

АНАЛИЗ ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ ОТ ГЕНЕРАТОРА В ПУЧОК ДЛЯ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР РАЗНЫХ ТИПОВ

Е. В. Дронова^{a,1}, А. Е. Левичев^{a,б}, А. В. Андрианов^{a,б}

^a Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Предложен анализ различных ускоряющих структур относительно их максимального тока и шунтового сопротивления в зависимости от эффективности структуры. Определено, что оптимальным типом структуры с точки зрения передачи СВЧ-мощности в пучок является структура на основе стоячей волны с последовательной связью.

An analysis of various accelerating structures in relation to their maximum current and shunt resistance, depending on the efficiency of the structure, is proposed. It has been determined that the most optimal type of structure from the point of view of microwave power transfer to the beam is a structure based on a standing wave with series communication.

PACS: 29.20.-c; 29.17.+w

ВВЕДЕНИЕ

В качестве ускоряющих структур для ускорителей можно использовать структуры на бегущей волне с постоянным импедансом [1] или градиентом [2], структуры на стоячей волне с последовательной связью [3] или структуру на стоячей волне с параллельной связью [4, 5]. Стоит упомянуть, что существуют так называемые гибридные структуры [6], когда для группировки пучка используются начальные резонаторы, работающие в режиме стоячей волны, а основное ускорение осуществляется в структуре с бегущей волной. Поскольку здесь первые ячейки служат только для группировки пучка, то такие структуры можно отнести к первому типу — структурам с бегущей волной. Каждая из перечисленных структур имеет свои характерные особенности, и выбор использования той или иной структуры ускорителя определяется многими факторами. В данной работе приводится анализ одного из таких факторов — КПД передачи СВЧ-мощности в пучок. Как правило, именно этот параметр может стоять на первом месте при проектировании линейного ускорителя, особенно если речь идет

¹ekaterinadrono@gmail.com

о промышленных ускорителях. Данный анализ проводится в общем виде без конкретных приложений ускорителей, мощностных и энергетических параметров пучка. На его основе можно сравнить разные типы ускоряющих структур и определить наиболее подходящую с точки зрения передачи мощности от генератора в пучок и значения шунтового сопротивления.

РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ НАГРУЗКИ ТОКОМ ПУЧКА

При учете тока нагрузки пучка энергию, которую набирает пучок, для любой ускоряющей структуры можно представить в общем виде:

$$U = U_0 \left(1 - \frac{I}{I_c} \right). \quad (1)$$

Здесь U_0 — энергия пучка [эВ] без учета его тока; I — средний ток пучка за импульс тока; I_c — критический ток, при котором результирующая энергия пучка будет равна нулю. Значения U_0 и I_c для каждого типа ускоряющей структуры свои.

Коэффициент полезного действия (КПД) передачи мощности от генератора в ускоряющую структуру в общем виде будет иметь вид

$$\eta = \frac{UI}{P_0}, \quad (2)$$

где P_0 — мощность генератора. Ток пучка, при котором будет максимальное значение КПД, можно получить, приравнявая производную $\partial\eta/\partial I = 0$, откуда имеем оптимальный ток пучка I_m :

$$I_m = \frac{I_c}{2}. \quad (3)$$

Для любой ускоряющей структуры максимальное значение КПД передачи мощности от генератора в пучок будет при значении тока пучка, равном половине критического тока. Энергия, которую приобретет такой пучок, равна половине энергии без учета нагрузки током ускоряющего поля

$$U_m = \frac{U_0}{2}. \quad (4)$$

Таким образом, зная критический ток ускоряющей структуры и энергию, которую пучок может приобрести при нулевом токе, можно определить максимальное значение КПД передачи мощности от генератора в пучок для каждого типа структур. Стоит отметить, что, как правило, для ускорителей энергия пучка и мощность генератора являются величинами заданными. При этом величина, которая не участвует в явном виде в выражениях (1)–(4), — эффективное шунтовое сопротивление ускоряющей структуры, нормированное на длину R_{shn} [Ом/м] [7, 8]. Данная величина характеризуется электромагнитными и геометрическими свойствами ускоряющей структуры. Чем шунтовое сопротивление выше, тем тяжелее может быть структура в реализации из-за увеличения сложности геометрии. Другими словами, шунтовое

сопротивление может быть также критерием эффективности структуры, как и передача мощности в пучок. Чем больше КПД при меньшем уровне шунтового сопротивления, тем выгодней ускоряющая структура может быть для изготовления. Таким образом, эффективное шунтовое сопротивление будем считать одним из параметров, который должен подвергаться анализу. Далее рассмотрим отдельно каждый из видов ускоряющих структур.

