

УДК 621.385.632

## ГРУППИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ОПТИМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ КАРСИНОТРОДА

© 2011 г. М. В. Назарова, В. А. Солнцев, В. О. Мелихов

Поступила в редакцию 16.09.2010 г.

Исследованы процессы группирования электронов в карсинотроде – лампе обратной волны с авто-модуляцией эмиссии электронов – в найденном ранее режиме работы прибора с высоким КПД. Предложено физическое объяснение получения КПД порядка 80%.

### ВВЕДЕНИЕ

Карсинотрод представляет собой лампу обратной волны (ЛОВ) с цепью катодной обратной связи (КОС), по которой мощность выходного сигнала ЛОВ полностью или частично передается на катод и модулирует электронный поток, влетающий в замедляющую систему (ЗС) [1]. Физические соображения, теоретическое исследование и моделирование стационарных и нестационарных процессов в карсинотроде показали возможность существенно-го увеличения КПД карсинотрода (до 80%) по сравнению с обычной ЛОВ при сохранении присущей ЛОВ электронной перестройки частоты [2–4]. Целью данной работы является анализ трансформации траекторий и группировки электронов в процессе установления колебаний для найденного в [4] режима работы карсинотрода с КПД = 80%.

### 1. ОПИСАНИЕ МОДУЛЯЦИИ ЭМИССИИ

Напряжение между катодом и сеткой (первым анодом) электронной пушки карсинотрода представляет сумму статического напряжения и ВЧ напряжения, передаваемого по КОС с выхода ЗС

$$U = U_0 + U_1 \cos \omega t_0 = U_{\max} (1 - \mu + \mu \cos \omega t_0), \quad (1)$$

где  $\mu = U_1/U_{\max}$  – коэффициент модуляции по отношению к максимальному напряжению  $U_{\max} = U_0 + U_1$ . Как и в [4], рассматриваем термокатоды и используем для тока эмиссии  $J$  закон степени “3/2”

$$J = P U^{3/2}, \quad (2)$$

где  $P$  – первеанс. В процессе установления колебаний величина  $\mu$  возрастает, так как увеличивается напряжение  $U_1$ . При малом ВЧ-напряжении отсечки тока нет когда  $\mu \leq 0.5$ . С ростом  $\mu$  появля-

ется отсечка тока с углом отсечки  $\theta$ , определяемым соотношением

$$\cos \theta = 1 - 1/\mu \quad \text{при } \mu > 0.5. \quad (3)$$

При  $\mu = 1$  имеем  $\theta = \pi/2$ , что соответствует режиму класса “В” диода катод–сетка.

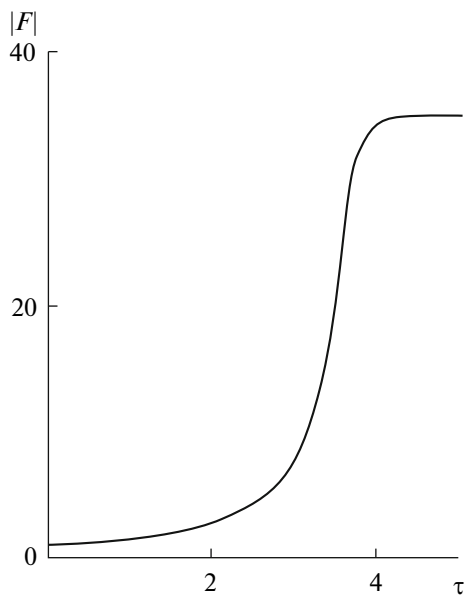
При моделировании процесса установления колебаний в карсинотроде используется система уравнений, математическая модель и программа GAMS3, приведенные в [4]. Рассматривается безразмерное медленно меняющееся во времени поле  $F(0, \tau) = U(0, \tau)/U_{\text{нор}}$  на выходе ЗС, определяющее модулирующее эмиссию поле на катоде  $F_k(\tau) = K_{\text{ОС}} F(0, \tau)$ , где  $\tau$  – безразмерное время,  $K_{\text{ОС}}$  – коэффициент передачи цепи КОС,  $U_{\text{нор}}$  – постоянная нормировки. Коэффициент модуляции  $\mu$  удобно представить через  $|F(0, \tau)|$  в виде

$$\mu = \frac{|K_{\text{ОС}}| U(0, \tau)}{U_0 + |K_{\text{ОС}}| U(0, \tau)} = \frac{GF(0, \tau)}{1 + GF(0, \tau)},$$

где параметр  $G$  имеет смысл параметра обратной связи и определяется отношением модуля коэффициента передачи цепи КОС к величине нормированного статического напряжения.

