

УДК 621.384.64:621.372.413

## **РАСЧЕТ ДВУХ СВЯЗАННЫХ РЕЗОНАТОРОВ В РЕЖИМЕ УСКОРЕНИЯ И РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ ПУЧКА**

*В. М. Павлов*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Новосибирск, Россия

Одним из вариантов ускорителя электронов на энергию порядка 0,8–8 МэВ для электронного охлаждения антипротонного пучка в HESR (High Energy Storage Ring, GSI, Германия) был линейный ВЧ-ускоритель электронов. Базовым элементом такого ускорителя является система из двух связанных резонаторов, работающих в режиме рекуперации энергии пучка. В одном резонаторе происходит ускорение пучка, а в другом пучок, тормозясь, отдает свою энергию обратно в систему. Представлен расчет такой системы.

One possible variant of electron accelerator for cooling of the antiproton beam at HESR GSI, Germany is the 0.8–8 MeV linear RF-accelerator. The main element of the accelerator is two coupled cavities, operating in recuperation mode. The first cavity is an accelerating cavity. In the second cavity, the waste beam is a decelerating one and returns the energy to the system. The calculation of such a system is presented.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для электронного охлаждения антипротонного пучка в HESR с энергией 2–14,5 ГэВ необходим пучок электронов со средним током порядка 0,36 А и энергией, регулируемой в пределах  $\sim 0,8\text{--}8$  МэВ. Одним из вариантов ускорителя электронов на энергию 0,8–8 МэВ был ВЧ линейный ускоритель электронов. После прохождения участка, на котором происходит охлаждение антипротонов, пучок электронов возвращается на коллектор. При этом для уменьшения потребляемой мощности возвращаемый пучок отдает свою энергию обратно в систему. Для рекуперации энергии отработанного пучка было предложено использовать систему из двух параллельно расположенных ускорителей. Каждый ускоритель состоит из набора отдельных резонаторов. Основным элементом такого ускорителя-рекуператора является система из двух связанных резонаторов, запитываемых от двух ВЧ-генераторов. В одном из резонаторов электронный пучок ускоряется, а в другом тормозится, отдавая энергию в систему связанных резонаторов.

### **1. СИСТЕМА ДВУХ СВЯЗАННЫХ РЕЗОНАТОРОВ**

В качестве ускоряющих резонаторов планировалось использовать резонаторы, разработанные в ИЯФ, Новосибирск, для лазера на свободных электронах [1]. Резонатор имеет следующие характеристики: рабочая частота 181,1 МГц, собственная добротность

$Q_0 = 49710$ , шунтовое сопротивление  $R_{\text{sh}} = 10,84$  МОм. При ускоряющем напряжении  $\sim 1$  МВ тепловые потери в резонаторе составят примерно 100 кВт. Поэтому, из энергетических соображений, два резонатора питаются отдельными ВЧ-источниками.

Система двух резонаторов, связанных волноводом электрической длиной  $\varphi$  и нагруженных токами, изображена на рис. 1.

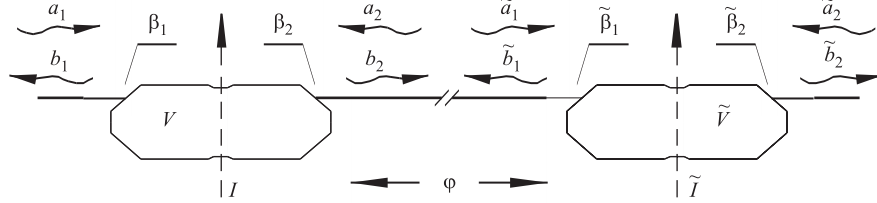


Рис. 1. Два связанных резонатора, запитываемых от отдельных ВЧ-источников

На рисунке все величины без тильды относятся к ускоряющему резонатору, а с тильдой — к тормозящему. Каждый резонатор имеет два отверстия связи, коэффициенты связи  $\beta_{1,2}$ ,  $a_{1,2}$  и  $b_{1,2}$  — амплитуды падающих и отраженных волн в подводящих волноводах. В установившемся режиме при работе на частоте  $\omega$  уравнения для амплитуд эффективных напряжений  $V$  и  $\tilde{V}$  в резонаторах с двумя отверстиями связи можно записать в виде [2]

