

НАГРУЗОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СВЯЗЬЮ

*Ю. Д. Черноусов*¹

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН,
Новосибирск, Россия

Приведены нагрузочные характеристики ускоряющих структур стоячей волны с последовательной и параллельной связью. Структура с последовательной связью состоит из набора ускоряющих резонаторов и резонаторов связи, последовательно возбуждаемых друг от друга. Структура с параллельной связью содержит ускоряющие резонаторы, возбуждаемые параллельно из общего высокодобротного проходного резонатора. Получены соотношения, определяющие режимы работы структур, значение КПД в режиме критической связи. Выявлены характерные особенности и отличия зависимости коэффициента входной связи от токовой нагрузки у структур разного типа.

The load characteristics of series- and parallel-coupled standing-waves accelerating structures are presented. The structure with the series coupling consists of a set of accelerating cavities and coupling resonators, sequentially excited by each other. The structure with the parallel coupling contains the accelerating resonators, excited in parallel by a common high-Q transmission-type resonator. The relations are obtained to determine the operating modes of the structures and the efficiency value in the regime of critical coupling. The characteristic features and differences of the dependence of input coupling coefficient on current loads in structures of various types have been revealed.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

Связанные резонаторы применяются в технике сверхвысоких частот (СВЧ) и ускорительной технике. Широко распространены ускоряющие структуры стоячей волны, содержащие последовательно расположенные связанные ускоряющие резонаторы и резонаторы связи. Такие структуры (с последовательной связью) представимы в виде одиночного резонатора, связанного с подводящей линией, и хорошо исследованы [1, 2]. В последнее время детально изучается система из двух связанных резонаторов [3, 4], поскольку она представляет модель ускоряющей структуры с параллельной связью (СПС) — быстро развивающегося направления в ускорительной технике [5–10]. Важными характеристиками ускоряющих структур являются коэффициент связи с подводящей линией и КПД преобразования мощности СВЧ-генератора в мощность ускоряемого пучка. В предлагаемой работе рассмотрены эти характеристики ускоряющих структур, коэффициент связи —

¹E-mail: chern@catalysis.ru

в общем случае, а КПД — для случая «критической» связи. Для ускорителей коэффициент связи стремятся сделать таким, чтобы в режиме с пучком достигалась «критическая» связь ускоряющей структуры с подводящей линией, вся СВЧ-мощность вводилась в структуру и использовалась для ускорения пучка. Обычные ускоряющие структуры стоячей волны, как и одиночный ускоряющий резонатор, настраивают без пучка на режим «пересвязи», и тогда с пучком достигается критическая связь с подводящей линией. СПС представима в виде системы из двух связанных резонаторов, и такую структуру, как показано ниже, необходимо настраивать в режим «недосвязи», и тогда с пучком достигается критическая связь с линией.

1. УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СВЯЗЬЮ

Вначале рассмотрим более простой случай обычной ускоряющей структуры стоячей волны — с последовательной связью, представимой в виде одиночного ускоряющего резонатора, возбуждаемого от СВЧ-генератора и нагруженного пучком электронов. В стационарном режиме СВЧ-мощность генератора (P) частично отражается от резонатора, частично рассеивается в стенках (P_W) и при наличии ускоряемого пучка частично расходуется на его ускорение (P_B), так что в резонатор проходит СВЧ-мощность [11]:

$$P_W + P_B = 4P\beta_B/(1 + \beta_B)^2, \quad (1)$$

а коэффициент связи нагруженного пучком ускоряющего резонатора с линией β_B определяется из соотношения

$$\beta_B = \frac{P_{\text{ext}}}{P_W + P_B} = \frac{P_{\text{ext}}}{P_W} \left/ \left(1 + \frac{P_B}{P_W} \right) \right. = \frac{\beta}{1 + \chi}. \quad (2)$$

