

И.29

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

И.Г.Идрисов, В.Н.Пакин

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ОДНОЧАСТОТ-
НАЯ КАСКАДНАЯ ГРУППИРОВКА

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
физики СО АН СССР
ИД. 11

ПРЕПРИНТ 80-197



Новосибирск

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ОДНОЧАСТОТНАЯ КАСКАДНАЯ
ГРУППИРОВКА

И.Г.Идрисов, В.Н.Пакин

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе показано, что применение очень больших параметров группировки в первых каскадах обычных одночастотных группирователей в сочетании с нарастанием глубины модуляции по скорости и доускорением между каскадами в принципе позволяет повысить амплитуду первой гармоники тока до $1,76I_0$ в случае двух, до $1,94I_0$ при трех и до $1,98I_0$ при четырех каскадах группировки.

І. В В Е Д Е Н И Е

Эффективности каскадной группировки посвящено очень много работ (см., например, /1/, /2/, /3/...).

При решении этой задачи применяются два метода: одночастотный /2/ и многочастотный /3/, /4/. Первый метод общепринятый, конструктивно простой и при стандартных режимах группировки позволяет получить амплитуду первой гармоники тока около $1,5I_0$ в случае двух группирующих каскадов и около $1,6I_0$ в случае трех. Второй метод только развивается, конструктивно сложен и, согласно расчету, в режиме "нормальной" группировки позволяет получить амплитуду первой гармоники тока около $1,55I_0$ в случае двухчастотного группирователя и около $1,68I_0$ в случае трехчастотного.

В этой работе рассмотрен одночастотный метод группировки при режимах, позволяющих в принципе поднять амплитуду первой гармоники тока до $1,76I_0$ в случае двух группирующих каскадов, до $1,94I_0$ в случае трех и до $1,98I_0$ в случае четырех. Задача решалась как в кинематическом приближении, так и с учетом действия объемного заряда.

2. ГРУППИРОВКА В КИНЕМАТИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

2.1. Многокаскадный группирователь

Общая схема такого группирователя приведена на рис.1.

Непрерывный поток электронов, эмиттируемый катодом 1 и ускоренный постоянным напряжением U_0 , поступает в первый резонатор 2 и модулируется в нем по скорости переменным напряжением $U_{м1}$. В трубе дрейфа 3 модуляция по скорости приводит к модуляции потока по плотности. Во втором резонаторе 4 наведенный ток создает переменное напряжение $U_{м2}$, которое приводит к дополнительной модуляции по скорости, переходящей в модуляцию по плотности в трубе 5. В общем случае в зазорах между каскадами, состоящими из резонаторов и труб дрейфа, подключаются источники постоянного напряжения, создающие доускоряющие скачки потенциалов $U_1, U_2 \dots$

2.2. Постановка задачи. Идеализированное уравнение фазового движения. Электронный к.п.д.

Для облегчения анализа рассмотрим фазовое движение в системе координат, связанной с частицей, относительно которой идет группировка, при следующих условиях:

- а) эта частица проходит все зазоры без изменения скорости, т.е. $U_1 = U_2 = \dots = 0$;
- б) модулирующие и доускоряющие зазоры считаем столь узкими, что можно пренебречь временем пролета через них;
- в) глубина модуляции по энергии во всех каскадах α_i столь мала, что величины второго порядка малости $O(\alpha_i^2)$ несущественны;
- г) глубина модуляции от каскада к каскаду нарастает очень сильно, т.е. $\alpha_1 \ll \alpha_2 \ll \dots \ll 1$, что означает возможность пренебрежения разбросами по скоростям, полученными в предыдущих каскадах, при рассмотрении фазового движения в любом последующем каскаде.

Из условий а), б), в) следует, что зависимость фазы частицы на выходе первого каскада ψ_1 от ее входной фазы ψ имеет вид:

- (1) $\psi_1 = \psi - \chi_1 \sin \psi$, где
- (2) $\chi_1 = \frac{\Theta_1 \alpha_1}{2}$ - параметр группировки, Θ_1 - угол пролета первого дрейфового промежутка, а глубина модуляции частиц по энергии в первом каскаде
- (3) $\alpha_1 = \frac{U_{м1}}{U_0}$

Тогда, при учете условия г), на выходе двухкаскадного группирователя получим выражение

- (4) $\psi_2 = \psi_1 - \chi_2 \sin \psi_1 = (\psi - \chi_1 \sin \psi) - \chi_2 \sin(\psi - \chi_1 \sin \psi)$
- где χ_2 - параметр группировки, соответствующий модуляции только за счет второго модулирующего напряжения $U_{м2}$ (парциальный параметр /2/).

В тех же обозначениях и приближениях в общем виде для k -каскадного группирователя получаем:

$$(5) \quad \psi_k = \psi_{k-1} - \chi_k \sin \psi_{k-1} = (\psi_{k-2} - \chi_{k-1} \sin \psi_{k-2}) - \chi_k \sin(\psi_{k-2} - \chi_{k-1} \sin \psi_{k-2}) = \dots$$

Если представить полный ток на выходе k -го каскада в виде ряда

$$(6) \quad i_k(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k) = I_0 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} f_{n,k}(\chi_1, \dots, \chi_k) \cos n\psi_k \right]$$

то коэффициенты Фурье $f_{n,k}$ имеют смысл амплитуды n -ой гармоники тока в единицах $2I_0$, а потому максимально возможный электронный к.п.д. $\eta_e(n,k)$ для этой гармоники

$$(7) \quad \eta_e(n,k) = f_{n,k} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos n\psi_k(\chi_1, \dots, \chi_k, \psi) d\psi$$

где $\psi_k(\chi_1, \dots, \chi_k, \psi)$ определяется из (5).

