

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ЭЛЕКТРОНОВ С ПИТАНИЕМ ОТ АВТОГЕНЕРАТОРА ЧЕРЕЗ
ФЕРРИТОВЫЙ ЦИРКУЛЯТОР

© 2022 г. С. В. Мациевский^a *, В. И. Каминский^a

^aНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: MatsievskiySV@gmail.com

Поступила в редакцию 28.06.2021 г.

После доработки 09.07.2021 г.

Принята к публикации 19.07.2021 г.

В работе рассматривается схема питания гибридного ускорителя с секциями на стоячей и бегущей волнах, соединенными через ферритовый циркулятор от автогенератора. На примере ускорителя с выходной энергией пучка 10 МэВ и током 300 мА определены параметры ускоряющих секций и характеристики чувствительности к изменениям параметров ячеек. Рассмотрены вопросы стабилизации питающего автогенератора.

Ключевые слова: моделирование, гибридный ускоритель электронов, автогенератор, ферритовый циркулятор

DOI: 10.56304/S2079562922010274

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение в ускорителе на бегущей волне группирователя на стоячей волне успешно используется для улучшения спектральных характеристик ускоряемого пучка промышленных ускорителей. Ускоритель с одной группировочной ячейкой был запущен в МРТИ еще в 1984 году [1]. Позднее были предприняты попытки использовать многоячейковые секции группирователя на стоячей волне. В большинстве предложенных схем секции на стоячей волне и бегущей волне с положительной дисперсией соединены общей ячейкой ввода мощности [2–6]. Данная схема питания требует наличия ферритового циркулятора, отводящего отраженную СВЧ мощность в поглощающую нагрузку при заполнении секции на стоячей волне энергией. Стабилизация частоты секции на стоячей волне при этом производится обычными методами. Настройка относительной фазы колебаний ограничена и может производиться только за счет изменения длины соединяющей ячейки.

Другой часто рассматриваемой схемой питания является схема с секцией на бегущей волне с отрицательной дисперсией [7]. При использовании данной схемы питания с тщательно подобранными параметрами секций на стоячей и бегущей волнах можно обойтись без ферритовой развязки. Обеспечение обратной связи секции на

стоячей волне и задание требуемой относительной фазы между секциями значительно облегчается при использовании соединяющего секции волновода вместо общей ячейки, хотя это несколько увеличивает длину установки [8–10].

Возможной схемой питания, не часто встречающейся в литературе, является схема с соединенными секциями на стоячей и бегущей волнах через ферритовую развязку, рассмотренная в данной статье.

2. СХЕМА ПИТАНИЯ УСКОРИТЕЛЯ

На рис. 1 изображена схема питания гибридного ускорителя с секциями на стоячей и бегущей волнах, соединенных через ферритовый циркуля-

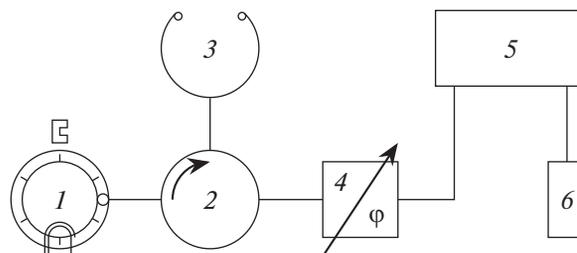


Рис. 1. Схема питания гибридного ускорителя.

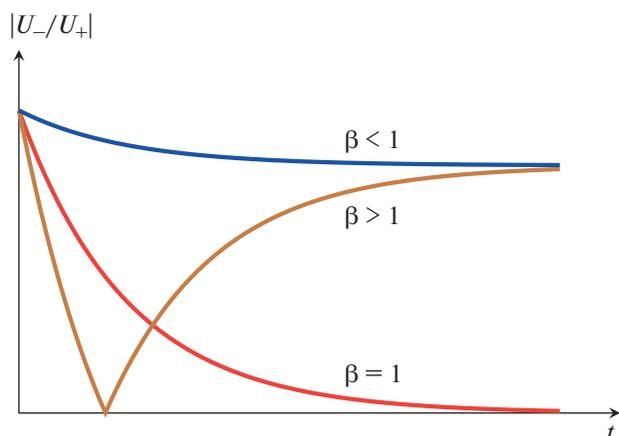


Рис. 2. Характерные зависимости отраженной от секции на стоячей волне нормированной амплитуды волны от времени при различных значениях коэффициента связи β .

