавливать вдоль резонатора, как показано на рис. 2.

Следует отметить, что в случаях, если ускоряющее напряжение мало меняется по амплитуде в течение ускорительного цикла и при малом влиянии ферритов на частоту резонатора, как это часто может иметь место в нашем случае, можно исключить в системе автоматической подстройки частоты быструю ветвь обратной связи и ограничиться только медленной. При этом отпадает надобность в разрезах на корпусе, что существенно упрощает конструкцию резонатора.

Представляет интерес выяснение вопроса о связи между

перестройкой отдельного ферритового кольца и возможной перестройкой резонатора с одним таким же ферритовым сердечником.

Для проведения таких исследований был изготовлен коаксиальный резонатор на частоту 59 МГц с указанным ранее геометрическими размерами $D_{\text{нар}}=400$ мм, $d_{\text{внут}}=80$ мм, высота $l=300$ мм. Объем внутренней полости резонатора — 36191 см³.

В резонатор поочередно устанавливались ферриты 10ВН и 45НН, имеющие магнитную проницаемость соответственно 10 и 45. Ферритовые сердечники размещались на внутренней боковой и торцевой поверхностях резонатора и перестраивались внешним электромагнитом.

Геометрические размеры ферритовых колец и их объемы приведены в табл. 1.

Постоянные модуляционные характеристики резонатора с этими ферритами приведены на рис. 3, рис. 4.

Как видно из модуляционных характеристик применения ферритов с большей магнитной проницаемостью позволяет существенно увеличить перестройку резонатора, которая для ферритов 45НН достигает 560 кГц.

Далее были исследованы максимальные перестройки этих ферритов при подмагничивании такими же по величине постоянными подмагничивающими полями, как и при перестройке в резонаторе. Для этого каждый феррит заключался в объемный виток с максимальным заполнением объема и перестраивался в электромагните.

Модуляционные характеристики объемных витков с ферритами приведены на рис. 5 и рис. 6.

Таблица 1.

Феррит 10ВН		Феррит 45НН	
Геометрические размеры мм	Объем см ³	Геометрические размеры мм	Объем см ³
126×81×18	132	180×110×15	240

Для одинаковых ферритов и одинаковых подмагничивающих полей на основе модуляционных характеристик исследованных объемных витков и резонатора проведены расчеты абсолютной и относительной перестройки. За начальную частоту относительно которой выполнены расчеты принята начальная частота каждого