Структура на основе бегущей волны с постоянным импедансом. Рассмотрим ускоряющую структуру на бегущей волне с постоянным импедансом (CZ-структуру). Пусть фазовая скорость будет задана равной скорости света. Коэффициент затухания по полю α [1/м] и групповая скорость $v_{гр}$, определяемая длиной и временем заполнения структуры, постоянны. Геометрия ячеек одинакова [1].

Решением для набираемой энергии пучком в общем виде будет выражение (1), для которого энергия пучка без учета его тока $U_0 = U_{CG0}$ [9]

$$U_{CZ0} = \sqrt{2P_0 R_{CZ} L} \frac{1 - \exp(-\tau)}{\sqrt{\tau}}, \quad (5)$$

критический ток

$$I_{CZc} = \sqrt{\frac{2P_0 \tau}{R_{CZ} L}} \frac{1 - e^{-\tau}}{\tau - 1 + e^{-\tau}}. \quad (6)$$

Здесь приняты следующие обозначения: $\tau = \int_0^L \alpha(z) dz = \alpha \cdot L$ — постоянная затухания; P_0 — мощность генератора; L — длина структуры; R_{CZ} [Ом/м] — эффективное шунтовое сопротивление. С учетом выражений (4), (5) и (6) получим оптимальный ток и шунтовое сопротивление, умноженное на длину структуры, через мощность генератора P_0 и энергию пучка U_m :

$$I_{CZm} = \frac{P_0}{2U_m} \frac{(1 - e^{-\tau})^2}{\tau - 1 + e^{-\tau}}, \quad (7)$$

$$R_{CZ} L = \frac{2U_m^2}{P_0} \frac{\tau}{(1 - e^{-\tau})^2}. \quad (8)$$

Максимальное КПД при оптимальном токе (3) в этом случае будет иметь вид

$$\eta_{CZm} = \frac{1}{2} \frac{(1 - e^{-\tau})^2}{\tau - 1 + e^{-\tau}}. \quad (9)$$

Структура на основе бегущей волны с постоянным градиентом. Теперь рассмотрим ускоряющую структуру на бегущей волне с постоянным градиентом (CG-структуру) с фазовой скоростью, равной скорости света. Теперь коэффициент затухания по полю α [1/м] и групповая скорость $v_{гр}$ непостоянны, а величина ускоряющего поля, наоборот, — постоянная величина вдоль ускоряющей структуры [2].

Как и прежде, решением для набираемой энергии пучком в общем виде будет выражение (1), но теперь $U_0 = U_{CG0}$ примет вид [10]

$$U_{CZ0} = \sqrt{2P_0 R_{CG} L} \sqrt{\frac{1 - e^{-2\tau}}{2}}, \quad (10)$$

критический ток выразится как

$$I_{CGc} = 2\sqrt{\frac{P_0}{R_{CG}L}} \frac{(1 - e^{-2\tau})^{3/2}}{1 - e^{-2\tau} - \tau e^{-2\tau}}. \quad (11)$$

Здесь, как и ранее, $\tau = \int_0^L \alpha(z) dz$ — постоянная затухания; R_{CG} [Ом/м] — эффективное шунтовое сопротивление. Принимая во внимание (4), (8) и (9), имеем

$$I_{CGm} = \frac{P_0}{2U_m} \frac{(1 - e^{-2\tau})^2}{1 - e^{-2\tau} - 2\tau e^{-2\tau}}, \quad (12)$$

$$R_{CG}L = \frac{4U_m^2}{P_0} \frac{1}{1 - e^{-2\tau}}, \quad (13)$$

где I_{CGm} — ток, соответствующий максимальному КПД передачи мощности генератора в пучок. Само максимальное КПД имеет вид

$$\eta_{CGm} = \frac{1}{2} \frac{(1 - e^{-2\tau})^2}{1 - e^{-2\tau} - 2\tau e^{-2\tau}}. \quad (14)$$