### 2. АНАЛИЗ ТРАЕКТОРИЙ И ГРУППИРОВКИ ЭЛЕКТРОНОВ

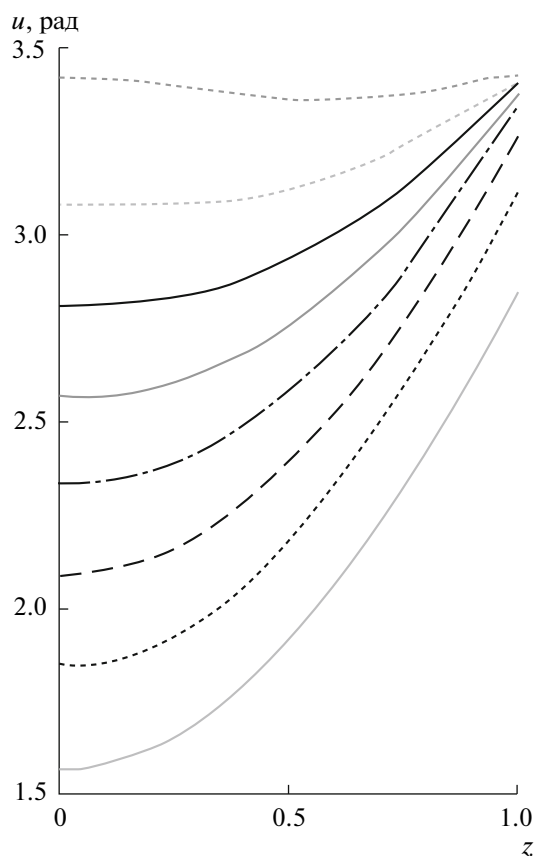
Для моделирования траекторий в программе GAMS3 задавались безразмерные параметры, введенные в [4]:  $L$  – безразмерная длина лампы,  $\varepsilon$  – параметр усиления,  $G$  – параметр обратной связи,  $\varphi_{\text{ОС}}$  – фаза обратной связи. На рис. 1–4 представлены результаты, показывающие изменение безразмерного ВЧ-поля  $|F|$  на выходе ЛОВ и траекторий электронов в процессе установления колебаний для варианта  $L = 1$ ,  $\varepsilon = 0.1$ ,  $G = 1.3$ ,  $\varphi_{\text{ОС}} = -2.3$ . Этому варианту соответствует максимальный



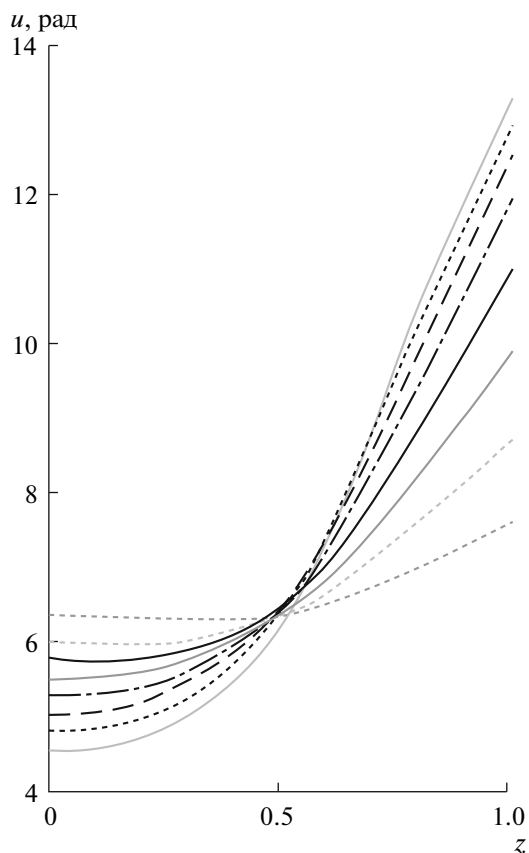
**Рис. 1.** Изменение амплитуды поля на выходе карсинотрода в процессе установления колебаний.

КПД карсинотрода, равный 82% в установившемся режиме, который вычисляется через  $F(0, \tau)$  по формуле (35), приведенный в статье [4]. Отметим, что на графиках рис. 2–5  $z$  – безразмерная координата вдоль длины лампы (нормированная на геометрическую длину замедляющей системы лампы),  $u$  – фаза электронов относительно бегущей обратной волны

Из рис. 1 видно, что на начальном этапе развития колебаний при  $0 < \tau < 3$  происходит медленное нарастание выходного поля, которое сменяется при  $\tau \approx 3$  его интенсивным ростом и переходом в стационарное состояние с максимальным для данного варианта КПД. Такое поведение поля можно объяснить изменением группировки электронов во времени, которое представлено на рис. 2–4 для фазовых траекторий. При  $\tau < 3$  происходит медленное образование сгустка электронов, а при  $\tau = 3$  образуется плотный сгусток в середине лампы ( $z \approx 0.5$ ). Далее он смещается к началу лампы, переходя в интенсивное ВЧ-поле и продолжая уплотняться. В результате получается указанный высокий КПД. На рис. 5 показано изменение во времени коэффици-



