

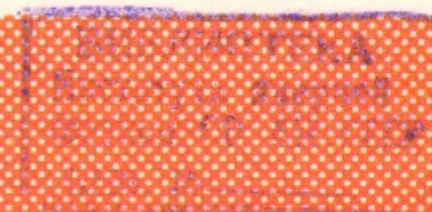
И.29

29

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

И.Г.Идрисов, В.Н.Пакин

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ГРУППИРОВКА
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНЫХ
ДОРОЖЕК



ПРЕПРИНТ 80-193

Работа поступила - 3 октября 1980 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 27.V-1980г. МН 06989
Усл. 1,2 печ.л., 1,0 учетно-изд.л.
Тираж 200 экз. Бесплатно
Заказ № 193.

Отпечатано на роталпринте ИЯФ СО АН СССР



ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ГРУППИРОВКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНЫХ
ДОРОЖЕК

И. Г. Идрисов, В. Н. Пакин

А Н Н О Т А Ц И Я

Показана возможность повышения эффективности одночастотной группировки первоначально ~~мало~~ высокоэнергичных релятивистских и ультрарелятивистских заряженных частиц при использовании магнитных дорожек: амплитуду первой гармоники тока можно поднять до уровня $1,9 I_0$ и более, амплитуду десятой — до уровня $1,8 I_0$ и более.

В случае замкнутых магнитных дорожек можно получать одиночные сгустки высокой плотности и малой длительности, с помощью нескольких последовательных разомкнутых дорожек — непрерывные потоки либо пакеты таких сгустков.

Высокая эффективность достигается путем применения очень больших первых параметров группировки в сочетании с нарастающей глубиной модуляции по энергии в процессе группировки.

I. Введение

Задача об эффективной группировке моноэнергичных пучков ультрарелятивистских заряженных частиц возникает при необходимости собрать их в основном кольце, имеющем очень большой периметр, в короткий ступок перед конверсией при накоплении вторичных частиц в специальных кольцах малого периметра. В частности, это относится к проектам протон-антипротонных встречных пучков ИФВЭ в СССР и *FNAL* в США. Та же задача возникает в физике высоких энергий при проведении экспериментов с аппаратурой, работающей только в режиме коротких импульсов, например, в экспериментах с нейтрино.

Эффективная группировка релятивистских пучков необходима при инжекции в сильноточные линейные ускорители электронов и линейные ускорители с высоким темпом набора энергии, в сверхмощной СВЧ-энергетике /1/, /2/, /3/, а также в случае генерации миллиметровых волн /4/.

При решении этой задачи используются две основные схемы: 1) для одиночных ступков; 2) для непрерывного потока или пакета таких ступков. В первой схеме первоначально однородный по азимуту и монохроматичный пучок заряженных частиц движется в замкнутой кольцевой магнитной дорожке и за много оборотов собирается в короткий ступок с помощью нескольких щупов синусоидального напряжения первой гармоники частоты обращения. Во второй схеме используются разомкнутые магнитные дорожки, между которыми помещаются резонаторы первой гармоники, модулирующие пучок по энергии. В обеих схемах используется зависимость времени поворота частиц в магнитной дорожке от их энергии /5/, сами дорожки играют роль дрейфовых промежутков, а устройства в целом работают как многокаскадные клистронные группирователи /6/.

В этой работе показано, что использование больших начальных параметров группировки в сочетании с ростом глубины модуляции по энергии позволяет поднять амплитуду первой гармоники тока до уровня $1,9 I_0$ и выше при использовании напряжения только первой гармоники частоты обращения.

Задача рассмотрена в одночастичном приближении, без учета

коллективных эффектов.

2. ГРУППИРОВКА ЗАМКНУТОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ПУЧКА

2.1. Постановка задачи

Известно, что в циклических ускорителях высоких энергий применяется СВЧ-поле высокой кратности, и потому в конце цикла ускорителя пучок обычно состоит из многих сгустков, почти монохроматических и однородно распределенных по азимуту. Для некоторых физических экспериментов эти сгустки необходимо собрать с минимальными потерями в один короткий сгусток. Для решения этой задачи обычно используется зависимость времени оборота частицы от ее энергии /5/. После выключения основного, ускоряющего ВЧ-напряжения собирание частиц в один сгусток производится с помощью специальных устройств, которые производят импульсную модуляцию пучка по энергии, переходящую в модуляцию по плотности при многооборотном дрейфе в магнитной дорожке. В качестве таких устройств можно применять резонаторы, работающие на первой гармонике частоты обращения (одночастотная группировка), совокупность синхронизированных резонаторов, работающих на нескольких гармониках частоты обращения (многочастотная группировка), а также импульсные широкополосные трансформаторы с пилообразной формой напряжения и периодом, равным времени оборота равновесной частицы (линейная группировка).

Одночастотная группировка выгодно отличается простотой от многочастотной и линейной, и потому вопрос о повышении ее эффективности достаточно актуален.

Рис. I иллюстрирует обсуждаемую схему группировки. В замкнутой магнитной дорожке I движется азимутально-симметричный моноэнергичный релятивистский пучок, состоящий из многих сгустков. Собственно ускорительные СВЧ-резонаторы на время группировки зашунтированы, отстроены и отключены от генераторов, а потому на рисунке не показаны. На модулирующий резонатор 2, настроенный на первую гармонику частоты обращения, по заданной

во времени программе импульсно включается и выключается генератор, создающий модуляцию пучка по энергии. В промежутках между включениями происходит свободный дрейф частиц, и в результате частицы собираются в один сгусток малой длительности и высокой плотности. При необходимости дальнейшего сжатия можно использовать дополнительные резонаторы, работающие по той же схеме, но на более высоких гармониках частоты обращения и при большей амплитуде модуляции. Ниже будет показано, что уже первый этап, одночастотная группировка, может быть существенно более эффективной, чем в известных работах (см., например, /7/).

