

О ВЛИЯНИИ СМЕЩЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ УСКОРИТЕЛЯ ЛУЭ-200

*А. Е. Левичев^а, М. В. Арсентьева^а, С. Л. Самойлов^а, И. С. Жиронкин^б,
К. И. Михайлов^б, А. П. Сумбаев^{б,1}, В. В. Кобец^б*

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

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты аналитических оценок изменения эффективности ускоряющей структуры и ускоряющей системы в целом при смещении рабочей частоты СВЧ-системы линейного электронного ускорителя с бегущей волной 10-см диапазона. В порядке верификации полученных оценок проведены измерения энергетических характеристик пучка электронов при изменении частоты задающего генератора у источника СВЧ-мощности и подборе собственных частот резонаторов системы компрессии СВЧ-мощности ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН ОИЯИ (Дубна).

The results of analytical estimates of the change in the efficiency of the accelerating structure and the accelerating system as a whole with a shift in the operating frequency of the microwave system of a linear electron accelerator with a traveling wave of a 10-cm range are presented. In order to verify the obtained estimates, the energy characteristics of the electron beam were measured when changing the frequency of the master oscillator at the microwave power source and selecting the natural frequencies of the SLED system resonators of the LUE-200 accelerator of the IREN facility of JINR (Dubna).

PACS: 29.20.Vj; 29.20.–c

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] проведены аналитические исследования ускоряющих структур на бегущей волне 10-см диапазона (частота 2856 МГц) с модой колебаний $2\pi/3$ и постоянным импедансом, разработанных в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН для линейных ускорителей электронов. Структуры данного типа работают в ускорительных комплексах ИЯФ и в ускорителе ЛУЭ-200 Объединенного института ядерных исследований [3]. В схеме создаваемого источника фотонов СКИФ также предполагается использование этих структур в качестве регулярных секций линейного ускорителя — инжектора [4, 5]. В данной статье в продолжение исследований, выполненных в [1],

¹E-mail: sumbaev@ni.jinr.ru

рассматриваются вопросы влияния различных ошибок изготовления или работы линейного ускорителя на величину набора энергии. Влияние рассогласования (отклонения) частоты СВЧ-мощности, поступающей в структуру, от собственной (резонансной) частоты структуры на величину набора энергии описывается в рамках следующих допущений: омические потери в стенках структуры отсутствуют (амплитуда ускоряющего поля вдоль структуры принимается постоянной), нагрузка ускоряющего поля током пучка незначительна.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

Энергия, которую набирает частица в ускоряющем электрическом поле на промежутке z , определяется как

$$W = eE_0 \int_0^z \cos(\varphi + \varphi_0) dz. \quad (1)$$

Здесь E_0 — амплитуда ускоряющего поля на оси ускоряющей ячейки; L — длина ускоряющей структуры; φ — фаза частицы относительно волны; φ_0 — начальная фаза влета частицы; e — заряд электрона; z — продольная координата. Записать фазу частицы в этом случае можно выражением [6]:

$$\varphi = \omega \left(t - \int_0^z \frac{dz}{v_p} \right), \quad (2)$$

где ω — круговая частота ускоряющего электрического поля; v_p — фазовая скорость волны; t — время. Если фазовая скорость волны постоянна, а скорость частицы v_e , то выражение (2) запишем как

$$\varphi = \omega z \left(\frac{1}{v_e} - \frac{1}{v_p} \right). \quad (3)$$

Если ускорение происходит в диафрагмированном волноводе [7] на рабочей частоте, то частота ω совпадает с частотой генератора (свободного пространства), и ее можно представить в виде $\omega = 2\pi c/\lambda$, где c — скорость света в вакууме, λ — длина волны от генератора. В этом случае из (3) получим

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} z \left(\frac{1}{\beta_e} - \frac{1}{\beta_p} \right). \quad (4)$$

В выражении (4) β_e и β_p — скорость частицы и фазовая скорость волны по отношению к скорости света соответственно. С учетом (1) и (4) определим набираемую частицей энергию при пролете ускоряющей структуры длиной L :

$$W = eE_0 \int_0^L \cos(\tilde{\beta}z + \varphi_0) dz = eE_0 L \frac{\sin(\tilde{\beta}L/2)}{\tilde{\beta}L/2} \cos\left(\frac{\tilde{\beta}L}{2} + \varphi_0\right). \quad (5)$$

Здесь

$$\tilde{\beta} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{\beta_e} - \frac{1}{\beta_p} \right). \quad (6)$$

Будем рассматривать небольшие отклонения фазовой скорости ускоряющей структуры, считая, что частица движется с постоянной скоростью, практически равной скорости света $\beta_e \approx 1$, т. е. $\beta_p \cong 1$. В этом случае выражение (6) можно приближенно записать

$$\tilde{\beta} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\beta_p - 1}{\beta_p} \right) \approx \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta\beta_p}{\beta_p}. \quad (7)$$

Относительная фазовая скорость $\beta_p = \omega/(c \cdot \beta)$, где $\beta = 2\pi/\lambda$ — волновое число. С учетом этого можно записать

$$\Delta\beta_p = \frac{\Delta\omega}{c\beta} - \frac{\omega}{c} \frac{\Delta\beta}{\beta^2}. \quad (8)$$

Выражение (8) упрощается, если в него ввести относительную фазовую скорость:

$$\Delta\beta_p = \frac{\omega}{c\beta} \frac{\Delta\omega}{\omega} \left(1 - \frac{\omega}{\beta} \frac{\Delta\beta}{\Delta\omega} \right). \quad (9)$$

По определению групповая скорость $\beta_{gr} = \Delta\omega/(c\Delta\beta)$ [6]. С учетом этого (9) примет вид

$$\Delta\beta_p = \frac{\omega}{c\beta} \frac{\Delta\omega}{\omega} \left(1 - \frac{\omega}{\beta c \beta_{gr}} \right) = \beta_p \frac{\Delta\omega}{\omega} \left(1 - \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \right). \quad (10)$$

В итоге перепишем выражение (6):

$$\tilde{\beta} \approx \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta\omega}{\omega} \left(1 - \frac{\beta_p}{\beta_{gr}} \right). \quad (11)$$

Если относительная групповая скорость $\beta_{gr} \ll 1$, а $\beta_p \cong 1$, то (11) дополнительно упрощается и окончательно получаем

$$\tilde{\beta} \approx -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta\omega}{\omega} \frac{1}{\beta_{gr}}. \quad (12)$$

С помощью выражения (12) можно провести оценку изменения набираемой энергии (5) при работе «вне рабочей частоты». Будем использовать следующие параметры ускоряющей структуры на основе диафрагмированного волновода [8]: $\lambda = 105$ мм, $\beta_{gr} = 0,021$. Максимальная энергия, которую может набрать частица: $W_{max} = eE_0L$. На рис. 1 показана зависимость набираемой энергии относительно W_{max} при начальной фазе $\varphi_0 = 0$. Из рисунка видно, что при расстройке $\Delta f/f = \pm 0,28 \cdot 10^{-3}$ (для рабочей частоты 2856 МГц это соответствует $\pm 0,8$ МГц) это приводит к недобору энергии на 70%.

Как отмечалось выше, рис. 1 получен для начальной фазы $\varphi_0 = 0$. В этом случае, влетая в ускоряющее поле при его амплитудном значении, частица «соскальзывает» с него за счет несоответствия ее скорости фазовой скорости волны вследствие «неправильной» частоты генератора. В итоге набираемая энергия уменьшается вплоть

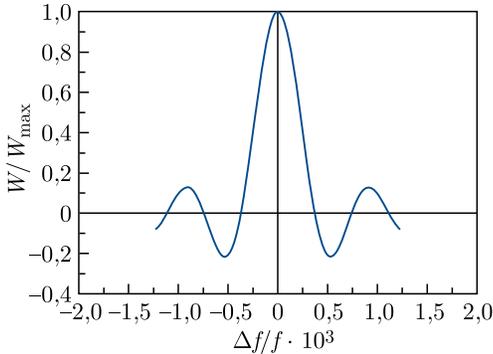


Рис. 1. Снижение энергии по отношению к максимальному значению при изменении частоты рабочего генератора и начальной фазе $\varphi_0 = 0^\circ$

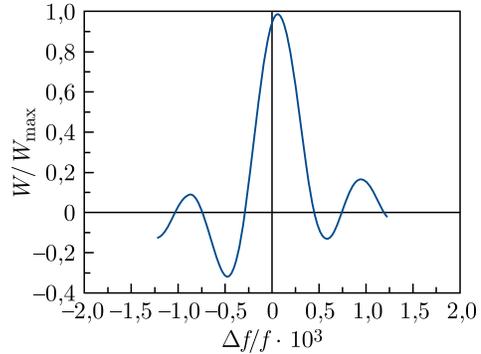


Рис. 2. Снижение энергии по отношению к максимальному значению при изменении частоты рабочего генератора и начальной фазе $\varphi_0 = 20^\circ$

до полного торможения, а если уход частоты значительный, то частица снова может попасть в ускоряющее поле и приобрести энергию. Получается затухающий осциллирующий процесс. Если начальная фаза частицы отличается от нуля $\varphi_0 \neq 0$, то частица изначально попадает в неоптимальное значение ускоряющего поля волны. Однако при некорректной частоте генератора, «скользя» по волне, частица может приобрести энергию больше, чем в первом варианте.

На рис. 2 показан вариант, когда начальная фаза $\varphi_0 = 20^\circ$. В этом случае зависимость набираемой энергии от частоты становится несимметричной. Максимально возможная энергия становится меньше $W_{\max} = eE_0L$, но при положительном отклонении частоты генератора набираемая частицей энергия может быть больше, чем для случая рис. 1. Так, например, при $\Delta f/f = 0,28 \cdot 10^{-3}$ уменьшение энергии уже составит не 70%, как ранее, а 50%. Стоит заметить, что при отрицательном отклонении частоты $\Delta f/f = -0,28 \cdot 10^{-3}$, наоборот, уменьшение энергии будет больше, чем для случая с $\varphi_0 = 0^\circ$, и составит практически 97%.

В реальном ускорителе заряженных частиц пучок всегда имеет протяженность. Другими словами, каждая частица будет иметь свою начальную фазу влета. Наличие ошибки в частоте генератора приведет к уменьшению средней энергии пучка, но максимальная энергия может уменьшиться не так сильно, как для одной частицы с нулевой фазой влета. Если при корректной частоте генератора пучок инжектируется таким образом, что его центр имеет фазу влета $\varphi_0 = 0^\circ$, то крайние (первые и последние) частицы будут иметь меньшую энергию, чем центральные. При наличии ошибки частоты генератора энергия в пучке перераспределится, и может получиться так, что крайние частицы приобретут энергии больше, чем центральные.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА ЛУЭ-200

В порядке верификации полученных выше оценок на ускорителе ЛУЭ-200 установки ИРЕН ОИЯИ проведены измерения энергетических характеристик пучка электронов при изменении частоты задающего генератора источника СВЧ-мощности и подборе собственных частот у резонаторов систем компрессии СВЧ-мощности типа SLED.

Подобная задача для ускорителя в целом осложняется тем, что «согласованию» подлежат одновременно несколько объектов: две ускоряющие секции и по два резонатора в системах SLED каждой секции (рис. 3). При этом частотные характеристики секций и резонаторов SLED существенно отличаются.

Периодическая ускоряющая структура при наличии малой связи между ячейками может быть описана с помощью дисперсионного уравнения [6, 7]

$$f \approx f_0 (1 \pm |k_c| \cos(\theta)), \quad (13)$$

где f_0 — частота одной ускоряющей ячейки; $|k_c| \ll 1$ — коэффициент связи между ускоряющими ячейками; θ — рабочая мода колебания. Выбор знака определяется связью между ячейками: индуктивной или емкостной. Модуль коэффициента связи может быть найден как

$$|k_c| = \left| \frac{f_{\theta=\pi} - f_{\theta=0}}{f_{\theta=\pi/2}} \right| = \left| \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_0} \right|, \quad (14)$$

