

01;10

Случайные фазовые возмущения и допуски на разброс амплитуды и фазы в драйвере двухпучкового ускорителя с сопровождающей волной

© А.В. Елжов, Э.А. Перельштейн

Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская область, Россия
e-mail: artel@sunse.jinr.ru

(Поступило в Редакцию 13 августа 2004 г. В окончательной редакции 22 декабря 2004 г.)

Исследуется влияние на динамику частиц случайных фазовых возмущений при выводе СВЧ мощности из драйвера двухпучкового ускорителя с сопровождающей волной. Представлены результаты моделирования динамики пучка в драйвере в зависимости от величины фазовых возмущений. Определяются допуски на разброс амплитуды и фазы волны в устройствах вывода мощности из драйвера.

PACS: 29.27.-a

В ускоряющих структурах линейных коллайдеров возникают ограничения на разброс амплитуды и фазы ВЧ поля как от импульса к импульсу, так и по длине ускорителя в связи с тем, что такой разброс приводит к флуктуациям энергии пучка.

Анализ влияния случайных возмущений амплитуды и фазы СВЧ поля на входе в ускоряющие секции линейного коллайдера, построенного по традиционной схеме запитки отдельных секций независимыми источниками, проведен в работе [1]. В ней на конкретном примере для проекта NLC на энергию 1 TeV показано, что для сведения ошибки в конечной энергии пучка к уровню не более 0.1% отклонения ВЧ амплитуды и фазы в каждой ускоряющей структуре должны находиться в пределах 2% и 3° соответственно.

В отличие от традиционной схемы запитки ускоряющих структур в двухпучковом ускорителе секции главного ускорителя (до тэвных энергий) запитываются от драйвера, в котором для генерации СВЧ мощности используется сильноточный пучок на большой длине коллайдера [2]. Таким образом, случайные возмущения амплитуды и фазы СВЧ волны при выводе из драйвера складываются из случайных ошибок на каждом отдельном устройстве вывода и скоррелированных через электронный пучок случайных возмущений от предыдущих секций.

В схеме драйвера двухпучкового ускорителя с сопровождающей электромагнитной волной [3–6] СВЧ мощность, предназначенная для запитки ускоряющих структур главного ускорителя, выводится периодически по всей длине. Соответственно в устройствах вывода мощности должны удовлетворяться допуски на амплитудные и фазовые отклонения, возникающие из условий ускорения главного пучка.

В качестве примера рассматривается драйвер (рис. 1), который состоит из инжектора, группирователя пучка и протяженной (возможно, несколько сотен метров) последовательности отдельных ускорительно-генераторных секций. В них потери пучка на излучение

компенсируются внешней ускоряющей секцией ЛИУ. Секции перемежаются с переходными участками, в которых осуществляется частичный вывод СВЧ мощности.

Электронный пучок с энергией 1–2 MeV, создаваемый в инжекторе, вводится в группирователь. В качестве последнего может быть использована лампа бегущей волны (ЛБВ) в режиме усиления. В работах [7,8] показано, что высокая степень группировки может быть достигнута на расстоянии ~ 1 м. Усиление СВЧ волны и группировка пучка в ЛБВ были исследованы и зарегистрированы в экспериментах [5].

Далее по ходу драйвера электронные ступки продолжают движение в ЛИУ в сопровождении СВЧ волны, усиливаемой в электродинамических структурах. Ускоряющее электрическое поле может быть приложено непрерывно по всей длине драйвера либо на отдельных ускоряющих промежутках. Вывод СВЧ мощности из драйвера производится только на переходных участках. Система достигает квазистационарного состояния на первых нескольких десятках метров, где энергия ступков возрастает до уровня ~ 10 MeV. Затем следует область квазистационарной генерации СВЧ волны: вся

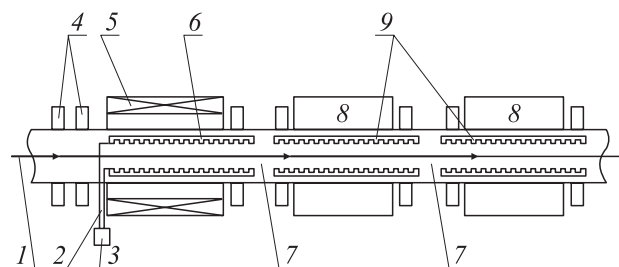


Рис. 1. Схема драйвера двухпучкового ускорителя: 1 — электронный пучок, 2 — волновод, 3 — магнетрон, 4 — фокусирующие магнитные линзы, 5 — соленоид, 6 — ЛБВ — группирователь пучка, 7 — участки вывода СВЧ мощности, 8 — ускоряющие секции, 9 — гофрированный волновод — замедляющая электродинамическая структура.