тор. Начальная часть схемы питания ускорителя подобна схеме питания ускорителя на стоячей волне: СВЧ мощность от магнетрона 1 поступает в секцию на стоячей волне 3 через ферритовый циркулятор 2. Отличие данной схемы питания состоит в том, что прежде чем попасть в поглощающую нагрузку 6 СВЧ мощность проходит также через фазовращатель 4 и секцию на бегущей волне 5.

Компоновка ускоряющих секций указанным на рис. 1 относительным расположением секций наиболее удобна при использовании секции на бегущей волне с положительной дисперсией, однако преимущества ускоряющих структур с отрицательной дисперсией в темпе ускорения [11] вынуждают использовать именно их.

Как видно из характерных зависимостей отраженной от секции на стоячей волне мощности, представленных на рис. 2 [12], такая схема питания не может оперировать при критической связи резонатора с генератором с учетом ускоряемого пучка (кривая $\beta = 1$) поскольку после окончания переходного процесса в секцию на бегущей волне не будет поступать мощность. Соответственно, резонатор должен работать при определенной величине недосвязи или пересвязи. Из характера зависимости выражения постоянной времени секции на стоячей волне $\tau^{CB} = 2Q_n \omega_0^{-1}$ с учетом $\beta = Q_{вн} Q_0^{-1}$ можно заключить, что использование секции в режиме недосвязи дает некоторое преимущество в скорости заполнения резонатора мощностью, хотя они и уменьшается при увеличении тока ускоряемого пучка.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕКЦИЙ УСКОРИТЕЛЯ

Для определения параметров ускорителя первоначально требуется определить возможные соотношения длин секций на стоячей и бегущей волнах. Его можно рассчитать, зафиксировав суммарный прирост энергии в ускорителе

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_{CB} + \Delta W_{BB}, \quad (1)$$

записав баланс мощности в его секциях

$$\begin{cases} P_{\Gamma} = P_{\text{пот}}^{CB} + P_n^{CB} + P_{\text{вых}}^{CB} \\ P_{\text{вых}}^{CB} = P_{\text{пот}}^{BB} + P_n^{BB} + P_{\text{наг}}, \end{cases} \quad (2)$$

и используя упрощенные выражения расчета энергии пучка [13] в секции на стоячей волне

$$W_{CB} = \sqrt{R_{\text{ш } \text{эф}} P_{CB}} \frac{2\sqrt{\beta}}{1+\beta} \left(1 - \sqrt{\frac{R_{\text{ш } \text{эф}}}{P_{CB}} \frac{I_n}{2\sqrt{\beta}}} \right) \quad (3)$$

и в секции на бегущей волне

$$\begin{aligned} W_{BB} = & \sqrt{\frac{2R_{\text{ш}} P_{BB}}{\alpha L_{BB}}} (1 - e^{-\alpha L_{BB}}) - \\ & - I_0 R_{\text{ш}} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha L_{BB}}}{\alpha L_{BB}} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Использование выражений (1)–(4) оставляет две степени свободы системы: суммарную подводимую мощность и коэффициент связи секции на стоячей волне β .

Общая подводимая мощность ограничена снизу мощностью пучка $P_n = W_n I_n$ и минимальными потерями в ускоряющих секциях. Увеличение суммарной подводимой мощности выше этого уровня снизит КПД ускорителя, но позволит увеличить темп ускорения пучка в секции на бегущей волне, тем самым сократив ее длину.

Использование численного значения параметра связи секции на стоячей волне β в данном случае является малоинформативным, и в качестве параметра с более очевидным физическим смыслом в данной работе используется параметр $\kappa = P_{CB} P_0^{-1}$, характеризующий долю мощности, потраченную в секции на стоячей волне с учетом нагрузки током. В данной статье был рассмотрен вариант с секцией на стоячей волне с величиной параметра $\kappa = 0.2$.