где $f_{\theta=\pi/\theta=0}$ — частоты при виде колебания $\theta = \pi$ и $\theta = 0$ соответственно. Данные частоты являются крайними для полосы периодической структуры. $f_{\theta=\pi/2} = f_0$ — частота при виде колебания $\theta = \pi/2$, которая совпадает с серединой полосы пропускания и соответствует частоте одиночной ускоряющей ячейки. В соответствии с сертификатом производителя у ускоряющих секций, разработанных и изготовленных в ИЯФ СО РАН [8], собственная частота, измеренная «под атмосферой» при температуре 25 °С, составляет 2855,05 МГц, а коэффициент температурной зависимости собственной частоты ≈ 50 кГц/°С. При откачке атмосферы из-за изменения диэлектрической проницаемости среды внутри структуры собственная частота повышается примерно на 0,86 МГц и при 25 °С приближается к 2855,91 МГц. При нагреве структуры до 37 °С (температура «стабилизации» секции) рабочая частота структуры уменьшается до 2855,31 МГц. Измеренная полоса пропускания ускоряющих секций представлена коэффициентом стоячей волны на рис. 4. Из этих начальных данных следует, что поиск рабочей частоты задающего генератора, оптимальной с точки зрения повышения энергии ускоряемого пучка, должен базироваться на частоте, близкой к 2855,31 МГц.

При добротности резонаторов SLED $Q_p = 8,0 \cdot 10^4$ ширина полосы пропускания резонаторов $\Delta f \approx 0,04$ МГц, что значительно уже полосы ускоряющей секции, но с учетом возможностей подстройки собственной частоты резонаторов путем деформирования задней стенки (4 МГц/мм) или изменения температуры [9] целесообразнее

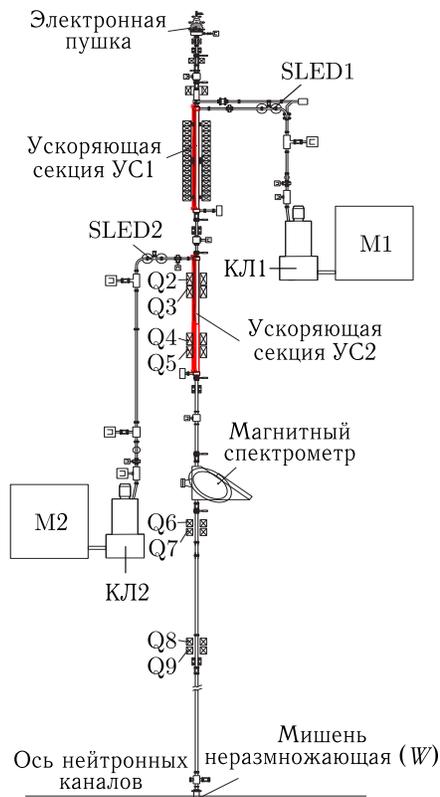


Рис. 3. Структурная схема ускорителя ЛУЭ-200. КЛ1, КЛ2 — клистроны; М1, М2 — модуляторы; SLED1, SLED2 — системы компрессии СВЧ-мощности

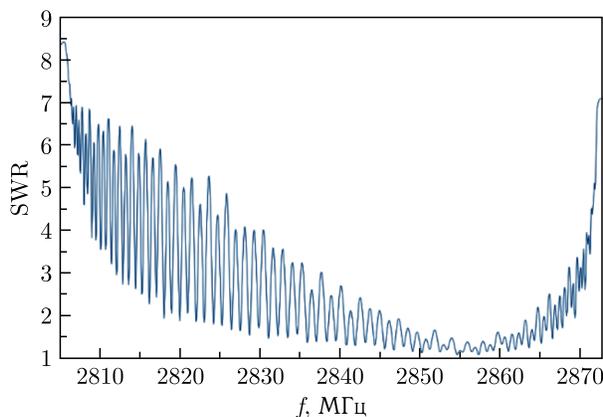


Рис. 4. Коэффициент стоячей волны ускоряющей структуры ЛУЭ-200, изготовленной на основе диафрагмированного волновода, в зависимости от частоты

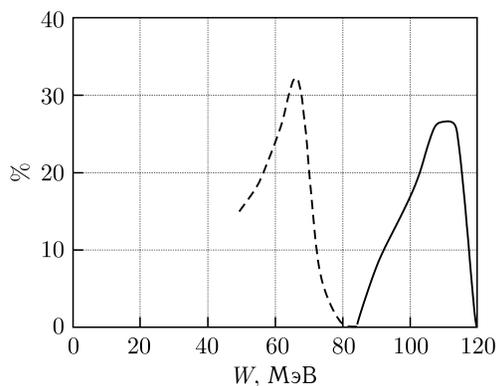


Рис. 5. Спектры энергий пучка ЛУЭ-200 до (штриховая линия) и после (сплошная) оптимизации частоты задающего генератора

выбор оптимальной частоты задающего генератора производить посредством первоначального согласования с частотой ускоряющей секции с последующей подстройкой собственных частот резонаторов SLED под выбранную частоту генератора.