2.2. Уравнение фазового движения

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

а) частицы первоначально равномерно распределены по азимуту и монохроматичны;

б) за время модуляции не происходит значительного фазового сдвига частиц относительно невозмущенной, т.е. частицы мгновенно получают нужное распределение по энергии;

в) глубина модуляции по энергии α от включения к включению нарастает очень сильно: $\alpha_1 \ll \alpha_2 \ll \dots \ll 1$, что приводит к возможности пренебрежения разбросами по энергии, полученными от предыдущих модуляций, при рассмотрении фазового движения под действием последующей модуляции.

Для малых отклонений по частоте обращения и энергии, согласно /5/, можно написать

$$(1) \quad \Delta \omega = - \frac{\omega_0}{E_0} \Delta E \mathcal{K}_0$$

где ω_0 и E_0 — частота и энергия невозмущенной частицы, а параметр \mathcal{K}_0 определяется соотношением

$$(2) \quad \mathcal{K}_0 = \frac{\alpha_c \gamma_0^2 - 1}{\gamma_0^2 - 1}$$

Здесь α_c — коэффициент расширения орбит

$$(3) \quad \alpha_c = \frac{P}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{dP}$$

γ_c - релятивистский фактор центральной частицы, P - ее импульс, Γ - периметр орбиты, соответствующий этому импульсу.

Фазовый сдвиг за время группировки t_{zp}

$$(4) \quad \Delta\varphi = \Delta\omega t_{zp} = -\frac{\omega_c}{E_c} K_c \Delta E t_{zp}$$

После первой синусоидальной модуляции по энергии

$$(5) \quad \Delta E = \alpha_1 E_c \sin\varphi$$

для частицы, находившейся первоначально относительно невозмущенной в фазе φ , получим после первого дрейфа новую фазу

$$(6) \quad \varphi_1 = \varphi + \Delta\varphi_1 = \varphi - \omega_c K_c \alpha_1 t_{zp1} \sin\varphi$$

Вводя обозначение

$$(7) \quad \varphi_1 = \varphi - \omega_c K_c \alpha_1 t_{zp1} = 2\pi K_c \alpha_1 N_{zp1}, \text{ где}$$

$$(8) \quad N_{zp1} = \frac{t_{zp1}}{T_c} = \frac{\omega_c t_{zp1}}{2\pi}$$

число оборотов, соответствующих первому дрейфу, получим уравнение

$$(9) \quad \varphi_1 = \varphi - \varphi_1 \sin\varphi$$

После второй модуляции по энергии и второго дрейфа, с учетом условия в), получаем аналогичное выражение

$$(10) \quad \varphi_2 = \varphi_1 - \varphi_2 \sin\varphi_1 = (\varphi - \varphi_1 \sin\varphi) - \varphi_2 \sin(\varphi - \varphi_1 \sin\varphi)$$

В тех же обозначениях и приближениях после K модуляций и дрейфов имеем

$$(II) \quad \begin{aligned} \varphi_k &= \varphi_{k-1} - \varphi_k \sin\varphi_{k-1} = (\varphi_{k-2} - \varphi_{k-1} \sin\varphi_{k-2}) - \\ &- \varphi_k \sin(\varphi_{k-2} - \varphi_{k-1} \sin\varphi_{k-2}) = \dots \end{aligned}$$

Из (9), (10) и (II) очевиден физический смысл "парциальных" параметров группировки $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k$ - это сдвиг по фазе за время первого, второго, ..., k -го дрейфа максимально возмущенной частицы, при условии, что всеми предыдущими модуляциями можно пренебречь, согласно /6/.

Если представить полный ток после K -го дрейфа в виде ряда

$$(12) \quad I_k(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k, \varphi_k) = I_0 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} f_{n,k}(\varphi_1, \dots, \varphi_k) \cos n\varphi_k \right],$$

то коэффициенты Фурье $f_{n,k}$ имеют смысл амплитуды n -ой гармоники тока в единицах $2I_0$ и определяются из

$$(13) \quad f_{n,k} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \cos n\varphi_k(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k, \varphi) d\varphi$$

где $\varphi_k(\varphi_1, \dots, \varphi_k, \varphi)$ в свою очередь определяется из (II).

Интегралы (13) при произвольном K в явном виде не берутся, а при $K=1$ выражаются через функции Бесселя первого рода n -го порядка. Поэтому при расчете нескольких последовательных модуляций использовались численные методы.

2.3. Результаты расчетов

Для нахождения максимальных величин $f_{n,k}$ необходимо решить задачу о нахождении экстремума функции, представленной интегралом (13). При расчете использовались методы Гаусса-Зейделя и метод конфигураций, описанные в /8/. В таблицах I и 2 представлены результаты расчетов при $K=2$ и $K=3$ соответственно для различных номеров гармоник n . Видно, что с ростом номера гармоники n параметры группировки φ

приближаются к неким константам, которые можно назвать асимптотическими. При параметрах χ , близких к асимптотическим:

$$\begin{array}{l} k = 1 \quad \chi_1 = 1,08 \\ k = 2 \quad \chi_1 = 2,08 \quad \chi_2 = 1,08 \\ k = 3 \quad \chi_1 = 3,60 \quad \chi_2 = 1,92 \quad \chi_3 = 1,05 \end{array}$$

были проведены расчеты, результаты которых сведены в таблицу 3. Величины $f_{n,k}$ остаются высокими вплоть до 50-й гармоники в случае двух и особенно трехкратной модуляции. Это означает, что вид конвенционного тока приближается к δ -функции. О минимально возможной длине образующихся ступок и их плотности можно судить по рис. 2, где показаны кривые $\varphi_1(\varphi)$, $\varphi_2(\varphi)$ и $\varphi_3(\varphi)$ при параметрах группировки, оптимальных по первой гармонике (частицы обозначены крестиками), и при параметрах, близких к асимптотическим (частицы обозначены точками). Количество пробных частиц равно 50.