На рис. 3 изображено соотношение количества ячеек в секциях на стоячей и бегущей волнах, при котором выполняются соотношения баланса энергий (1) и мощностей (2) в ускорителе. КПД ускорителя представлен на рис. 4.

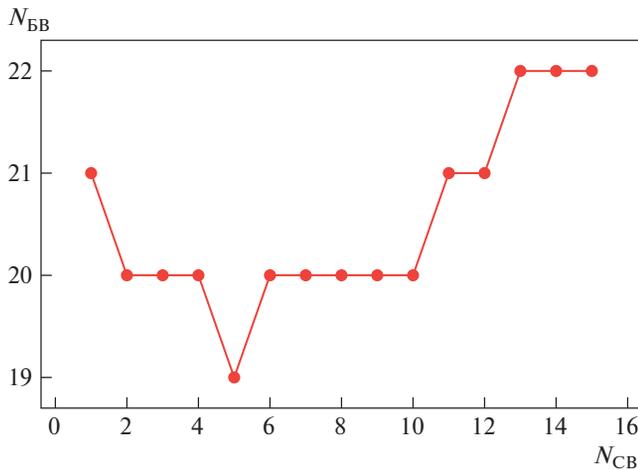


Рис. 3. Соотношение количества ячеек в секциях на стоячей и бегущей волнах.

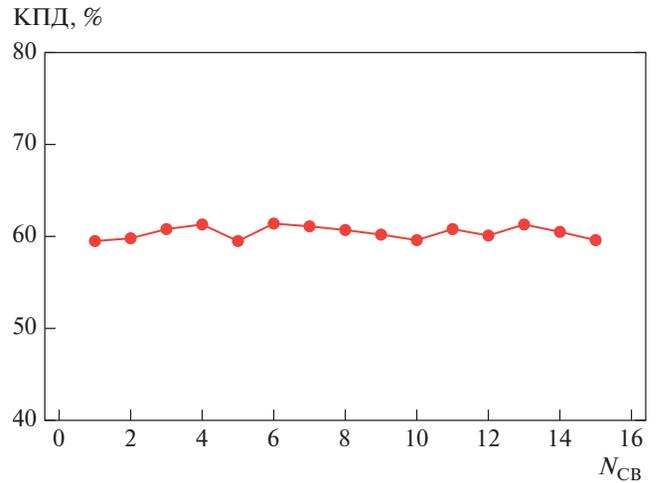


Рис. 4. Зависимость КПД ускорителя от количества ячеек в секции на стоячей волне.

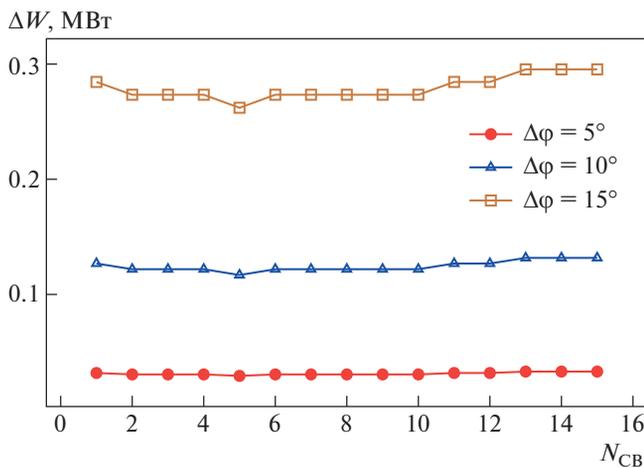


Рис. 5. Зависимость изменения выходной энергии ускорителя из-за сдвига относительной фазы колебаний от количества ячеек в секции на стоячей волне.