мощность, передаваемая ускоряющим полем пучку, преобразуется в СВЧ мощность.

Для драйвера в виде последовательности ускоряющих секций, чередующихся с переходными участками (в которых локализован вывод СВЧ мощности), фазовые возмущения моделируются путем введения дополнительного фазового набег в каждой ячейке вывода.

Для моделирования динамики пучка с учетом фазового возмущения при выводе СВЧ мощности использовалась система уравнений [6]

$$\frac{dW_j}{d\xi} = -F \cos \psi_j + \varepsilon_0, \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_j}{d\xi} = 2\gamma_0^2 \left(\Delta_0 + \frac{1}{\beta_{zj}} - \frac{1}{\beta_{z0}} \right), \quad (2)$$

$$\frac{dF}{d\xi} = 2\pi J \langle \cos \psi_j \rangle - \Gamma F, \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi}{d\xi} = -\frac{2\pi J}{F} \langle \sin \psi_j \rangle - \Phi. \quad (4)$$

Здесь $W_j = \gamma_j/\gamma_0$ — нормированная энергия j -й частицы, $\xi = k_0 z / 2\gamma_0^2$ — безразмерная продольная координата, $k_0 = \omega_0/c$ — волновое число, $\omega_0 = 2\pi f_0$ — частота СВЧ волны, θ_j — фаза j -й частицы относительно электромагнитного поля; φ — фаза волны, комплексная амплитуда волны $\hat{F} = F e^{i\varphi}$, $\psi_j = \varphi + \theta_j$ — полная фаза. Величина $F = 2\gamma_0 e |E_z| / mc\omega_0$ есть безразмерная амплитуда продольного электрического поля волны. Параметр $\Delta_0 = 1/\beta_{z0} - 1/\beta_{ph}$ определяет начальную расстройку синхронизма волны с пучком; β_{zj} — продольная безразмерная скорость электронов, β_{ph} — фазовая скорость СВЧ волны, на которую должен быть рассчитан волновод. Угловые скобки в уравнениях (3) и (4) означают усреднение по сгустку.

Параметр $\varepsilon_0 = 2\gamma_0 e |E_a| / mc\omega_0$ — безразмерная величина внешнего электрического поля E_a ; параметр Γ — постоянная ослабления амплитуды сопровождающей волны, характеризующая распределенные потери СВЧ мощности вдоль драйвера. Фазовое возмущение моделируется мнимой добавкой к параметру Γ ; в данной записи этому отвечает второе слагаемое в правой части (4) — Φ .

Параметр взаимодействия пучка с волной J пропорционален кубу параметра Пирса

$$J = \frac{2\gamma_0^3}{\pi mc^2/e} IZ, \quad (5)$$

где

$$Z = \frac{|E_z^2|}{2k_0^2 N} \quad (6)$$

— импеданс связи пучка с волной (N — мощность волны в данной моде).

Цикл расчетов был выполнен для последовательности ускоряющих секций, чередующихся с переходными участками, как и в работе [3], с длинами $l_s = 50$ см

и $l_t = 25$ см соответственно. Вывод СВЧ мощности локализован в переходных участках. Исходные характеристики электронного пучка, ускоряющих полей и вывода СВЧ волны принимались близкими к условиям, исследовавшимся в [3]. Параметры пучка и волны следующие: энергия электронного пучка ~ 2.2 MeV ($\gamma_0 \sim 5.31$), электронный ток $I_b \sim 500$ А, радиус электронного пучка ~ 0.5 см, рабочая мода волновода E_{01} , частота волны f_0 17 GHz ($\lambda \sim 1.76$ см), заправочная мощность в ЛБВ 10 MW, внешнее электрическое поле E_a 1.5 MV/m, постоянная ослабления Γ 0.112.