Здесь P_{ext} — мощность, излучаемая из резонатора при выключенном генераторе; β — коэффициент связи ускоряющего резонатора с подводимым волноводом без пучка; $\chi = P_B/P_W$ — нагрузочный коэффициент, отношение мощности, затрачиваемой на ускорение пучка, к потерям в стенках резонатора. Из (2) видно, что всегда $\beta_B < \beta$ — включение пучка (дополнительных потерь) уменьшает связь. Поэтому, если необходимо добиться режима критической связи при включенном пучке, без пучка структуру нужно настраивать в режим недосвязи. Величина мощности, проходящей в резонатор ($P_B + P_W$) в соответствии с (1), максимальна при $\beta_B = 1$, что при заданном χ с учетом (2) дает $\beta = 1 + \chi$. В этом случае коэффициент преобразования мощности генератора в мощность пучка (КПД)

$$\eta = \frac{P_B}{P} = \frac{\chi}{1 + \chi}, \quad (3)$$

и при критической связи (с пучком) выражение для зависимости входного коэффициента связи (без пучка) от желаемого КПД с учетом (2), (3) имеет вид

$$\beta = \frac{1}{1 - \eta}. \quad (4)$$

Значение коэффициентов χ, η задается при проектировании структуры. Например, при $\chi = 1, \eta = 0,5$ из (4) получаем $\beta = 2$, т. е. ускоряющий резонатор в «холодном» режиме

(без пучка) должен быть настроен на «пересвязь» с подводящей линией, в конкретном случае с коэффициентом связи 2. Тогда, если в режиме с пучком ускоряющий резонатор «критически» связан с подводящей линией, коэффициент преобразования мощности генератора в пучок составит 50 %.

2. СТРУКТУРА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СВЯЗЬЮ

Рассмотрим систему, состоящую из двух связанных резонаторов, первого — возбуждающего, в который вводится СВЧ-мощность от генератора, и второго — ускоряющего, в который вводится ускоряемый пучок. Такая схема представлена в работе [10], а здесь более подробно рассмотрим характер связи системы с подводящей линией при нагрузке пучком. Первый резонатор (индекс 0) связан с возбуждающим генератором и вторым резонатором (индекс 1), второй — только с первым резонатором. Коэффициент связи резонатора с подводящей линией равен отношению внешних потерь к внутренним [11], и в нашем случае входной коэффициент связи β первого резонатора при подключенном втором резонаторе определяется выражением

$$\beta = \frac{P_{\text{ext}}}{P_{W0} + P_{01}} = \frac{P_{\text{ext}}}{P_{W0}} \left/ \left(1 + \frac{P_{01}}{P_{W0}} \right) \right. = \frac{\beta_0}{1 + \gamma}. \quad (5)$$

Здесь P_{ext} — СВЧ-мощность, излучаемая из первого резонатора в подводящую линию при выключенном генераторе; $P_{W0} + P_{01}$ — суммарные потери в первом резонаторе; P_{W0} — мощность потерь в стенках первого резонатора; $P_{01} = P_{W1} + P_B$ — мощность, переходящая из первого резонатора во второй; P_{W1} — мощность потерь в стенках второго резонатора; P_B — мощность, затрачиваемая на ускорение пучка; $\beta_0 = P_{\text{ext}}/P_{W0}$ — коэффициент связи первого резонатора с подводящей линией при отключенном втором резонаторе; $\gamma = P_{01}/P_{W0}$ — отношение потерь во втором резонаторе к потерям в стенках первого резонатора. Соотношения (5), (2) подобны, в (5) роль нагрузочного коэффициента играет γ .

Потери во втором резонаторе в общем случае могут быть обусловлены потерями в его стенках, потерями на ускоряемый пучок и потерями на излучение при наличии дополнительных связей. Наиболее просто отношение потерь определяется при критической связи. При $\beta = 1$ из (5) находим $\gamma = \gamma_{\text{cr}} = \beta_0 - 1$.

