

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЧ СИГНАЛА В TW СТРУКТУРЕ УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ

© 2025 г. Л. Ю. Овчинникова^{a, b, *}, В. В. Парамонов^a

^aИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^bАО «НИИ «Феррит-Домен», Санкт-Петербург, 196084 Россия

*E-mail: lubovch@inr.ru

Поступила в редакцию 13.06.2023 г.

После доработки 19.06.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

Описана методика моделирования распространения СВЧ сигнала в ускоряющей структуре на бегущей волне методом эквивалентных схем. Выполнены расчеты распространения сигнала с частотой 2856 МГц в ускоряющей структуре с постоянным градиентом, состоящей из 102 ячеек. Показана возможность изменения энергии ускоренного пучка за счет вращения фазы сигнала внутри длинного импульса.

Ключевые слова: протонная терапия, линейный ускоритель на бегущей волне, связанные резонаторы, эквивалентная схема

DOI: 10.56304/S2079562924050361

1. ВВЕДЕНИЕ

Управление глубиной дозового воздействия осуществляется регулировкой энергии протонов [1]. В [2] показана возможность изменения выходной энергии пучка от импульса к импульсу за счет изменения только фазы СВЧ сигнала. В развитии этой методики сформулирована идея изменения выходной энергии пучка за счет изменения фазы во время одного длинного СВЧ импульса [3].

2. МЕТОДИКА

Моделирование распределения поля для СВЧ сигнала с изменяющейся фазой и распространяющегося в Ускоряющей Структуре (УС), содержащей до 100 ячеек с переменными параметрами, выполнено с использованием метода эквивалентных схем [4]. Входные параметры — длины, шун-

товые сопротивления, добротности ячеек УС, групповая скорость волны β_g и скорость равновесной частицы β_p , несущая частота, общая длительность, форма и длительность фронтов, время и величина изменения фазы СВЧ сигнала на входе в УС. Отсутствие отраженной волны обеспечивается согласованной нагрузкой на конце структуры. Эквивалентная схема УС показана на рис. 1.

Связь переменной групповой скорости волны β_g в структуре с переменным коэффициентом связи K между моделирующими ячейками дается следующим соотношением:

$$K = \frac{\Xi}{\sin \Theta - \Xi \cos \Theta}, \quad \Xi = \frac{2\beta_g}{\Theta\beta_p}, \quad (1)$$

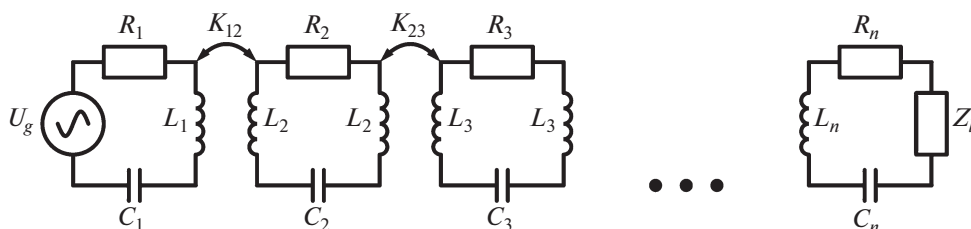


Рис. 1. Эквивалентная схема УС: U_g — сигнал от генератора, R — сопротивления, L — индуктивности, C — емкости, K — коэффициенты связи, Z_l — согласованная нагрузка.