$$V = \frac{1}{\xi}(2\beta_1 A_1 + 2\beta_2 A_2 - IR_{\text{sh}}), \quad \tilde{V} = \frac{1}{\xi}(2\tilde{\beta}_1 \tilde{A}_1 + 2\tilde{\beta}_2 \tilde{A}_2 - \tilde{I}\tilde{R}_{\text{sh}}), \quad (1)$$

где  $\xi = (1 - j\varepsilon)(1 + \beta_1 + \beta_2)$ ,  $\varepsilon \approx -2Q_L(\omega - \omega_0)/\omega_0$  — относительная расстройка;  $Q_L = Q_0/(1 + \beta_1 + \beta_2)$  — полная нагруженная добротность резонатора;  $Q_0$  — собственная добротность резонатора;  $R_{\text{sh}}$  — эффективное шунтовое сопротивление резонатора;  $I = I_0 \exp(j\varphi_I)$  — внешний нагружающий ток,  $I_0$  — средний ток пучка,  $\varphi_I$  — его фаза;  $A_{1,2}$  — нормированные амплитуды напряжений падающих волн на входах 1 и 2.

Нормированные амплитуды напряжений  $A_{1,2}$  в (1) связаны с амплитудами напряжений падающих волн в подводящих волноводах (см. рис. 1) соотношением

$$a_{1,2} = -\sqrt{2\rho\beta_{1,2}/R_{\text{sh}}} A_{1,2}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — волновое сопротивление питающего волновода.

Нормированные амплитуды напряжений отраженных волн от входов 1 и 2 резонатора равны

$$B_{1,2} = V - A_{1,2}. \quad (3)$$

Амплитуды напряжений отраженных волн в питающих волноводах  $b_{1,2}$  (см. рис. 1) связаны с  $B_{1,2}$  соотношением, аналогичным (2) для падающих волн.

В пренебрежении потерями в связующем волноводе электрической длины  $\varphi$  падающие и отраженные волны связаны соотношениями:

$$\tilde{a}_1 = b_2 \exp(-j\varphi) \Rightarrow V - A_2 = \sqrt{\tilde{\beta}_1/\beta_2} \exp(j\varphi) \tilde{A}_1, \quad (4a)$$

$$\tilde{b}_1 = a_2 \exp(j\varphi) \Rightarrow \tilde{V} - \tilde{A}_1 = \sqrt{\beta_2/\tilde{\beta}_1} \exp(j\varphi) A_2. \quad (46)$$

Используя (4) и исключая амплитуды  $\tilde{A}_1$  и  $A_2$  из (1), получим систему уравнений для нахождения напряжений на резонаторах через амплитуды падающих волн от питающих генераторов и нагружающих токов:

$$\begin{pmatrix} V \\ \tilde{V} \end{pmatrix} = \frac{1}{\det M} \begin{pmatrix} 2\tilde{\beta}_1 - \xi \det & 2\sqrt{\tilde{\beta}_1\beta_2} \exp(j\varphi) \\ 2\sqrt{\tilde{\beta}_1\beta_2} \exp(j\varphi) & 2\beta_2 - \xi \det \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -2\beta_1 A_1 + IR_{\text{sh}} \\ -2\tilde{\beta}_2 \tilde{A}_2 + \tilde{I}R_{\text{sh}} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где  $\det M = (2\beta_2 - \xi)(2\tilde{\beta}_1 - \xi) - \xi\tilde{\xi} \exp(2j\varphi)$ .