На рис. 3 изображены изолинии функции $f_{1,2}(\chi_1, \chi_2)$, т.е. амплитуды первой гармоники после двух модуляций в зависимости от параметров χ_1 и χ_2 .

На рис. 4 изображены изолинии функции $f_{5,2}(\chi_1, \chi_2)$, т.е. амплитуды пятой гармоники после двух модуляций.

Из таблиц 1 и 2 следует, что оптимальные параметры группировки χ_1 очень велики для первой гармоники и постепенно уменьшаются с ростом номера гармоники, а соответствующие амплитуды $f_{n,k}$ велики. Таблица 3 показывает, что при параметрах, близких к асимптотическим, $f_{n,k}$ остаются большими даже при очень высоких номерах гармоник.

Из рис. 3 следует, что большая величина $f_{1,2}$ сохраняется в широкой области изменения χ_1 и χ_2 , а сопоставление рис. 3 и рис. 4 показывает, что с ростом номера гармоники область больших $f_{n,k}$ сужается, но остается внутри первой.

Не приведенные здесь результаты расчетов показали, что с ростом числа модуляций области больших $f_{n,k}$ расширяются.

2.4. Обсуждение результатов расчета

Необходимость применения очень больших параметров группировки при первых модуляциях для получения высоких амплитуд гармоник $f_{n,k}$ связана с формой кривой модулирующего напряжения - синусоиды, которая в интервале фаз $\pm \frac{\pi L}{2}$ с хорошей точностью близка к идеальной пилообразной форме. В связи с этим задача об эффективной группировке сводится к начальному собиранию большинства частиц в интервал фаз, меньший или равный $\pm \pi L / 2$ (в зависимости от того, по какой гармонике идет оптимизация), и получению коротких ступок с помощью только последней глубокой модуляции, играющей роль короткофокусной фазовой линзы.

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

- частичную или полную компенсацию разбросов по энергии частиц, максимально возмущенных при первых модуляциях, напряжением на резонаторах при последующих модуляциях, что и соответствует большим первым параметрам группировки;
- нарастание глубины модуляции α скачком.

Расчеты, проведенные с учетом разбросов по энергиям, полученным при первых модуляциях, показали, что амплитуды первых десяти гармоник при оптимальных параметрах группировки остаются близкими к рассчитанным выше при идеальных условиях а), б), в) пункта 2.2. и приведенным в таблицах 1, 2, 3.

На рис. 5 для примера приведена картина фазового движения в системе покоя невозмущенной частицы I2 при двухкратной модуляции, когда $\alpha_2 = 9\alpha_1 \ll 1$. Точками обозначены пробные частицы. Кривая 1 показывает начальное распределение частиц по фазам и энергиям, 2 - после первой модуляции, 3 - после первого дрейфа, 4 - кривая второй модуляции по энергии, 5 - распределение после этой модуляции, 6 - после второго дрейфа. Стрелками показаны фазовые траектории частиц, максимально возмущенных

при первой модуляции. Видно, что в процессе группировки эти частицы повернулись относительно своего начального положения на угол $\Phi = \frac{3\pi}{2}$, а движение потока в целом носит характер вихря, образующегося относительно центральной частицы и постепенно стягивающегося к ней по горизонтали, по фазам. Этот пример соответствует максимальной величине первой гармоники $f_{1,2} = 0,87$ при $\chi_1 = \pi$, $\chi_2 = \frac{\pi}{2}$, и из рисунка очевидно, что для более высоких номеров нужно уменьшать как χ_1 , так и χ_2 . Кроме того, кривая 6 показывает, что именно конечность α_1 относительно α_2 приводит к расщеплению распределения частиц на три идентичные ветви вблизи центральной частицы. При бесконечно малой α_1 они вырождаются в одну, соответствующую цифрам в таблицах I, 3, а также кривым рис. 2 и рис. 3.

В случае трех и более модуляций оптимальная для первой гармоники картина фазового движения тоже носит характер вихря, стягивающегося по фазам к центру, но с полным углом поворота для максимально возмущенных частиц Φ , равным примерно $\frac{5\pi}{2}$, $\frac{7\pi}{2}$ и т.д. Амплитуды гармоник остаются близкими к идеальным, полученным при условиях а), б), в) пункта 2.2.

3. Релятивистская группировка непрерывного пучка

Для группировки непрерывного пучка релятивистских заряженных частиц также используется зависимость длины траектории частицы от ее энергии в поперечном магнитном поле, только магнитная дорожка размкается для удобства ввода и вывода пучка.

Однокаскадный группирователь такого типа описан в /7/, где по аналогии с /9/ показано, что $f_{n,1}$ — амплитуда n -ой гармоники тока в единицах $2I_0$ также определяется функциями Бесселя первого рода n -го порядка, и, в частности,

$$f_{1, \max} = J_1(\chi)_{\max} = 0,582.$$

Переход к многокаскадной группировке (рис. 6) может сильно повысить ее эффективность, особенно при использовании

очень больших параметров группировки в первых каскадах и сильного нарастания глубины модуляции от каскада к каскаду $\alpha_1 \ll \alpha_2 \ll \alpha_3 \ll \dots$. При необходимости поддерживать одинаковую глубину модуляции в разных каскадах $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx \alpha_3 \dots$ весьма полезным оказывается доускорение пучка между каскадами в несколько раз квазистатическим вихревым, либо просто статическим электрическим полем, ибо в этом случае уменьшается относительный разброс частиц по энергии при входе в последующий каскад. Анализ фазового движения показывает, что увеличение глубины модуляции в несколько раз почти эквивалентно доускорению во столько же раз, и при поиске оптимальной конструкции группирователя скорее всего нужно использовать как возрастание α , так и доускорение.

