

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

## **Предгенерационный режим работы карсинотрода**

### **АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 421 группы  
направления 03.03.03 - Радиофизика  
факультета нелинейных процессов  
Цуненко Александра Игоревича

Научный руководитель  
ассистент кафедры электроники,  
колебаний и волн, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Г.М. Вдовина

Зав. кафедрой электроники,  
колебаний и волн, член-корр.РАН,  
д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Д.И. Трубецков

Саратов 2017 год

## Введение

Исследование волновых процессов при взаимодействии электронного потока и электромагнитной волны является одним из центральных направлений исследований в радиофизике с акцентом на сверхвысокочастотную вакуумную электронику. Новый всплеск интереса к таким исследованиям связан с традиционными проблемами по освоению миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. Возможность применения полевых катодов, с которых можно получить большую плотность тока, имеющих длительное время жизни, работающих при температуре окружающей среды и требующих небольшие значения приложенного напряжения послужила основой для новых идей и модификации известных устройств и приборов.

В целом использование полевой эмиссии представляет определённый интерес в СВЧ диапазоне. При применении автоэмиссионных катодов модуляция эмиссии оказывается эффективной из-за сильной зависимости тока эмиссии от поля на катоде, что позволяет управлять электронным потоком. Также это позволяет обеспечить практически мгновенную готовность прибора к работе и избавиться от необходимости источника питания катода. Кроме того, становится принципиально возможным создание устройств компактных размеров и сравнительно легкого веса, что отвечает тенденциям последних лет.

В плане развития теории подобных устройств следует выделить работы группы В. А. Солнцева [1 - 7], посвященные исследованию процессов в лампе обратной волны с автомодуляцией эмиссии (карсинотрод). Прибор сочетает принципы работы ЛОВ и клистрода. Для создания карсинотрода могут быть использованы электронные пушки с модуляцией эмиссии, применяемые в клистродах, индуктивных выходных лампах телевизионных передатчиков (ИОТ), или многолучевые пушки с модуляцией эмиссии.

В работе [1-4] предложена и описана схема карсинотрода, который представляет собой лампу обратной волны (ЛОВ) с введённой автомодуляцией эмиссии (рис. 1).

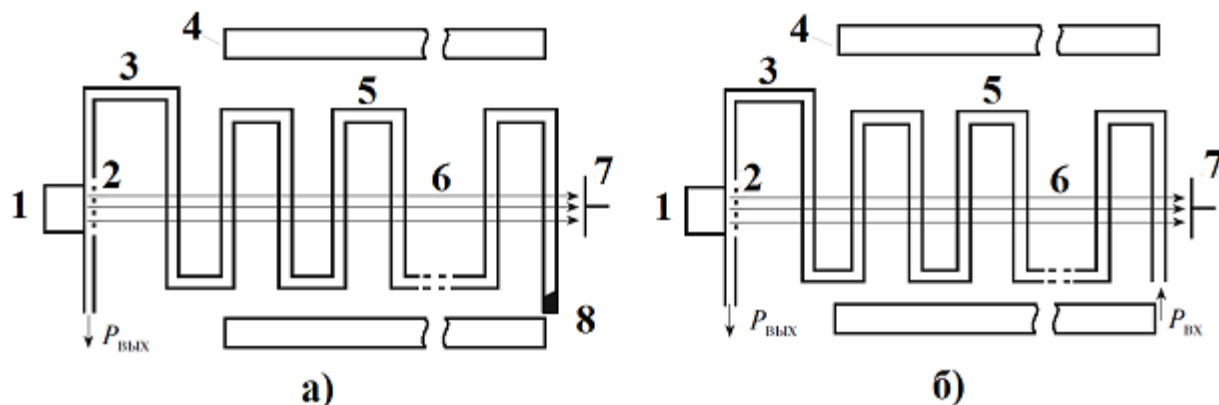


Рис. 1. Схема карсинотрода а) генератор ( $P_{вх} = 0$ ), б) усилитель обратной волны ( $P_{вх} \neq 0$ ):

1 – катод, 2 – модуляция эмиссии, 3 – катодная обратная связь, 4 – фокусирующая система, 5 – замедляющая система, 6 – электронный пучок, 7 – коллектор, 8 – согласованная нагрузка.