Структура на основе стоячей волны с последовательной связью. В структурах на стоячей волне (SW-структурах) характерна величина связи с внешним волноводом $\beta = P_{ex}/P_{loss}$ — отношение излученной мощности из структуры P_{ex} к мощности потерь в стенках резонаторов ускоряющей структуры P_{loss} . В остальном, как и для структур на бегущей волне, справедливы выражения (1)–(4). С учетом этого можно записать [11]:

$$U_{SW0} = 2\sqrt{P_0 R_{SW}L} \frac{\beta}{(1 + \beta)^2}, \quad (15)$$

$$I_{SWc} = \sqrt{\frac{4\beta P_0}{R_{SW}L}}, \quad (16)$$

$$I_{SWm} = \frac{P_0}{U_m} \frac{\beta}{1 + \beta}, \quad (17)$$

$$R_{SW}L = \frac{U_m^2}{P_0} \frac{(1 + \beta)^2}{\beta}, \quad (18)$$

$$\eta_{SWm} = \frac{\beta}{1 + \beta}. \quad (19)$$

Здесь R_{SW} [Ом/м] — также эффективное шунтовое сопротивление ускоряющей структуры на стоячей волне с последовательной связью; U_{SW0} — энергия пучка при нулевом токе; I_{SWc} — критический ток структуры; I_{SWm} — оптимальный ток пучка, соответствующий максимальному КПД передачи мощности генератора в пучок η_{SWm} .

Структура на основе стоячей волны с параллельной связью. Последней для анализа является ускоряющая структура на основе стоячей волны с параллельной связью (PCS). В ней передача СВЧ-мощности от генератора происходит сначала в возбуждающий резонатор, от которого параллельным образом питаются ускоряющие резонаторы [12–14]. Для такой структуры необходимо ввести дополнительные обозначения:

- $\beta = P_{\text{ex1}}/P_{\text{loss1}}$ — коэффициент связи, определяющийся отношением излученной мощности из возбуждающего резонатора в волноводный тракт к мощности потерь в этом резонаторе;

- $\beta_c = P_{12}/P_{\text{loss1}}$ — коэффициент связи между возбуждающим и возбуждаемыми резонаторами, P_{12} — мощность, поступающая из возбуждающего резонатора в ускоряющие.

Из работы [15], с учетом обозначения эффективного шунтового сопротивления R_{PCS} [Ом/м], можно записать:

$$U_{\text{PCS0}} = \sqrt{4P_0 R_{\text{PCS}} L \frac{\beta \cdot \beta_c}{1 + \beta_1 + \beta_c}}, \quad (20)$$

$$I_{\text{PCS}} = \sqrt{\frac{4P_0}{R_{\text{PCS}} L} \frac{\beta \cdot \beta_c}{(1 + \beta)^2}}, \quad (21)$$

$$I_{\text{PCS}m} = \frac{P_0}{U_m} \frac{\beta \cdot \beta_c}{(1 + \beta)(1 + \beta + \beta_c)}, \quad (22)$$

$$R_{\text{PCS}} L = \frac{U_m^2}{P_0} \frac{(1 + \beta + \beta_c)^2}{\beta \beta_c}, \quad (23)$$

$$\eta_m = \frac{\beta \cdot \beta_c}{(1 + \beta)(1 + \beta + \beta_c)}, \quad (24)$$

где U_{PCS0} — энергия пучка при нулевом токе; $I_{\text{PCS}c}$ — критический ток структуры; $I_{\text{PCS}m}$ — оптимальный ток пучка, соответствующий максимальному КПД передачи мощности генератора в пучок $\eta_{\text{PCS}m}$.