Интегралы (7) при произвольном k в явном виде не берутся, а при $k=1$ выражаются через функции Бесселя первого рода n -го порядка /2/. Поэтому при изучении многокаскадной группировки были использованы численные методы.

2.3. Результаты расчетов

Для нахождения максимальных величин $\eta_e(n,k)$ в приближениях а), б), в) и г) пункта 2.2 необходимо решить задачу о нахождении экстремума функции $f_{n,k}(\chi_1, \dots, \chi_k)$, представленной интегралом (7), где ψ_k определяется из (5). При расчете были использованы метод Гаусса-Зейделя и метод конфигураций, описанные в /7/.

Результаты расчетов представлены в таблице 1 для двух группировочных каскадов и в таблице 2 для трех. Видно, что с ростом номера гармоники n параметры χ приближаются к неким константам, которые можно назвать асимптотическими параметрами группировки. При параметрах группировки, близких к асимптотическим:

$k=1$	$\chi_1 = 1,08$		
$k=2$	$\chi_1 = 2,08$	$\chi_2 = 1,08$	
$k=3$	$\chi_1 = 3,60$	$\chi_2 = 1,92$	$\chi_3 = 1,05$

были рассчитаны $\eta_e(n,k)$ для первых 50-ти гармоник, и результаты представлены в таблице 3. Из этой таблицы видно, что $\eta_e(n,k)$ остается большими до 10-й гармоники и вы-

ше при использовании двух и особенно трехкаскадных группирователей. Это означает, что вид конвекционного тока приближается к δ - функции - идеальной форме. О минимально возможной длине ступков и их плотности можно судить по кривым рис.2, на котором показаны зависимости выходной фазы от входной для одного, двух и трех каскадов $\psi_1(\varphi)$, $\psi_2(\varphi)$, $\psi_3(\varphi)$ при параметрах группировки, оптимальных для первой гармоники (крестики), и при параметрах, близких к асимптотическим (точки). Количество пробных частиц 50 в начальном интервале фаз $0 \leq \varphi \leq \pi$.

На рис.3 изображены изолинии функции $\eta_e(1,2)$ для первой гармоники двухкаскадного группирователя.

На рис.4 изображены изолинии функций $\eta_e(5,2)$ для пятой гармоники того же группирователя.

Из таблиц 1 и 2 следует, что оптимальные параметры группировки в первых каскадах гораздо больше, чем общепринятые (приведенные, например, в /2/, стр.327 и стр.349), а максимальные электронные к.п.д. также существенно выше при соблюдении условий а), б), в), г) пункта 2.2. Таблица 3 показывает, что при тех же условиях и параметрах группировки, близких к асимптотическим, возможно резкое повышение электронного к.п.д. для гармоник с высоким номером n .

Из рис.3 следует, что высокий к.п.д. по первой гармонике $\eta_e(1,2)$ сохраняется в широкой области изменения χ_1 и χ_2 . Сопоставление рис.3 и рис.4 показывает, что с ростом номера гармоники область больших к.п.д. сужается, но остается внутри первой.

Не приведенные здесь результаты расчетов для большего числа каскадов показали, что с ростом числа каскадов ширина области с большим к.п.д. также растет.

2.4. Обсуждение результатов расчетов

Необходимость применения очень больших параметров группировки во входных каскадах для получения высоких электронных к.п.д. $\eta_e(n, k)$ связана с формой кривой скоростной модуляции, приближающейся к синусоиде при малых α . Синусоида в интервале фаз $\pm \frac{\pi}{2}$ с хорошей точностью близка к идеальной кривой скоростной модуляции, поэтому задача об эффективной

группировке сводится к собиранию большинства частиц входными каскадами в интервал фаз, равный или меньший $\pm \frac{\pi}{2}$ (в зависимости от того, по какому номеру гармоники идет оптимизация), и получению коротких ступков с помощью только последнего каскада, играющего роль короткофокусной фазовой линзы.

Ограничения при собирании частиц в широкий интервал фаз и при последующем сжатии в узкий интервал связаны с разбросом частиц по скоростям, полученным в предыдущих каскадах. Для уменьшения действия этих разбросов можно применять:

а) частичную или полную компенсацию скоростей частиц, максимально возмущенных в первых каскадах, электрическим полем последующих каскадов, что соответствует большим параметрам группировки в первых каскадах;

б) нарастание глубины модуляции α от каскада к каскаду /2/;

в) доускорение (скачок потенциала) между каскадами, поскольку оно уменьшает как относительный, так и абсолютный разброс по скоростям /9/, /10/.

При реализации конкретных решений разумно применять сочетания этих способов.

Расчеты, приведенные с учетом конечности α (до $\alpha = 0,5$ в последнем каскаде) при реальных углах пролета и наличии разбросов по скоростям, показали, что электронные к.п.д.

$\eta_e(n, k)$ для первых десяти номеров гармоник при оптимальных параметрах группировки остаются близкими к рассчитанным выше при идеальных условиях и приведенным в таблицах 1,2,3.