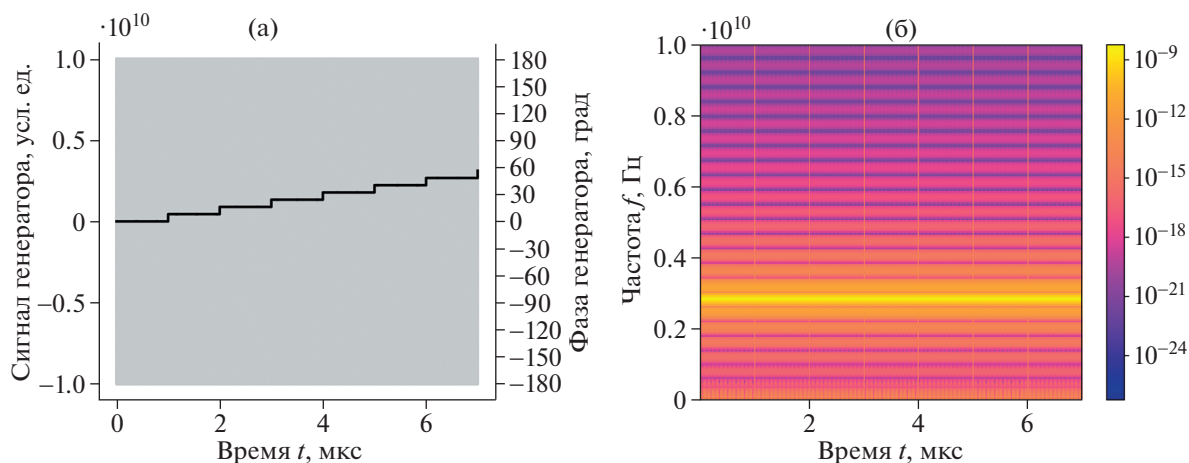


Рис. 2. Сигнал на входе в УС: (а) амплитуда и фаза; (б) спектрограмма. Прямоугольный СВЧ импульс имеет длительность 7 мкс и несущую частоту 2856 МГц. С шагом 1 мкс фаза скачкообразно меняется на $+8^\circ$. На спектрограмме видно возбуждение широкого спектра частот, возникающее при скачках фазы. Регулировка фазы в диапазоне от 0° до 48° соответствует диапазону изменения энергии ускоренного пучка от 216 до 230 МэВ.

где Θ — сдвиг фазы поля на период УС, β_g — групповая скорость волны, β_p — скорость равновесной частицы. Необходимые электродинамические характеристики ячеек берутся из электродинамического расчета УС на бегущей волне с постоянным градиентом.

Во временной области решается система дифференциальных уравнений (2) методом Рунге-Кутты для эквивалентной напряженности поля в ячейках. В постпроцессоре программы выводятся эквивалентные значения полей в ячейках ускоряющей структуры в зависимости от времени, на основе которых проводится расчет разности фаз между ячейками, формируются огибающие и т.п.

$$\begin{bmatrix} L_1 & K_{12}L_2 & 0 & \cdots & 0 \\ K_{21}L_1 & L_2 & K_{23}L_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & L_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1'' \\ q_2'' \\ \vdots \\ q_n'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 - R_1 q_1' - q_1/C_1 \\ U_2 - R_2 q_2' - q_2/C_2 \\ \vdots \\ U_n - R_n q_n' - q_n/C_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $U_1 = U_g$ — сигнал от генератора, $U_2, \dots, U_n = 0$, R — сопротивления, L — индуктивности, C — емкости, K — коэффициенты связи, q , q' , q'' — заряды, их первые и вторые производные по времени соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Выполнено моделирование распространения СВЧ сигнала в последней выходной TW-структуре протонного медицинского ускорителя [2]. Сигнал на входе в УС и его характеристики приведены на рис. 2.

УС состоит из 102 ячеек. Время заполнения УС ~ 1.0 мкс. Сдвиг фазы поля на период УС составляет 120° , что соответствует моде $2\pi/3$. Резкий фронт от включения сигнала и скачки фаз порождают переходные процессы, которые распространяются по УС. Для примера, сравним характеристики ускоряющего поля во всех 102 ячейках УС в момент времени 6.5 мкс. В момент времени 6 мкс происходит скачок фазы на 8° , из-за которого возникает переходной процесс. На рис. 3 показана действительная и мнимая части сигнала, на рис. 4 — разница фаз поля между соседними ячейками, на рис. 5 — значение огибающей поля, на рис. 6 — распределение поля во всех 102 ячейках УС.

