



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 96-35  
ОЛУ

О.К.Беляев, В.А.Тепляков

**ПОДСТРОЙКА ЧАСТОТЫ РЕЗОНАТОРА  
УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ  
КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ КОНТУРОМ**

Протвино 1996

**Аннотация**

Беляев О.К., Тепляков В.А. Подстройка частоты резонатора ускоряющей структуры колебательным контуром: Препринт ИФВЭ 96-35. – Протвино, 1996. – 7 с., 6 рис., библиогр.: 4.

Показана возможность подстройки частоты резонатора ускоряющей структуры с помощью связанного с ним колебательного контура. Приведены экспериментальные результаты.

**Abstract**

Belyaev O.K., Teplyakov V.A. Tuning the Accelerator Cavity With the Circuit: IHEP Preprint 96-35. – Protvino, 1996. – p. 7, figs. 6, refs.: 4.

The possibility of accelerator cavity tuning with the coupling circuit is shown. The experimental results are presented.

Наиболее распространенные способы подстройки собственной частоты основываются на механической или тепловой деформациях стенок резонатора или на перемещении специальных подстроечных элементов. В существующем ускорителе с ВЧК-фокусировкой [1] УРАЛ-30 подстройка частоты осуществляется поворотом специальных короткозамкнутых колец. Кольца расположены в ВЧ-магнитном поле Н-резонаторов, работающих на частоте 148,5 МГц. Поворот одного кольца на  $90^\circ$  приводит к изменению собственной частоты резонатора начальной части ускорителя длиной 4 м на  $5 \div 7$  кГц, что, как следует из практики, явно недостаточно. Для получения требуемых расстроек необходимо иметь до 10 и более таких колец на один резонатор. Задача подстройки частоты усложняется в режиме большой средней мощности в резонаторе.

Рассмотрим возможность изменения собственной частоты резонатора с помощью колебательного контура с сосредоточенными параметрами, который индуктивно связан с резонатором. Эквивалентная схема такой системы показана на рис.1. Известно [2], что воздействие вторичного контура на первичный заключается во внесении в первичный контур дополнительного активного  $R_{en}$  и реактивного  $X_{en}$  сопротивлений. В этом случае полное комплексное сопротивление первичного контура выражается следующим образом:

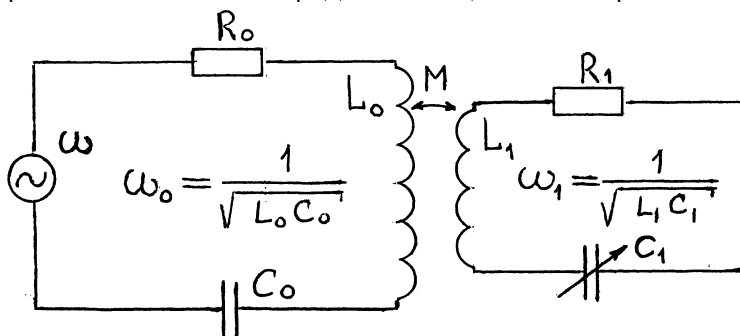


Рис. 1. Эквивалентная схема системы резонатор – контур.  $R_o; L_o; C_o$  — эквивалентные параметры резонатора;  $R_1; L_1; C_1$  — параметры колебательного контура.

$$Z = R + jX = R_o + R_{en} + j(X_o + X_{en}). \quad (1)$$

$$\begin{cases} R = R_o + \frac{M^2}{L_1^2} \frac{R_1}{\left(\frac{\omega_1}{\omega} \cdot \frac{1}{Q_1}\right)^2 + \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega^2}\right)^2} \\ X = \omega L_o - \frac{1}{\omega C_o} - \frac{M^2}{L_1} \frac{\omega}{\left(\frac{\omega_1}{\omega} \cdot \frac{1}{Q_1}\right)^2 + \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega^2}\right)^2} \cdot \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega^2}\right), \end{cases} \quad (2)$$

где  $Q_1$  — собственная добротность вторичного контура.

Собственная частота резонатора определяется из условия:

$$X = 0. \quad (3)$$

Вносимое реактивное сопротивление  $X_{вн}$  при

$$\left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)_{1,2} = \sqrt{1 \pm \frac{1}{Q_1}}. \quad (4)$$

имеет экстремумы, величина которых пропорциональна  $Q_1$ .  $X_{вн}$  обращается в 0 при

$$\frac{\omega_1}{\omega} = 1 \quad (5)$$

При переходе через ноль вносимое реактивное сопротивление меняет знак.