Чтобы реализовать автомодуляцию эмиссии в карсинотроде, на катод передается высокочастотное (ВЧ) выходное поле замедляющей системы. Для этого используются дополнительные электроды, образующие цепь обратной связи между замедляющей системой и катодом. В итоге сгруппированный по плотности поток возникает непосредственно на катоде. При влёте в замедляющую систему сгруппированный пучок сразу попадает в сильное ВЧ-поле обратной волны. Если выполнены условия синхронизма, электронные сгустки сразу начинают отдавать энергию полю, которое максимально у выхода замедляющей системы.

Результаты теоретических исследований и моделирования процессов в карсинотроде [2 – 4, 6, 7] показали, что это обстоятельство приводит к значительному увеличению КПД по сравнению с обычной ЛОВ. Таким образом, если в обычной ЛОВ КПД составляет 10 - 15 %, то в карсинотроде с автоэмиссионным катодом можно получить 35 % при том же параметре усиления. В некоторых случаях, как было показано в работах [6, 7],

возможно более существенное увеличение КПД – до 70 %. Такой результат был получен в режиме слабой автомодуляции колебаний при увеличении коэффициента обратной связи между выходом замедляющей системы и катодом и уменьшении статического поля в промежутке катод-сетка. Возможность значительного повышения КПД лампы при введении автомодуляции подтверждено численным моделированием нелинейных процессов в приборе на основе метода крупных частиц [5 - 7]. Важным является тот факт, что посредством выбора катодной обратной связи можно обеспечить широкую полосу электронной перестройки частоты. Для этого необходимо, чтобы цепь катодной обратной связи обеспечивала модуляцию эмиссии на катоде в нужной фазе во всей полосе частот.

Лампа обратной волны О типа обычно применяется как источник СВЧ сигналов с электрической перестройкой в большом диапазоне частот. Но при токах пучка, меньших пускового, генератор может работать как усилитель шумовых флуктуаций электронного потока. В этом режиме устройство может быть использовано в качестве генератора СВЧ шума.

Целью выпускной квалификационной работы является исследование предгенерационного режима карсинотрода. При этом учитывается влияние поля пространственного заряда. Теоретический анализ предгенерационного режима работы изучается в рамках одномерной модели ЛОВ с ограниченным по направлению электронным потоком. На входе в пространство взаимодействия имеется как заданная шумовая модуляция электронного потока, так и автомодуляция эмиссии. Можно считать, что все флуктуационные процессы стационарны и рассматриваются с точки зрения гармонического анализа шумов. Рассматривается случай, когда флуктуации электронного потока определяются только флуктуациями тока пучка, а флуктуациями скорости можно пренебречь.

При анализе используется традиционный для вакуумной СВЧ электроники метод последовательных приближений. В первом приближении получена зависимость спектральной плотности мощности шума (СПМШ) от

различных параметров исследуемой системы. В основном задача состоит в том, чтобы рассмотреть, как именно наличие пространственного заряда и предварительной модуляции эмиссии скажется на кривых СПМШ.

Первая глава выпускной работы посвящена описанию принципа действия карсинотрода. Во второй главе сформулированы основные соотношения и начальные условия, получено выражение для напряжённости электрического поля. В третьей главе приведены графики зависимости СПМШ от параметров исследуемой системы.

## Решение задачи с учетом пространственного заряда и предварительной модуляции

Для анализа используем уравнения линейной теории ЛОВ, полученные ранее в безразмерном виде:

$$\begin{cases} \frac{dF}{d\xi} - j\zeta F = I \\ \frac{d^2 I}{d\xi^2} + \sigma^2 I = -jF \end{cases} \quad (1)$$

где  $\xi = C_0 x \frac{\omega}{v_e}$  безразмерная координата,  $I$ ,  $F$ -нормированные амплитуды 1 гармоники ВЧ тока пучка и поля системы соответственно,  $\zeta = b - id$  ( $b$  – параметр расстройки электронов и фазовой скорости волны ЗС,  $d$  – параметр потерь ( $d=0$ )),  $\sigma = 4QC = \Gamma(\omega_{nl}/\omega C)^2$  - параметр пространственного заряда, определяется плазменной частотой  $\omega_{nl}$ , частотой  $\omega$ , коэффициентом депрессии сил пространственного заряда  $\Gamma$ .