СРАВНЕНИЕ СТРУКТУР

Введем обозначения $I_n = P_0/U_m$ и $R_{\text{shn}} = U_m^2/P_0$, на которые нормируем соответствующие ток и шунтовое сопротивление. Обратим внимание, что максимальные значения КПД передачи мощности от генератора в пучок не зависят ни от мощности генератора, ни от энергии пучка. Будем анализировать нормированные токи пучка (7), (12), (17), (22) и шунтовые сопротивления (8), (13), (18), (23) в зависимости от КПД передачи мощности генератора в пучок (9), (14), (19), (24). При этом каждый из перечисленных параметров зависит, в свою очередь, от величины, которая характеризует вид ускоряющей структуры: для ускоряющих структур на бегущей волне —

постоянная затухания $\tau \in (0,054; 1)$, для структур на стоячей волне — коэффициент связи с внешним волноводом $\beta \in (1; 15)$. Для ускоряющих структур на бегущей волне выбор диапазона постоянной затухания связан с тем, что при малых значениях резко возрастает необходимое эффективное шунтовое сопротивление структуры, а большие значения приводят к значительному ее удлинению. Для стоячей волны диапазон коэффициента связи, с одной стороны, определяется критической связью, с другой — величиной связи, которая является достаточно большой, но еще измеряемой с достаточной точностью современными приборами.

Для ускоряющей структуры с параллельной связью для построения графиков необходимо задаться еще одним дополнительным параметром β_c . Данная структура состоит из двух видов резонаторов: возбуждающего резонатора и ускоряющих резонаторов. Таким образом появляются два вида связи: связь возбуждающего резонатора с внешним волноводом и связь между возбуждающим и ускоряющими резонаторами. За первый вид связи отвечает параметр β , за второй — β_c . Наиболее реалистичным представляется случай, когда в ускоряющие резонаторы из возбуждающего поступает не менее 80% мощности, что соответствует $\beta_c = 5$ [14, 16].

В итоге на рис. 1 получаем графики нормированных токов и шунтовых сопротивлений для всех видов ускоряющих структур. Из графиков видно, что наименьшим КПД обладает ускоряющая структура с параллельной связью. Данную структуру стоит рассмотреть отдельно.

Для КПД ускоряющей структуры с параллельной связью согласно выражению (24) имеется максимум в зависимости от коэффициента связи β , который определяется как

$$\beta_{me} = \sqrt{1 + \beta_c}. \tag{25}$$

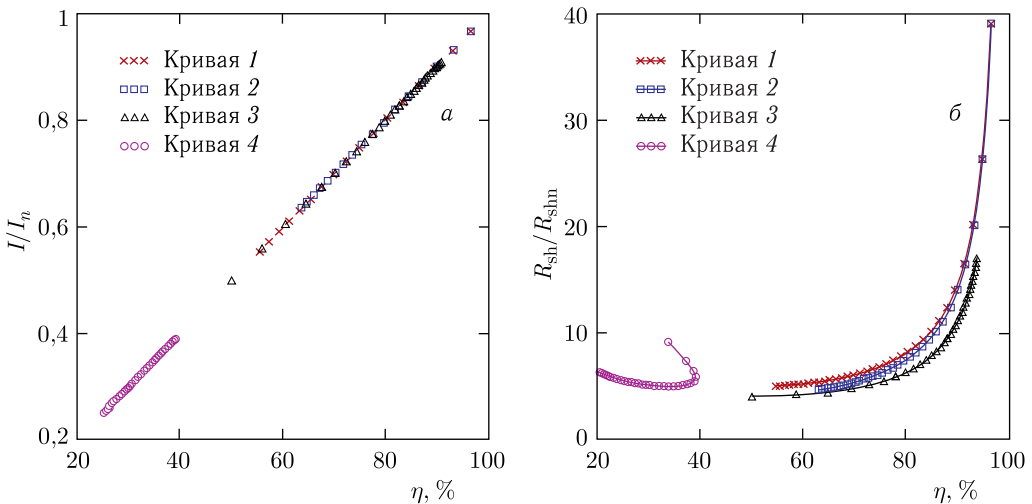


Рис. 1. Зависимость тока пучка (а) и эффективного шунтового сопротивления (б) от КПД передачи мощности генератора в пучок соответственно: 1 — структура на бегущей волне с постоянным импедансом; 2 — структура на бегущей волне с постоянным градиентом; 3 — структура на стоячей волне с последовательной связью; 4 — структура на стоячей волне с параллельной связью