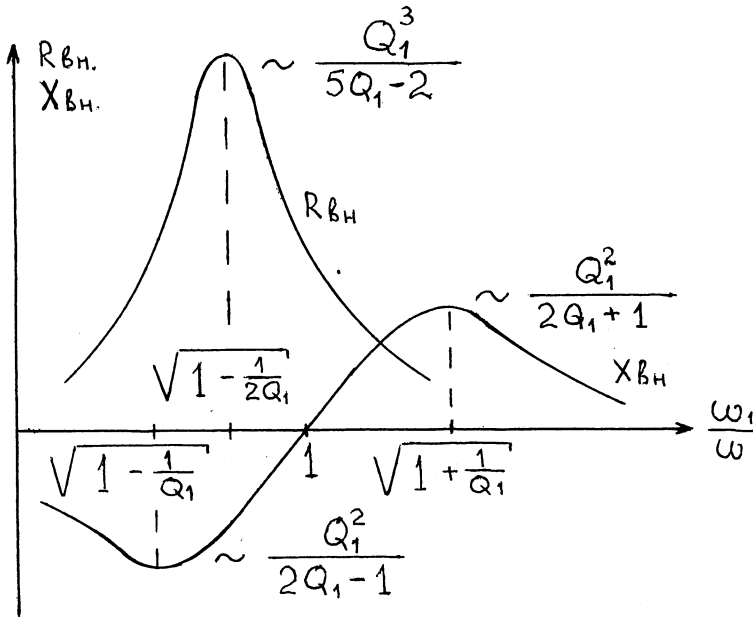


Рис. 2. Зависимость вносимых сопротивлений от частоты вторичного колебательного контура.

Примерный вид зависимости  $X_{вн}$  от частоты показан на рис.2. Согласно выражению (2) выполнение условия

$$\frac{\omega_1}{\omega} < 1 \quad (6)$$

эквивалентно уменьшению емкости  $C_o$ , т.е. повышению собственной частоты резонатора. Условие

$$\frac{\omega_1}{\omega} > 1 \quad (7)$$

эквивалентно увеличению емкости  $C_o$ , т.е. уменьшению собственной частоты резонатора.

Таким образом, меняя собственную частоту  $\omega_1$  вторичного контура, например изменением  $C_1$ , можно перестраивать собственную частоту резонатора как вверх, так и вниз. Необходимо отметить, что для подстройки частоты следует использовать области

$$\frac{\omega_1}{\omega} > \sqrt{1 + \frac{1}{Q_1}};$$

$$\frac{\omega_1}{\omega} < \sqrt{1 - \frac{1}{Q}}, \quad (8)$$

так как в интервале

$$\sqrt{1 + \frac{1}{Q_1}} > \frac{\omega_1}{\omega} > \sqrt{1 - \frac{1}{Q_1}} \quad (9)$$

находится максимум вносимого активного сопротивления  $R_{вн}$ . Примерный вид зависимости вносимого активного сопротивления от частоты колебательного контура  $\omega_1$  показан на рис.2. При

$$\frac{\omega_1}{\omega} = \sqrt{1 - \frac{1}{2Q_1}} \quad (10)$$

величина вносимых потерь достигает максимума. При приближении к такому значению частоты следует ожидать резкого падения добротности резонатора, что нежелательно.

Увеличение добротности вторичного контура  $Q_1$  расширяет диапазон перестройки частоты резонатора  $\sim Q_1$  и уменьшает вносимые активные потери в области (8)  $\sim Q_1^{-1}$ .

Экспериментальная проверка возможности подстройки собственной частоты резонатора с помощью связанного с ним колебательного контура проводилась на НЧУ – начальной части ускорителя с ВЧК-фокусировкой. НЧУ построена на базе 2Н-резонатора, нагруженного системой электродов [3]. При отсутствии узла подстройки собственная частота НЧУ  $f_o = 148,43$  МГц, нагруженная добротность  $Q_{max} = 4110$ . Колебательный контур был изготовлен в виде съемного устройства, устанавливаемого в люке контейнера НЧУ на половине длины резонатора (рис.3). Колебательный контур состоял из индуктивной петли  $L_1$ , переменного конденсатора  $C_1$ , образованного

