

ISSN 0453-804

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ

ВІСНИК
ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ

№ 467

РАДІОФІЗИКА ТА ЕЛЕКТРОНІКА

Випуск 1' 2000

Radiophysics and Electronics

ХАРКІВ
2000

ПЛАНАРНЫЙ СВЧ УСИЛИТЕЛЬ О-ТИПА С МНОГОСЛОЙНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Е.Н.Одаренко, Н.Г.Шевченко

Харьковский национальный университет, радиофизический факультет

пл. Свободы, 4. Харьков, 61077, Украина

Харьковский государственный политехнический университет

ул. Фрунзе, 21. Харьков, 61002, Украина

Поступила в редакцию 29 декабря 1999 г.

Представлены результаты исследования двухмерной модели электронно-волнового взаимодействия в нерезонансном планарном усилителе О-типа. Анализ проведен в рамках нелинейной самосогласованной теории. Рассматривается система, в которой электронный поток разделен на несколько автономных парциальных пучков с целью компенсации эффекта высокочастотного расслоения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многомерная модель, нерезонансный усилитель, парциальный пучок, эффект расслоения.

Применение многомерных моделей для описания физических процессов в электронно-волновых системах СВЧ позволяет значительно расширить диапазон исследуемых явлений, что повышает достоверность теоретического анализа. Так называемое расслоение электронного потока под действием неоднородного высокочастотного поля электродинамической системы является одним из факторов снижения эффективности энергообмена, который следует учитывать при построении многомерной теории электронных приборов. Степень неоднородности поля замедленной волны в пределах поперечного сечения пучка определяет интенсивность воздействия эффекта расслоения на характер физических процессов [1,2].

В данной работе рассматривается один из способов повышения эффективности энергообмена путем компенсации высокочастотного расслоения в электронном потоке за счет изменения начальных скоростей парциальных пучков. В приборах с симметричной электродинамической замедляющей системой (ЗС) (ЛБВ, оротрон с двухрядной гребенкой [3] и др.) реализуется иной механизм компенсации расслоения пучка – за счет действия сильного поля пространственного заряда [2,3].

Возможность применения набора парциальных пучков с целью компенсации неоднородности высокочастотного поля по ширине электронного потока ранее рассматривалась в работах Б.А.Белявского.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим планарную схему электронно-волновой системы, состоящей из двух проводящих пластин, на одну из которых нанесена периодическая замедляющая структура – гребенка. Вблизи ЗС пропускается ленточный электронный поток толщины Δ , который фокусируется магнитостатическим полем. Высокочастотное электрическое поле замедленной волны полагаем двухмерным с компонентами:

$$E_y = C\Psi_y(z)\exp[i(\beta y - \omega t)]; \quad E_z = i\frac{\Psi_z(z)}{\Psi_y(z)}E_y; \quad (1)$$

где C – комплексная амплитуда; y и z – продольная и поперечная координата соответственно; $\Psi_{y,z}(z)$ – поперечные амплитудные огибающие; $\beta = \omega/v_\phi$; ω – частота колебаний; v_ϕ – фазовая скорость замедленной волны. Для рассматриваемой системы функции Ψ_y и Ψ_z можно представить в виде [4]:

$$\Psi_y(z) = \frac{\operatorname{sh}\beta(d-z)}{\operatorname{sh}\beta d}; \quad \Psi_z(z) = \frac{\operatorname{ch}\beta(d-z)}{\operatorname{sh}\beta d}; \quad (2)$$

где d – расстояние между ЗС и верхней проводящей пластиной. Функции (2) характеризуют поперечную неоднородность высокочастотного поля, которая обуславливает расслоение электронного потока.

Движение заряженных частиц в пространстве взаимодействия описывается векторным уравнением Лоренца:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{|e|\hbar}{m} \operatorname{Re}\{\vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}]\}, \quad (3)$$

где $\vec{v}$ - вектор скорости электрона; t - время; e и m - заряд и масса электрона (рассматривается нерелятивистский случай); $\vec{E}$ - вектор напряженности электрического поля (включая поле пространственного заряда); $\vec{B}$ - вектор индукции фокусирующего магнитостатического поля, которое в общем случае может быть неоднородным и нестационарным [5].