На рис.5 приведена в качестве примера картина фазового движения в системе покоя невозмущенной частицы для двухкаскадного группирователя при $\chi_1 = 3,12$, $\chi_2 = 1,51$, $\alpha_1 = 0,1$, $\alpha_2 = 0,5$, углах пролета в резонаторах $\theta_1 = \theta_2 = \pi$, $U_0 = 10^4$ В, количестве пробных частиц $N = 101$, что соответствует $\eta_e(1,2) = 0,882$. Кривая 1 показывает положение пробных частиц на фазовой плоскости перед входом во второй модулирующий зазор, кривая 2 - на выходе группирователя. Стрелками показаны фазовые траектории частиц, максимально возмущенных в первом каскаде. Видно, что эти частицы в процессе группировки повернулись относительно своего начального положения в плоскости φ, ψ на угол $\Phi = 3\pi/2$, а движение потока в целом носит характер

вихря, образуемого относительно центральной частицы и постепенно стягивающегося к ней. Кривая 2 показывает также, что для низких номеров гармоник разброс по скоростям, полученный в первом каскаде, играет весьма малую роль, и потому электронный к.п.д. остается близким к полученному в идеальных условиях пункта 2.2.

В случае трех и более каскадов оптимальная для первой гармоники картина фазового движения тоже носит характер вихря, стягивающегося по фазам к центру, но с полным углом поворота для максимально возмущенных в первом каскаде частиц, равным примерно $5\pi/2$, $7\pi/2$ и т.д. Электронные к.п.д. для низких номеров гармоник остаются близкими к идеальным, приведенным в таблицах 1, 2, 3.

3. ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА. ДОУСКОРЕНИЕ МЕЖДУ КАСКАДАМИ

Силы объемного заряда существенно влияют на вид фазовых траекторий отдельных частиц и приводят к изменению оптимальных величин параметров группировки в отдельных каскадах. Расчет группировки проводился нами с использованием одномерной модели заряженных дисков,двигающихся в трубе заданного диаметра (согласно /5/, стр. II4-II8 и /6/, стр. IO7). При различных плотностях тока были исследованы влияние доускорения на процесс группировки, а также найдены оптимальные параметры χ .

Как и в случае отсутствия объемного заряда, в соответствии с законом сохранения энергии, применение доускорения между каскадами приводит к уменьшению как относительного, так и абсолютного разбросов скоростей в пучке (/7/, /8/), а также к усилению экранирующего действия пролетной трубы заданного диаметра вследствие увеличения среднего расстояния между заряженными дисками.

В качестве примера на рис.6 и рис.7 приведены результаты расчетов двухкаскадного группирователя с большими параметрами группировки в первом каскаде и с применением доускорения между каскадами. Начальное напряжение $U_0 = 10^4$ В, U_1 - скачок потенциала между первым и вторым каскадами, $\beta = 10^{-2}$ - радиус пролетной трубы, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,3$ - глубина модуляции по энергии, χ_1 и χ_2 - параметры группировки, $\omega = 1,89 \cdot 10^{10}$ сек⁻¹ цикли-

ческая частота, а параметр объемного заряда

$$(8) \quad \chi = \frac{2 \omega p}{\omega a}$$

где ω_p - плазменная частота, соответствующая $U_0 = 10^4$ В.

На рис.6 показаны зависимости величины электронного к.п.д. по первой гармонике $\eta_e(1,2)$ от отношения U_1/U_0 при различных χ и $\chi_1 = 3,12$, $\chi_2 = 1,51$. Кривые показывают, что доускорение очень эффективно, особенно при малых и средних $\chi \leq 0,6$.

На рис.7 показаны зависимости той же величины $\eta_e(1,2)$ от первого параметра группировки χ_1 при $\chi_2 = 1,51$, доускорении $U_1/U_0 = 4$ для различных значений параметра χ . Видно, что с ростом плотности тока оптимальная величина χ_1 уменьшается, а вместе с ней и величина $\eta_e(1,2)$.

Расчеты, проведенные для группирователей с большим числом каскадов, показали аналогичные зависимости, и поэтому здесь не приводятся.

Следует специально отметить, что очень выгодно применять доускорение полностью сгруппированного пучка на выходе группирователя, особенно с использованием релятивистского замораживания фазового движения. Это приводит к росту коэффициента усиления и к.п.д. СВЧ-прибора в целом.

Кроме того, в рассмотренных выше режимах, в результате эффективного предварительного собирания частиц первыми каскадами, в выходных каскадах возможно осуществление так называемого режима "нормальной" группировки /3/ для большинства частиц, т.е. подавление скоростной модуляции на выходе последнего каскада силами объемного заряда.

Итак, при умеренных значениях параметра пространственного заряда электронный к.п.д. по первым гармоникам в рассмотренных режимах остается высоким.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование фазового движения заряженных частиц в процессе одночастотной каскадной группировки показало, что использование очень больших параметров группировки в первых каскадах в сочетании с нарастанием глубины модуляции по энергии, а также примене-

ние доускорения между каскадами может привести к значительному увеличению электронных к.п.д. СВЧ-приборов с линейными пучками. Теоретически возможно повышение этого к.п.д. до уровня 0,88 в случае двух, до 0,97 в случае трех и более чем до 0,99 в случае четырех каскадов в группирователе.

Эти результаты существенно выше, чем в известных одночастотных, двухчастотных и трехчастотных режимах группировки.

Использование рекомендуемых режимов группировки может обеспечить повышение электронного к.п.д. приборов O - типа как на первой, так и на более высоких гармониках, а в линейных и кольцевых ускорителях заряженных частиц может повысить эффективность захвата в режим ускорения, а также привести к повышению начального темпа ускорения.