При изменении фазы сигнала на входе в УС пролетающая частица попадает в поля с разными фазами и, следовательно, получает разные приросты энергии. На рис. 7 показан уровень ускоряющего поля при пролете равновесной частицы в ячейках 1 (входная), 51 (в середине УС) и 102 (выходная).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках разработанного предложения ЛУ для протонной терапии была предложена возможность многократного повышения скорости перестройки выходной энергии ЛУ за счет изменения фазы внутри питающего ВЧ импульса. На основе метода эквивалентных схем разработана и реализована в программе методика моделирования характеристик распространяющейся в УС волны,

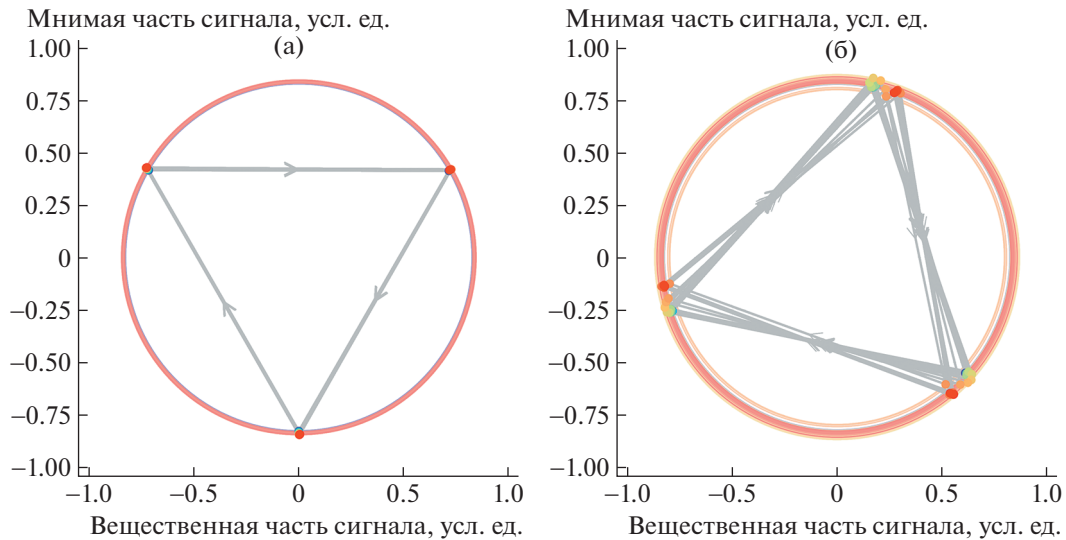


Рис. 3. Действительная и мнимая части сигнала в момент времени 6.5 мкс во всех 102 ячейках УС. Окружностями показаны значения огибающей поля в ячейках. Стрелками обозначен переход от ячейки к ячейке: (а) без скачков фазы; (б) со скачками фазы.

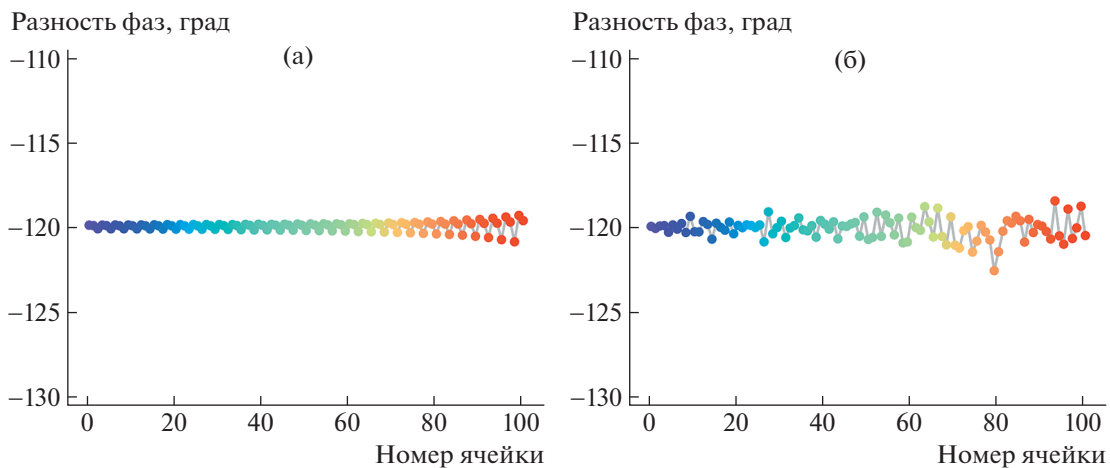


Рис. 4. Разница фаз поля между соседними ячейками в момент времени 6.5 мкс. Наблюдаемая разница $\sim 120^\circ$ соответствует моде $2\pi/3$: (а) без скачков фазы, $\Theta_{\text{err}} < 1^\circ$; (б) со скачками фазы.

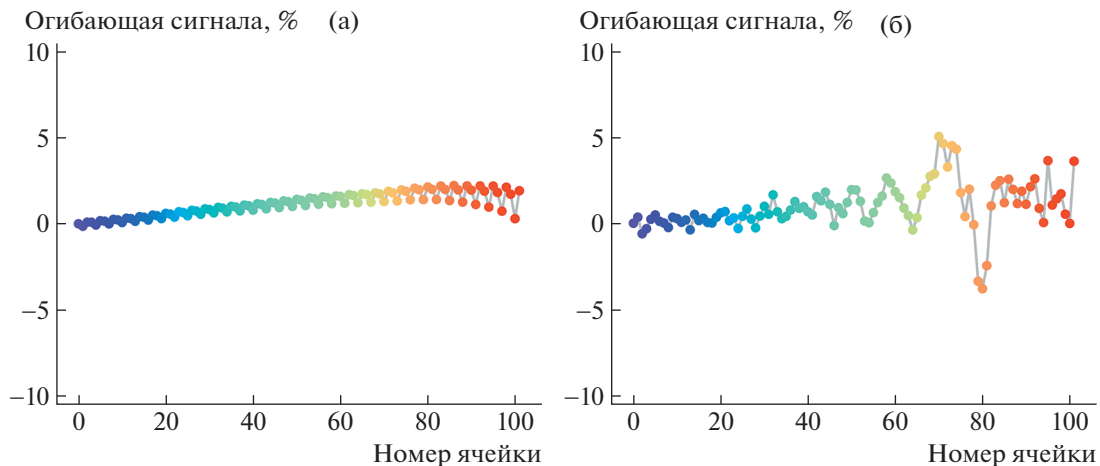


Рис. 5. Значение огибающей поля в момент времени 6.5 мкс во всех 102 ячейках УС. Значения величины поля приведены относительно первой ячейки: (а) без скачков фазы, $E_{\text{err}} < 2.5\%$; (б) со скачками фазы.

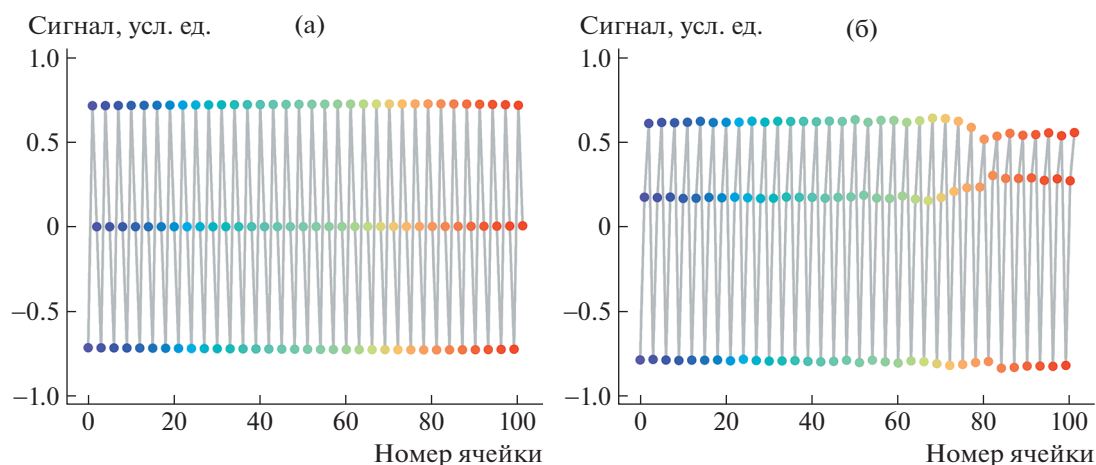


Рис. 6. Распределение поля в момент времени 6.5 мкс во всех 102 ячейках УС: (а) без скачков фазы; (б) со скачками фазы. Переходный процесс, связанный со скачком фазы, наблюдается с 70 по 80 ячейку.