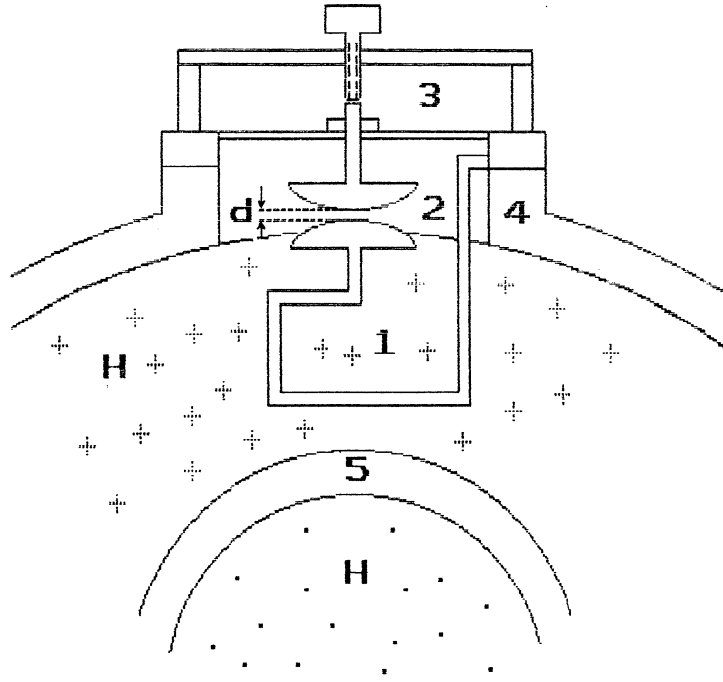


Рис. 3. Узел подстройки частоты. 1 — индуктивная петля; 2 — электроды конденсатора с переменной емкостью; 3 — устройство позиционирования; 4 — контейнер; 5 — 2Н-резонатор.

двумя электродами и системы позиционирования, обеспечивающей изменение емкости конденсатора в широких пределах за счет изменения расстояния между электродами. Контур связан с магнитным полем резонатора.

Измерялась собственная частота и нагруженная добротность НЧУ при различных расстояниях  $d$  между электродами. На рис.4 а,б показаны полученные зависимости этих параметров от нормированной частоты  $\bar{\omega}_1$  колебательного контура. Под нормированной частотой понимается величина

$$\bar{\omega}_1 = \frac{\omega_1}{\omega_{1n}} = \sqrt{\frac{C_{1n}}{C_1}} \approx \sqrt{\frac{d}{d_n}}, \quad (11)$$

где  $\omega_{1n}$  — начальная собственная частота колебательного контура, соответствующая емкости  $C_{1n}$  при максимальном расстоянии между электродами  $d_n = 5,8$  мм.

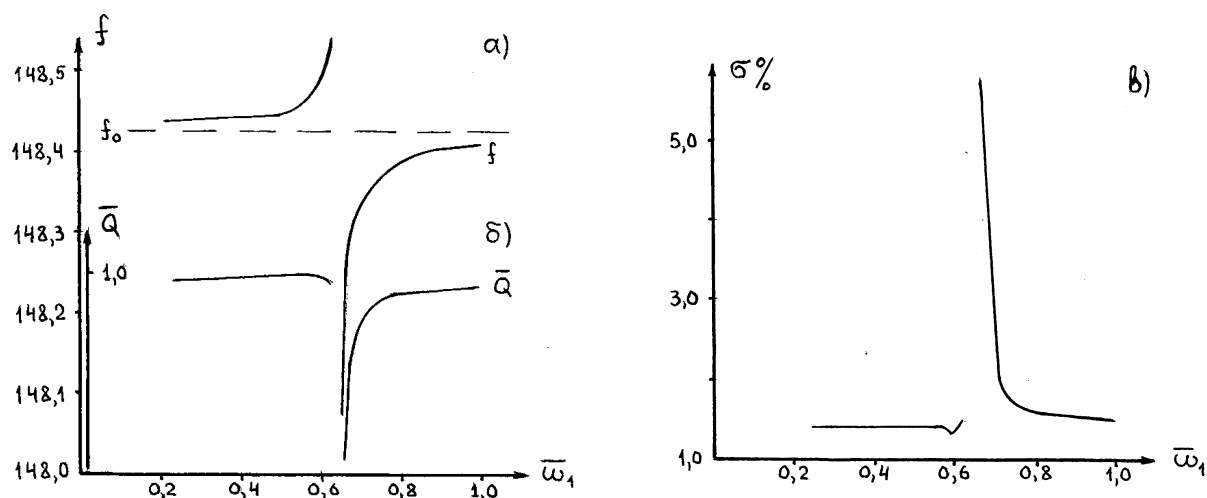


Рис. 4. Зависимости радиотехнических параметров резонатора от нормированной собственной частоты колебательного контура.