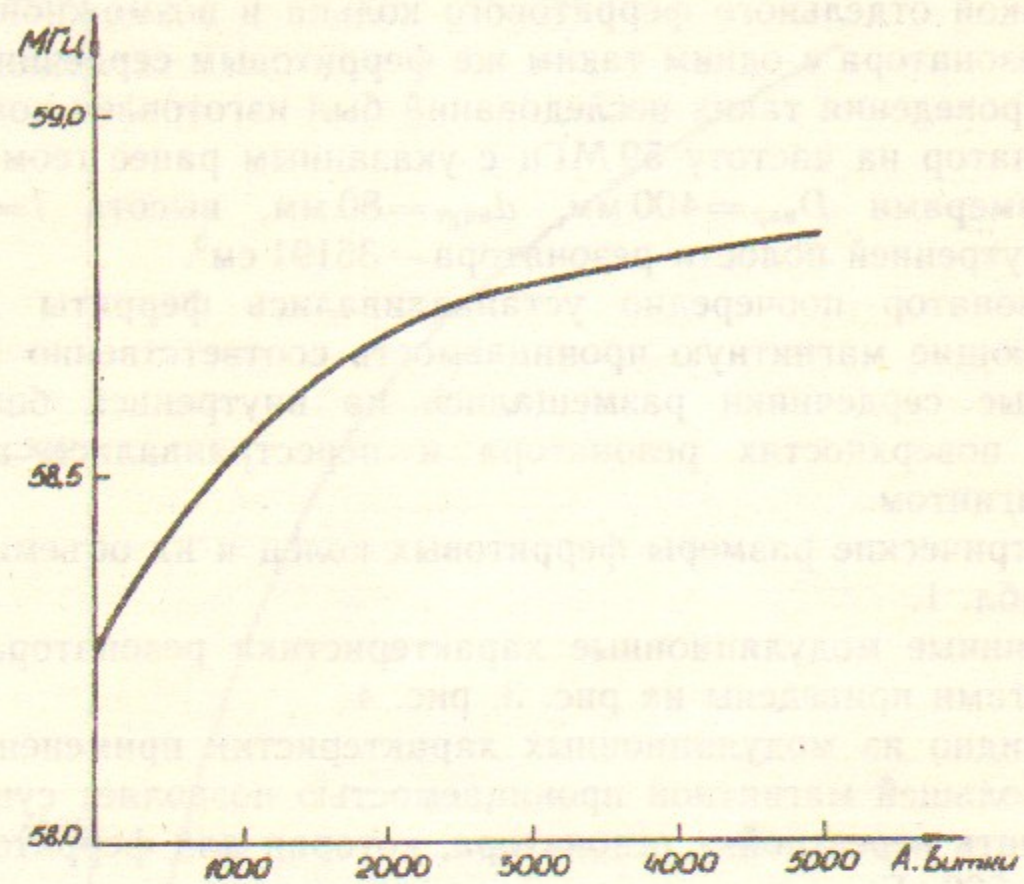


Рис. 4. Модуляционная характеристика резонатора с ферритом 45НН.

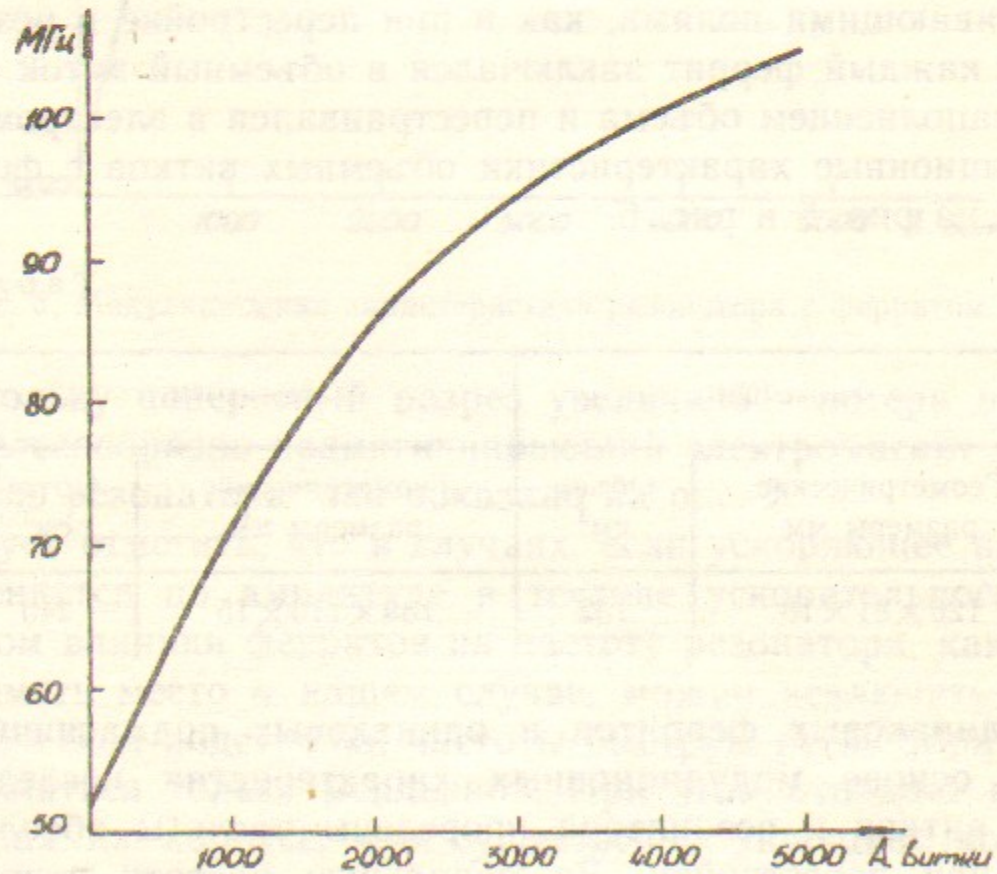


Рис. 5. Модуляционная характеристика объемного витка 10ВН.