Если пучок не включен, то в (5) $\beta = \beta_{0+1}$ — коэффициент связи системы из двух резонаторов с подводящей линией без пучка, $P_{01} = P_{W1}$, $\gamma = \gamma_0 = P_{W1}/P_{W0}$ также без пучка, и из (5) определяем $\gamma_0 = (\beta_0/\beta_{0+1}) - 1$. В этом случае коэффициент $\gamma = \gamma_0$ равен отношению потерь в стенках соседних резонаторов и может быть определен путем измерения коэффициентов связи при отключенном и подключенном втором резонаторе.

При критической связи ($\beta = 1$), $P = P_{01} + P_{W0}$, из (5) получаем $P_{01}/P = (\beta_0 - 1)/\beta_0$. Кроме того, $P_{01} = P_{W1} + P_B = P_B(1 + P_{W1}/P_B) = P_B(1 + \chi)/\chi$. Здесь $\chi = P_B/P_{W1}$ — нагрузочный коэффициент, отношение мощности на ускорение пучка к потерям в стенках второго резонатора. Отсюда при критической связи получаем выражение зависимости КПД η от нагрузочного коэффициента χ :

$$\eta = \frac{P_B}{P} = \frac{(\beta_0 - 1)}{\beta_0} \frac{\chi}{(1 + \chi)}. \quad (6)$$

Для выяснения характера связи СПС с подводящей линией в общем случае воспользуемся выражением для коэффициента отражения G_L системы из двух связанных резонаторов на резонансной частоте [4]:

$$G_L = -1 + \frac{2\beta_0}{1 + \beta_0} \frac{1}{1 + \beta_L}, \quad \beta_L = Q_{L0} Q_{L1} k_C^2, \quad (7)$$

где $Q_{L0} = Q_{00}/(1 + \beta_0)$ — нагруженная добротность первого резонатора; Q_{00} — его собственная добротность; Q_{L1} — нагруженная добротность второго резонатора; k_C — коэффициент межрезонаторной связи. Коэффициент k_C не зависит от добротности резонаторов, определяется геометрией системы, и его вычисленное значение для частного случая резонаторов прямоугольной формы приведено в [4]. Величина Q_{L1} в общем случае определяется всеми связями резонатора, потерями в стенках (P_{W1}) и потерями на ускоряемый пучок (P_B). При наличии пучка и слабых связях $Q_{L1} = \omega W_1 / (P_{W1} + P_B) = Q_{01} / (1 + \chi)$. Здесь ω — рабочая частота, W_1 — запасенная энергия во втором резонаторе, Q_{01} — собственная добротность второго резонатора, $\chi = P_B / P_{W1}$ — нагрузочный коэффициент. С учетом введенных обозначений из соотношений (5), (7) и из соотношения для коэффициента отражения системы $G_L = (\beta - 1) / (\beta + 1)$ можно выразить коэффициент связи β системы с подводящей линией при включенном пучке:

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + Q_{00} Q_{01} k_C^2 / (1 + \chi)}. \quad (8)$$

Если пучок не включен, $\chi = 0$, то из (8) получаем входной коэффициент связи $\beta = \beta_{0+1}$ при подключенных первом и втором резонаторах:

$$\beta_{0+1} = \frac{\beta_0}{1 + Q_{00} Q_{01} k_C^2}. \quad (9)$$

Из этого соотношения находим $Q_{00} Q_{01} k_C^2 = (\beta_0 / \beta_{0+1}) - 1 = \gamma_0$. Из этой формулы по известным значениям Q_{00} , Q_{01} , β_0 , β_{0+1} можно определить коэффициент k_C . Подстановка этого выражения в (8) для системы с пучком ($\beta = \beta_B$) дает соотношение коэффициентов

$$\beta_B = \beta_{0+1} \frac{1 + \chi}{1 + \chi(\beta_{0+1} / \beta_0)}. \quad (10)$$

Здесь, как и выше, β_{0+1} — коэффициент входной связи системы при выключенном пучке; β_0 — коэффициент входной связи при отключенном втором резонаторе. Оба эти коэффициента считаются известными и могут быть измерены при настройке системы, выбираются при проектировании структуры и оперативно изменены быть не могут.