Для такого группирователя справедливы практически все результаты, полученные выше для замкнутой магнитной дорожки, за исключением одной особенности: применение сильно отличающихся по величине χ , α и энергии в разных каскадах может привести к необходимости применения в каждом каскаде своей величины \mathcal{K} , ширины, радиуса и числа витков в магнитной дорожке. Действительно, в этом случае

$$(I4) \quad N_{zp} = \frac{t_{zp}}{T_0} = \frac{\Pi_{\text{каскад}}}{\lambda}$$

где $\Pi_{\text{каскад}}$ — периметр каскада, λ — длина волны

$$(I5) \quad \lambda = c T_0$$

а параметр группировки χ приобретает вид

$$(I6) \quad \chi = 2\pi \mathcal{K}_0 \alpha \frac{\Pi_{\text{каскад}}}{\lambda}$$

Перепишем (I6) в виде

$$(I7) \quad \frac{\Pi_{\text{каскад}}}{\lambda} = \frac{\chi}{2\pi \mathcal{K}_0 \alpha}$$

Из (17) видно, что для уменьшения периметра дорожки $\Pi_{каск}$ при заданных χ и α нужно использовать большие K_c , т.е. применять мягкофокусирующую магнитную дорожку, например, однородное магнитное поле в /1/, /2/, /3/, /7/.

Поскольку при эффективной группировке с ростом номера каскада χ уменьшается, а α - возрастает, то при заданном K_c периметры магнитных дорожек должны резко уменьшаться.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование фазового движения заряженных частиц в магнитных дорожках с поперечным магнитным полем показало, что эффективность одночастотной группировки можно резко повысить, если использовать очень большие параметры группировки в первых каскадах в сочетании с нарастанием глубины модуляции по энергии от каскада к каскаду, а также с применением доускорения между каскадами.

Для пучков, циркулирующих в замкнутых дорожках, это означает возможность получения очень коротких и плотных ступков с помощью резонаторов, работающих на первой гармонике частоты обращения. Амплитуда тока на этой гармонике может достигать $1,9I_c$ и более, амплитуда десятой $1,8I_c$ и более.

Использование нескольких последовательных разомкнутых магнитных дорожек позволяет получать непрерывные потоки или пуги таких же плотных ступков.

Предполагаемые решения представляются актуальными и полезными при генерации и накоплении пучков вторичных частиц в физике высоких энергий, при инжекции в сильноточные электронные ускорители, а также для развития СВЧ-энергетики.

Таблица 1. Максимальные амплитуды гармоник тока и соответствующие параметры группировки в зависимости от номера гармоники при двух модуляциях по энергии.

n	$f_{n,2 \text{ макс}}$	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. Максимальные амплитуды гармоник тока при трех модуляциях по энергии.

n	$f_{n,3 \text{ макс}}$	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. Амплитуды гармоник тока в случае одной, двух и трех модуляций при асимптотических параметрах идеальной одночастотной группировки

n	$f_{n,1}$	$f_{n,2}$	$f_{n,3}$
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

Л и т е р а т у р а

- /1/ Ф.А.Водопьянов, Б.П.Мурин. Способ генерирования ВЧ-колебаний при помощи пучка релятивистских электронов. Техника ускорителей. Труды ИАН 1975, №22, стр.20.
- /2/ Л.А.Рогинский. "Синхротронное и клистронное группирование релятивистских пучков в заворачивающем магнитном поле". Там же стр.103.
- /3/ Ф.А.Водопьянов, В.Н.Литвинов. Высокоэффективная группировка сильноточных релятивистских пучков. Та же, стр.70.
- /4/ П.Д.Колеман. Теория ребатрона... Сборник статей. Миллиметровые и субмиллиметровые волны, Москва, ИЛ, 1959, стр.301.
- /5/ А.А.Коломенский, А.Н.Лебедев. Теория циклических ускорителей, Москва, ИЛ, 1962, стр.145.
- /6/ В.Н.Гайдук, К.И.Палатов, Д.М.Петров. Физические основы электроники СВЧ, Москва, Сов.радио, 1971.
- /7/ J.W. Beal, R.K. Cooper, W.A. Lamb, V.K. Neil, D.S. Proano, L. Smith and D.F. Wright. A device for bunching relativistic electrons. IEEE transactions on nuclear science, 1973, v. NS20, N°3, part 1, p. 347+350
- /8/ Д.Дж.Уайлд. Методы поиска экстремума, Москва, Наука, 1967.
- /9/ D.L. Webster. Cathode-Ray Bunching. J.A.P., vol 10, July 1939, p. 501+508.

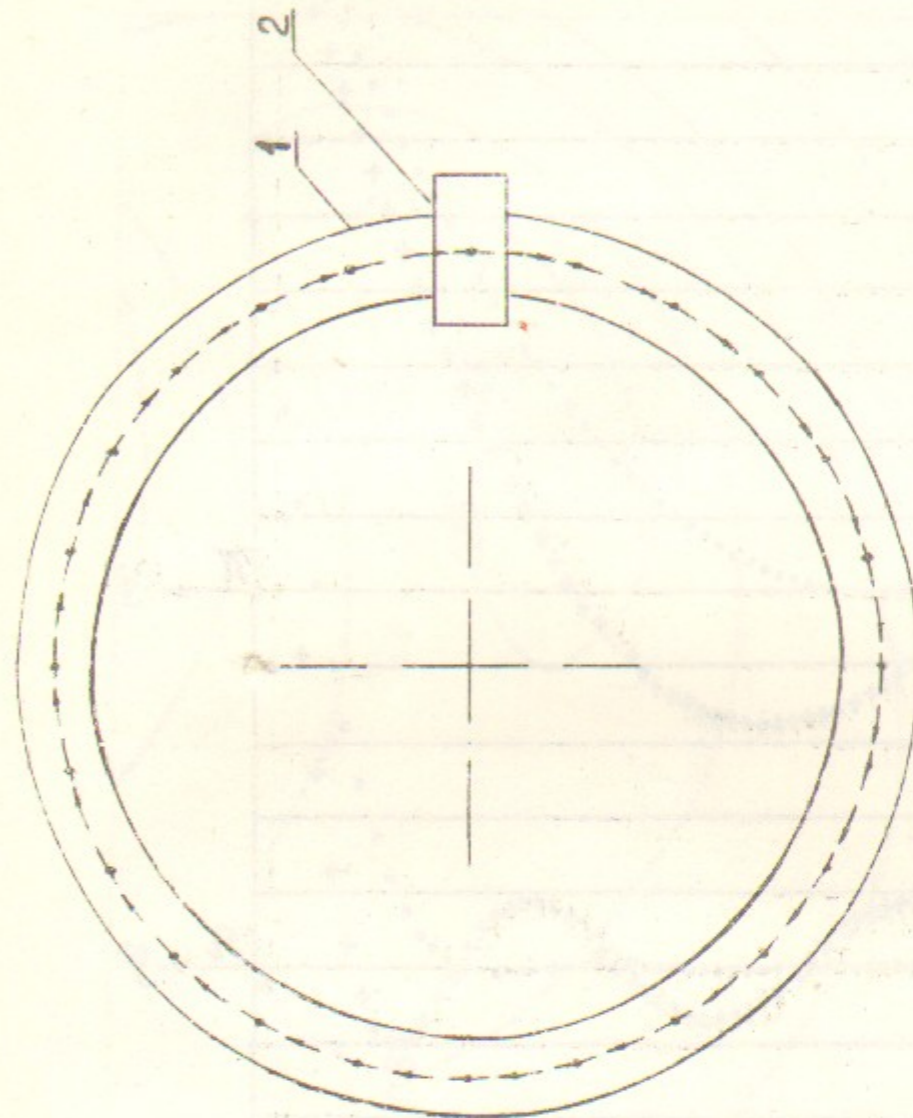


Рис. 1. Схема одночастотной группировки в замкнутой магнитной дорожке.
1 - магнитная дорожка, 2 - модулирующий резонатор.

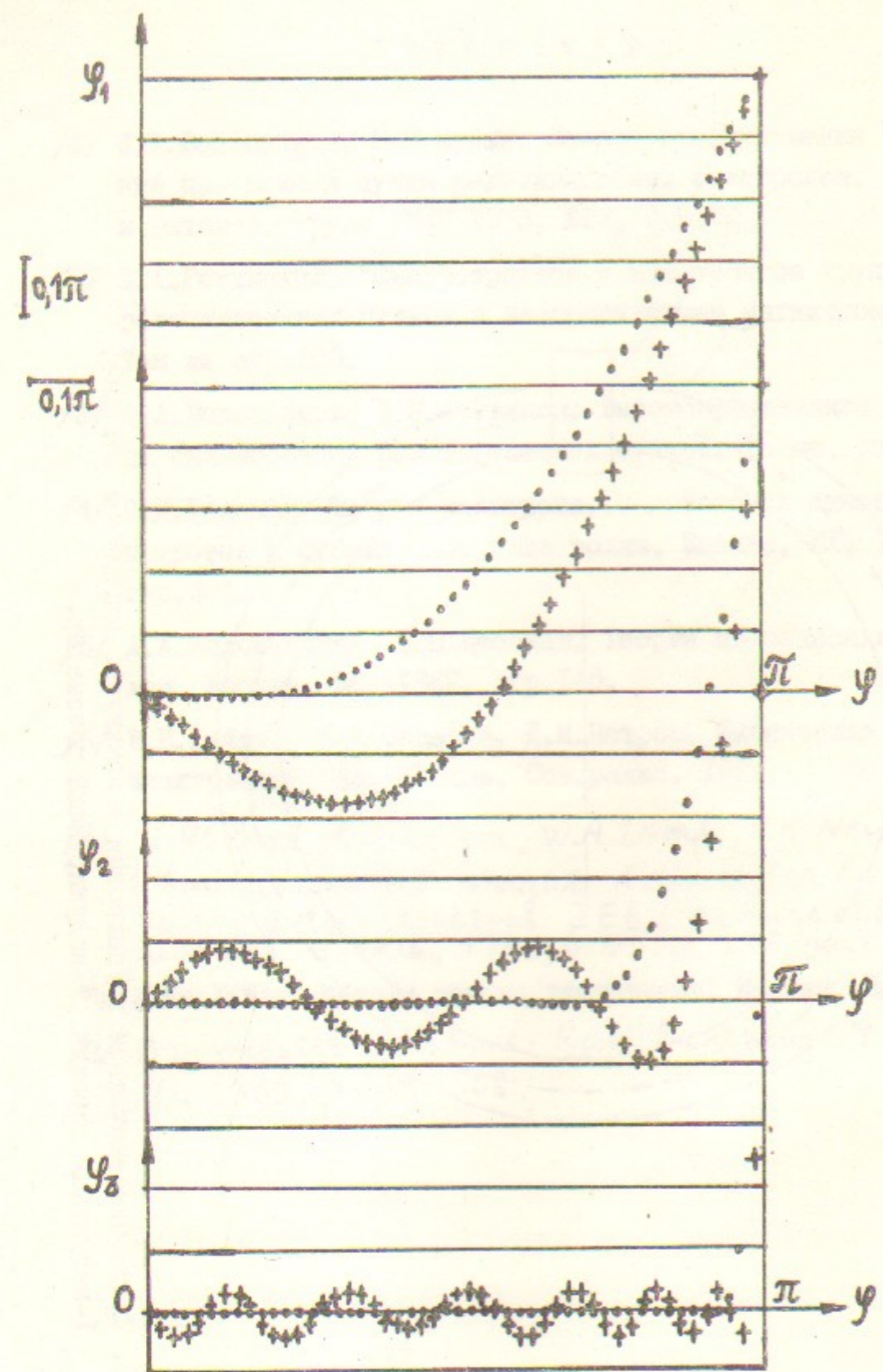


Рис.2. Зависимость выходной фазы от входной при идеальной одночастотной группировке в случае одной, двух и трёх модуляций по энергии.

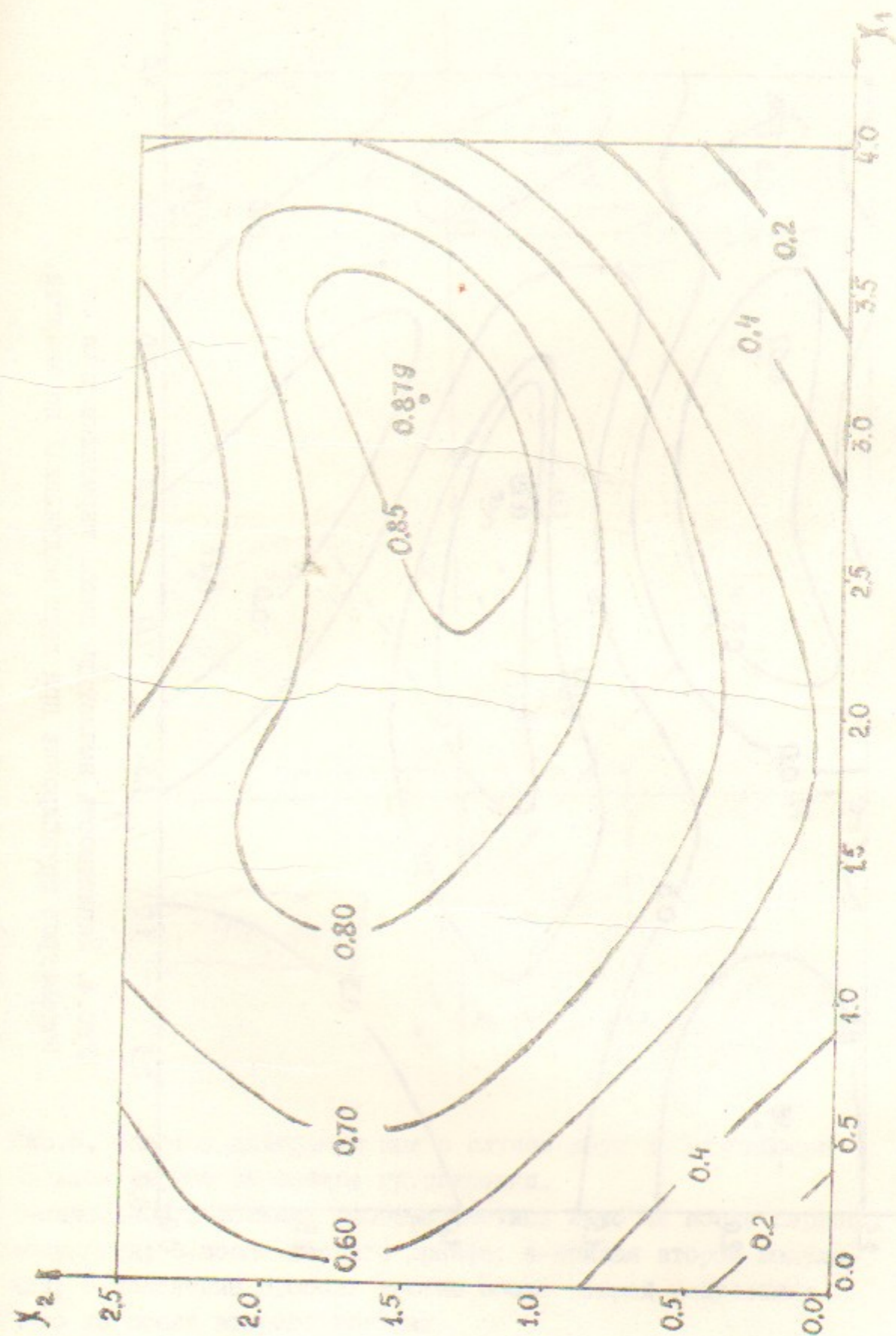


Рис.3. Зависимость амплитуды первой гармоники тока от параметров группировки при двух модуляциях по энергии.

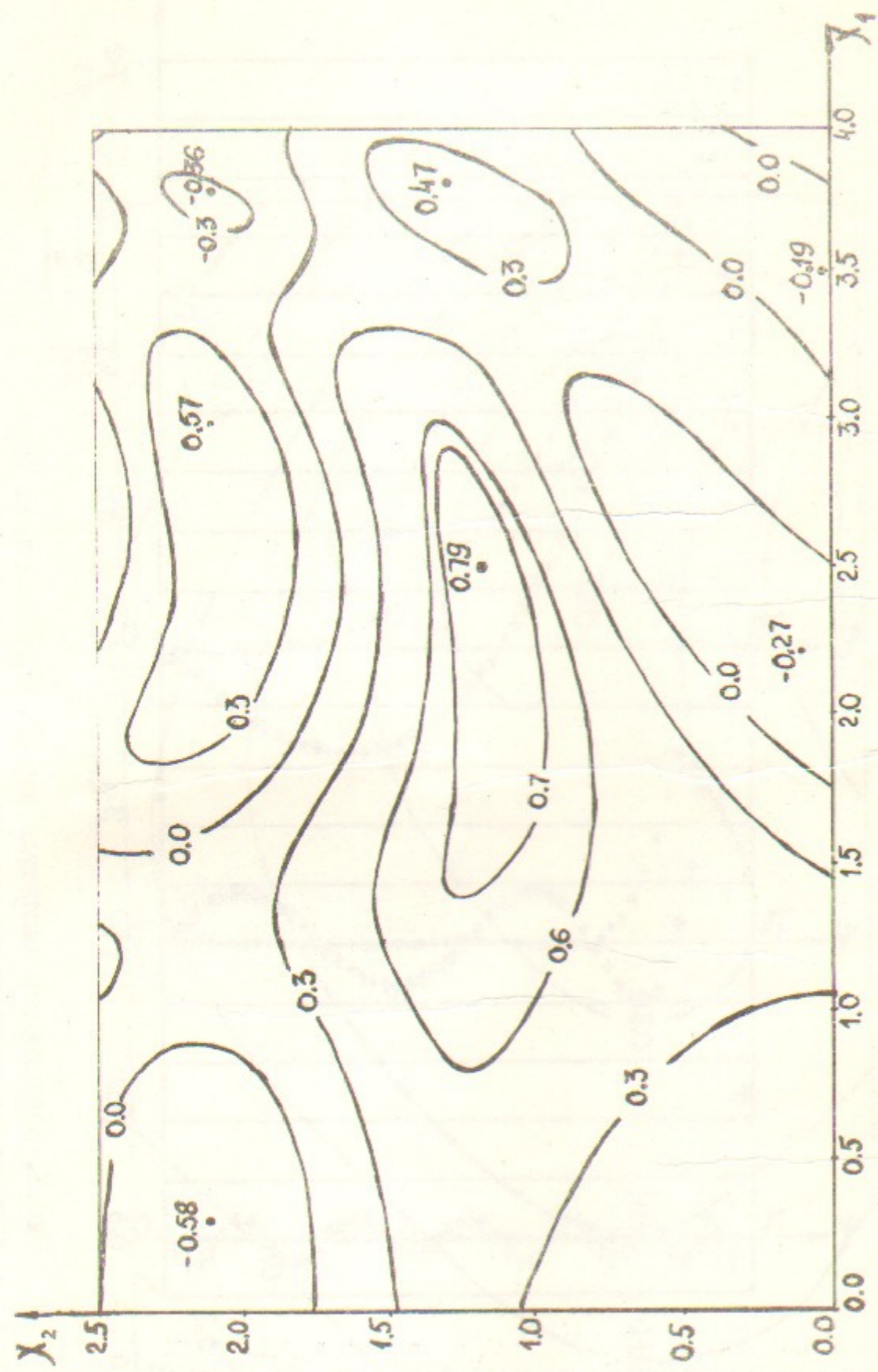


Рис.4. Зависимость амплитуды n -той гармоники тока от параметров группировки при двух модуляциях по энергии.