С помощью преобразования Лапласа (без учета потерь,  $d = 0$ ) найдем интегральный вид уравнений системы (1)

$$\begin{cases} s\tilde{F}(s) - f(+0) - jb\tilde{F}(s) = L\{I\} \\ s^2\tilde{I} - \tilde{i}(+0)s + \sigma^2\tilde{I} = -L\{-jF\} \end{cases} \quad (2)$$

$$\tilde{F}(s) = L\{I\} \frac{1}{s - jb} + f(+0) \frac{1}{s - jb}$$

$$F = e^{jb\xi} \int_0^\xi I(\tau) d\tau + f(+0)e^{jb\xi}$$

$$\tilde{I}(s^2 + \sigma^2) = L\{-jF\} + \tilde{i}(+0)s$$

$$\tilde{I} = L\{-jF\} \frac{1}{(s^2 + \sigma^2)} + \tilde{i}(+0) \frac{s}{(s^2 + \sigma^2)}$$

$$I = -\int_0^\xi jF(k) \frac{1}{\sigma} \sin \sigma(x - k) + I(0) \cos \sigma\xi$$

В результате преобразования Лапласа с учетом начальных условий отличных от нуля получаем интегральный вид уравнений

$$\begin{cases} F = e^{jb\xi} \int_0^\xi I(\tau) e^{-jbr} d\tau + F(0) e^{-jb\xi} \\ I = -j \frac{1}{\sigma} \int_0^\xi F(k) \frac{e^{j\sigma(\xi-k)} - e^{-j\sigma(\xi-k)}}{2j} + I(0) \frac{e^{j\sigma\xi} - e^{-j\sigma\xi}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

Систему уравнений (3, 4) решаем с помощью метода последовательных приближений. Подставляем холодное поле  $F(0) e^{-jb\xi}$  в уравнение (4) на место  $F(k)$  и решаем его.

$$\begin{aligned} I &= -\frac{1}{\sigma} \int_0^\xi F(0) e^{-jbk} \frac{e^{j\sigma(\xi-k)} - e^{-j\sigma(\xi-k)}}{2} dk + I(0) \frac{e^{j\sigma\xi} - e^{-j\sigma\xi}}{2} = \\ &= -\frac{F(0)}{2\sigma} \left[ e^{j\sigma\xi} \int_0^\xi e^{-jk(\sigma-b)} dk - e^{-j\sigma\xi} \int_0^\xi e^{jk(\sigma+b)} dk \right] + I(0) \frac{e^{j\sigma\xi} - e^{-j\sigma\xi}}{2} = \\ &= -\frac{F(0)}{2\sigma} \left[ \frac{e^{j\xi b}}{-j(\sigma-b)} - \frac{e^{j\sigma\xi}}{-j(\sigma-b)} - \frac{e^{j\xi b}}{j(\sigma+b)} + \frac{e^{-j\sigma\xi}}{j(\sigma+b)} \right] + \\ &+ I(0) \left( \frac{e^{j\sigma\xi}}{2} - \frac{e^{-j\sigma\xi}}{2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

И теперь подставляем выражение для высокочастотного тока (5) в уравнения возбуждения (3).