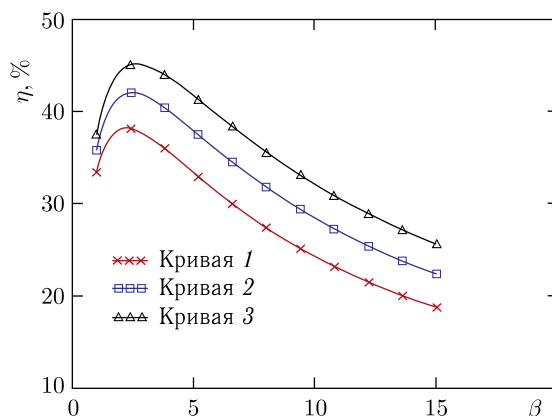


Рис. 2. Зависимость КПД ускоряющей структуры с параллельной связью для разных коэффициентов связи возбуждающего резонатора с внешним волноводом: 1 — $\beta_c = 4$; 2 — $\beta_c = 5$; 3 — $\beta_c = 6$

При дальнейшем увеличении коэффициента связи $\beta > \beta_{me}$ КПД структуры с параллельной связью будет уменьшаться несмотря на рост шунтового сопротивления.

Не вдаваясь в глубокий анализ, данный эффект можно объяснить следующим образом. Для структуры с параллельной связью за передачу мощности в пучок отвечает не один вид связи, а два: возбуждающего резонатора с внешним волноводом и между возбуждающим и ускоряющими резонаторами. Если увеличивать только один вид связи (возбуждающего резонатора с внешним волноводом β), то в какой-то момент связи между резонаторами будет не хватать для необходимой передачи мощности генератора в пучок. Это хорошо видно из рис. 2. При увеличении связи между возбуждающим и ускоряющими резонаторами максимальный КПД передачи мощности генератора в пучок увеличивается. То есть здесь необходимо оперировать сразу двумя видами связи для получения больших значений КПД. Полный анализ данной структуры при работе с пучком может потребовать отдельного материала и здесь проводиться не будет, поскольку в любом случае видно, что ускоряющая структура с параллельной связью проигрывает традиционным ускоряющим структурам с точки зрения передачи мощности генератора в пучок.

Рассмотри более подробно три класса ускоряющих структур: структуры на бегущей волне с постоянным импедансом и градиентом и структуру на стоячей волне с последовательной связью. Если с точки зрения ускоряемых токов данные структуры практически одинаковы, то с точки зрения шунтового сопротивления они отличаются.

На рис. 3 показаны нормированные шунтовые сопротивления для трех классов ускоряющих структур в более подробном масштабе по сравнению с рис. 1. При приближении КПД к 100% шунтовые сопротивления для всех ускоряющих структур резко возрастают до бесконечности (см. рис. 1 и 3).

Для ускоряющих структур на бегущей волне при увеличении КПД шунтовые сопротивления практически совпадают. При КПД менее 80% шунтовое сопротивление для ускоряющей структуры с постоянным градиентом меньше структуры с постоян-

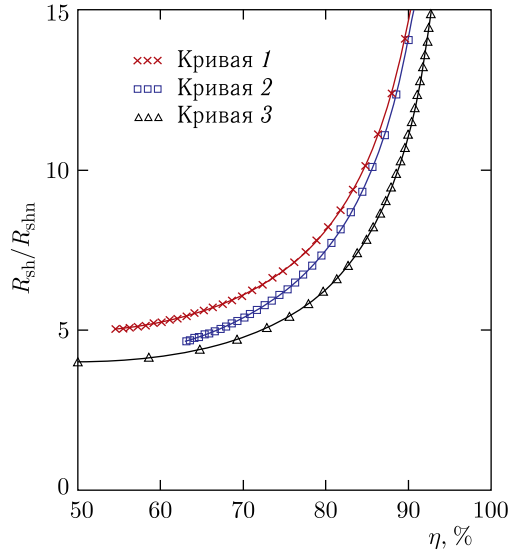


Рис. 3. Зависимость эффективного шунтового сопротивления от КПД передачи мощности генератора в пучок соответственно: 1 — структура на бегущей волне с постоянным импедансом; 2 — структура на бегущей волне с постоянным градиентом; 3 — структура на стоячей волне с последовательной связью

ным импедансом. При этом в любом случае их значения остаются больше значения для структуры на стоячей волне с последовательной связью. Таким образом, можно признать, что ускоряющая структура на стоячей волне с последовательной связью является наиболее выгодной для работы с большими токами и КПД около 70–80%.