Далее рассматриваются два одинаковых резонатора:  $\tilde{Q}_0 = Q_0$ ,  $\tilde{R}_{\text{sh}} = R_{\text{sh}}$ ,  $\tilde{\beta}_2 = \beta_1$ ,  $\tilde{\beta}_1 = \beta_2$  и  $\tilde{\omega}_0 = \omega_0$ ,  $\tilde{\omega} = \omega$ . При согласованном режиме работы обоих резонаторов на резонансной частоте ( $\omega = \omega_0$ ) амплитуды отраженных от резонаторов волн равны нулю:  $B_1 = \tilde{B}_2 = 0$ . Тогда амплитуды падающих волн должны быть равны  $A_1 = V$ ,  $\tilde{A}_2 = \tilde{V}$ . Энергия, набираемая пучком в резонаторе; равна

$$\Delta W = e|V| \cos(\varphi_V - \varphi_I), \quad (6)$$

где  $\varphi_V$  — фаза напряжения в резонаторе,  $\varphi_I$  — фаза нагружающего тока.

Пусть амплитуды падающих волн от питающих генераторов связаны соотношением  $\tilde{A}_2 = A_1 \exp(j\psi)$ . При согласованном режиме работы напряжения на резонаторах будут также равны по величине и отличаться только фазой:  $\tilde{V} = V \exp(j\psi)$ . При охлаждении пучок электронов практически не изменяет своего тока. Тогда, если ток возвращаемого пучка равен  $\tilde{I} = -I \exp(j\psi)$ , то энергия, набираемая пучком во втором резонаторе, будет

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{W} &= e|\tilde{V}| \cos(\varphi_{\tilde{V}} - \varphi_{\tilde{I}}) = e|\tilde{I}| \operatorname{Re} \left( \frac{\tilde{V}}{\tilde{I}} \right) = \\ &= -e|I| \operatorname{Re} \left( \frac{V}{I} \right) = -e|V| \cos(\varphi_V - \varphi_I) = -\Delta W. \end{aligned}$$

Т.е. первый резонатор ускоряет пучок на  $\Delta W$ , а во втором резонаторе пучок теряет точно такую же энергию. Из (4) получим условия согласованного режима работы обоих резонаторов на резонансной частоте в режиме рекуперации энергии пучка

$$\psi = \varphi, \quad \varphi_V = \varphi_I, \quad \beta_1 = 1, \quad \beta_2 = R_{\text{sh}}|I|/|V| \equiv R_{\text{sh}}|I|/|A_1|.$$

При этом в связующем волноводе есть только волна, распространяющаяся от резонатора, в котором пучок тормозится, к ускоряющему резонатору. При заданных значениях максимального приращения энергии в одном ускоряющем резонаторе  $\Delta W = 1$  МэВ и среднего ускоряемого тока  $I = 0,36$  А получим рабочие значения коэффициентов связи:  $\beta_1 = 1$  и  $\beta_2 \approx 3,9$ .

Для ускорителя-охлаждителя необходимо выполнение еще одного условия – плавная регулировка энергии электронного пучка в пределах 0,8–8 МэВ. При этом амплитуды отраженных волн от обоих резонаторов также должны быть равны нулю, т.е. чтобы

мощности питающих генераторов расходовались только на возмещение тепловых потерь в стенках резонаторов. Можно показать, что это можно сделать только при жесткой связи между резонаторами, т. е. когда  $\varphi = \pi$ . В этом случае на резонансной частоте, при выбранных значениях коэффициентов связи  $\beta_1 = 1$  и  $\beta_2 = 3,9$ , независимо от амплитуды питающего напряжения и амплитуды нагружающего тока (но при условии  $\tilde{A}_2 = -A_1$  и  $\tilde{I} = I$ ), первый резонатор всегда будет ускорять пучок до энергии  $\Delta W = e|A_1|$ , а второй будет снижать его энергию ровно на такую же величину. Изменение либо мощности генератора, либо нагружающего тока ведет лишь к образованию стоячей волны в соединяющем волноводе. Для сравнения на рис. 2 показаны зависимости приращения энергии в резонаторах от амплитуды падающей волны для электрической длины связующего волновода  $\varphi$ , равной  $\pi$  и  $\pi/2$ . На рис. 2, а, б сплошная линия относится к ускоряющему резонатору, штриховая — к тормозящему. При этом при работе с  $\varphi = \pi$  коэффициенты отражения от обоих резонаторов равны нулю для любых значений амплитуды падающей волны  $A_1$ . В то время как при электрической длине связующего волновода  $\pi/2$  коэффициенты отражения равны нулю только в одной точке — при  $A_1 = 1$  МВ.