$$\begin{aligned} F &= e^{-jb\xi} \left\langle \int_0^\xi -\frac{F(0)}{2\sigma} \left[ \frac{e^{jrb}}{-j(\sigma-b)} - \frac{e^{j\sigma r}}{-j(\sigma-b)} - \frac{e^{jrb}}{j(\sigma+b)} + \frac{e^{-j\sigma r}}{j(\sigma+b)} \right] e^{-jbr} d\tau + \right. \\ &+ \left. \int_0^\xi I(0) \left( \frac{e^{j\sigma r}}{2} - \frac{e^{-j\sigma r}}{2} \right) e^{-jbr} d\tau \right\rangle + F(0) e^{-jb\xi} \\ F &= e^{-jb\xi} \left\langle \int_0^\xi -\frac{F(0)}{2\sigma} \left[ \frac{1}{-j(\sigma-b)} - \frac{e^{j\tau(\sigma-b)}}{-j(\sigma-b)} - \frac{1}{j(\sigma+b)} + \frac{e^{-j\tau(\sigma+b)}}{j(\sigma+b)} \right] d\tau + \right. \\ &+ \left. \int_0^\xi I(0) \left( \frac{e^{j\tau(\sigma-b)}}{2} - \frac{e^{-j\tau(\sigma+b)}}{2} \right) d\tau \right\rangle + F(0) e^{-jb\xi} \\ F &= e^{-jb\xi} \left\langle -\frac{F(0)}{2\sigma} \left[ \frac{1}{-j(\sigma-b)} - \frac{e^{j\xi(\sigma-b)} - 1}{(\sigma-b)^3} - \frac{1}{j(\sigma+b)} + \frac{e^{-j\xi(\sigma+b)} - 1}{(\sigma+b)^2} \right] + \right. \\ &+ \left. I(0) \left( \frac{e^{j\xi(\sigma-b)} - 1}{2j(\sigma-b)} - \frac{e^{-j\xi(\sigma+b)} - 1}{-2j(\sigma+b)} \right) \right\rangle + F(0) e^{-jb\xi} \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, выражение (12) соответствует электрическому полю в первом приближении в безразмерном виде.

Чтобы получить выражение для искомого значения электрического поля в начале системы  $F(0)$  при отсутствии входного сигнала, положим  $F(L) = 0$ . Тогда из уравнения (12) следует

$$F(0) = \frac{j\sqrt[3]{\left(\pi^3 \frac{I_0}{I_n} \frac{1}{4}\right) F_2}}{1 + \left(\pi^3 \frac{I_0}{I_n} \frac{1}{4}\right) F_1 + Y\sqrt[3]{\left(\pi^3 \frac{I_0}{I_n} \frac{1}{4}\right) F_2}} \quad (7)$$

где:

$$F_1 = \frac{(j(\theta_p - \Phi_0) - e^{j(\theta_p - \Phi_0)} + 1)}{2\theta_p(\theta_p - \Phi_0)^2} - \frac{(j(-\theta_p - \Phi_0) - e^{-j(\theta_p + \Phi_0)} + 1)}{2\theta_p(-\theta_p - \Phi_0)^2}$$

$$F_2 = \frac{(\beta_e l + \theta_p)(e^{j(\theta_p - \Phi_0)} - 1)(-\theta_p - \Phi_0) - (\beta_e l - \theta_p)(e^{j(\theta_p + \Phi_0)} - 1)(\theta_p - \Phi_0)}{2\theta_p(\Phi_0^2 - \theta_p^2)}$$

$\Phi_0 = -b2\pi CN$  - относительно невозмущенный угол пролета,  $\theta_p = \sigma 2\pi CN$  - плазменный угол пролета,  $\beta_e l = 2\pi N$ ,  $N$  - электрическая длина лампы,  $I_0$  ток пучка,  $I_n$  - ток генерации.



## Спектральная плотность мощности шума

Выражение для спектральной плотности мощности шума (СПМШ) на выходе ЛОВ имеет вид:

$$S(\Phi_0) = \frac{\overline{|E(0)|^2}}{2\beta_0^2 K} \quad (8)$$

На основании уравнения для СПМШ (14), выражения для напряженности электрического поля (13) и соотношения (3) построены зависимости СПМШ от относительного невозмущенного угла пролета  $\Phi_0$  при различных параметрах системы.

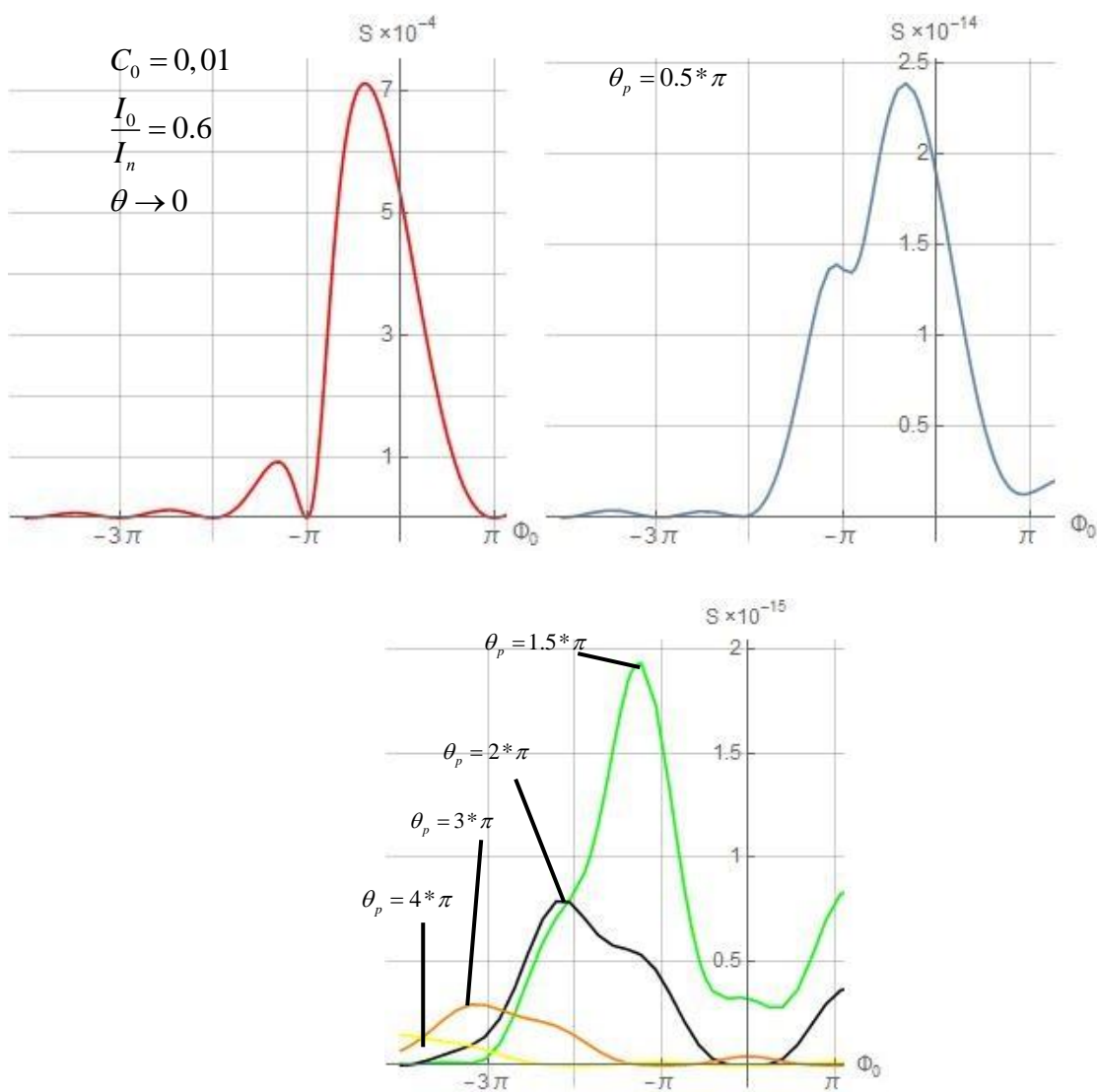


Рис. 2

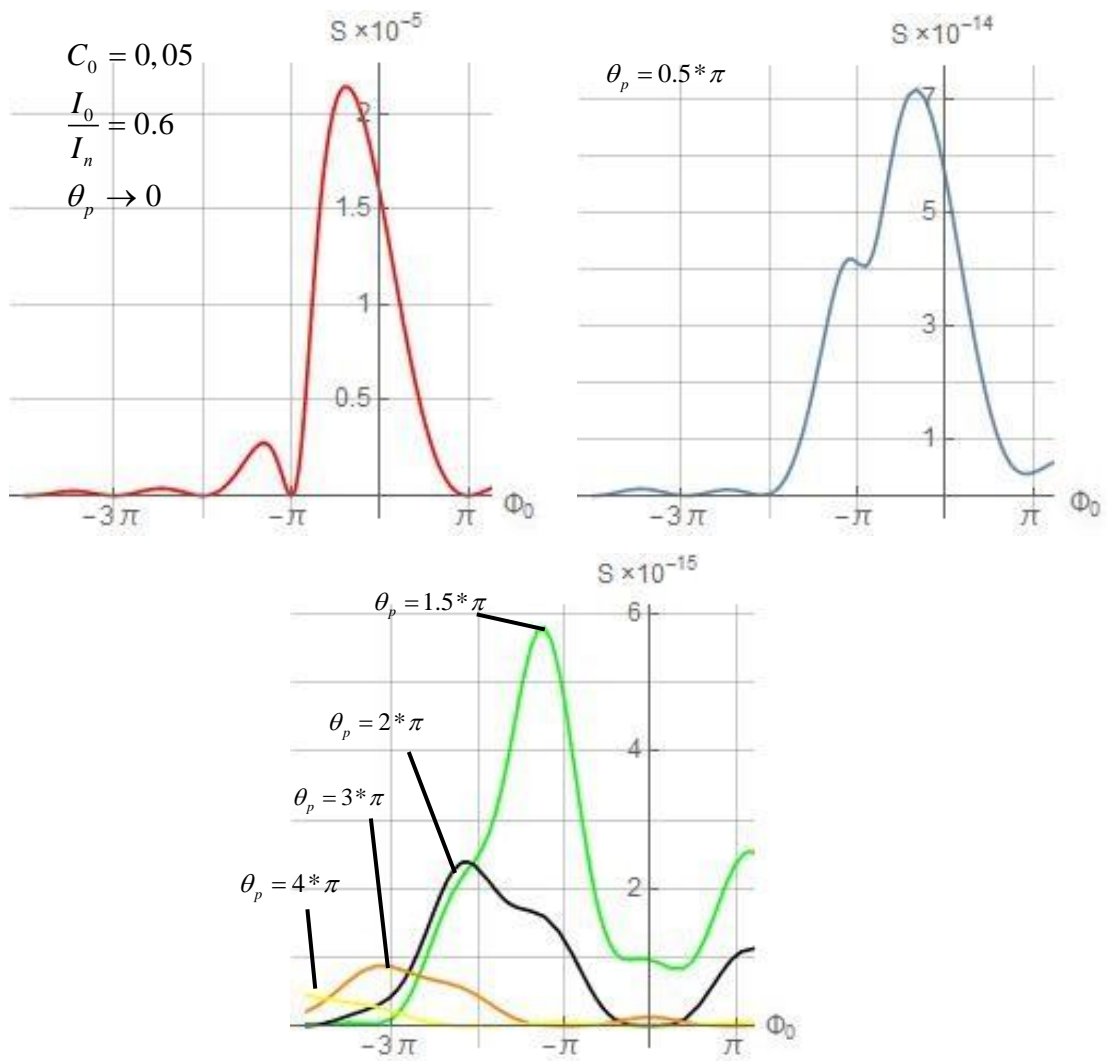


Рис. 3

На рис. 2 и 3 показана зависимость функции спектральной плотности мощности шума (СПМШ) от невозмущенного относительного угла пролета  $\Phi_0$  при различных значениях параметра пространственного заряда  $\theta_p$ . Как следует из рисунков, чем больше плазменный угол пролета  $\theta_p$ , тем ниже максимальное значение функции СПМШ, причем оно сдвигается влево.