**Рис. 2.** Фазовые траектории электронов в начале установления колебаний,  $\tau = 2$ .



**Рис. 3.** Фазовые траектории электронов при переходе в режим большого КПД,  $\tau = 3$ .

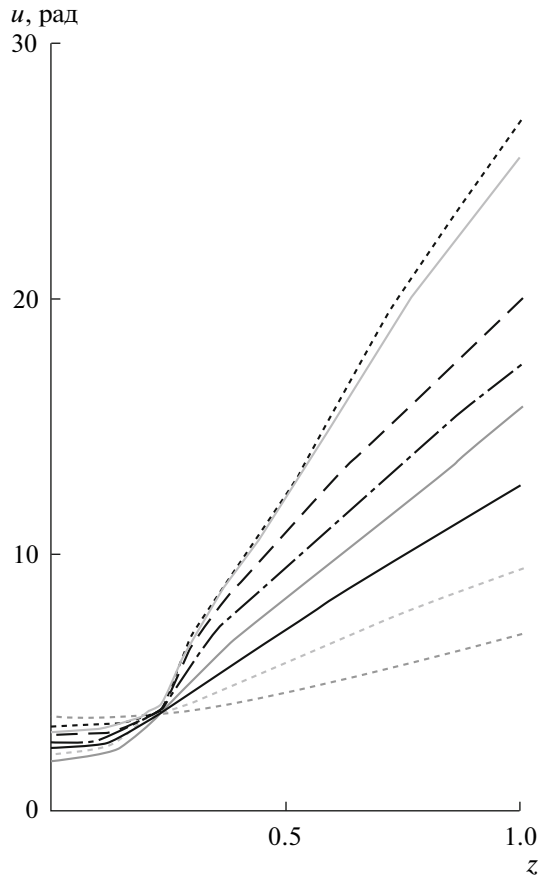


Рис. 4. Фазовые траектории электронов в установившемся режиме при КПД 80%,  $\tau = 5$ .

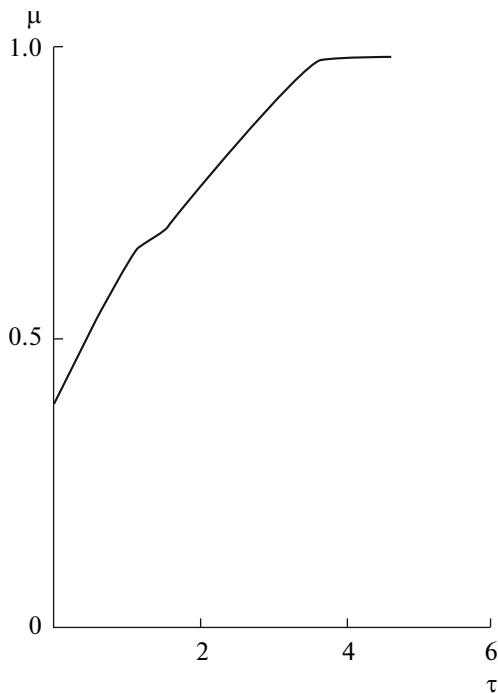


Рис. 5. Изменение коэффициента модуляции поля на катоде в процессе установления колебаний.

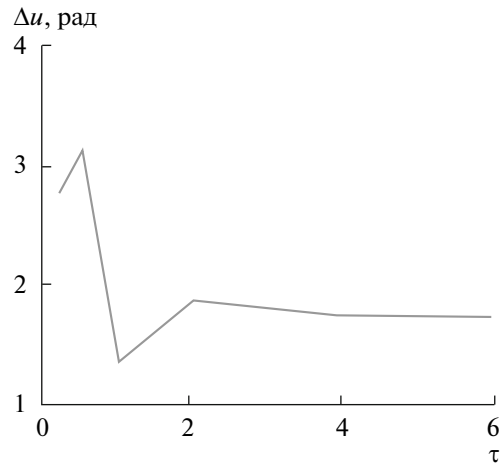


Рис. 6. Изменение разброса фаз электронов в сгустке.

ента модуляции  $\mu$  с максимальным значением  $\mu = 0.98$  в стационарном режиме. Таким образом, образованный катодом и сеткой (первым анодом) диод переходит в режим работы класса “В” с небольшой фазовой шириной сгустка (рис. 6), что объясняет полученный высокий КПД.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В начале переходного процесса при малой амплитуде колебаний модуляция эмиссии слабая и требуется достаточно большая длина для самовозбуждения карсинотрода. При правильно подобранной фазе катодной обратной связи модуляция эмиссии увеличивается, сгустки электронов уплотняются, отдают свою энергию полю на начальном участке ЗС и устанавливается стационарное одночастотное состояние с высоким КПД 80%. При других параметрах КОС возможно получение автомодуляции и хаотизации колебаний, на что указывалось в [4]. Эти процессы также могут быть рассмотрены с помощью программы GAMS3.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-02-00859-а).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солнцев В.А. Карсинотрод. Патент РФ № 2121194RU2121194C1. // Б.И. № 30. 27.10.1998 г.
2. Солнцев В.А. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т. 6. № 1. С. 54.
3. Солнцев В.А., Колтунов Р.П., Мелихов В.О. // РЭ. 2005. Т. 50, № 4. С. 483.
4. Мелихов В.О., Назарова М.В., Солнцев В.А.// РЭ. 2009. Т.54. № 12. С.1481.