Л и т е р а т у р а

- /1/. D.L. Webster "Cathode Ray Bunching"
J.A.P. v.10, July 1939, p 501
- /2/. В.И.Гайдук, К.И.Палатов, Д.М.Петров. Физические основы электроники СВЧ, часть 2, глава 10, Москва, "Сов.радио", 1971, стр.286+354.
- /3/. Ю.А.Капман. "Физические модели колебательных процессов. Колебательные явления в потоках заряженных частиц". Межвузовский сборник. Ленинград, СЭИ, 1978, стр.3+9.
- /4/. Ю.А.Капман, В.Д.Хлыстов, Г.П.Гоголев, М.Е.Раппопорт, А.К.Шапуренко. К.П.Д. нролетного клистрона при реализации нормального группирования во входном резонаторе. Там же, стр. 56+61.
- /5/. Ю.А.Капман, Д.М.Беневоленский. Нелинейная теория группирования в релятивистском клистроне. Там же, стр.79+86.
- /6/. С.О.Андожский. Расчеты явлений в приборах типа O в одномерном приближении на малых ЭВМ. Там же, стр.107+111.
- /7/. Д.Дж.Уайлд. Методы поиска экстремума. Москва, "Наука", 1967.
- /8/. Дж.Роу. Теория нелинейных явлений в приборах СВЧ, стр.189+193, Москва, "Сов.радио", 1969.
- /9/. I. Hefni The variable-drift biased-gap klystron Proc. IRE, 1964, 52, N#1, 102.
- /10/. В.Л.Грановский. Электрический ток в газе. Установившийся ток. Москва. "Наука". 1971, стр.27+31.

Таблица 1. Максимальный электронный к.п.д. и соответствующие параметры группировки для различных номеров гармоник в случае двух группировочных каскадов.

n	$\eta_e(n,2)_{\text{макс}}$	χ_1	χ_2
1	0,879	3,11	1,51
2	0,842	2,82	1,33
3	0,819	2,65	1,25
5	0,790	2,47	1,18
10	0,749	2,24	1,11

Таблица 2. Максимальный электронный к.п.д. и соответствующие параметры группировки для различных номеров гармоник в случае трех группировочных каскадов.

n	$\eta_e(n,3)_{\text{макс}}$	χ_1	χ_2	χ_3
1	0,971	4,08	2,75	1,28
2	0,962	3,97	2,50	1,20
10	0,937	3,60	1,92	1,05

Таблица 3. Электронный к.п.д. в случае одного, двух и трех группировочных каскадов при асимптотических параметрах группировки.

n	$\eta_e(n,1)$	$\eta_e(n,2)$	$\eta_e(n,3)$
1	0,465	0,823	0,959
3	0,349	0,778	0,947
10	0,269	0,740	0,937
30	0,213	0,672	0,914
50	0,170	0,570	0,878