Рассмотрим отдельно ускоряющую структуру на стоячей волне с последовательной связью. На рис. 4 показаны зависимости оптимального нормированного тока (17) и максимального КПД (19) от коэффициента связи β . Видно, что при связи $\beta = 1$ достигается КПД 50%. При связи $\beta = 10$ КПД становится 90%, но для этого потребуется нормированное шунтовое сопротивление $R_{SW}L/R_{shn} = 12$. Зная входную мощность и энергию пучка, можно получить абсолютное значение шунтового сопротивления. В качестве примера можно рассмотреть энергию пучка $U_m = 5$ МэВ и

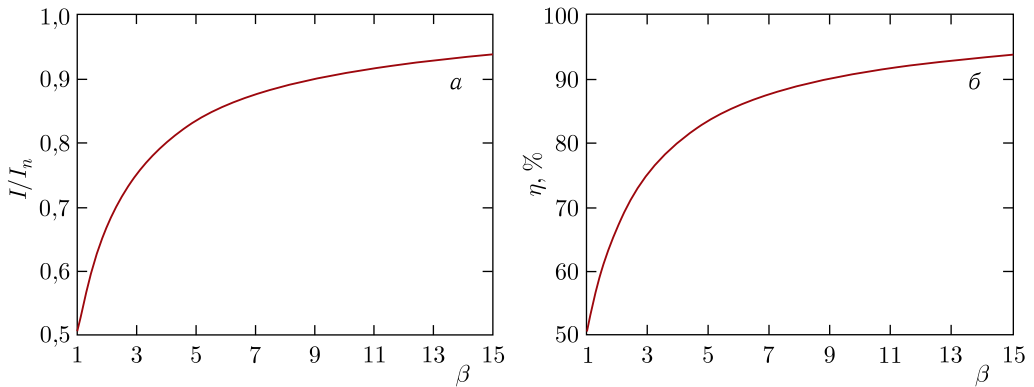


Рис. 4. Ток ускоренного пучка, соответствующий максимальному КПД (а) и КПД (б) в зависимости от коэффициента связи

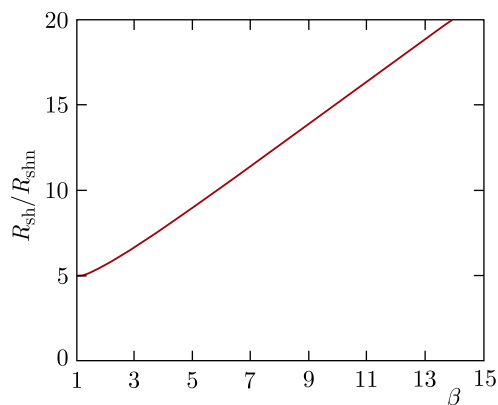


Рис. 5. Нормированное шунтовое сопротивление в зависимости от коэффициента связи

$P_0 = 5$ МВт, в этом случае $R_{SW}L = 60$ МОм. Данное значение выглядит вполне реализуемым.

Ключевую роль для ускоряющих структур на стоячей волне играет время переходного процесса, которое можно оценить через постоянную нагруженного времени

$$\tau_L = \frac{2Q_0}{\omega_0(1 + \beta)}. \quad (26)$$

Здесь Q_0 — собственная добротность структуры; $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 — рабочая частота. Можно считать, что переходной процесс заканчивается за время $3\tau_L$. Очевидно, что чем больше коэффициент связи, тем меньше постоянная нагруженного времени, а значит, быстрее заканчивается переходной процесс. Выгодно иметь короткий переходной процесс для эффективного использования всего импульса СВЧ-мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в ускорительной технике, как правило, используются 4 класса ускоряющих структур: структуры на бегущей волне с постоянным импедансом и постоянным градиентом, структуры на стоячей волне с последовательной и параллельной связью. Каждая из этих структур имеет свои особенности. С точки зрения работы с большими токами и КПД передачи мощности от генератора в пучок менее выгодной является структура на стоячей волне с параллельной связью. Это связано с наличием двух видов связи: между возбуждающим резонатором и подводющим волноводом, а также между возбуждающим и ускоряющими резонаторами.