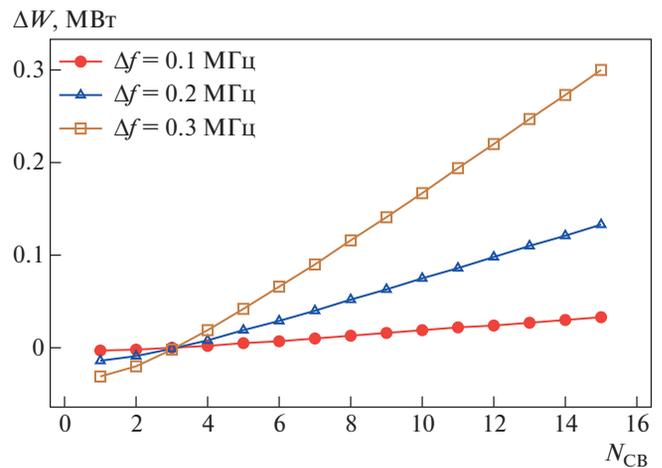


Рис. 6. Зависимость изменения выходной энергии ускорителя из-за расстройки ячеек от количества ячеек в секции на стоячей волне.

4. ВАРИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На рис. 5 представлена вариационная характеристика ускорителя при расстройке относительной фазы колебаний в секциях. Такая расстройка может появляться вследствие неверно настроенного фазовращателя.

На рис. 6 представлена вариационная характеристика ускорителя при расстройке собственной частоты ячеек. В ускорителях на стоячей волне вследствие большой добротности такая расстройка сильно влияет на выходную энергию пучка. В данной схеме питания это влияние значительно меньше, во-первых, из-за большей ширины пропускания недосвязанной секции на стоячей вол-

не, во-вторых, вследствие передачи отраженной от секции на стоячей волне мощности в секцию на бегущей волне, где она используется для ускорения пучка.

5. СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ МАГНЕТРОНА

В рассматриваемой высокочастотной системе может быть обеспечена стабилизация частоты магнетрона. Для этого следует использовать четырехплечий циркулятор. Выход секции на бегущей волне подключается через регулируемый рассогласователь к четвертому плечу циркулято-

ра. При этом реализуется канал обратной связи между высокодобротным группирователем и магнетроном для устойчивого и стабильного возбуждения магнетрона на рабочей частоте группирователя. Анализ рабочих режимов в высокочастотной системе ускорителя может быть осуществлен с помощью основного уравнения генерации – баланса активной проводимости генератора и пассивной проводимости нагрузки [14]. Наибольший интерес представляет баланс реактивных компонент проводимостей, из которого определяются частоты колебаний, возбуждаемых в высокочастотной системе ускорителя. Реактивная проводимость нагрузки определяет коэффициент отражения

$$\Gamma_n = S_{12}S_{23}S_{34}S_{41}\Gamma_{гр}\Gamma_{рас}e^{-j\varphi} = A\Gamma_{гр}e^{-j\varphi}. \quad (5)$$

Здесь $S_{12}, S_{23}, S_{34}, S_{41}$ – элементы матрицы рассеяния циркулятора, $\Gamma_{гр}$ – коэффициент отражения от группирователя в полосе частот, $\Gamma_{рас}$ – коэффициент отражения от рассогласователя в четвертом плече циркулятора, φ – фазовый набег в секции на бегущей волне, подводящих волноводах, $A = |S_{12}S_{23}S_{34}S_{41}\Gamma_{рас}|$, Φ – полный фазовый набег в циркуляторе, секции на бегущей волне, циркуляторе. Условие отсутствия устойчивых режимов на частотах, далеких от рабочей, определяется из условия отсутствия эффекта “длинной линии” при замкнутом группирователе и имеет вид [15]:

$$A \leq 1 + \frac{Q_l}{Q_{внг}} - \sqrt{\frac{Q_l}{Q_{внг}} \left(\frac{Q_l}{Q_{внг}} + 2 \right)}. \quad (6)$$

Здесь $Q_l = 2\pi/\Lambda\lambda^{-2}$ – добротность линии, l – геометрическая длина тракта, Λ, λ – длина волны в волноводе и свободном пространстве соответственно.

Коэффициент стабилизации частоты записывается

$$S = 1 + \frac{Q_{вн}}{Q_{внг}} \frac{4A}{[1 + Q_{вн}/Q_0 + A(1 - Q_{вн}/Q_0)]^2}. \quad (7)$$

Выражение для полосы захвата имеет вид

$$\Delta f_3 = \frac{f_0}{Q_{вн}} \frac{1 + Q_{вн}/Q_0 + A(1 - Q_{вн}/Q_0)\sqrt{F(S+F)}}{1 - Q_{вн}/Q_0} \frac{1}{1+F}. \quad (8)$$

Здесь $F = \frac{S-3 + \sqrt{(S-1)(S-9)}}{2}$. Оценочные расчеты по приведенным соотношениям показывают, что коэффициент стабилизации частоты магнетрона должен составлять 9–12 при полосе захвата в устойчивый одночастотный режим не менее 3 МГц.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена схема питания гибридного ускорителя с секциями на стоячей и бегущей волнах, соединенными через ферритовый циркулятор. На основе выражений баланса мощности и энергии определено оптимальное соотношение длин секций, а также КПД ускорителя. Рассчитанные вариационные характеристики ускорителя свидетельствуют о том, что расстройка собственной частоты ячеек не имеет столь сильного влияния на выходную энергию электронов, как в ускорителях на стоячей волне. Рассмотрены вопросы стабилизации питающего автогенератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Pavlov Y. et al. // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. 1985. V. 2. No. 23. P. 3–5 (in Russian).
2. Pirozhenko V.M. // Proc. EPAC'08. 2008. P. 2746–2748.
3. Zuyev Y. et al. Uskoryayushchaya struktura lineynogo uskoritelya elektronov UELV-10/5-15S [Accelerating Structure of the Linear Electron Accelerator UELV-10/5-15S]. 2002. Moscow: TSNIAtominform (in Russian).
4. Fukasawa A., Badakov H., O'Shea B.D., Alesini J.R.D., Ficcadenti L., Spataro B., Palumbo L. // Proc. PAC09. 2009. P. 5.
5. Pei S., Gao B. // Proc. SAP'17. 2018. P. 79–82.
6. Gao B., Chi Y.L., Pei S. // Proc. SAP'17. 2018. P. 92–95.
7. Kutsaev S.V., Sobenin N.P., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2011. V. 636. No. 1. P. 13–30.
8. Matsievskiy S. et al. // Proc. IPAC'16. 2016. P. 1791–1793.
9. Matsievskiy S.V., Savin E.A., et al. // J. Phys. 2016. V. 747. P. 012078.
10. Matsievskiy S.V., Savin E.A., et al. // Proc. RuPAC'16. 2017. P. 228–230.
11. Sobenin N.P., Kutsaev S.V., et al. // Proc. LINAC'10. 2010. P. 202–204.
12. Wangler T. RF Linear Accelerators. 2 ed. 2008. Weinheim: Wiley-VCH.
13. Wilson P.B., Griffin J.E. // AIP Conf. Proc. 1982. V. 87. P. 450; SLACPub-2884.
14. Sobenin N.P., Milovanov O.S. Tekhnika sverkhvysokikh chastot [Microwave Technology]. 2 ed. 2007. Moscow: Energoatomizdat (in Russian).
15. Kaminskiy V., Milovanov O.S. // Uskoriteli. 1980. No. 19. P. 34–38 (in Russian).

Autogenerator with Ferrite Circulator Powered Hybrid Electron Accelerator Characteristics Modeling

S. V. Matsievskiy¹, * and V. I. Kaminskiy¹

¹National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: MatsievskiySV@gmail.com

Received June 28, 2021; revised July 9, 2021; accepted July 19, 2021

Abstract—This paper considers the power supply scheme of a hybrid accelerator with standing and traveling wave sections, connected through a ferrite circulator from an autogenerator. Parameters of the accelerating sections and the cell parameter change sensitivity characteristics are determined for the accelerator with output beam energy 10 MeV and beam current 300 mA. Autogenerator stabilization issues are considered.

Keywords: modeling, hybrid electron accelerator, autogenerator, ferrite circulator