объемного витка или резонатора в неподмагниченном состоянии ферритов. Кроме этого рассчитаны отношения относительных перестроек объемных витков и резонаторов с одинаковыми ферри-

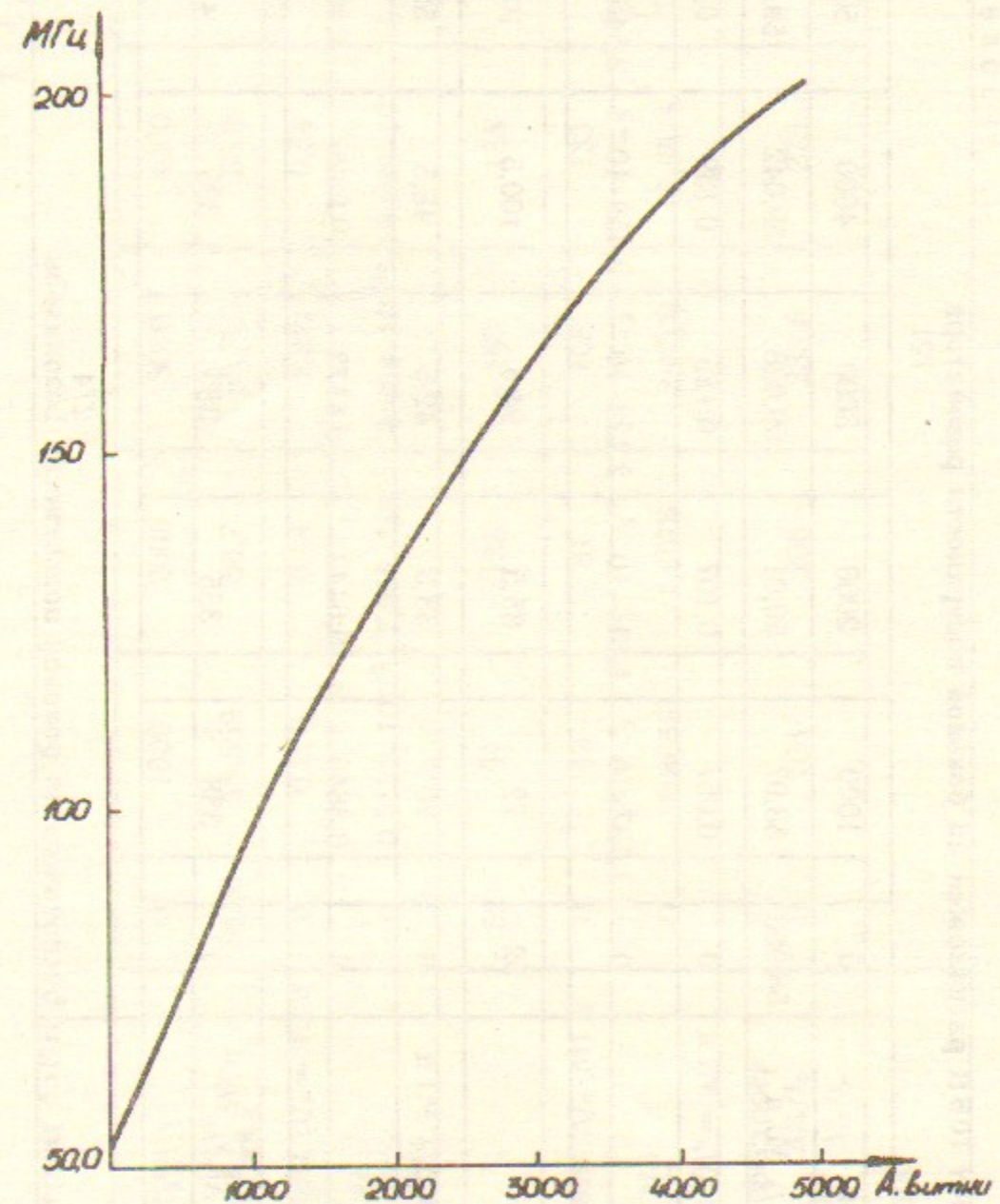


Рис. 6. Модуляционная характеристика объемного витка с ферритом 45НН.

тами для равных подмагничивающих полей. Результаты этих расчетов для ферритов 10ВН и 45НН приведены в табл. 2, 3.

