

УДК 533.932

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ПУЧКА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ
ИЗЛУЧЕНИЕ В СКРЕЩЕННЫХ ПОЛЯХ В СИНХРОННОМ РЕЖИМЕ****В. П. Милантьев, О. А. Савельев**

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Аналитически решена усредненная система уравнений движения электрона в сопутствующей системе отсчета, движущейся со скоростью электрического дрейфа. В лабораторной системе отсчета найдена длина взаимодействия, на которой происходит максимальная отдача энергии частицы волне. Рассчитана эффективность преобразования энергии, которая возрастает с увеличением начальной энергии частицы.

Авторезонансный механизм взаимодействия электронов с поперечной электромагнитной волной, распространяющейся вдоль постоянного магнитного поля, используется как в целях ускорения электронов, так и для усиления и генерации электромагнитных волн [1, 2]. При авторезонансе условие циклотронного резонанса частицы с волной, распространяющейся со скоростью света,

$$\omega - kv_{\parallel} = \Omega_0 / \gamma \equiv \Omega \quad (1)$$

сохраняется “само собой” за счет взаимной компенсации доплеровского сдвига частоты волны и релятивистского изменения циклотронной частоты электрона.

Здесь ω и k — частота и волновое число волны, соответственно; $\Omega_0 = eB_0 / mc$ — классическая гирочастота электрона с зарядом e и массой m в постоянном магнитном поле $B_0 = (0, 0, B_0)$; γ и v_{\parallel} — релятивистский фактор и продольная составляющая скорости электрона, соответственно.

Если же фазовая скорость волны не равна скорости света, то условие (1) не является интегралом движения, и авторезонанс нарушается. В работах [3, 4] рассматривалась возможность поддержания синхронизма частиц с замедленной электромагнитной волной с помощью сильного поперечного электростатического поля $E_0 = (0, E_0, 0)$. Данное сообщение посвящено изучению преобразования кинетической энергии пучка в электромагнитное излучение в таких условиях.

Рассмотрим систему ковариантных уравнений движения частицы в скрещенных полях в сопутствующей системе отсчета, движущейся со скоростью электрического дрейфа $v_D = cE_0 / B_0$:

$$\frac{du^i}{ds} = \frac{1}{B_0} F^{ik} u_k, \quad (2)$$

где u^i и F^{ik} — компоненты 4-го вектора скорости частицы и тензора электромагнитного поля в сопутствующей системе отсчета;

$ds = \frac{\Omega_0}{c} dS$ — безразмерный релятивистский интервал.

Фаза волны ϑ , плоскополяризованной в направлении электростатического поля, описывается уравнением:

$$\frac{d\vartheta}{ds} = -qn(u^0 + Vu^1 - u^3), \quad (3)$$

где $q = \omega / \Omega_0$; $V = v_D / c$, n — показатель преломления волны.

Решение уравнений (2) и (3), из которых исключены члены, связанные с радиационным трением, искалось в виде:

$$u^0 = \gamma; \quad u^1 = p_{\perp} \sin \theta; \quad u^2 = p_{\perp} \cos \theta; \quad u^3 = p_{\parallel},$$

где θ — фаза циклотронного вращения.

Разность фаз $\psi = \vartheta - \theta$ является резонансной, медленно меняющейся переменной, и по всем прочим комбинациям фаз может быть произведено усреднение. Анализ усредненной системы уравнений показывает наличие интеграла движения $Y \equiv \gamma - p_{\parallel} n \sqrt{1 - V^2}$, который при выполнении соотношения

$$n = 1 / \sqrt{1 - V^2} \quad (4)$$

совпадает с условием авторезонанса (1).

В авторезонансный режим взаимодействия вовлекаются частицы, для которых выполнено условие

$$qY / 1 - V^2 = 1.$$

Выбор начальных условий: $Y = 1$, а $\psi = \pi$, является оптимальным. В этом случае, как показывает аналитическое решение усредненных уравнений движения, в сопутствующей системе отсчета частица отдает волне всю свою кинетическую энергию. В то же время в лабораторной системе отсчета частица сохраняет за собой часть кинетической энергии, связанную с электрическим дрейфом.