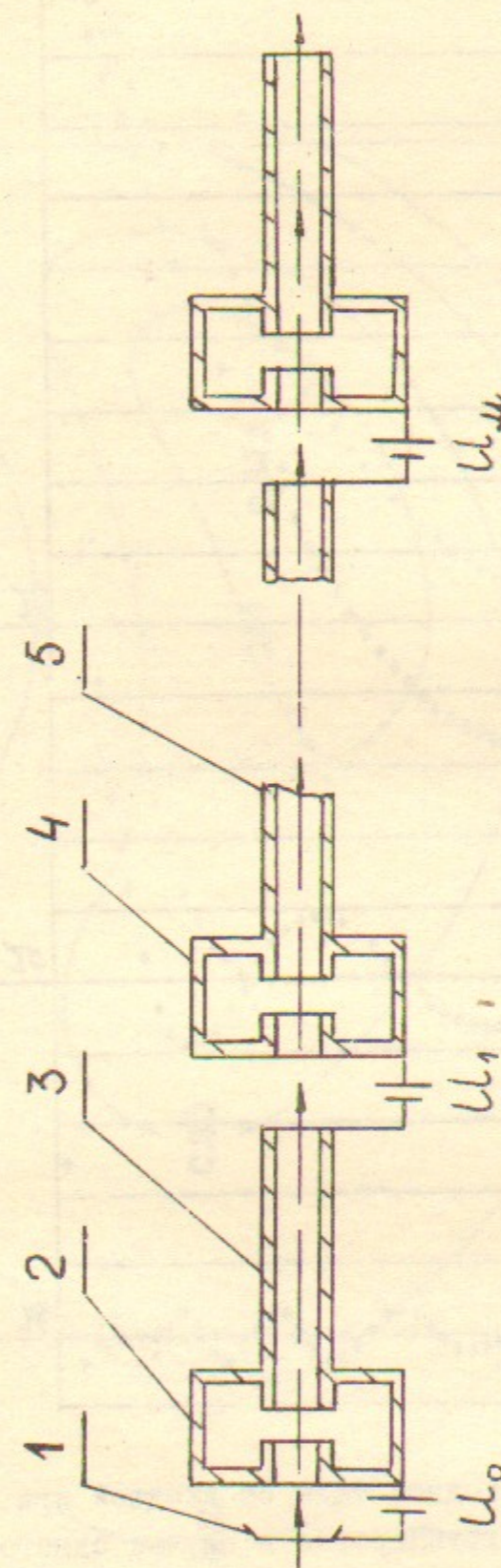
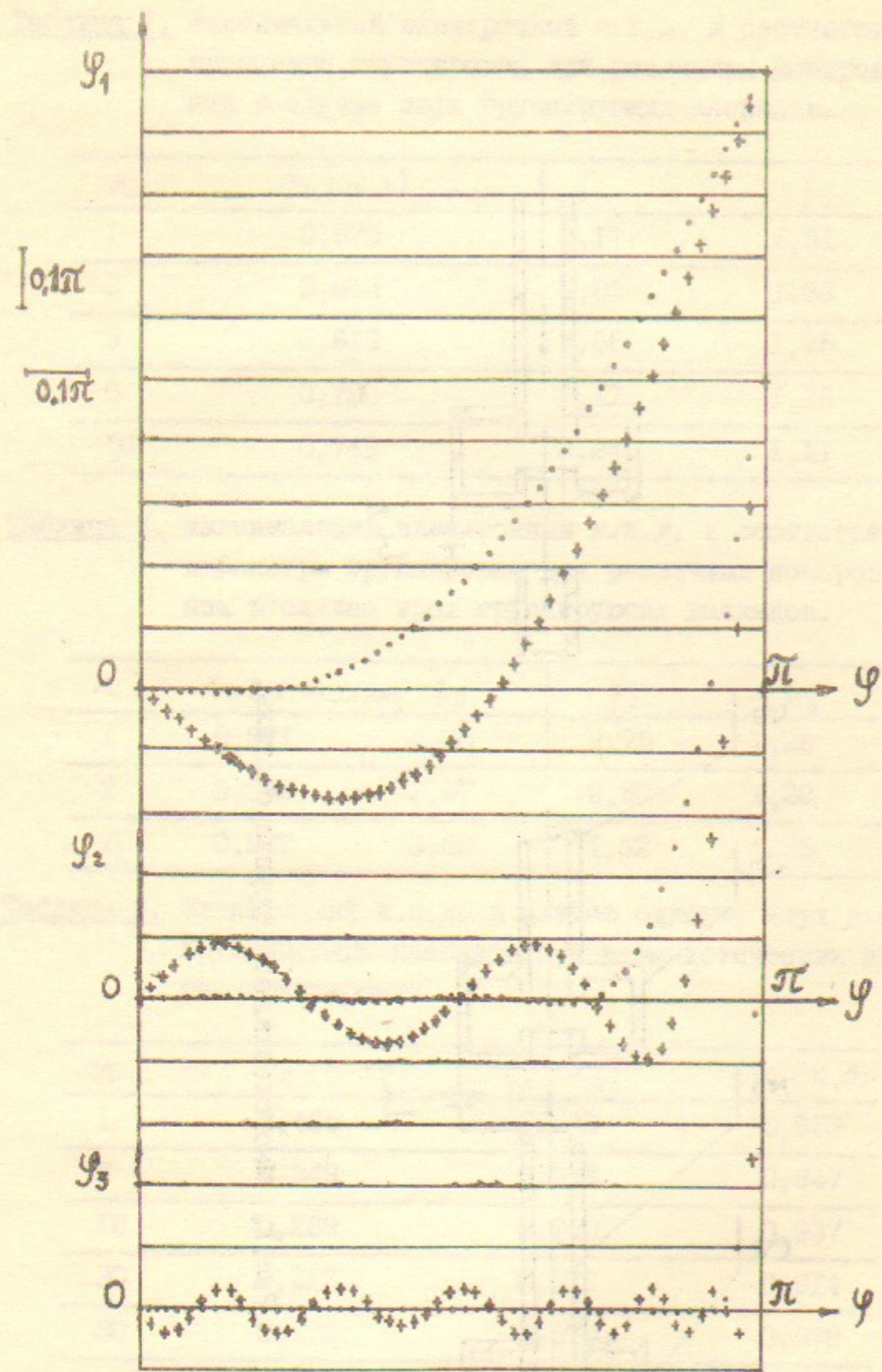


Рис. 1. Многокаскадный группирователь.



Фиг. 2. Зависимость выходной фазы от входной при идеальной одночастотной группировке в случае одного, двух и трёх каскадов.