Анализ приведенных в табл. 2, 3 расчетов показывает, что при низких уровнях постоянного подмагничивания отношение относительных перестроек феррита и резонатора соответствует отношению их объемов. При максимальном намагничивании ферритов это отношение примерно в два раза превышает отношение указанных объемов. Этот вывод позволяет предложить экспериментальную формулу для расчета перестройки резонатора с ферритом.

Феррит 10ВН расположен на боковой поверхности резонатора

Таблица 2

Подмагничивающие ампервитки	0	1000	2000	3000	4000	5000
Частота настройки резонатора f_p , МГц	58,903	58,97	59,01	59,028	59,042	59,053
Абсолютные изменения частоты $\Delta f_p = \text{МГц}$	0	0,067	0,107	0,125	0,139	0,15
Относительная перестройка $\frac{\Delta f_p}{f_p}$	0	$1,137 \cdot 10^{-3}$	$1,816 \cdot 10^{-3}$	$2,122 \cdot 10^{-3}$	$2,359 \cdot 10^{-3}$	$2,546 \cdot 10^{-3}$
Частота настройки объемного витка f_ϕ , МГц	52	72	85,5	94,5	100,5	104,5
Абсолютные изменения частоты Δf_ϕ , МГц	0	20	33,5	42,5	48,5	52,5
Относительная перестройка $\frac{\Delta f_\phi}{f_\phi}$	0	0,3846	0,6442	0,8173	0,9326	1,0096
Отношения относительных перестроек объемного витка и резонатора $\frac{\Delta f_\phi / f_\phi}{\Delta f_p / f_p}$	0	338	355	385	395	415
Отношение объема резонатора к объему феррита	274					

12

Феррит 45НН расположен на боковой поверхности резонатора

Таблица 3

Подмагничивающие ампервитки	0	1000	2000	3000	4000	5000
Частота настройки резонатора f_p , МГц	58,26	58,559	58,7	58,765	58,8	58,82
Абсолютные изменения частоты $\Delta f_p = \text{МГц}$	0	0,299	0,44	0,505	0,54	0,56
Относительная перестройка $\frac{\Delta f_p}{f_p}$	0	$0,5132 \cdot 10^{-3}$	$7,552 \cdot 10^{-3}$	$8,668 \cdot 10^{-3}$	$9,268 \cdot 10^{-3}$	$9,612 \cdot 10^{-3}$
Частота настройки объемного витка f_ϕ , МГц	52	97	133	160	185	200
Абсолютные изменения частоты Δf_ϕ , МГц	0	45	81	108	133	148
Относительная перестройка $\frac{\Delta f_\phi}{f_\phi}$	0	0,8656	1,5576	2,0769	2,5576	2,846
Отношения относительных перестроек объемного витка и резонатора $\frac{\Delta f_\phi / f_\phi}{\Delta f_p / f_p}$	0	168	206	239,6	275	296
Отношение объема резонатора к объему феррита	151					

13

$$\frac{\Delta f_p}{f_p} = \frac{\Delta f_\phi / f_\phi}{(1 \div 2) K} \quad (2)$$

Здесь $\Delta f_p / f_p$ — относительная перестройка резонатора $\Delta f_\phi / f_\phi$ — относительная перестройка феррита в объемном витке. K — отношение объема внутренней полости резонатора к объему феррита.

Для исследования вносимых ферритами потерь был использован макет резонатора с указанными ранее размерами и измеренной добротностью.

В резонатор попеременно устанавливались ферритовые сердечники из различных материалов и измерялась его результирующая добротность. Результаты измерения результирующей добротности резонатора с различными ферритовыми сердечниками, а также добротность резонатора без ферритов приведены в таблице 4.

Таблица 4

Добротность резонатора без ферритов	Добротность резонатора с ферритом		
	10ВН	45НН	60НН
650	620	490	410

Указанная в табл. 4 добротность резонатора без ферритов 650 объясняется низкой добротностью укорачивающих конденсаторов, имеющих $\text{tg} \delta \approx 10^{-3}$. Расчетное значение добротности резонатора без ферритов, учитывающая только потери в меди, составляет величину $\sim 10^4$. Укорачивающий конденсатор в таком резонаторе, как известно, часто формируется вакуумным ускоряющим зазором.

По измеренным значениям результирующей добротности резонатора и значению добротности резонатора без ферритов рассчитана добротность исследованных ферритов, приведенная к открытому концу коаксиальной линии. Расчет произведен по формуле

$$Q_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{рез}} Q}{Q - Q_{\text{рез}}} \quad (3)$$

Здесь $Q_{\text{пр}}$ — приведенная добротность ферритов, $Q_{\text{рез}}$ — результирующая добротность резонатора, Q — добротность резонатора без ферритов.

Результаты расчетов приведенной добротности ферритов даны в табл. 5.

Таблица 5

Приведенная добротность одного ферритового кольца		
феррит 10ВН	феррит 45НН	феррит 60НН
13500	2000	1100

Как следует из табл. 5 наименьшие потери в резонатор вносят высокочастотные ферриты 10ВН. В рассматриваемом резонаторе приведенная добротность одного кольца размером $126 \times 81 \times 18$ мм составляет величину ~ 13500 , соизмеримую с добротностью резонатора без ферритов, учитывающей только потери в меди. Возможная перестройка резонатора с одним таким ферритовым кольцом, как указывалось, составляет 150 кГц. Два ферритовых кольца из материала 10ВН могут обеспечить вдвое большую перестройку, но приведенная добротность ферритов при этом уменьшается в два раза.

Ферриты с большей магнитной проницаемостью, например, 45НН позволяют получить перестройку частоты в таком же резонаторе $500 \div 600$ кГц, но приведенная добротность ферритов при этом составляет только 2000.

Таким образом, получение больших перестроек в резонаторе достигается за счет снижения его добротности. Очевидно, в каждом конкретном случае эти параметры должны выбираться из комплексных соображений.

Представляет интерес получение оценочных соотношений между приведенной добротностью ферритов в резонаторе и собственной добротностью ферритов. С этой целью была измерена собственная добротность ферритов на частоте 55 МГц. Результаты этих измерений приведены в таблице 6.

Таблица 6

Добротность ферритов на частоте 55 МГц		
10ВН	45НН	60НН
55	11,5	7,5

Далее было рассчитано произведение собственной добротности

ферритов на величину отношения объема внутренней полости резонатора к объему исследуемых колец. Объем внутренней полости резонатора, как указывалось, равен 36191 см^3 . Объемы исследованных ферритов, отношение объема внутренней полости резонатора к объему ферритов, а также произведение этих отношений на добротность соответствующего феррита, приведены в табл. 7.

Таблица 7

	Феррит 10ВН	Феррит 45НН	Феррит 60НН
Объем	132 см^3	240 см^3	350 см^3
Отношения объемов	275	151	103
Произведение отношений на добротность	15000	1750	800

Сравнение расчетных значений произведения отношения объемов на добротность, приведенных в табл. 7, с измеренными величинами, приведенными в табл. 5, показывает, что величина, равная произведению добротности ферритов на отношения объемов резонатора и феррита, достаточно близко соответствует значению приведенной добротности. Это дает основание записать экспериментальную формулу для расчета приведенной добротности ферритов

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{ф}} \cdot k. \quad (4)$$

Здесь $Q_{\text{пр}}$ — приведенная добротность ферритов, $Q_{\text{ф}}$ — собственная добротность ферритов, k — отношение объема внутренней полости резонатора к объему ферритового сердечника.

Тепловой режим ферритов обеспечивается известной системой охлаждения, использующей «Эластосил» в качестве тонкого теплопроводного клеевого слоя между ферритами и корпусом резонатора, который можно охлаждать водой или воздушным потоком.

Автор выражает благодарность М.М. Карлинеру за полезные обсуждения, а также П.А. Довгерду, В.М. Попову и А.С. Шубенкову принимавшим участие в проведении экспериментальных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авербух И.И. и др. Компактный электронный синхротрон-инжектор накопителей — источников СИ для технологических целей. *Тезисы XI Съезда ИИИ*
2. С.С. Аршинов, С.В. Персон, А.И. Эйленкриг. Инженерный расчет контуров генераторов УКВ и КВ. Советское радио. 1957
3. Авербух И.И. Резонаторы на ферритах с высоким ускоряющим напряжением.

Примечание 90-57 М-и 1990

И.И. Авербух

И.И. Авербух

**Применение ферритов
в ускоряющих резонаторах
электронных синхротронов**

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 2 февраля 1991 г.

Подписано в печать 2.02 1991 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,5 печ.л., 1,2 уч.-изд.л.

Тираж 150 экз. Бесплатно. Заказ № 13

Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.