Уравнения, описывающие пространственную эволюцию амплитуды и фазы сигнала в приборе, представим следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dF}{d\xi} &= \frac{G}{\pi\Delta} (A \cos \gamma - B \sin \gamma), \\ \frac{d\gamma}{d\xi} &= -\frac{G}{\pi F \Delta} (B \cos \gamma + A \sin \gamma), \\ A &= \int_0^{2\pi} \int_{\Delta} \left(\Psi_y \cos \phi + \Psi_z \frac{H}{L} \frac{dZ}{d\xi} \sin \phi \right) dZ_0 d\phi_0, \\ B &= \int_0^{2\pi} \int_{\Delta} \left(\Psi_y \sin \phi - \Psi_z \frac{H}{L} \frac{dZ}{d\xi} \cos \phi \right) dZ_0 d\phi_0, \\ \phi &= \theta + \Phi \xi + \phi_0; \end{aligned} \quad (4)$$

где $F = |C/E_0|$ - амплитуда, а γ - фаза высокочастотного поля; E_0 - напряженность ускоряющего электростатического поля; $\xi = y/L$, $Z = z/H$ - нормированные продольная и поперечная координаты; L и H - продольный и поперечный масштаб; $\Delta = \Delta/H$; $G = L|I_0|/(NE_0)$ - параметр, характеризующий эффективность взаимодействия; N - норма колебаний; I_0 - постоянная составляющая тока пучка; $\theta = \omega(t - y/v_0) - \phi_0$; ϕ_0 - начальная фаза; $\Phi = \omega L(1 - v_0/v_\phi)/v_0$ - начальный рассинхронизм между скоростью электронов v_0 и фазовой скоростью замедленной волны.

Полагаем, что в систему поступает немодулированный электронный поток, а усиливаемый сигнал подается непосредственно в пространство взаимодействия. В этом случае начальные условия для системы уравнений (3-4) можно записать в виде:

$$\theta|_{\xi=0} = \frac{d\theta}{d\xi}|_{\xi=0} = 0; \quad F|_{\xi=0} = F_0 \quad (5)$$

При решении системы (3-4) с начальными условиями (5) электронный поток условно разбивался на несколько парциальных пучков, каждый из которых имеет свою начальную скорость (начальный рассинхронизм Φ_n , $n=1,2,3,\dots$). Таким образом, можно формировать произвольное распределение начального рассинхронизма по толщине пучка и, тем самым, изменять условия взаимодействия заряженных частиц с полем замедленной волны.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Система уравнений (3-4) с начальными условиями (5) решалась численно. Начальная амплитуда F_0 задавалась равной 0.5. Из теории ЛБВ известно, что при уровнях входного сигнала, значительно меньших максимальных мощностей, от величины F_0 зависит в основном только оптимальная длина лампы [1]. В данном случае при $F_0=0.5$ на длине пространства взаимодействия реализуется область экспоненциального нарастания амплитуды волны, поэтому выводы, полученные для ЛБВ, пригодны и

для исследуемой электронно-волновой структуры. Величина заполнения пролетного канала электронным потоком по поперечной координате: $\Delta/d=1/3$. Начальный рассинхронизм скоростей $\Phi = -3\pi$.

Рассматриваются два значения нормированной циклотронной частоты: $\omega_c/\omega=0.5$ и 1. Для выбранных параметров системы значение $\omega_c/\omega=1$ соответствует режиму фокусировки электронного потока, при котором отсутствует оседание частиц на поверхность электродинамической системы. В этом

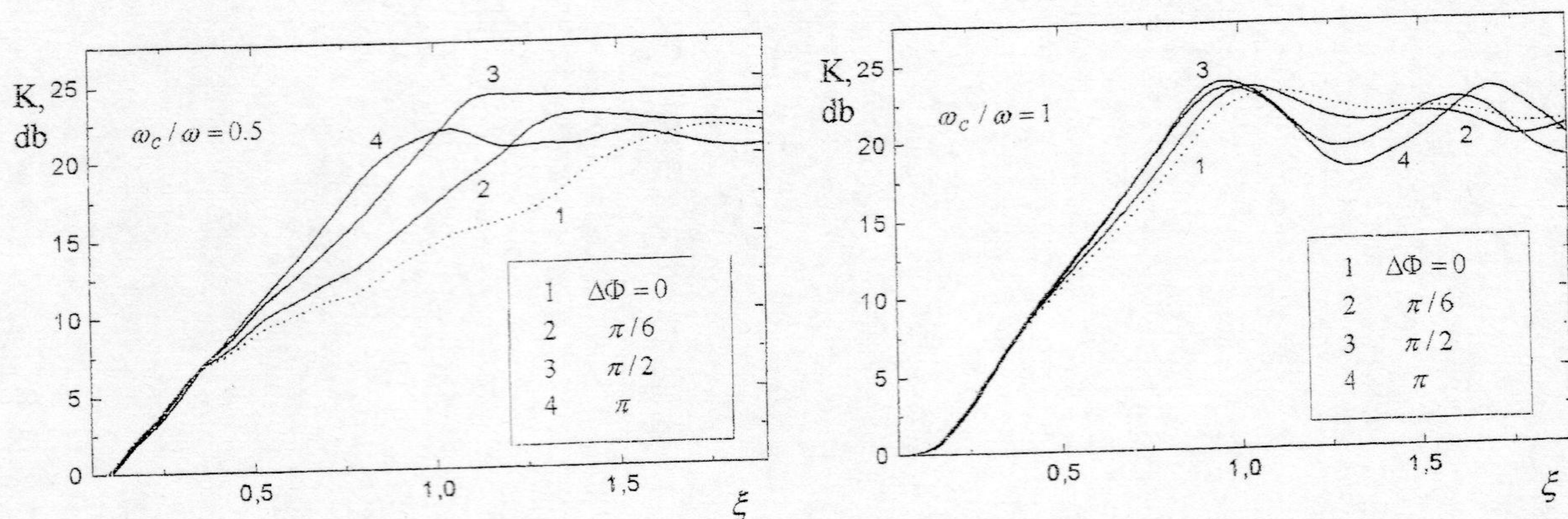


Рис. 1. Зависимости коэффициента усиления от продольной координаты для различных значений нормированной циклотронной частоты.

случае реализуются сравнительно небольшие поперечные смещения траекторий электронов, т.е. происходит преимущественно продольное электронно-волновое взаимодействие. Уменьшение индукции фокусирующего поля сопровождается увеличением величины поперечных смещений частиц и, как следствие, приводит к токооседанию на ЗС. Толщина пучка оказывается нарастающей функцией продольной координаты ξ . Естественно, что в этом случае эффект расслоения проявляется более существенно, поскольку степень неоднородности поля на толщине пучка увеличивается. Графики на рис. 1 подтверждают этот вывод. Штриховыми кривыми показаны зависимости коэффициента усиления K от продольной координаты в ситуации, когда все парциальные пучки имеют одинаковый начальный рассинхронизм ($\Delta\Phi=0$). Ослабление фокусировки приводит к снижению коэффициента усиления и увеличению оптимальной длины прибора.

Неоднородное распределение параметра начального рассинхронизма по толщине пучка позволяет повысить коэффициент усиления на оптимальной длине, т.е. на участке пространства взаимодействия до первого максимума функции $K(\xi)$. В случае $\omega_c/\omega=0.5$ этот эффект выражен сильнее, чем для $\omega_c/\omega=1$, что позволяет сделать вывод об определяющей роли расслоения в снижении эффективности взаимодействия при уменьшении индукции фокусирующего поля (токооседание начинается за пределами оптимальной длины прибора).

Положительные значения $\Delta\Phi$ означают, что параметр Φ в каждом последующем верхнем парциальном пучке больше на $\Delta\Phi$, чем в предыдущем ($\Phi_{n+1} = \Phi_n + \Delta\Phi$).