Ускоряющие структуры на бегущей волне могут обладать очень высокими КПД, но для этого требуются практически нереализуемые значения шунтового сопротивления. В области КПД менее 80% ускоряющая структура с постоянным градиентом обладает меньшим значением шунтового сопротивления по сравнению со структурой с постоянным импедансом.

Наиболее перспективной является ускоряющая структура на стоячей волне с последовательной связью. Она обладает самым низким необходимым шунтовым сопротивлением для работы с большими токами и КПД передачи мощности от генератора в пучок около 70–90%. При высокой связи с внешним волноводом не только

повышается КПД структуры, но и уменьшается время переходного процесса, что является очень существенным и позволяет наиболее эффективно использовать весь СВЧ-импульс для ускорения тока пучка, получая большие средние значения тока. Для достижения значений КПД более 90% шунтовое сопротивление становится нереализуемым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wangler Th. P.* RF Linear Accelerators. 2nd rev. and enlarged ed. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2008. P. 72.
2. *Wangler Th. P.* Ibid. P. 74.
3. *Wangler Th. P.* Ibid. P. 83–134.
4. *Levichev A. E., Pavlov V. M., Ivannikov V. I., Shebolaev I. V., Chernousov Yu. D.* Linear Accelerator Based on Parallel Coupled Accelerating Structure // Proc. of LINAC-2012. JACoW Publ. P. 282–284.
5. *Levichev A., Nikiiforov D., Barnyakov A., Chernousov Yu., Ivannikov V., Shebolaev I.* Experience of Operation of the Electron Linear Accelerator Based on Parallel Coupled Accelerating Structure // Proc. LINAC2014, Geneva, Switzerland, 2014. P. 1144–1146.
6. *Куцаев С. В.* Исследование ускоряющих структур линейных ускорителей электронов для целей инспекции. Автореф. дис. . . . канд. техн. наук. М., 2011.
7. *Милованов О. С., Собенин Н. П.* Техника сверхвысоких частот. М.: Атомиздат, 1980. С. 148.
8. *Wangler Th. P.* RF Linear Accelerators. 2nd rev. and enlarged ed. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2008. P. 43.
9. *Левичев А. Е., Павлов В. М.* Линейные СВЧ ускорители: Учеб. пособие. Новосибирск: Ред.-изд. центр НГУ, 2015. С. 66–71.
10. Там же. С. 78–81.
11. *Ivannikov V. I., Pavlov V. M., Chernousov Yu. D., Shebolaev I. V.* // Tech. Phys. 2004. V. 49. P. 795.
12. *Andrianov A. V., Barnyakov A. M., Levichev A. E., Maltseva M. V., Nikiiforov D. A., Samoylov S. L.* Development and Low Power Test of the Parallel Coupled Accelerating Structure // J. Instrum. 2016. V. 11. P. 06007.
13. *Chernousov Yu. D., Ivannikov V. I., Shebolaev I. V., Levichev A. E., Pavlov V. M.* Bandpass Characteristics of Coupled Resonators // J. Commun. Technol. Electron. 2010. V. 55, Iss. 8. P. 863–869.
14. *Barnyakov A. M., Levichev A. E., Nikiiforov D. A.* Intercavity Coupling Constant of the Cavities // J. Commun. Technol. Electron. 2016. V. 61, No. 7. P. 783–788.
15. *Levichev A., Nikiiforov D., Barnyakov A., Chernousov Yu., Shebolaev I.* Transient Process in a Parallel Coupled Accelerating System with Regard to Beam Current Loading // Tech. Phys. 2015. V. 60, No. 1. P. 137–140.
16. *Levichev A. E., Pavlov V. M., Ivannikov V. I., Shebolaev I. V., Chernousov Yu. D.* Characteristics of the Parallel Coupled Accelerating Structure // Proc. of IPAC 2010. JACoW Publ. P. 3765–3767.