

01; 09

© 1992

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЛОВ С ПЕРЕМЕННОЙ  
ФАЗОВОЙ СКОРОСТЬЮС.Д. К о р о в и н, С.Д. П о л е в и н,  
А.М. Р о й т м а н, В.В. Р о с т о в

Эффективность релятивистского карсинотрона может быть повышена при использовании неоднородной электродинамической системы (ЭС). Изменением фазовой скорости и амплитуды, синхронной электронам электромагнитной волны, достигаются благоприятные для энергообмена соотношения между параметрами электронного пучка и сверхвысокочастотного поля [1, 2]. КПД неоднородного релятивистского карсинотрона, как было теоретически показано ранее [2, 3], может достигать более 50%. Однако основное внимание в этих исследованиях уделялось вариации сопротивления связи вдоль пространства взаимодействия и при расчетах использовалось ультрарелятивистское приближение по энергиям электронов.

В настоящей работе исследовалось влияние соотношения между фазовой скоростью  $n$ -1 гармонике электромагнитной волны ( $V_{\phi}$ ) и скоростью электронов на эффективность взаимодействия и рассматривался случай умеренно релятивистских энергий электронов. Численно решалась самосогласованная система уравнений, описывающая энергообмен между электронным пучком и возбуждаемой им электромагнитной волной в стационарном режиме [2, 4] с учетом продольной неоднородности фазовой скорости:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{da}{d\xi} = I \int_0^{2\pi} e^{i\theta} d\theta_0, \quad a(\xi_k) = 0 \\ \frac{d\omega}{d\xi} = \operatorname{Re} \left\{ \left( a - i\alpha \int_0^{2\pi} e^{i\theta} d\theta_0 \right) e^{-i\theta} \right\}, \quad \omega(0) = 1 \\ \frac{d\theta}{d\xi} = 2\gamma_0^2 \left( \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 - \gamma_0^{-2}}} - \beta(\xi)^{-1} \right), \quad \theta_0 \in (0, 2\pi), \quad \text{где} \end{array} \right.$$

$$a = \frac{2\gamma_0 e}{mc^2 k} E, \quad I = \frac{2\gamma_0^5 e}{(\gamma_0^2 - 1)\pi mc^2} JZ;$$

$$\omega = \frac{\gamma}{\gamma_0}, \quad \alpha = \frac{eJ4\gamma_0^2}{mc^3\pi(\gamma_0^2-1)^{3/2}} T;$$

$$\xi = \frac{kz}{2\gamma_0^2}, \quad \beta = \frac{k}{h};$$

$E$  – амплитуда синхронного поля,  $\gamma$  – релятивистский фактор,  $e$ ,  $m$  – заряд и масса электрона,  $k$  – волновое число,  $Z$  – сопротивление связи электронов пучка с „-I” гармоникой электромагнитной волны,  $J$  – ток пучка,  $\alpha$  – параметр высокочастотного пространственного заряда, где

$$T = \frac{I_0(\rho R_B)}{I_0(\rho R_0)} \left[ I_0(\rho R_0) K_0(\rho R_B) - I_0(\rho R_B) K_0(\rho R_0) \right],$$

$I_0$  и  $K_0$  – функция Макдональда и модифицированная функция Бесселя нулевых порядков,  $R_0$  – средний радиус волновода,  $R_B$  – радиус пучка,  $\rho$  и  $h$  – поперечное и продольное волновые числа синхронной волны. Предполагалась отсутствие у электронов поперечных скоростей и их моноэнергетичность.

Из решения системы уравнений и анализа изменений энергии электронов и их относительных фаз вдоль пространства взаимодействия следует, что в случае однородного карсинотрона ( $\beta(\xi) = \text{const}$ ) максимальное значение КПД  $\approx 20\%$  имеет место при значительном превращении начальной скорости электронов над фазовой скоростью синхронной волны, и большинство электронов пучка является пролетными [5]. Быстро пересекая области тормозящих фаз поля, часть электронов не успевает существенно потерять свою кинетическую энергию. В то же время, менее благоприятная группировка в режимах с малой начальной расстройкой синхронизма не позволяет улучшить работу однородной ЛОВ. Повысить эффективность энергообмена возможно, если в начале пространства взаимодействия создать условия, соответствующие благоприятному группированию, а затем за счет изменения параметров синхронной волны предотвратить попадание „быстрых” электронов в область ускоряющих фаз. Для реализации подобной ситуации можно:

а) резко затормозить эти электроны за счет повышения интенсивности отбора их энергии при увеличении сопротивления связи.

б) увеличить фазовую скорость синхронной волны до величины, когда электроны перестают ее обгонять (рис. 1).

Оба варианта служат решению одной и той же задачи, однако принципиальная разница между ЛОВ, неоднородной по сопротивлению связи и по фазовой скорости, состоит в том, что если в первом случае, увеличивая связь в конце пространства взаимодействия, мы пытаемся резко отобрать энергию электронов, то во втором случае, не меняя интенсивности взаимодействия, создаем условия наиболее

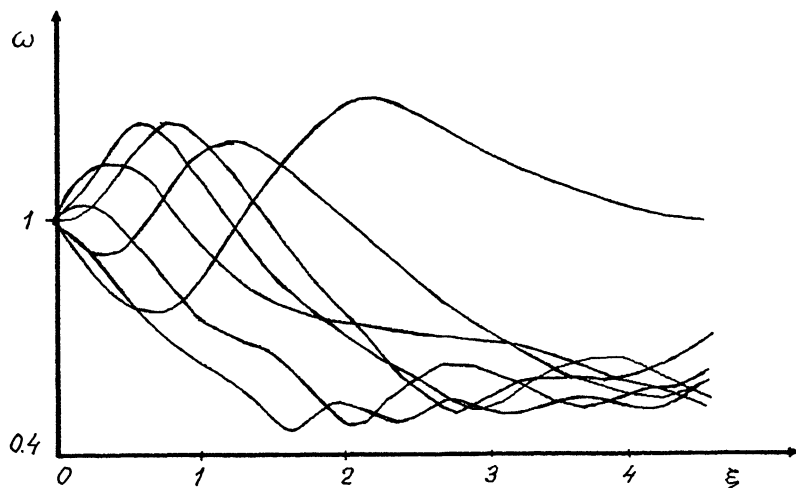
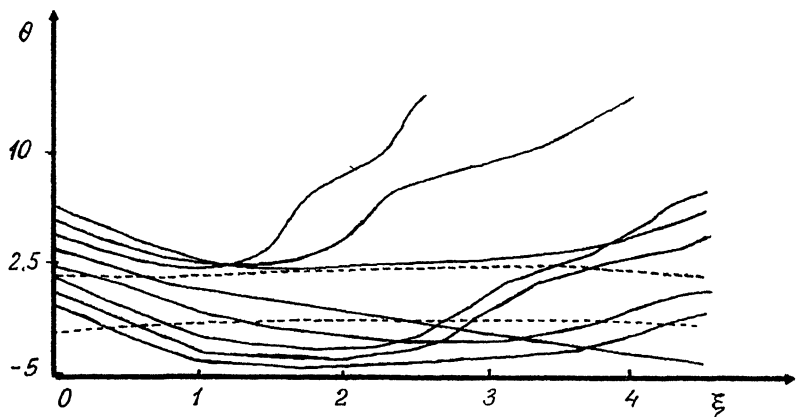


Рис. 1. Изменение относительных фаз и энергий электронов вдоль пространства взаимодействия при  $\nu_0 = 2.2$ ,  $I = 0.0625$ ,  $\alpha = 0.1$ ,  $\beta(0) = 0.68$ ,  $\Delta = 0.12$ ,  $\xi_c = 1.01$ , КПД = 67%. Пунктирной линией ограничена область ускоряющих фаз.

благоприятного распределения электронов по фазам вдоль всего пространства взаимодействия, протяженность которого возрастает. Различия в механизмах отбора энергии объясняют также большую чувствительность неоднородной по фазовой скорости ЛОВ к отклонениям характера изменения  $V_\varphi$  от оптимальных.

При численном моделировании релятивистского карсинотрона с переменной фазовой скоростью исследовался простейший случай ее одноступенчатого изменения вдоль пространства взаимодействия:

$$\beta(\xi) = \beta_0 + \Delta\beta \mathcal{E}(\xi, \xi_c),$$

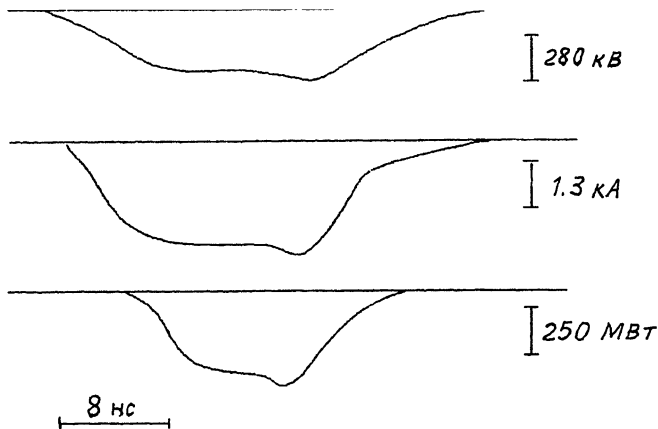


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на катоде (а), тока пучка (б) и огибающей СВЧ импульса (в).

где  $\Delta\beta$  и  $\xi_c$  – величина и координата места скачка фазовой скорости. Расчеты подтверждают возможность улучшения фазировки электронов при увеличении фазовой скорости синхронной волны. За счет этого при  $\gamma \approx 2$  эффективность карсинотрона повышается до 70% (рис. 1). В оптимальных режимах скачок фазовой скорости синхронной гармоники происходит на первой четверти длины периодической структуры, его величина составляет 10–20%. Начальная расстройка синхронизма оказывается в 1,5–2 раза больше, чем в случае однородной ЭС. С увеличением относительной длины первой секции значения  $\Delta\beta$  и  $\beta_0^{-1}$  уменьшаются при снижении эффективности, и для  $\xi_c = \xi_k$  ( $\xi_k$  – полная длина электродинамической системы)  $\Delta\beta = 0$ . С уменьшением начальной энергии электронного пучка величина скачка фазовой скорости возрастает. Оптимальная длина пространства взаимодействия при введении скачка фазовой скорости увеличивается в 1,3–1,6 раз. Расчеты показывают, что неоднородная по  $V_\phi$  ЛОВ наиболее чувствительна к отклонениям значений параметров  $\xi_c$ ,  $\xi_k$  и  $\Delta\beta$  от оптимальных. Так, изменение величины одного из них на 10–15% приводит к срыву решения стационарной задачи ЛОВ.

Экспериментальная часть работы проводилась на ускорителе „СИНУС К” [6], созданном в ИСЭ СО АН СССР. Электродинамическая система карсинотрона состояла из набора колец из нержавеющей стали и собирались таким образом, чтобы ее параметры наиболее полно соответствовали расчетным. Увеличение фазовой скорости вдоль пространства взаимодействия обеспечивалось изменением периода гофрировки структуры. При этом амплитуда гофрировки изменялась таким образом, чтобы сопротивление связи оставалось постоянным. Для транспортировки электронного пучка использовался импульсный соленоид с напряженностью магнитного поля

до 26 кЭ. Сделанные согласно [7] оценки мгновенного разброса электронов по продольным скоростям говорят о том, что в экспериментальных условиях он не превышает 0.5%.

Оптимальный режим для одноступенчатого изменения фазовой скорости реализован при отношении длин секций  $1/3$  и увеличении  $V_{\phi}$  на 10%. Максимальная импульсная мощность, полученная в эксперименте – 500 МВт. КПД при напряжении на катоде 400 кВ и токе пучка 2.8 кА составил 45%. Реализация меньшей, чем расчетная (55%) эффективности вероятно объясняется тем, что в экспериментах из-за фиксированного периода колец ЛОВ оказалось невозможным обеспечить скачок фазовой скорости точно при  $\xi_c$ , вытекающим из теоретических расчетов. Длительность СВЧ импульса составила 12 нс (рис. 2), длина волны излучения – 3.2 см. При  $\gamma \approx 1.6$  с увеличением величины скачка  $V_{\phi}$  получена импульсная мощность 200 МВт, КПД – 40%.

Полученные результаты хорошо согласуются с численными расчетами и подтверждают возможность повышения эффективности релятивистского карсинотрона за счет введения неоднородности по фазовой скорости.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] К о в а л е в Н.Ф., П е т р у х и н а В.И. // Электронная техника, Сер. 1, Электроника СВЧ. 1977. В. 7. С. 102-105.
- [2] К о в а л е в Н.Ф. Автореф. канд. дис. Горький, 1983. С. 173
- [3] К о в а л е в Н.Ф., П е т р у х и н а В.И., С м о р г о н с к и й А.В. // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. В. 7. С. 1547-1550.
- [4] К о в а л е в Н.Ф., П е т е л и н М.И., Р а й з е р М.Д., С м о р г о н с к и й А.В. В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1979. С. 76-113.
- [5] Г и н з б у р г Н.С. и др. В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1988. С. 37-75.
- [6] Б ы к о в Н.М., И в а н о в В.Н. и др. // ПТЭ. 1991. В. 2. С. 38-40.
- [7] К о р о в и н С.Д., П е г е л ь И.В. // ЖТФ. В печати.

Институт сильноточной  
электроники СО РАН,  
Томск

Поступило в Редакцию  
10 февраля 1992 г.