Следует отметить, что в случае $\omega_c/\omega=0.5$ для $\Delta\Phi=\pi/2$ реализуется даже несколько большее максимальное значение коэффициента усиления, чем для $\omega_c/\omega=1$. По видимому, это дополнительное повышение эффективности энергообмена обусловлено взаимодействием электронов с поперечными компонентами высокочастотного электрического поля.

Механизм компенсации действия эффекта расслоения заключается в следующем. В процессе взаимодействия моноскоростного потока электронов с неоднородным в поперечном направлении высокочастотным полем слои пучка, расположенные ближе к поверхности ЗС (в поле с большей амплитудой), группируются несколько ранее по сравнению с удаленными от ЗС слоями, которые находятся в поле с меньшей амплитудой. Следовательно, первый максимум модуля высокочастотного тока $|J|$ реализуется для разных слоев пучка при различных значениях продольной координаты. С другой стороны, известно, что изменение начального рассинхронизма скоростей электронов и замедленной волны приводит к смещению максимума $|J|$ вдоль пространства взаимодействия [6]. Условия группирования различных слоев моноскоростного потока формируются таким же образом, как у нескольких пучков с различными значениями начальной продольной скорости. Таким образом,

изменение начального рассинхронизма определенным образом от слоя к слою в пучке конечных поперечных размеров приводит к компенсации эффекта расслоения и повышению эффективности взаимодействия.

На рис. 2 представлены зависимости модуля комплексной амплитуды конвекционного тока трех парциальных пучков от продольной координаты для различных значений параметра $\Delta\Phi$. Наибольшая степень выравнивания условий группирования пучков реализуется для $\Delta\Phi = \pi/2$, что согласуется с данными, представленными на рис. 1. Более того, здесь также увеличивается максимальное значение $|J|$, что свидетельствует о повышении качества группирования электронов. В случае $\Delta\Phi \neq 0$ ближайший к ЗС парциальный пучок (кривые 1 на рис. 2) имеет ту же начальную скорость, что и для $\Delta\Phi = 0$, но максимальное значение плотности частиц этого пучка в сгустках растет и несколько видоизменяется зависимость $|J|$ от продольной координаты. Следовательно,

изменение начальной скорости более удаленных от ЗС парциальных пучков (кривые 2 и 3 на рис. 2) приводит к преобразованию условий энергообмена для всего электронного потока. Численные расчеты показывают, что при $\Delta\Phi = \pi/2$ пучок оседает на ЗС полностью (при $\Delta\Phi = 0$ оседание частичное) из-за нарастания динамических поперечных смещений траекторий электронов за счет взаимодействия с поперечными компонентами высокочастотного поля. Таким образом, формируя распределение начального рассинхронизма по толщине потока заряженных частиц, можно не только компенсировать расслоение, но и управлять условиями энергообмена в пространстве взаимодействия прибора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено теоретическое исследование электронно-волновой системы с пучком конечной толщины, разделенным на несколько парциальных пучков. Изменение начальной скорости парциальных пучков позволяет частично скомпенсировать эффект расслоения, присущий многомерным системам. Кроме того, неоднородное распределение рассинхронизма по толщине пучка дает возможность улучшения условий энергообмена частиц с продольными и поперечными компонентами высокочастотного поля в различных слоях электронного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г.Ф.Филимонов, Ю.Н.Бадлевский. Нелинейное взаимодействие электронных потоков и радиоволн в ЛБВ. М.: Сов. радио, 1971. – 184 с.
2. Л.А.Вайнштейн, В.А.Солицев. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973. – 400 с.
3. Белявский Б.А., Цейтлин М.Б. // Радиотехника и электроника, 1982. – Т.27. – №4. – С.787-793.
4. В.Н.Шевчик, Д.И.Трубецков. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Сов. радио, 1970. – 584 с.
5. В.В.Алексеев, Е.Н.Одаренко, А.А.Шматько. // Вісник Харківського ун-ту, Радіофізика та електроніка, 1999. – Вип. 1'99. – С. 122-125.
6. Дж.Роу. Теория нелинейных явлений в приборах сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1969. – 616 с.