Переписывая (5) в виде $\gamma = (\beta_0 / \beta) - 1$, полагая $\beta = \beta_B$, подставляя соотношение (10) и используя выражение $\gamma_0 = (\beta_0 / \beta_{0+1}) - 1$, можно найти для $\gamma = \gamma_B$: $\gamma = \gamma_B = \gamma_0 / (1 + \chi)$ — в СПС с повышением нагрузочного коэффициента χ отношение потерь во втором резонаторе к потерям в стенках первого резонатора уменьшается.

Соотношение (10) определяет связь коэффициентов β_B и χ при заданных β_{0+1} и β_0 . Поскольку, как видно из (9), всегда $\beta_{0+1} < \beta_0$, из (10) следует $\beta_B > \beta_{0+1}$, т. е. при включении пучка — возникновении дополнительных потерь во втором резонаторе системы связанных резонаторов — коэффициент связи ускоряющей структуры с подводящей линией возрастает. Поэтому, если необходимо добиться режима критической связи при включенном пучке, СПС без пучка нужно настраивать в режим недосвязи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные соотношения представляют нагрузочные характеристики ускоряющих структур с последовательной и параллельной связью — коэффициент связи с подводящей линией и КПД преобразования мощности СВЧ-генератора в мощность ускоряемого пучка.

В соответствии с соотношениями разд. 1 обычная ускоряющая структура стоячей волны (с последовательной связью без пучка) настраивается в режим «пересвязи». При вводе пучка ускоряющий резонатор нагружается, его добротность уменьшается, соответственно, уменьшается связь и при некотором токе пучка достигается режим критической связи.

Из соотношений разд. 2 следует, что СПС без пучка настраивается в режим «недо-связи». При вводе пучка ускоряющий резонатор нагружается, его добротность падает, связь между ускоряющим и возбуждающим резонаторами уменьшается, возбуждающий резонатор подгружается меньше, его добротность и, соответственно, связь с подводящей линией растет, и при некотором токе пучка достигается режим критической связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зверев Б. В., Собенин Н. П.* Электродинамические характеристики ускоряющих резонаторов. М.: Энергоатомиздат, 1993. 240 с.
2. *Wangler Th. P.* RF Linear Accelerators. WILEY-VCH. 2008.
3. *Иванников В. И., Черноусов Ю. Д., Шеболаев И. В.* // РЭ. 2000. Т. 45, вып. 2. С. 180.
4. *Черноусов Ю. Д., Иванников В. И., Шеболаев И. В. и др.* // РЭ. 2010. Т. 55, вып. 8. С. 923.
5. *Sundelin R. M., Kirchgessner J. L., Tiger M.* // Trans. Nucl. Sci. 1977. V. 24, No. 3. P. 1686.
6. *Иванников В. И., Черноусов Ю. Д., Шеболаев И. В.* // ЖТФ. 1986. Т. 56, вып. 12. С. 2407.
7. *Brezhnev O. N., Logatchev P. V., Pavlov V. M. et al.* // Proc. of LINAC. 2002. P. 213.
8. *Neilson J., Tantawi S., Dolgashev V.* // Proc. of LINAC. 2010. P. 235.
9. *Chernousov Yu. D., Shebolaev I. V., Ikrjanov I. M.* // Proc. of RuPAC. 2016. P. 222.
10. *Черноусов Ю. Д.* // РЭ. 2018. Т. 63, № 4. С. 379–383.
11. *Милованов О. С., Собенин Н. П.* Техника сверхвысоких частот. М.: Атомиздат, 1980.