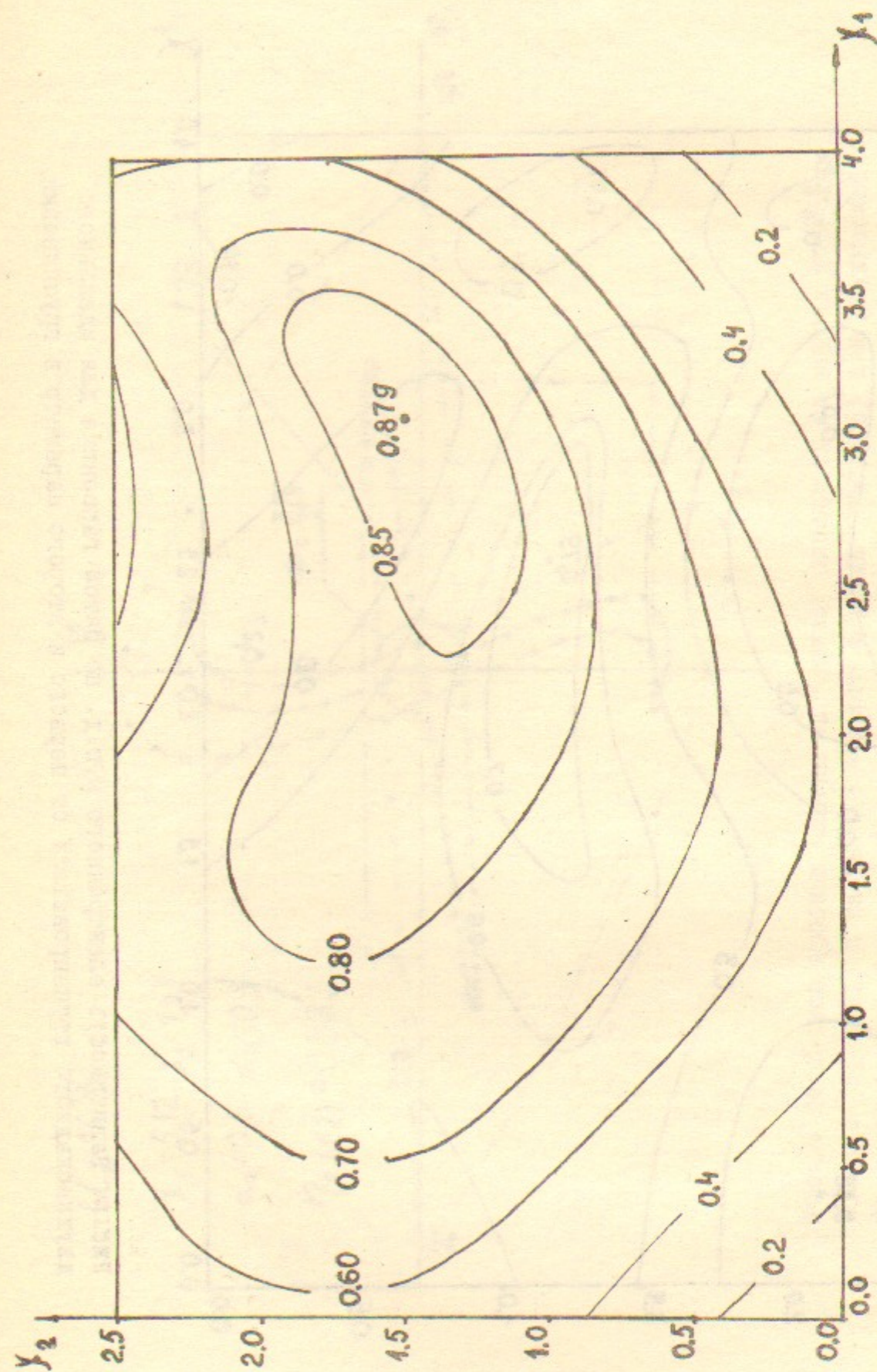


Рис. 3. Зависимость электронного к.п.д. по первой гармонике для идеального двухкаскадного группирователя от первого и второго параметров группировки.