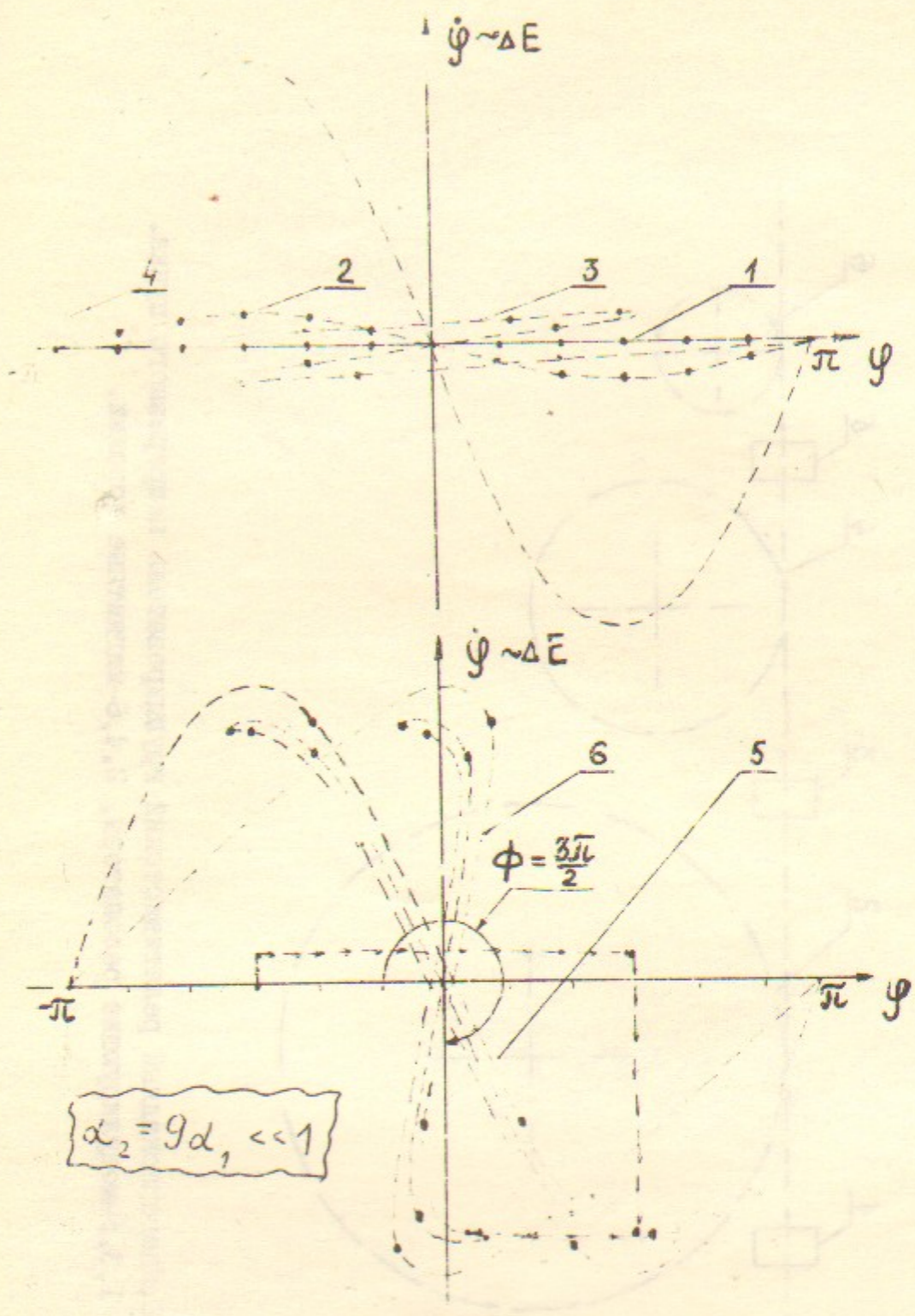


Рис.5. Фазовые диаграммы при в случае двух модуляций при большом первом параметре группировки.
 1-начальное положение пробных частиц; 2-то же после первой модуляции; 3-после первого дрейфа; 4-кривая второй модуляции; 5-положение пробных частиц после второй модуляции; 6-то же после второго дрейфа.

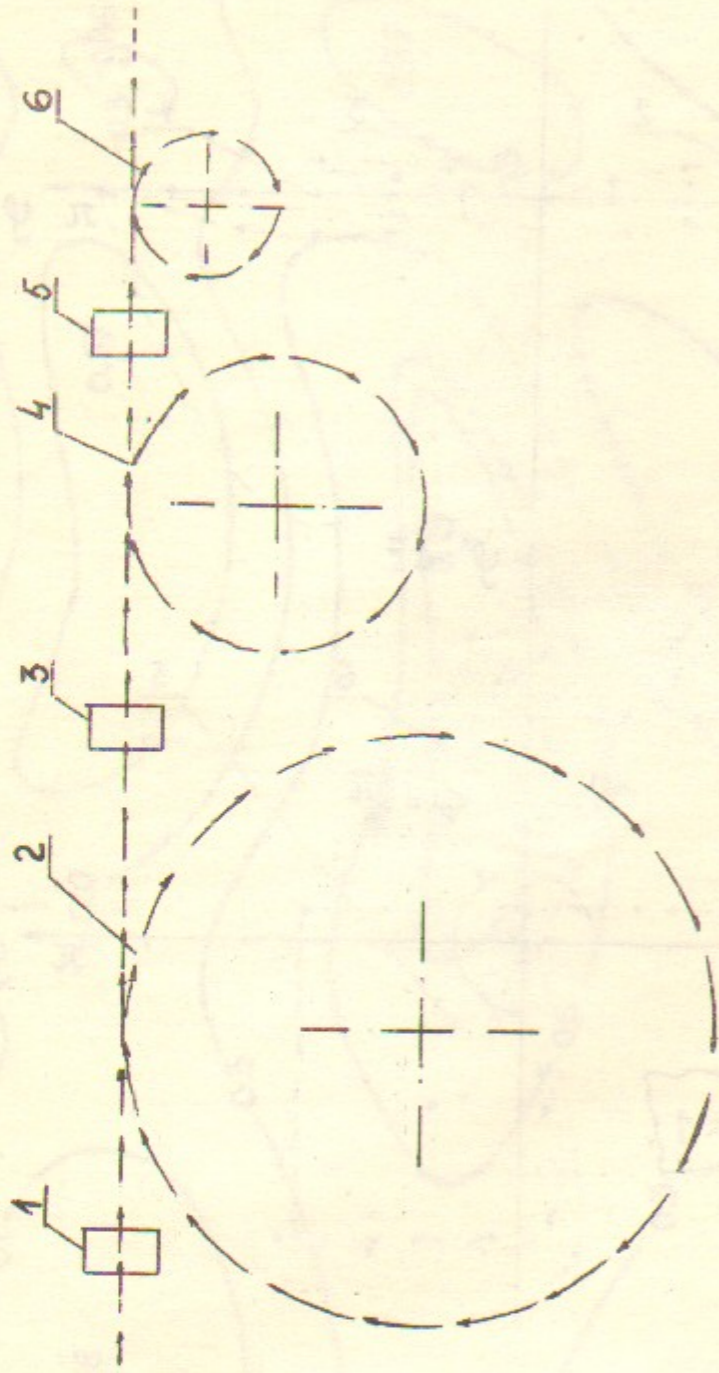


Рис. 6. Многокаскадный релятивистский группирователь непрерывного пучка.
 1, 3, 5-модулирующие резонаторы, 2, 4, 6-магнитные дорожки.