Экспериментальная зависимость собственной частоты резонатора от частоты контура (рис.4а) качественно соответствует поведению величины  $X_{вн}$  рис.2. При малых значениях собственной частоты колебательного контура (б) происходит повышение собственной частоты резонатора относительно  $f_o$ . При увеличении частоты контура происходит резкий переход частоты резонатора вниз от  $f_o$  с дальнейшим изменением в соответствии с  $X_{вн}$  при условии (7).

На рис.4б показана экспериментальная зависимость относительной добротности  $\bar{Q}$  от величины  $\bar{\omega}_1$ :

$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q_{max}}, \quad (12)$$

где  $Q_{max}$  — нагруженная добротность резонатора в отсутствии узла подстройки. Резкое падение добротности объясняется максимумом вносимых потерь при выполнении условия (10). Форма кривой соответствует характеру изменения вносимых сопротивлений рис.2.

Устройство для подстройки частоты не должно искажать распределение поля в ускоряющей структуре. Отклонение от требуемого распределения характеризуется величиной среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  [4]. Распределение поля без узла подстройки частоты при  $\sigma = 1,3\%$  показано на рис.5. В процессе эксперимента измерялись распределения поля вдоль оси структуры и значения  $\sigma$  при различной настройке колебательного контура. С возрастанием вносимых потерь распределение поля резко искажается (рис.6), а величина  $\sigma$  увеличивается (рис.4в).

Допустимое падение добротности и искажение формы поля являются основными факторами, ограничивающими величину перестройки собственной частоты резонатора вниз от  $f_0$ . Допустимое падение добротности определяется системой ВЧ-питания резонатора и величиной потерь в колебательном контуре, что особенно важно при работе в режиме большой средней мощности. Ограничение на искажение формы поля накладывается требованиями динамики частиц. Величина перестройки вверх от  $f_0$  определяется неравенствами (8) и (9).

Согласно экспериментальным результатам, приведенным на рис.4, в предположении допустимости увеличения  $\sigma$  до 2% и падения добротности на 7% испытываемый узел подстройки частоты обеспечивает уменьшение собственной частоты резонатора на величину не менее 50 кГц. Этот же узел дает увеличение частоты резонатора не менее чем на 80 кГц. Для получения такого же результата требуется около 20 ранее используемых элементов подстройки, что показывает эффективность предлагаемого способа.

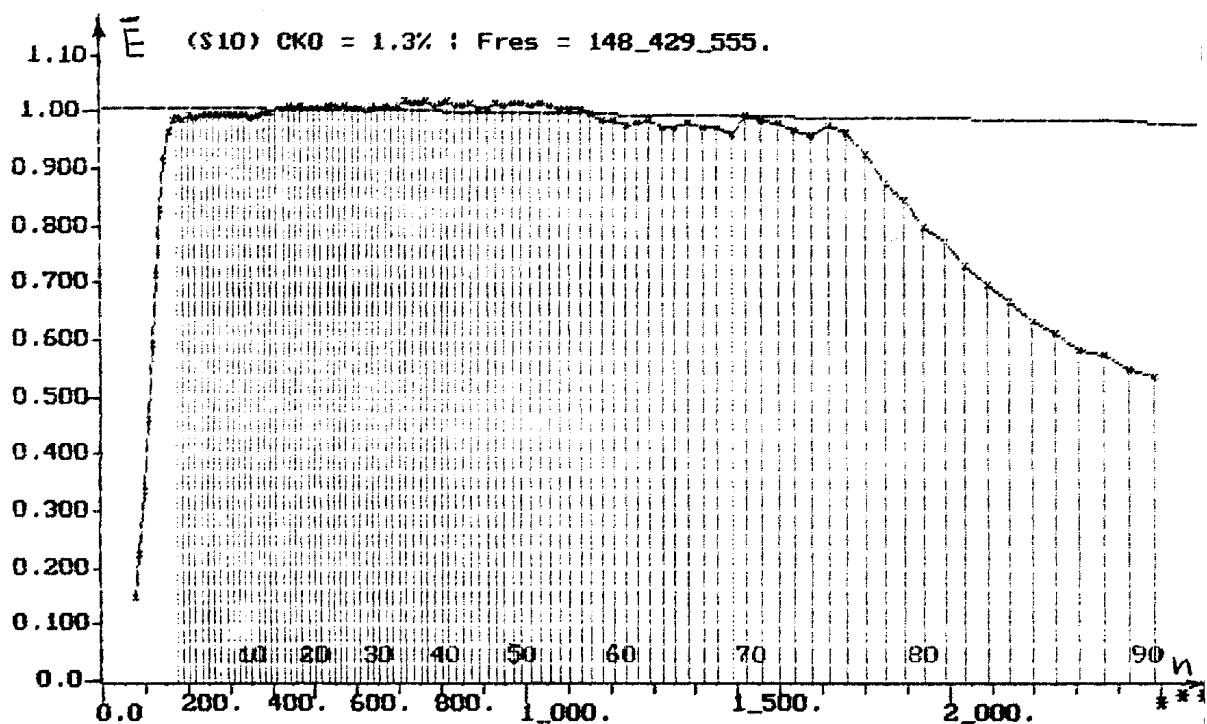


Рис. 5. Распределение поля в НЧУ без узла подстройки частоты.