Мерой фазового возмущения служит дополнительный набег фазы волны $\delta\varphi$ на переходном участке, связанный с безразмерной длиной переходного участка ξ_t соотношением $\Phi = \delta\varphi/\xi_t$. Он задавался как случайная величина (по отношению к номеру переходного участка) с нормальным (гауссовым) распределением плотности вероятности около среднего значения $\langle \delta\varphi \rangle = 0$ с дисперсией $\sigma_{\delta\varphi}$.

Моделирование динамики пучка проводилось при различных значениях $\sigma_{\delta\varphi}$ для различных реализаций (выборок) случайных последовательностей значений $\delta\varphi$ на участках вывода мощности.

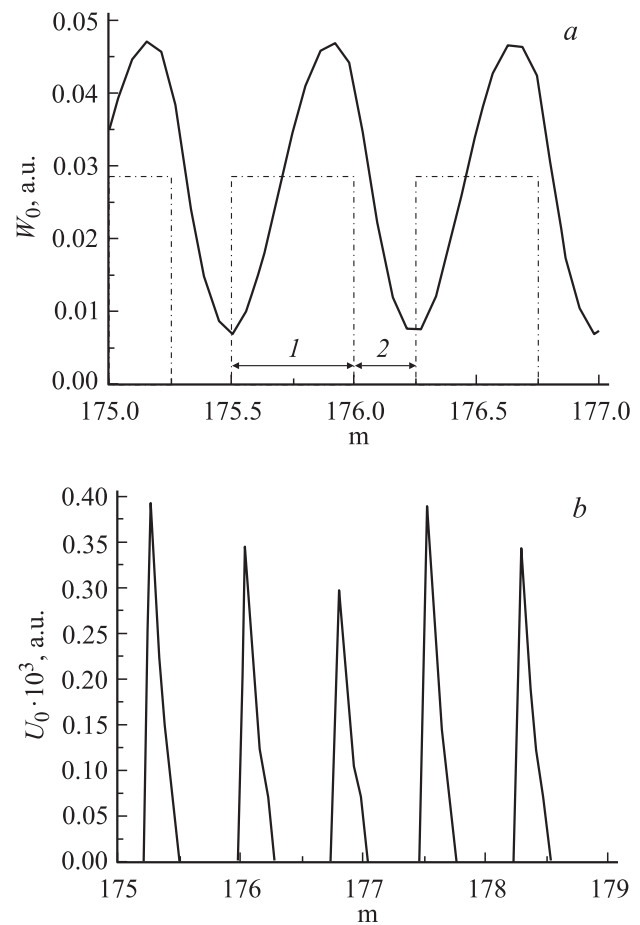


Рис. 2. Фрагменты невозмущенных пространственных распределений мощности сопровождающей СВЧ волны в драйвере (а), выделенной волны (б). Условно показано положение ускоряющих секций (1) и участков вывода мощности (2).

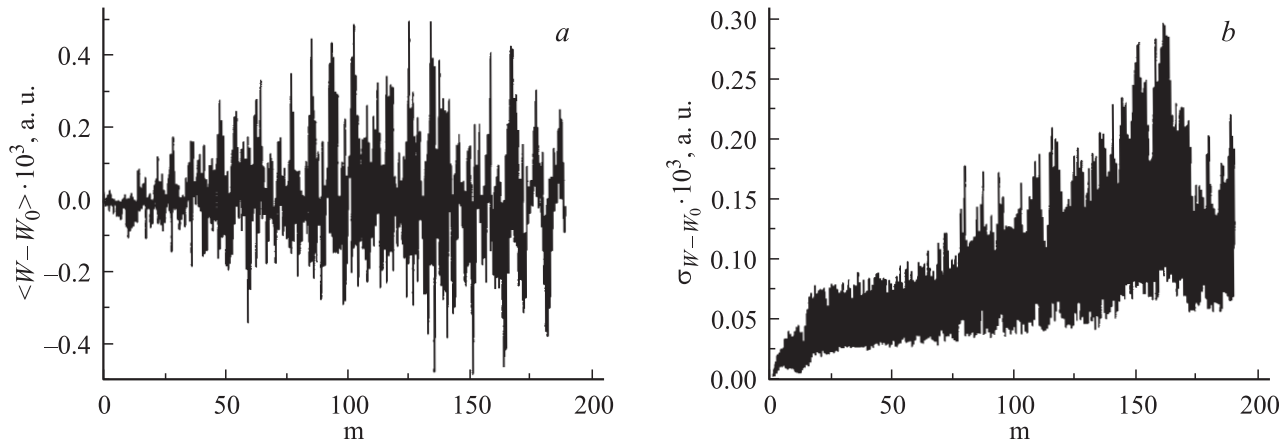


Рис. 3. Статистические характеристики пространственной зависимости отклонения мощности сопровождающей СВЧ волны от невозмущенного режима при $\sigma_{\delta\varphi} \approx 0.3^\circ$. Результат усреднения по 100 случайным выборкам величин фазового набега на ячейку вывода: *a* — среднее значение, *b* — дисперсия.

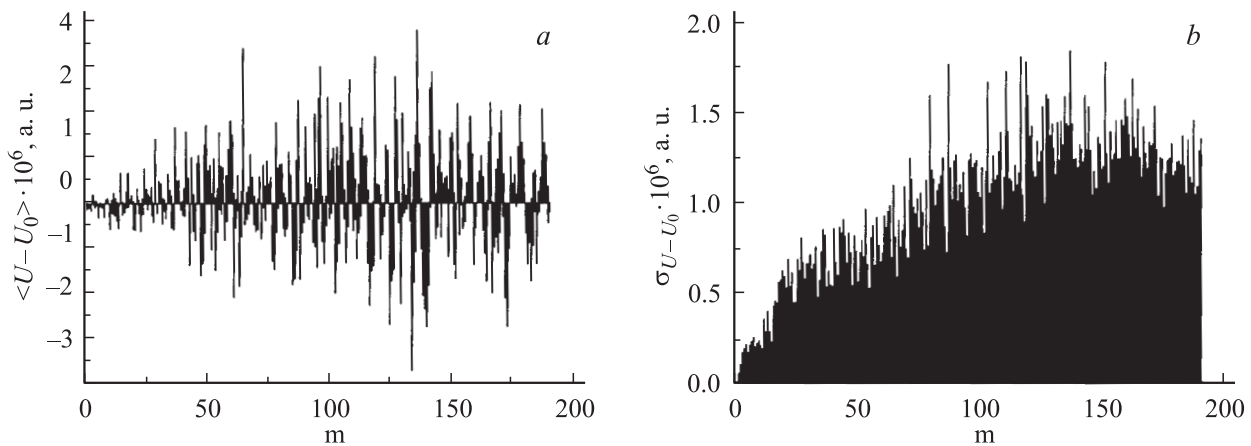


Рис. 4. Обозначения те же, что и на рис. 3.

Выведенная мощность (на единицу длины) в пределах участков вывода в соответствии с уравнением (3) связана с безразмерной мощностью сопровождающей волны $W \sim F^2$ соотношением $U = 2GW$.

В качестве меры фазовых и амплитудных нестабильностей рассматривались отклонения фазы и мощности (как сопровождающей, так и выведенной СВЧ волн) от невозмущенных распределений (соответствующих случаю $\langle \delta\varphi \rangle = \sigma_{\delta\varphi} = 0$) на протяжении всей длины драйвера. Невозмущенные распределения безразмерной мощности W_0 , U_0 (фрагменты на участках $z = 175-177$ и $175-179$ m) показаны на рис. 2.

Для выявления общих характеристик нестабильности проводилось усреднение по достаточно большому количеству выборок величин фазового набега на ячейку вывода при различных значениях $\sigma_{\delta\varphi}$.

На рис. 3, 4 представлены результаты статистической обработки (по 100 выборкам) полученных пространственных зависимостей мощности сопровождающей и выведенной волн на примере $\sigma_{\delta\varphi} \approx 0.3^\circ$.

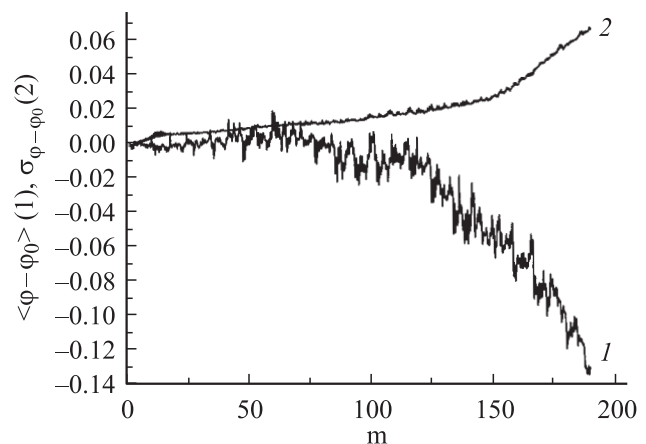


Рис. 5. Статистические характеристики пространственной зависимости отклонения фазы выведенной СВЧ волны от невозмущенного режима при $\sigma_{\delta\varphi} \approx 0.3^\circ$. Результат усреднения по 100 случайным выборкам величин фазового набега на ячейку вывода. *1* — среднее значение, *2* — дисперсия.

На рис. 5 показаны результаты статистической обработки для фазы сопровождающей волны (рассматривается отклонение от невозмущенного распределения φ_0).

Из рис. 3 видно, что отклонения мощности волны порядка 0.0001 в безразмерных единицах, тогда как сама мощность в тех же единицах измеряется сотыми долями единицы (0.01–0.05, рис. 2, *a*). Соответственно из рис. 2, *b* и 4 для выведенной волны отклонения порядка 10^{-6} на уровне $\sim 3 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, относительные отклонения мощности как сопровождающей, так и выведенной волн находятся на уровне долей процентов, что с запасом укладывается в амплитудный допуск 2% для примера [1]. В то же время, согласно рис. 5, фазовая нестабильность имеет масштаб 0.1 rad. Это сопоставимо с допуском в 3° для примера [1]. Накапливающийся характер отклонений мощности и фазы обусловлен скоррелированными вкладами возмущений на отдельных ячейках.

В результате проведенного численного моделирования приходим к выводу: при характерном разбросе набеге фазы на ячейку вывода мощности в драйвере на уровне нескольких долей градуса фазовые и амплитудные нестабильности имеют достаточно малый масштаб, приемлемый для передачи мощности в главный ускоритель коллайдера.

Список литературы

- [1] *Higo T., Kubo K., Yokoya K.* // Proc. Particle Accelerator Conf. (PAC'99). New York, 1999. P. 3435–3437.
- [2] *Sessler A.M.* // Proc. Workshop on the Laser Accelerator of Particles / Ed. P.J. Channel. Los Alamos (New Mexico), 1982. AIP Conf. Proc. 91. 1982. P. 154–159.
- [3] *Elzhov A.V., Kazacha V.I., Perelstein E.A.* // ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования. 1997. Вып. 4, 5 (31, 32). С. 129–131. Тр. II науч. семинара памяти В.П. Саранцева. Дубна, 1998. С. 119–124.
- [4] *Elzhov A.V., Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Kazacha V.I., Perelstein E.A., Sedykh S.N., Sergeev A.P.* // Proc. 6th European Particle Accelerator Conf. (ERAC'98). Stockholm, 1998. P. 472–474.
- [5] *Elzhov A.V., Kaminsky A.K., Kazacha V.I., Perelstein E.A., Sedykh S.N., Sergeev A.P.* // Сообщения ОИЯИ. Е9-2000-294. Dubna, 2000. 17 p.
- [6] *Елжов А.В., Перельштейн Э.А.* // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2. № 4 (127). С. 74–81.
- [7] *Perelstein E.A., Bobyleva L.V., Elzhov A.V., Kazacha V.I.* // Proc. Particle Accelerator Conf. (PAC'97). Vancouver (B.C., Canada), 1997. P. 488–490; Перельштейн Э.А., Бобылева Л.В., Елжов А.В., Казача В.И. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 2. С. 98–102.
- [8] *Elzhov A.V., Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Kazacha V.I., Laziev E.M., Perelstein E.A., Sedykh S.N., Sergeev A.P.* // Proc. Particle Accelerator Conf. (PAC'99). New York, 1999. P. 3393–3395.