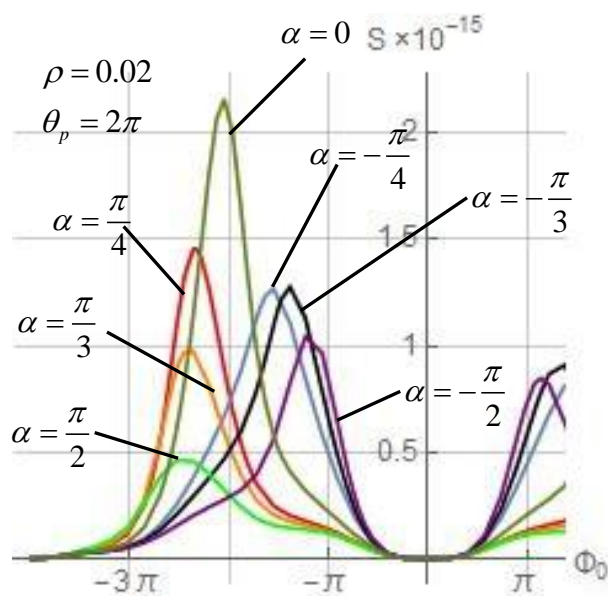


Рис. 4

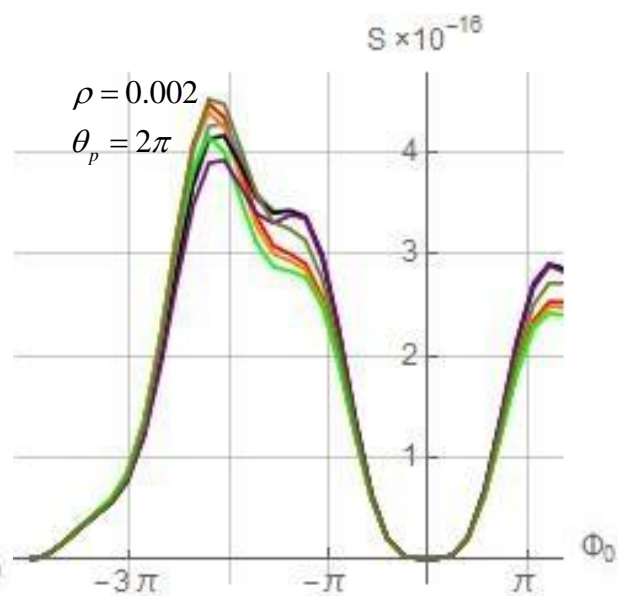


Рис. 5

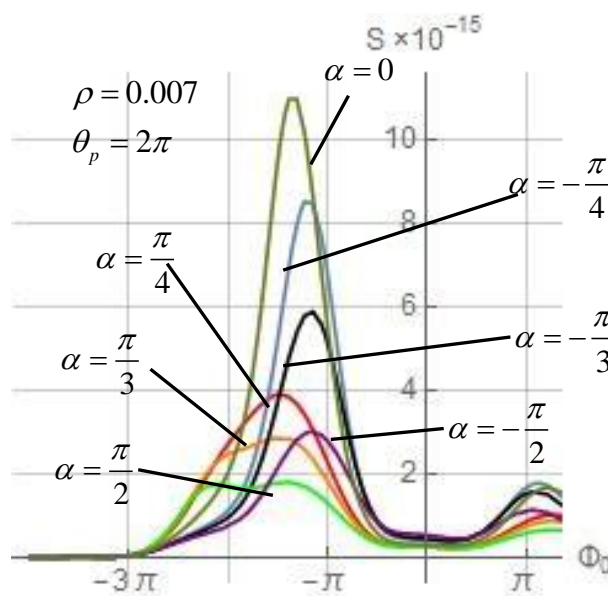


Рис. 6

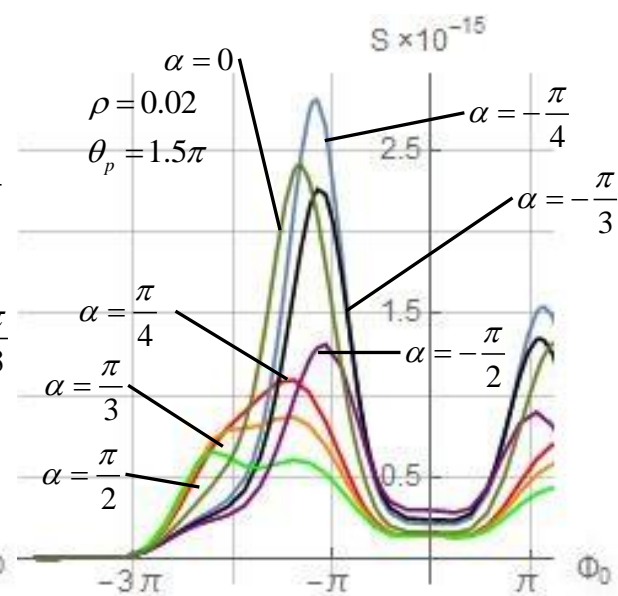


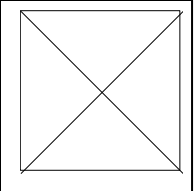
Рис. 7

На рис. 4, 5, 6 и 7 показана зависимость СПМШ от невозмущенного относительного угла пролета  $\Phi_0$  при разных значениях фазы  $\alpha \in \left[-\frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{4}\right]$ . Из графиков можно сделать вывод, что при нулевом значении фазы СПМШ имеет максимальное значение, но уменьшив плазменный угол пролета  $\theta_p$  с  $2\pi$  до  $1,5\pi$  максимальное значение выходит при  $-\frac{\pi}{4}$ . Уменьшив  $\rho$  в 10 раз фазы начинают сходиться к друг другу, однако увеличив  $\rho$  получаем расхождение.

## Выводы

Был исследован предгенерационный режим работы карсинотрода и аналитически получено выражение для спектральной плотности мощности шума. Результаты в предельном случае согласуются с известными результатами одномерной теории.

С изменением фазы параметра предварительной модуляции меняется положение максимума СПМШ (по оси  $\Phi_0$ ). С увеличением отношения тока пучка к пусковому повышается значение СПМШ. С увеличением плазменного угла пролета, уменьшается максимум СПМШ и сдвигается в сторону более отрицательных  $\Phi_0$  ( $\Phi_0 = -\theta_p$ ). С увеличением модуля параметра предварительной модуляции  $\rho$  растет максимум СПМШ, а в некоторых случаях появляются дополнительные максимумы