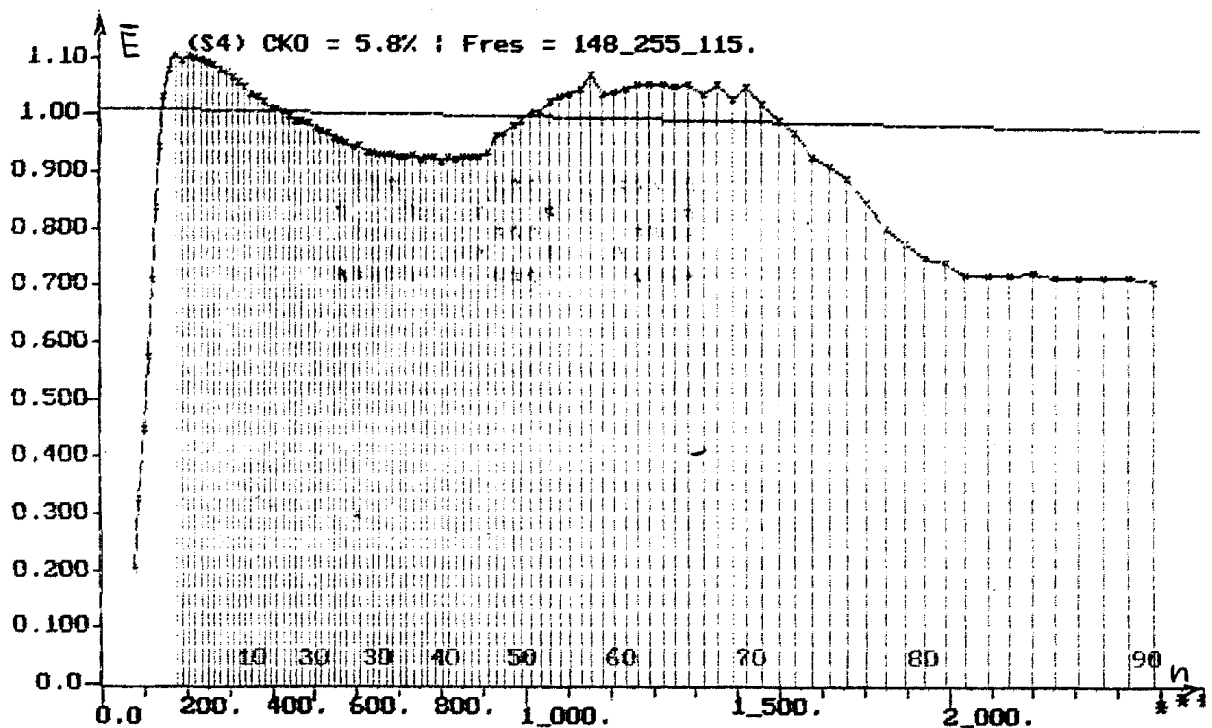


Рис. 6. Распределение поля в НЧУ с узлом подстройки частоты при увеличении вносимых потерь ( $\bar{\omega}_1 \approx 0,65$ ).

### Список литературы

- [1] Егоров А.А. и др. – Препринт ИФВЭ 79-151, Серпухов, 1979.
- [2] Калинин В.И., Герштейн Г.М. Введение в радиофизику. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957.
- [3] Капчинский И.М., Тепляков В.А. Линейный ускоритель ионов с пространственно однородной жесткой фокусировкой // ПТЭ, 1970, №2, с.19-22.
- [4] Беляев О.К., Голосай Н.И. – Препринт ИФВЭ 88-131, Серпухов, 1988.

*Рукопись поступила 25 апреля 1996 г.*



О.К.Беляев, В.А.Тепляков

Подстройка частоты резонатора ускоряющей структуры колебательным контуром.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы  $\text{\LaTeX}$ .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 30.04.96. Формат  $60 \times 84/8$ .      Офсетная печать.

Печ.л. 0,75.    Уч.-изд.л. 0,57.    Тираж 170.    Заказ 707.    Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