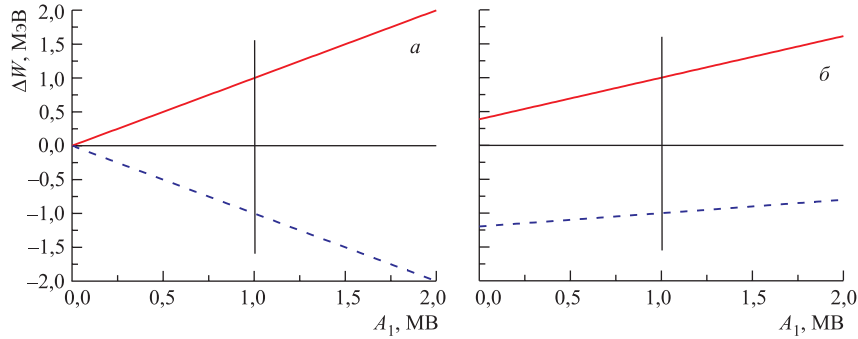


Рис. 2. Зависимость приращения энергии в резонаторах от амплитуды падающей волны: а)  $\varphi = \pi$ ; б)  $\varphi = \pi/2$

Если резонаторы имеют различные собственные частоты ( $\tilde{\omega}_0 \neq \omega_0$ ), или питающие генераторы имеют разные частоты ( $\tilde{\omega} \neq \omega$ ), или амплитуды падающих волн отличаются от оптимальных, или пучки имеют разные токи, то необходимо пользоваться полными уравнениями (5). Для выбранного случая  $\varphi = \pi$ ,  $\tilde{\beta}_2 = \beta_1$  и  $\tilde{\beta}_1 = \beta_2$  решение можно записать в виде

$$V = \frac{\beta_1[(A_1 - \tilde{A}_2) - (R_{\text{sh}}/2)(I - \tilde{I})]}{(1 + \beta_1) - j\frac{\varepsilon + \tilde{\varepsilon}}{2}(1 + \beta_1 + \beta_2)}, \quad \tilde{V} = -V. \quad (7)$$

Нормированные амплитуды напряжений отраженных волн находятся из (3), а приращение энергии — из (6). Используя эти уравнения, можно для рассматриваемой системы вычислить все интересующие параметры такого ускорителя-рекуператора. В том числе и допуски на величины входящих в (7) параметров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реализации режима ускорения и рекуперации энергии электронного пучка предложено использовать систему из двух одинаковых связанных резонаторов, запитываемых отдельно от двух генераторов. Резонаторы соединены между собой отрезком линии связи электрической длины  $\varphi = \pi$ . При таком выборе напряжения на резонаторах зависят только от мощности, подводимой к резонаторам, и всегда противофазны (режим жесткой связи). Энергия, отбираемая у тормозящегося пучка в одном резонаторе, полностью идет на ускорение пучка во втором резонаторе (без учета потерь в соединяющем резонаторы волноводе). Вариация энергии ускоряемых (тормозимых) электронов может производиться изменением мощности, подводимой к резонаторам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов В. С. и др. ВЧ-система разрезного микротрона-рекуператора для мощного лазера на свободных электронах // ВАНТ. Сер. 38, Ядерно-физ. исслед. Харьков, 2001. № 3. С. 89–91.
2. *Frontiers of Accelerator Technology* // Proc. of the Joint US–CERN–Japan Intern. School, Sept. 9–18, 1996. World Scientific, 1996.