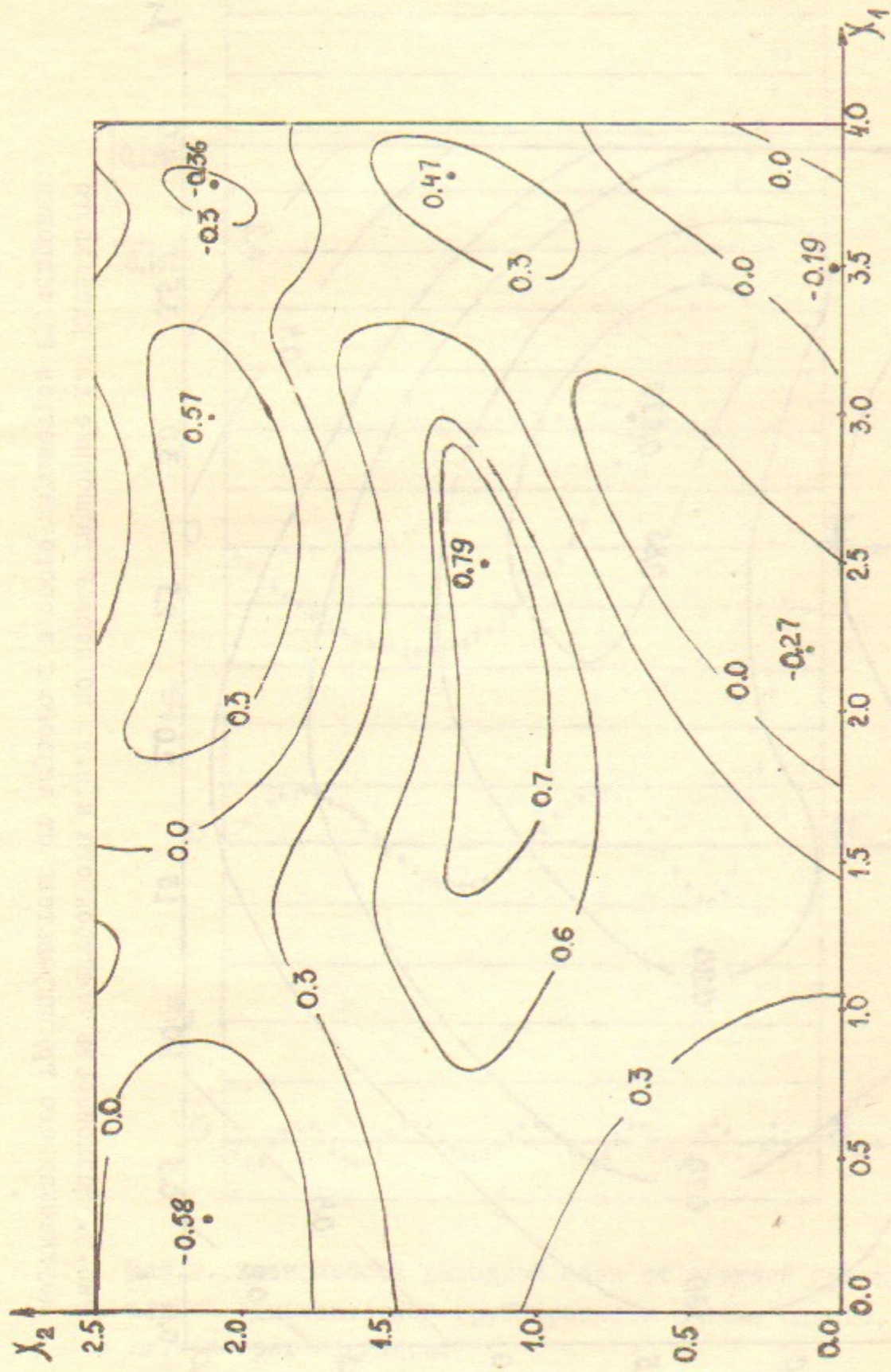


Рис. 4. Зависимость электронного к.п.д. по пятой гармонике для идеального двухкаскадного группирователя от первого и второго параметров группировки.

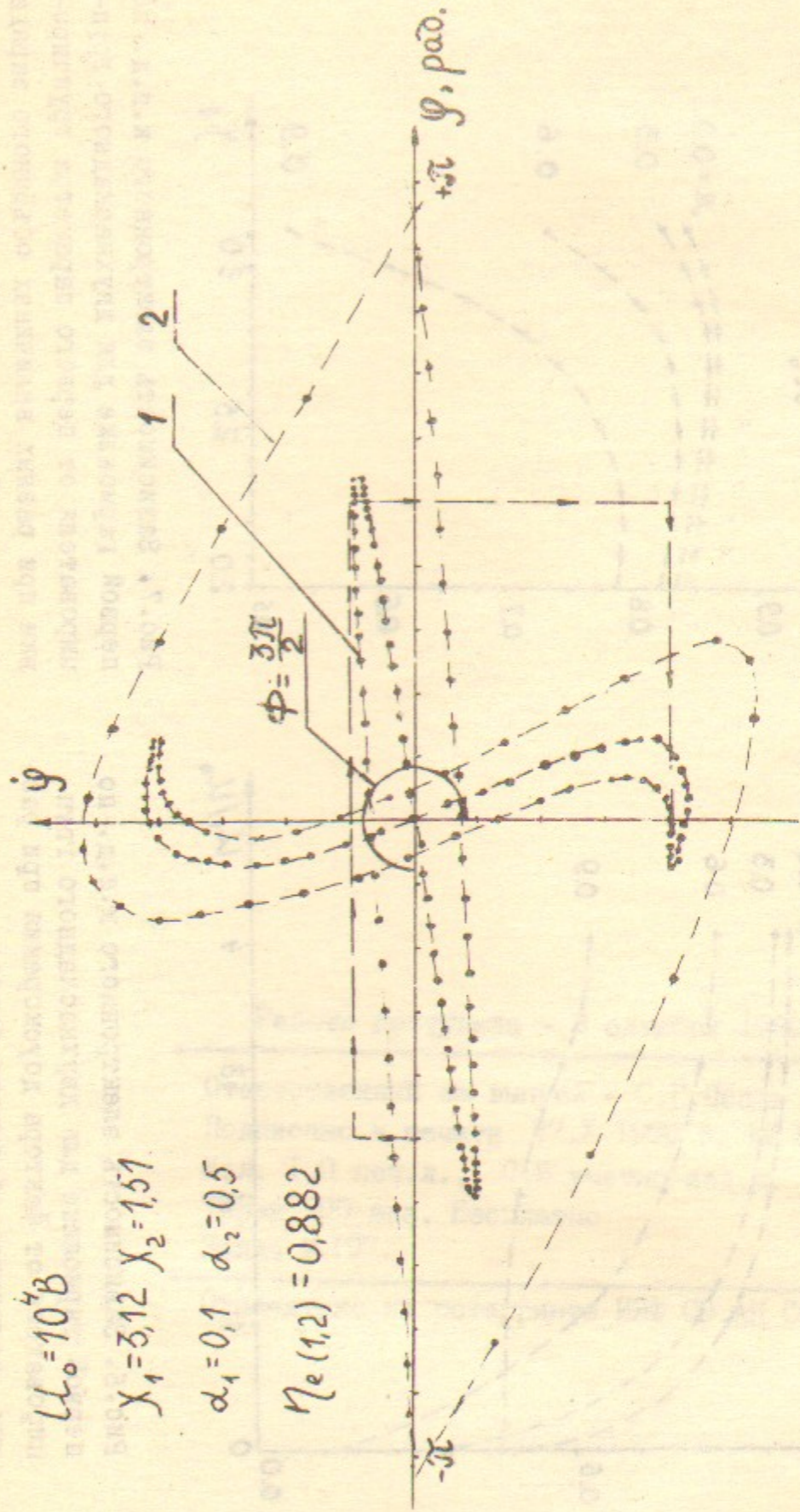


Рис. 5. Положение пробных частиц на газовой плоскости на выходе первого каскада (кривая 1) и на выходе второго каскада (кривая 2) для двухкаскадного группирователя при больших углах пролёта в резонаторах и большой глубине модуляции.