Таким образом, минимальное значение энергии в лабораторной системе отсчета с учетом (4) равно:

$$\gamma_{\min}^{\text{лаб}} = 1 / \sqrt{1 - V^2} = n. \tag{5}$$

Данный минимум достигается в точке с продольной координатой в лабораторной системе отсчета:

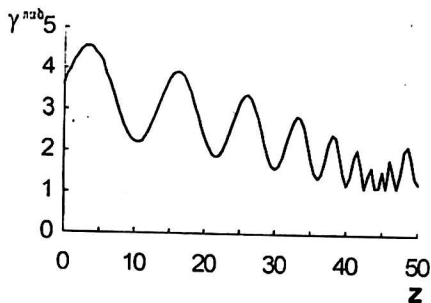
$$z = \frac{2(\gamma_0^{\text{лаб}} / n - 1)}{3n\varepsilon},$$

где $z = Z\Omega_0 / c$ — безразмерная длина взаимодействия;

$\gamma_0^{\text{лаб}}$ — начальное значение энергии в лабораторной системе отсчета;

ε — отношение амплитуды волны к величине постоянного магнитного поля.

Эти результаты хорошо согласуются с численным решением точной системы уравнений движения (2), приведенным на рисунке. Расчет энергии частицы $\gamma^{\text{лаб}}$ проводился при значениях параметров $\varepsilon = 0,05$, $n = 1,2$, $\gamma_0^{\text{лаб}} = 3,6$; $V = 0,553$.



Расчет энергии частицы $\gamma^{\text{лаб}}$

Видимая на графике осцилляция энергии (амплитуда которой уменьшается до нуля в момент наибольшего торможения) связана с большой скоростью циклотронного вращения частицы.

В работе [2] была определена одночастичная эффективность преобразования кинетической энергии в излучение:

$$\eta^{\text{сп}} = \frac{\gamma_0^{\text{лаб}} - \gamma^{\text{лаб}}}{\gamma_0^{\text{лаб}} - 1},$$

где $\gamma^{\text{лаб}}$ — текущее значение энергии частицы в лабораторной системе отсчета.

В рассматриваемых условиях с учетом (5) данная величина достигает максимума, равного:

$$\eta_{\max}^{\text{сп}} = \frac{\gamma_0^{\text{лаб}} - n}{\gamma_0^{\text{лаб}} - 1}. \tag{6}$$

Таким образом, при наличии сильного поперечного электростатического поля энергия частицы в лабораторной системе отсчета ограничена снизу из-за электрического дрейфа. Однако в соответствии с (6) в данных условиях можно достичь весьма значительной эффективности передачи энергии волне в связи с возможностью поддержания точного авторезонанса существенно релятивистских частиц с замедленной волной на всем интервале торможения.

Для учета влияния сил радиационного трения на процесс авторезонансного торможения частицы включим соответствующие члены в исходную систему уравнений (2):

$$\frac{du^i}{ds} = \frac{1}{B_0} F^{ik} + g^i, \quad (7)$$

где $g^i = \beta \left(\frac{d^2 u^i}{ds^2} - u^i u^k \frac{d^2 u_k}{ds^2} \right)$ — компоненты 4-го вектора силы радиационного

трения; $\beta = \frac{2e^2 c}{3B_0 \Omega_0} \ll 1$ [5]. Анализ системы (7) показывает, что в таких условиях минимальная энергия частицы в сопутствующей системе отсчета отличается от единицы на величину порядка β^2 .

Таким образом, силы радиационного трения не оказывают существенного влияния на авторезонансное взаимодействие волны с частицей на участке ее торможения.

Л и т е р а т у р а

1. Милантьев В. П. // УФН. 1997. V. 167. № 1. С. 3.
2. Братман В. Л., Денисов В. Г., Офицеров М. М. Релятивистская высокочастотная электроника. ИПФ. — Горький. 1983. С. 127.
3. Милантьев В. П. // ЖТФ. 1994. V. 64. № 166. С. 166.
4. Милантьев В. П., Савельев О. А. // Вестник РУДН. Сер. Физика. Т. 3. № 1. С. 196.
5. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теоретическая физика. — М., 1988. Т. 2. С. 273.

TRANSFORMATION OF BEAM'S ENERGY INTO AN ELECTROMAGNETIC RADIATION IN THE CROSSED FIELDS IN THE SYNCHRONOUS CONDITIONS

V. P. Milantiev, O. A. Saveliev

Russian Peoples' Friendship University, Moscow, Russia

The system of an electron's motion in the attendant reference system, moving with the electric draft velocity, is solved analytically. The inter-action length in the laboratory reference system, which the transformation of the particle's energy into the radiation is maximal on, is determined. The effectiveness of the energy transformation is calculated; it increases with the particle's initial energy's increase.