## Список литературы

1. Солнцев В.А. Карсинотрод. Патент на изобретение №2121194RU С1.Б.И. №30.27.10.98г.
2. Солнцев В.А. Нелинейные явления в вакуумных микроэлектронных структурах // Изв.вузов «ПНД». 1998. Т.6, № 1. С. 54.
3. Solntsev V. A. Nonlinear analysis of a carcinotrode: a BWO with an automodulation of the cathode emission // Jour. of Communications Technology and Electronics. 2000. Vol. 45, №1. P. S39.
4. Солнцев В.А., Колтунов Р.П., Мелихов В.О. Исследование характеристик лампы обратной волны с автомодуляцией эмиссии // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50, №4. С. 483.
5. Koltunov R., Melikhov V., Solntsev V. Frequency properties of BWO with emission automodulation // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2005. P.203.
6. Мелихов В. О., Назарова М. В., Солнцев В. А. Моделирование нестационарных процессов в лампе обратной волны с автомодуляцией эмиссии (карсинотроде) // РЭ. 2009. Т. 54, №12. С. 1481.
7. Назарова М. В., Солнцев В. А., Мелихов В. О. Группирование электронов в оптимальном режиме карсинотрода // РЭ. 2011. Т. 56, № 4. С. 511.
8. Смулин Л. Д., Хаус Г. А. Шумы в электронных приборах. - М.-Л.: издательство «Энергия», 1964. – 484 с.