В течение начальных этапов эксплуатации ускорителя ЛУЭ-200 частота задающего генератора для возбуждения клистронов — источников СВЧ-мощности ускоряющих секций устанавливалась на уровне 2855,7–2856,5 МГц и, скорее всего, отличалась от «оптимальной», что снижало эффективность передачи в пучок СВЧ-мощности и приводило к «недобору» энергии частицами ускоренного пучка. В конце 2022 г. после системных поисков оптимальной частоты генератора и тщательной подстройки собственных частот резонаторов SLED удалось существенно увеличить энергию пучка на выходе ускорителя (рис. 5).

Смещение спектра ускоренных частиц в сторону более высоких энергий достигало ≈ 45 МэВ, максимум спектра сместился в область ≈ 110 МэВ. Увеличение мощности пучка составило $\approx 40\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты аналитических оценок позволили выработать рекомендации по увеличению энергии и мощности пучка ускорителя ЛУЭ-200. Анализ, выполненный для ЛУЭ-200, является качественным, поскольку не описывает многих реальных особенностей ускорителя. Среди них можно указать на изначальную длительность пучка. Как было отмечено выше, для оптимально инжектированной частицы изменение энергии при частотной ошибке может быть существенней, чем для частицы, изначально смещенной относительно оптимальной фазы. В результате для пучка с продольной длиной изменение максимальной энергии может быть не таким, как для одночастичного случая. Скорее всего, результаты коррекции частоты ЛУЭ-200 как раз указывают на это: из-за длительности пучка (которая больше периода ускоряющего поля) произошло перераспределение энергии среди частиц, инжектируемых с разной фазой, и максимальная энергия изменилась на 40 % вместо 70 % для одночастичной модели. Кроме того, нужно учесть, что ЛУЭ-200 — это связка из двух ускоряющих структур и двух систем умножения мощности, что значительно усложняет как аналитическое описание, так и настройку ускорителя.

Тем не менее можно сделать однозначное заключение, что уход от частоты рабочего вида колебания в ускоряющей структуре, обладающей избирательностью, заметно сказывается на наборе энергии пучком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришина К. А., Андрианов А. В., Арсентьева М. В. и др. Анализ регулярных ускоряющих структур линейного ускорителя инжектора сибирского кольцевого источника фотонов // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 1(226). С. 49–62.
2. *Arsentyeva M. V., Berdnikov K. N., Levichev A. E.* Analysis of the Particle Longitudinal Motion during the Injection Process into the Disk Loaded Traveling Wave Accelerating Structure // *J. Instrum.* V. 15. 2020. P. P10015.
3. *Sumbaev A., Kobets V., Shvetsov V., Dikansky N., Logatchov P.* LUE-200 Accelerator — A Photo-Neutron Generator for the Pulsed Neutron Source IREN // *Ibid.* P. T11006.
4. *Andrianov A., Arsentyeva M., Barnyakov A. et al.* Development of 200 MeV Linac for the SKIF Light Source Injector // *J. Instrum.* 2022. V. 17. P. T02009.
5. *Levichev A., Grishina K., Samoilov S. et al.* Results of Manufacturing and Operation of the First Accelerating Structures for the Linear Accelerator of the SKIF Injector Based on a Disk-Loaded Waveguide // *J. Instrum.* 2023. V. 18. P. T07001.
6. *Wangler Th.P.* RF Linear Accelerators. 2nd Completely Revised and Enlarged ed. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
7. *Wang J. W.* RF Properties of Periodic Accelerating Structures for Linear Collider. SLAC Report-339. 1989.
8. *Avilov M. S., Akimov V. E., Aleksandrov A. V. et al.* Test of Accelerating Section for VEPP-5 Pre-injector. Tech. Rep. BUDKER-INP-2000-50. Novosibirsk, 2000.
9. *Мальцева М. В., Павлов В. М., Самойлов С. Л. и др.* Измерение резонаторов системы умножения мощности типа SLED // Сиб. физ. журн. 2017. Т. 12, № 4. С. 20–29.

Получено 15 сентября 2023 г.