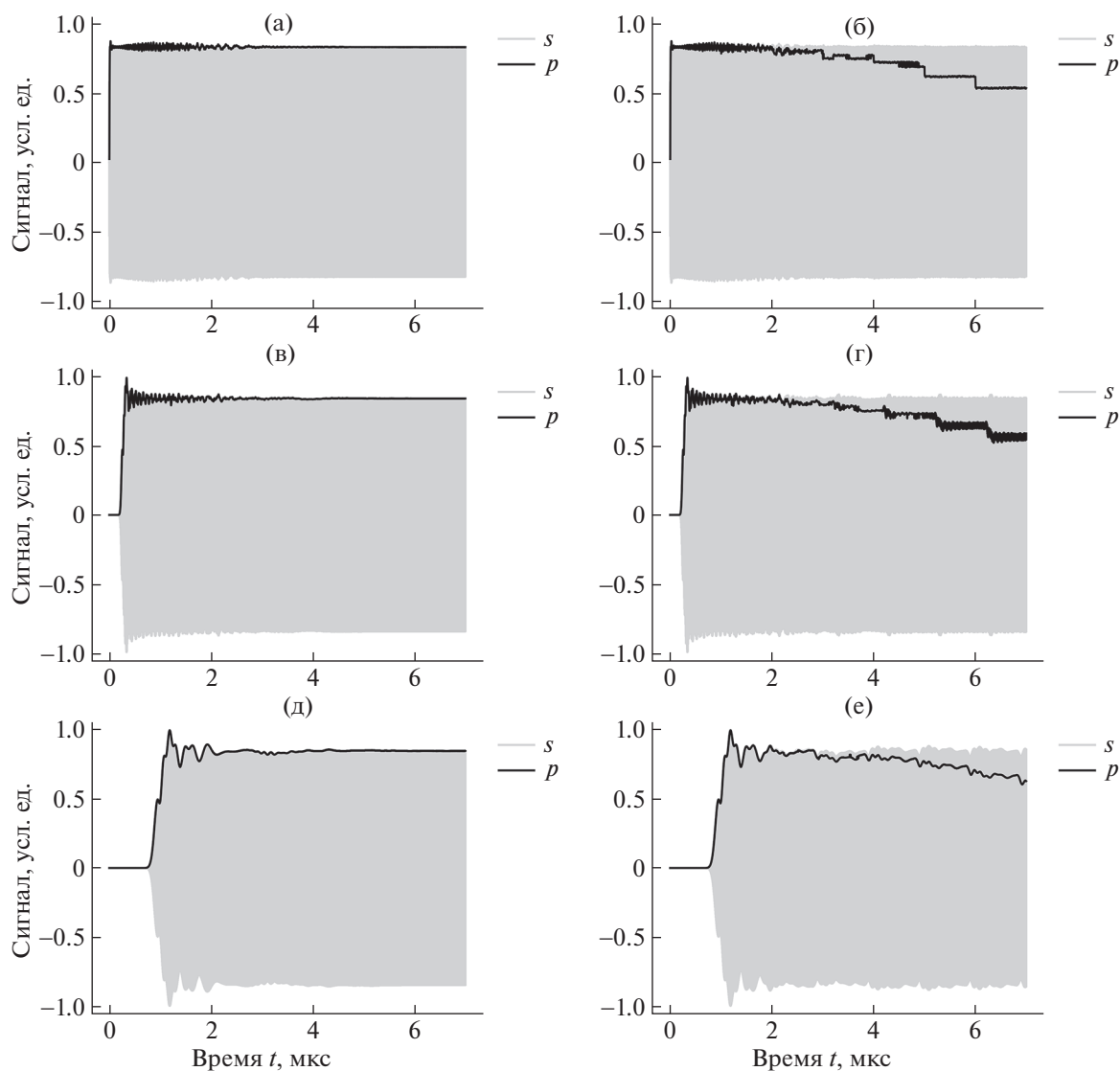


Рис. 7. Поле при пролете равновесной частицы в ячейках 1, 51 и 102 (сверху вниз соответственно). Серым показан уровень поля в ячейке, черным — уровень ускоряющего поля при пролете равновесной частицы: (а, в, д) без скачков фазы; (б, г, е) со скачками фазы.

учитывающая переходные процессы в дисперсной структуре. При изменении фазы питающего ВЧ сигнала результаты расчетов характеристик распространяющейся волны показывают физически обоснованное изменение напряженности поля, в которое попадают синхронные частицы, проходящие структуру в различные моменты времени. Результаты моделирования распространения волны могут быть использованы для донстройки УС и являются исходными данными для дальнейшего моделирования динамики сгустков протонов. Дополнительной является возможность использования разработанной программы для быстрого моделирования при экспериментальной настройке УС.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллегам из ИЯИ РАН за многочисленные консультации и полезные об-

суждения, а также за поддержку в проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Ovchinnikova L., Akulinichev S.V., Durkin A.P., Kolomiets A., Kurilik A., Paramonov V.V.* // Proc. Russian Particle Accelerator Conf. RuPAC'21. 2021. P. 182–185. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOP-SA41>
2. *Paramonov V.V., Durkin A.P., Kolomiets A.A.* // Proc. Russian Particle Accelerator Conf. RuPAC'21. 2021. P. 117–119. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04>
3. *Ovchinnikova L., Paramonov V.* // Proc. LaPlas-2023 Conf. 2023. P. 300. <https://conf.laplas.mephi.ru>.
4. *Nagle D.E., Knapp E.A., Knapp B.C.* // Rev. Sci. Instrum. 1967. V. 38 (11). P. 1583–1587. <https://doi.org/10.1063/1.1720608>

Simulation Technique for RF Signal Propagation in TW Structure for Medical Proton Linac

L. Yu. Ovchinnikova^{1, 2, *} and V. V. Paramonov¹

¹*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

²*Ferrite Domet Co., St. Petersburg, 196084 Russia*

**e-mail: lubovch@inr.ru*

Received June 13, 2023; revised June 19, 2023; accepted June 26, 2023

Abstract—Simulation technique of the RF signal propagation in a traveling wave accelerating structure by the method of equivalent circuits is described. Calculations were made for the propagation of a signal with the frequency of 2856 MHz in an accelerating structure with the constant gradient, consisting of 102 cells. The possibility of changing the energy of the accelerated beam due to the rotation of the phase of the signal within a long pulse is shown.

Keywords: proton therapy, traveling-wave linear accelerator, coupled resonators, equivalent circuit