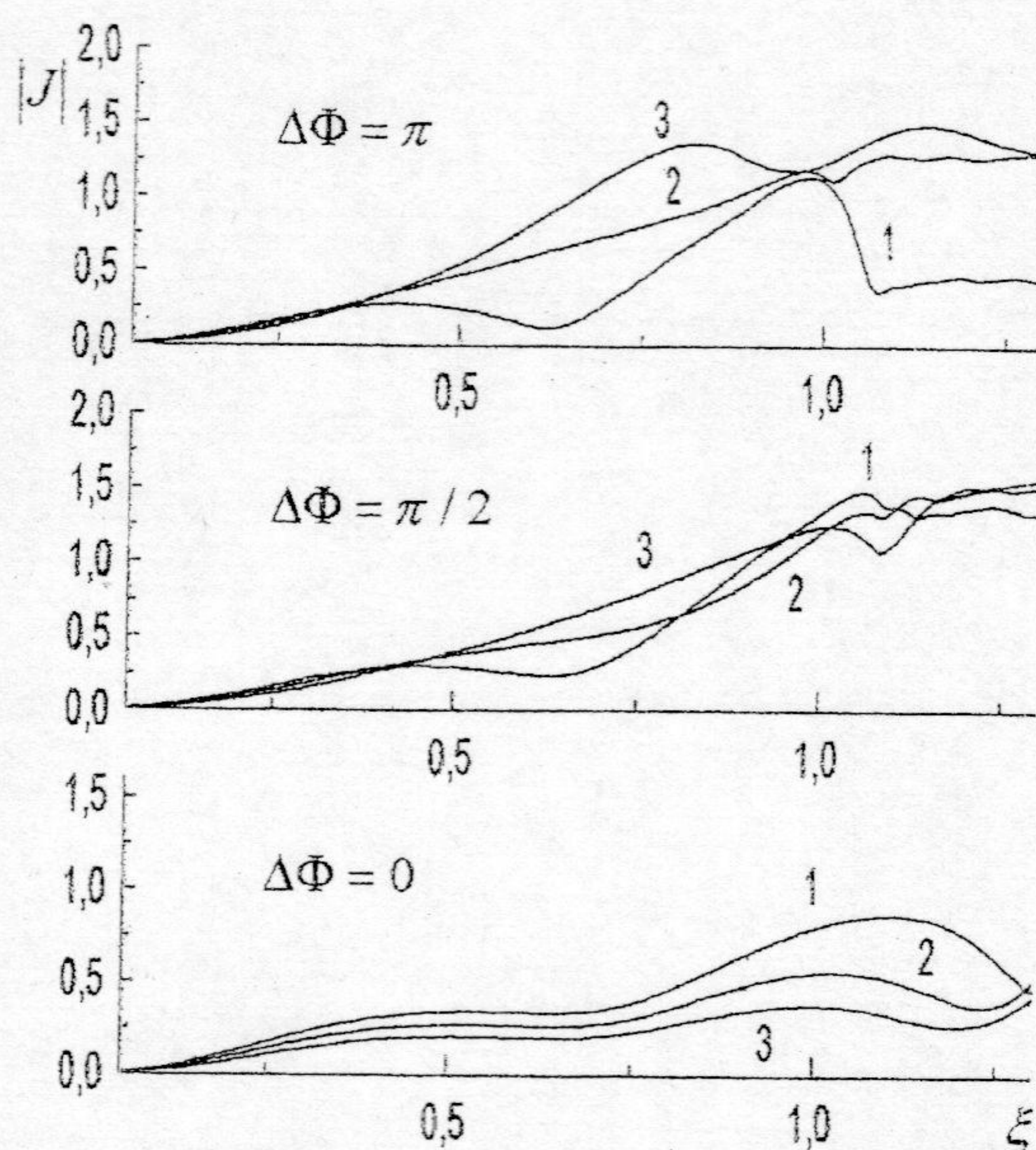


Рис. 2. Распределение модуля высокочастотного тока для трех парциальных пучков.