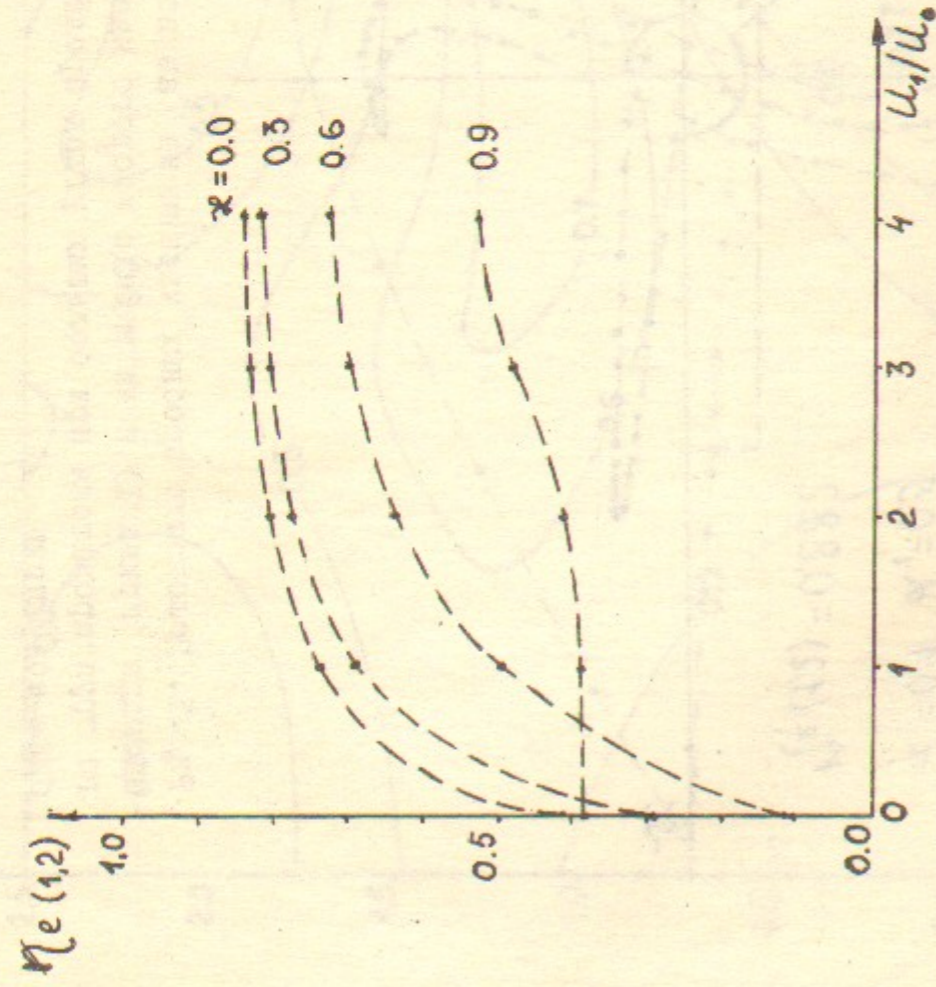
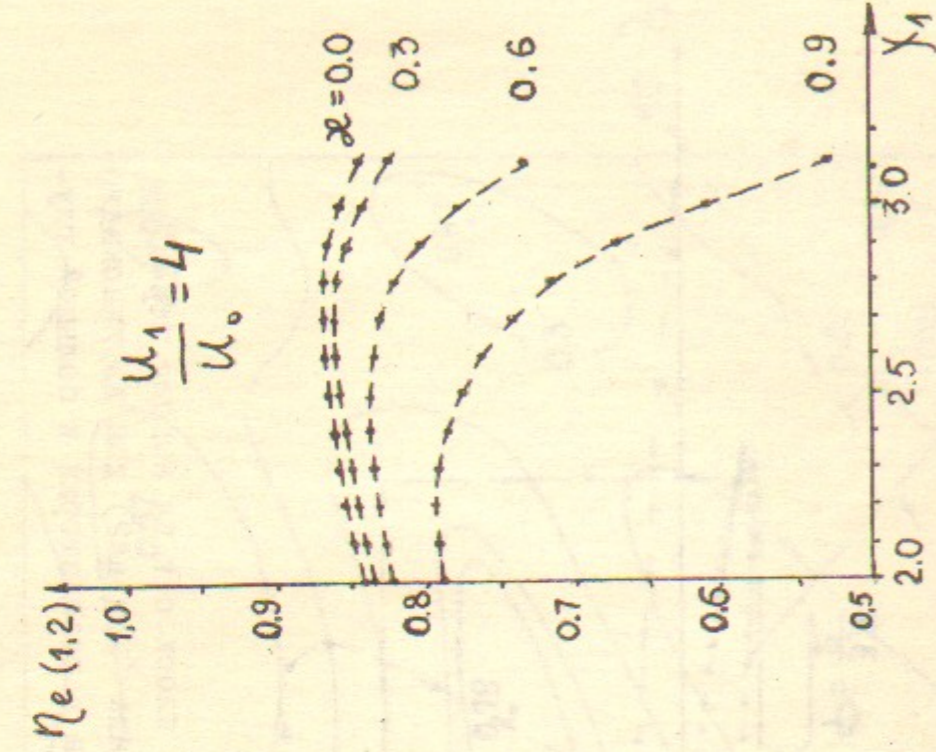


Рис.6. Зависимость электронного к.п.д. по первой гармонике для двухкаскадного группирователя от фактора доускорения при различных величинах объёмного заряда.



$$\frac{U_1}{U_0} = 4$$

Рис.7. Зависимость электронного к.п.д. по первой гармонике для двухкаскадного группирователя от первого параметра группировки при разных величинах объёмного заряда и заданном факторе доускорения.

Работа поступила - 3 октября 1980 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
 Подписано к печати 27.X-1980 г. МН 06988
 Усл. 1,0 печ.л., 0,8 учетно-изд.л.
 Тираж 200 экз. Бесплатно
 Заказ № 197.

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР