

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



СЗУ5А1
Г-124

20/1-75

P9 - 8227

191/2-75

З.Г.Гаврилова, Г.А.Иванов

ФАЗИРУЮЩАЯ СИСТЕМА

ДЛЯ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ

1974

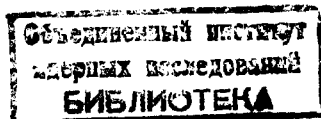
ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

P9 — 8227

З.Г.Гаврилова, Г.А.Иванов

ФАЗИРУЮЩАЯ СИСТЕМА

ДЛЯ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ



В коллективном ускорителе при наличии внешней ускоряющей системы одним из центральных условий является синхронизация короткого сгустка с напряжением на ускоряющих промежутках. Временной сдвиг /для импульсной ускоряющей системы/ или фазовый сдвиг /для в/ч системы/ между соседними ускоряющими элементами может быть заранее рассчитан.

Сложнее обстоит дело с синхронизацией момента инжекции сгустка в первый ускоряющий промежуток.

В данной работе рассматривается возможность такой синхронизации для в/ч ускоряющей системы, описанной в ^{1/}. При отсутствии синхронизации механизм захвата можно рассматривать аналогично захвату частиц в режим ускорения в обычных ускорителях с протяженным пучком. Максимальная величина области захвата при этом составляет $3\phi_s$, где ϕ_s - равновесная фаза.

С целью увеличения коэффициента захвата перед ускорителем обычно устанавливается группирователь волноводного или кристронного типа, сфазированный с ускоряющей системой. Подбором закона изменения по z фазовой скорости и амплитуды ускоряющего поля обеспечивают затухание фазовых колебаний и получают на выходе группирователя сгусток фазовой протяженности меньше 90° .

В группирователях для ЛУЭ изменение фазовой скорости обычно колеблется в пределах от 0,39-0,41 до 0,98-0,99 ^{2/}. Амплитуда ускоряющего поля $\mathcal{E}_z = 20-30$ кВ/см, длина волны лежит в сантиметровом диапазоне.

Группирователь характеризуется следующими параметрами: ϕ_s - равновесная фаза; $\Delta\phi_{ВХ}$ - разность между крайними начальными фазами частиц, конечные фазы которых находятся в области продольной устойчивости;

$S = \frac{\Delta\phi_{ВХ}}{2\pi}$ - параметр захвата, показывающий долю частиц, захваченных в режим затухающих фазовых колебаний;

$\Delta\phi_{ВЫХ}$ - лежащий в области продольной устойчивости фазовый интервал, в пределах которого заключены частицы на выходе группирователя;

$\frac{\Delta\phi_{ВХ}}{\Delta\phi_{ВЫХ}}$ - параметр группировки.

Для случая одиночных сгустков последние можно рассматривать как отдельные частицы в непрерывном пучке и, таким образом, группировка частиц в непрерывном пучке около фазы ϕ_s будет соответствовать подтягиванию к этой фазе одиночного сгустка, которое мы назовем "фазировкой".

Очевидно, что в нашем случае вероятность захвата одиночного сгустка в ускоряющую систему будет равна

$$W = \frac{\Delta\phi_{ВХ}}{2\pi} \cdot 100\%.$$

Учитывая особенности коллективного ускорителя, а именно:

а/ для ускорения используются утяжеленные электронные кольца / $\gamma_{\perp} = 30-40$ /;

б/ существует ограничение на величину продольного электрического поля из условия неотрыва ионов;

в/ при использовании резонаторной ускоряющей системы необходимо иметь резонаторы достаточной энергоемкости; представляет интерес рассмотреть систему с параметрами

$$\beta_{\phi} = 0,2-0,5$$

$$\epsilon_z = 10 \text{ кВ/см}, \Lambda = 2 \text{ м.}$$

В настоящей работе исследуется динамика движения одиночного сгустка в замедляющей системе при различных законах изменения β_{ϕ} и ϵ_z с целью получения удовлет-

ворительного коэффициента захвата S и параметра фазировки

$$\Phi = \frac{\Delta\phi_{ВХ}}{\Delta\phi_{ВЫХ}}.$$

Известно, что процесс фазовых колебаний описывается нелинейным дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами:

$$\frac{d}{d\tau} \left(M_z \frac{d\phi}{d\tau} \right) + F(\sin\phi - \sin\phi_s) = 0, \quad /1/$$

где

$$M_z = m_z \beta_{sr}^2; \quad m_z = m_0 (1 - \beta_{sr}^2)^{-1/2},$$

$$F = 2\pi m_0 a \beta_{sr}; \quad a = \frac{e \epsilon \Lambda}{m_0 c^2}; \quad \tau = \frac{t}{T}, \quad T = \frac{\Lambda}{c};$$

m_z - продольная масса частицы, τ - безразмерное время, T - период колебаний генератора, m_0 - масса покоя, a - параметр напряженности, ϵ - амплитуда ускоряющей гармоники, β_{sr} - скорость равновесной частицы, деленная на скорость света.

В общем виде уравнение /1/ не решается. Решение возможно методом Мандельштама и Палалекси^{/3/} в случае малых величин $(\phi - \phi_s)$ и при условии, что $M(\tau)$ медленно меняется. В этом случае частота фазовых колебаний ω_{ϕ} и амплитуда B запишутся:

$$\omega_{\phi} = \omega_0 \sqrt{\frac{a/2\pi}{\frac{m_z}{m_0} \beta_{sr}}} \cdot \cos\phi_s \quad /2/$$

$$B = \frac{\text{const}}{\sqrt{\frac{m_z}{m_0} \beta_{sr}^3 a \cos\phi_s}} \quad /3/$$

Из выражений /2/ и /3/ видно, что для того, чтобы фазовые колебания были затухающими, необходимо:

- 1/ увеличивать $\beta_{\phi} = \beta_{sr}$;
- 2/ увеличивать напряженность ускоряющего поля ϵ ;
- 3/ работать при малом значении равновесной фазы ϕ_s .

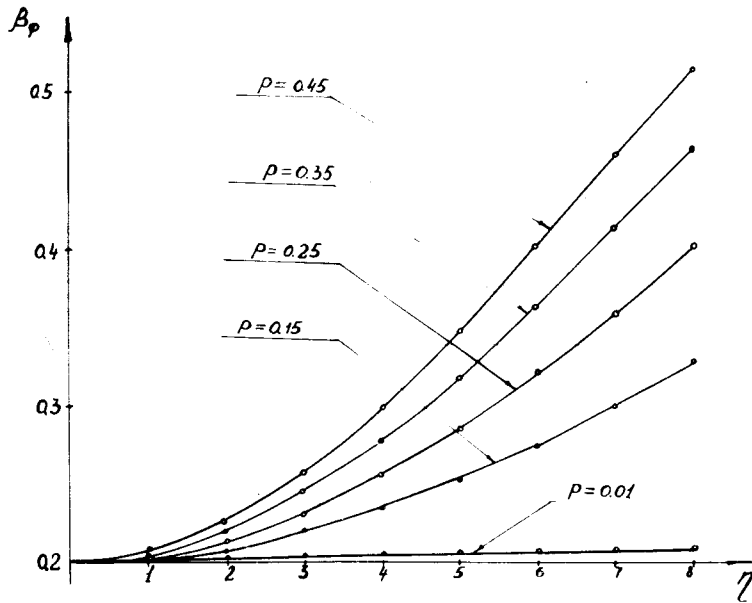


Рис. 1. Изменение фазовой скорости, задаваемой при интегрировании системы уравнений /4/ для различных ρ в формуле

$$\beta_{\phi} = \frac{2}{\pi} \arctg \left[\frac{\rho \eta}{2\pi} + D \right]$$

В нашем случае из условия максимального захвата $\phi - \phi_s \sim \pi$, поэтому аналитические методы для получения количественных результатов непригодны. Картина фазовых колебаний при том или ином законе изменения β_{ϕ} и \mathcal{E} смотрелась при численном интегрировании системы уравнений на ЭВМ

$$\frac{dE}{dz} = -e \mathcal{E} \sin \phi$$

$$\frac{d\phi}{dz} = k \left(\frac{1}{\beta_{\phi}} - \frac{1}{\beta_r} \right), \quad /4/$$

E - полная энергия, E_0 - энергия покоя,

$$k = 2\pi/\Lambda; \quad \beta_r = \frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{E},$$

β_{ϕ} начальное = β начальное частицы = 0,2.

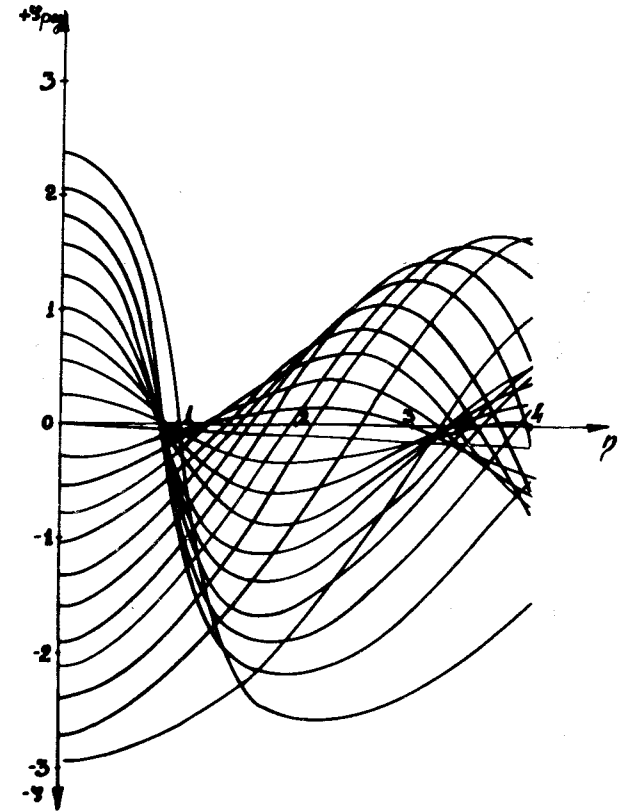


Рис. 2. Фазовые траектории для различных начальных фаз при $\rho = 0,15$ и электрической амплитуде волны $\mathcal{E} = 10$ кВ/см.

Пределы изменения β_{ϕ} выбирались от 0,2 до 0,5. Пределы изменения \mathcal{E} - от 5 кВ/см до 15 кВ/см,

$$\Lambda = 2 \text{ м.}$$

Результаты численного счета сведены в таблицу графиков. В первых вариантах система уравнений /4/ интегрировалась при следующем законе изменения β_{ϕ} : /см. рис. 1/

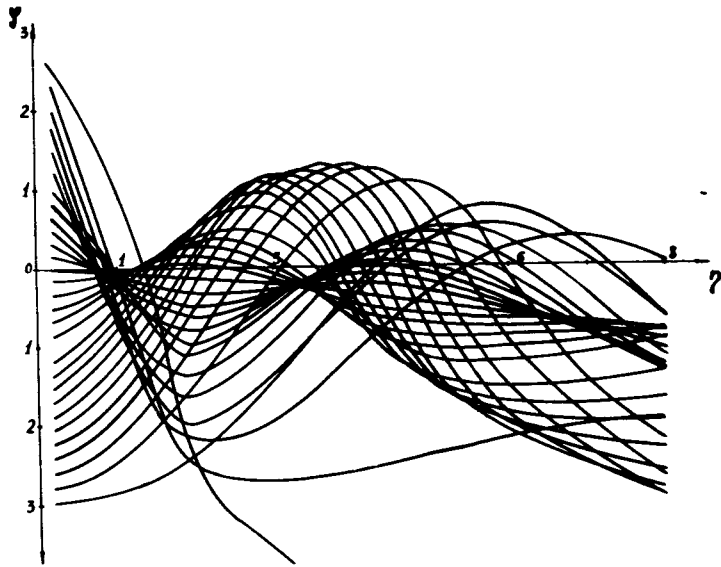


Рис. 3. Фазовые траектории при $p = 0,25$ и $E = 10$ кВ/см.

$$\beta_{\phi} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{p\eta}{2\pi} + D \right] \quad \text{при различных } p \text{ /от } 0,01 \text{ до } 0,45/.$$
 Параметр p показывает степень роста β_{ϕ} .
 $\eta = kz$; $k = 2\pi/\Lambda$; $D = 0,325$ из условия $\beta_{\phi_H} = 0,2$.

Счет производился при трех значениях напряженности ускоряющего поля.

$$\mathcal{E}_1 = 10 \text{ кВ/см при всех } \eta$$

$$\mathcal{E}_2 = 15 \text{ кВ/см при всех } \eta$$

$$\mathcal{E}_3 = \begin{cases} 5 \text{ кВ/см при } \eta = 0 \\ 5 + 5\eta / \text{кВ/см при } 0 < \eta \leq 2 \\ 15 \text{ кВ/см при } 2 < \eta. \end{cases}$$

На рис. 2-6 показаны первые циклы фазовых колебаний для различных p и E .

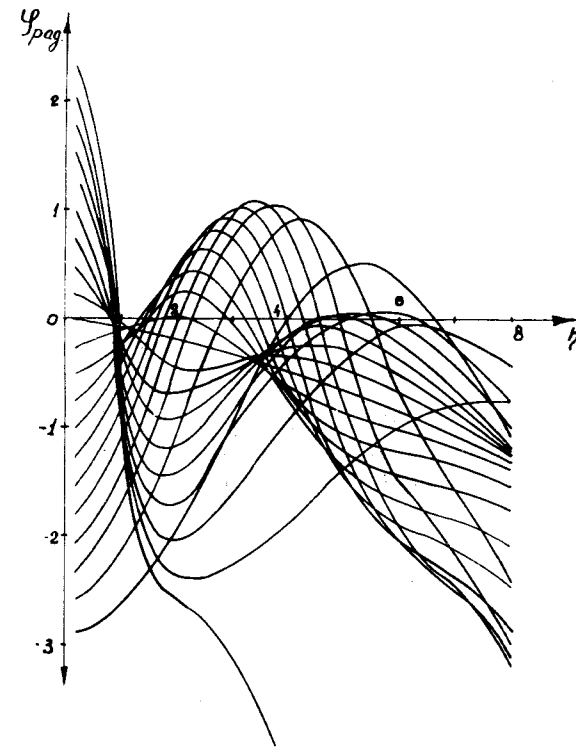


Рис. 4. Фазовые траектории при $p = 0,35$ и $E = 10$ кВ/см.

На рис. 2, 3 и 4 $p = 0,15; 0,25; 0,35$; соответственно и $E = \mathcal{E}_1$. рис. 5 / $p = 0,15$; $E = \mathcal{E}_2$ / , , рис. 6 / $p = 0,25$; $E = \mathcal{E}_3$ /.

На всех графиках ось ординат - ось начальных фаз, т.е. фаза, в которую попадает сгусток в начальный момент.

Ось абсцисс $\eta = \frac{2\pi}{\Lambda} z$.

В последующих вариантах счета задавался градиент синхронной фазы по z . Счет был продолжен до $\eta = 18 / \sim 6 \text{ м/}$. Синхронный сгусток выбран с $\phi_{\text{нач.}} = 0$.

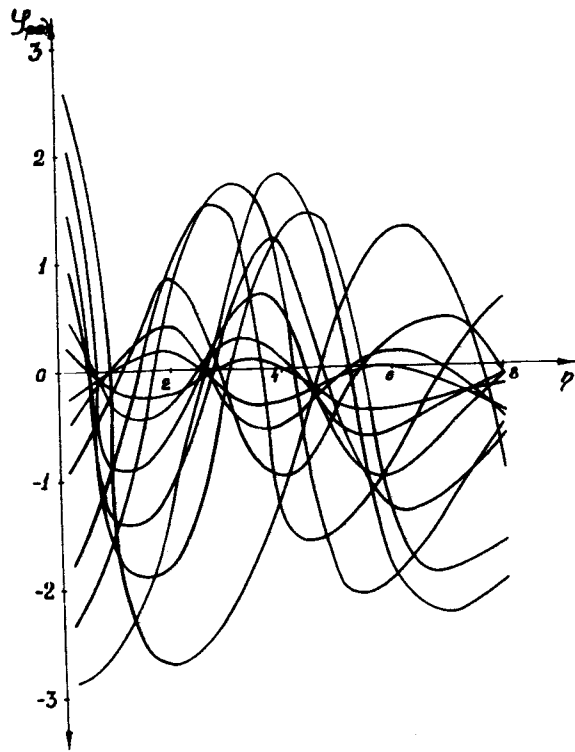


Рис. 5. Фазовые траектории при $\rho = 0,15$ и $E = 15$ кВ/см.

Рисунки 7-11 показывают картины фазовых колебаний при различных град ϕ_s .

На рис. 12 взят переменный град ϕ_s по z , а именно:

$$\begin{aligned} &0,02 \text{ град/см для } 0 < \eta \leq 4; \\ &0,04 \text{ град/см для } 4 < \eta < 9; \quad W = 88\%; \\ &0,06 \text{ град/см для } \eta \geq 0; \quad \Delta \phi_{\text{ВЛХ}} = 72^\circ; \\ &\hspace{10em} \eta = 20 \end{aligned}$$

Изменение фазовой скорости волны, соответствующее этим град ϕ_s , приведено на рис. 13.

Из графиков видно, что коэффициент захвата увеличивается при меньшей степени роста $\beta \phi$ / малые ρ и малые град ϕ_s / при одной и той же амплитуде ускоряющего

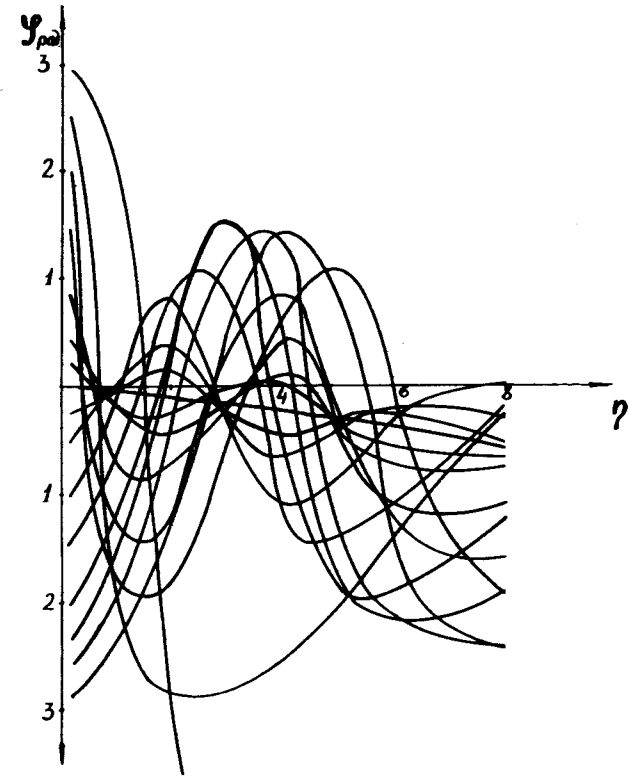


Рис. 6. Фазовые траектории при $\rho = 0,25$ и $E = E_3$.

поля. См. рис. 2 / $W = 89\%$; $\Phi_{\eta=4} = 1,78/$ и рис. 4 / $W = 79\%$; $\Phi_{\eta=4} = 1,74/$, а также рис. 7 / $W = 88\%$; $\Phi_{\eta=12} = 2,02/$ и рис. 8 / $W = 83\%$; $\Phi_{\eta=12} = 2,11/$.

Большая амплитуда ускоряющего поля замедленной волны улучшает условия фазировки при одном и том же законе изменения $\beta \phi$, см. рис. 2 / $\Phi_{\eta=4} = 1,78/$ и рис. 5 / $\Phi_{\eta=4} = 1,67/$, а также рис. 7 / $\Phi_{\eta=12} = 2,02/$ и рис. 10 / $\Phi_{\eta=12} = 3,06/$.

Хорошие результаты можно получить, осуществляя переменный по z град ϕ_s /см. рис. 12/.

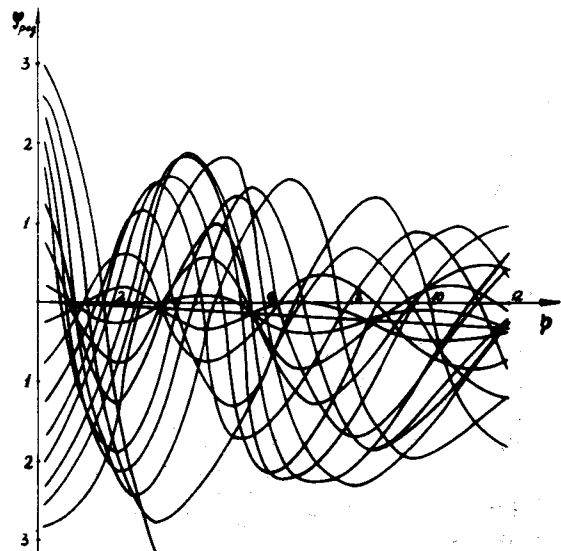


Рис. 7. Картина фазовых колебаний при град $\phi_s = 0,05$ град/см, $\xi = 10$ кв/см.

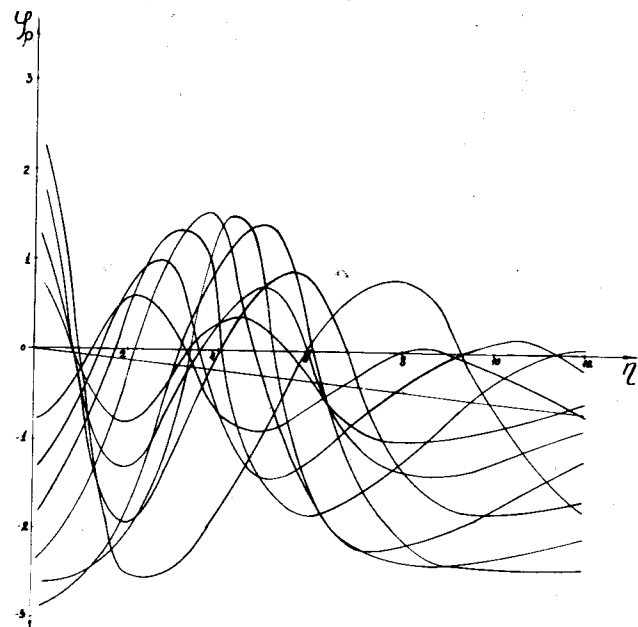


Рис. 8. Фазовые колебания для град $\phi_s = 0,1$ град/см, $\xi = 10$ кв/см.

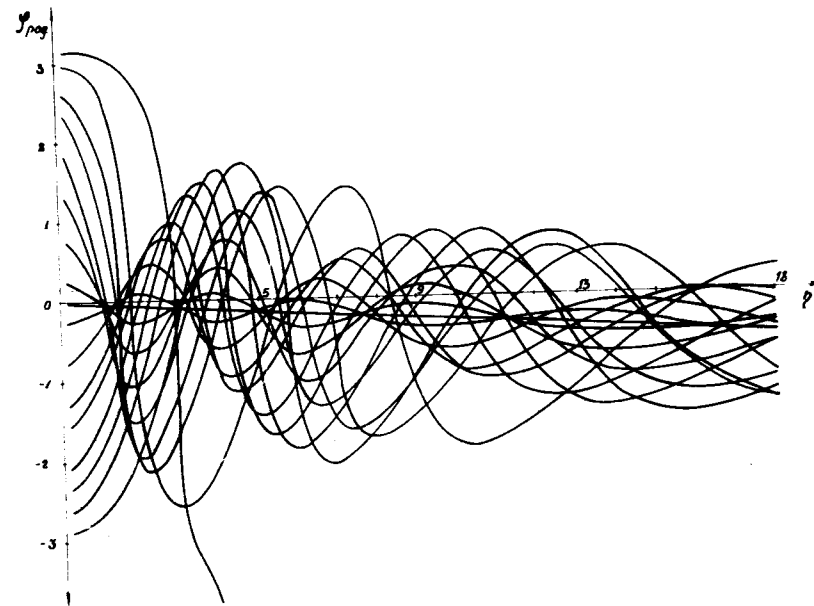


Рис. 9. Картина фазовых колебаний для град $\phi_s = 0,05$ град/см, $\xi = \xi_3$.

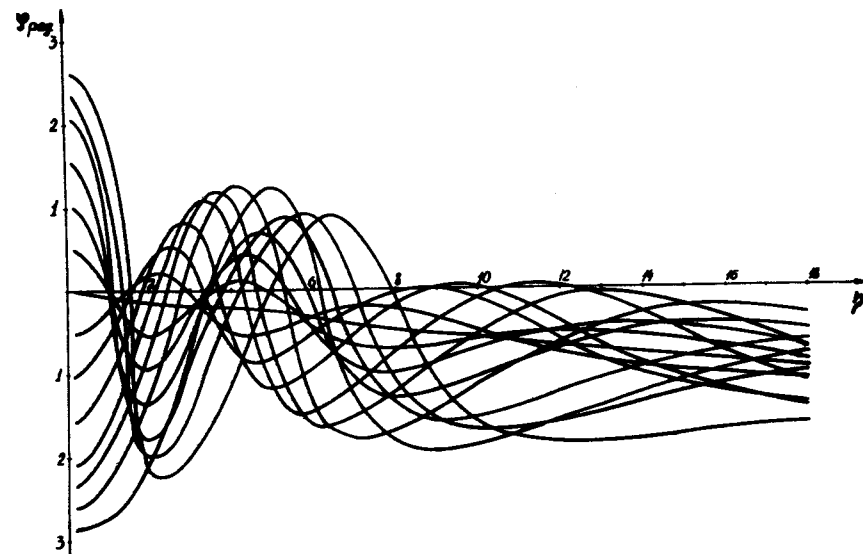


Рис. 10. Фазовые колебания для град $\phi_s = 0,1$ град/см, $\xi = \xi_3$.

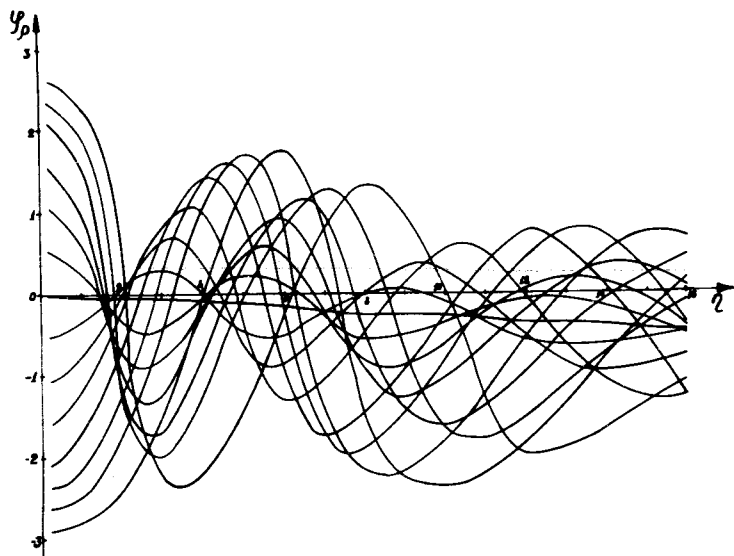


Рис. 11. Фазовые колебания для град $\phi_s = 0,05$ град/см, $\Lambda = 1$ м, $\mathcal{E} = 10$ кв/см.

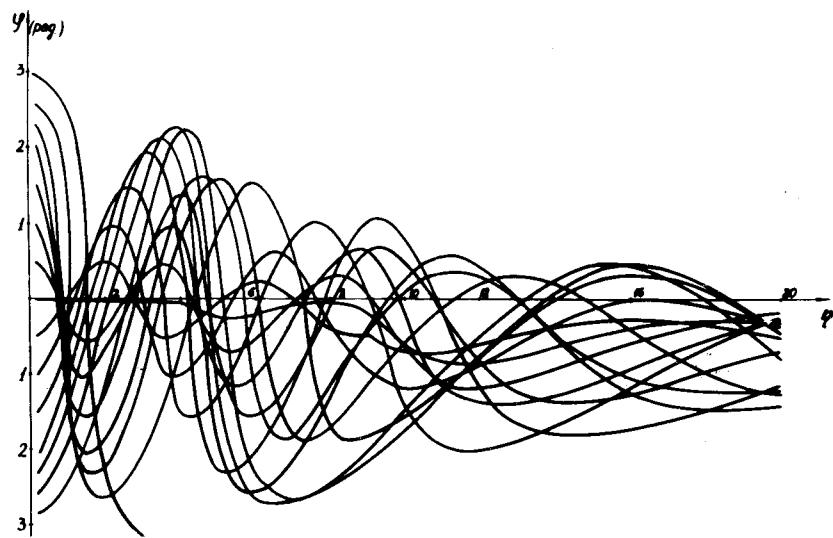


Рис. 12. Картина фазовых колебаний с переменным град ϕ_s .

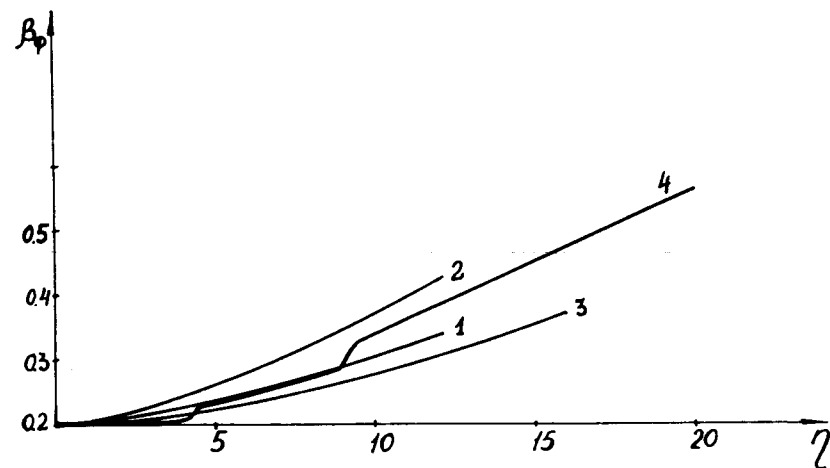


Рис. 13. Изменение фазовой скорости волны для различных град ϕ_s : кривая 1 для град $\phi_s = 0,05$ град/см; кривая 2 для град $\phi_s = 0,1$ град/см; кривая 4 для град $\phi_s = 0,02$ ($0 < \eta \leq 4$); $0,04$ ($4 < \eta < 9$); и $0,06$ для $\eta \geq 9$.

Следует отметить, что коэффициент захвата найден с точностью $+4\%$, т.е. ошибка работает в сторону увеличения W из-за того, что вариация по начальным фазам бралась через 15° .

Очевидно, фазировка сгустков должна сопровождаться некоторым энергетическим разбросом. На рис. 14 представлена величина $(E - E_s)/E_0$ в зависимости от z при нулевом начальном разбросе для варианта, изображенного на рис. 9. Здесь E_s - энергия синхронного сгустка; E - энергия несинхронного сгустка; E_0 - начальная энергия.

По графикам 9 и 14 можно судить о разбросе по энергиям и фазам отдельных сгустков в любом сечении z .

Так, при $\eta = 18 / - 6$ м/ $\Delta \phi_{\text{ВЫХ}} = 105^\circ$,

$$E_s - E = \begin{cases} +3,1\% \\ -3,8\% \end{cases}$$

Наконец, для более полного анализа на рис. 15 приведена сепаратриса варианта рис. 9 для крайних входных фаз.

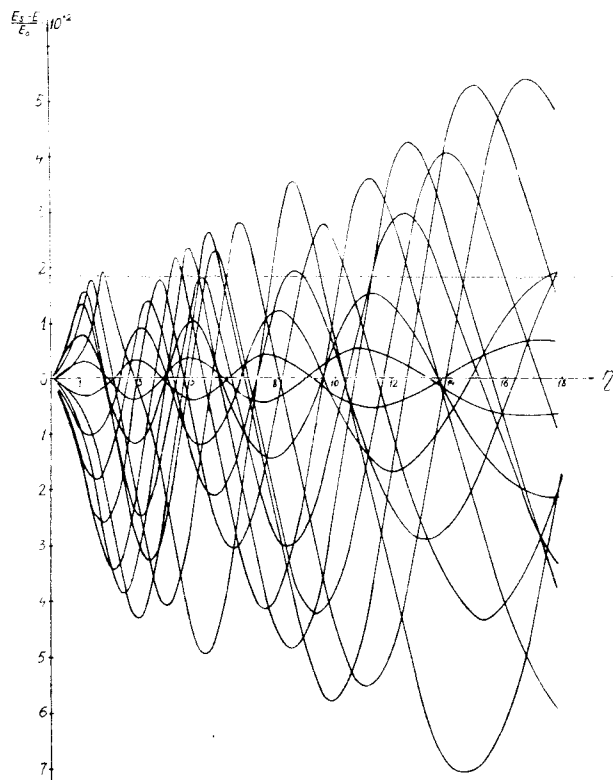


Рис. 14. Изменение величины энергетического разброса.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности создания для коллективного ускорителя фазирующей системы волноводного типа при параметрах: $\Lambda = 1-2$ м; $\mathcal{E} = 5-15$ кВ/см; $\beta_\phi = 0,2-0,5$.

В заключение авторы благодарят Е.Б.Титова за помощь в оформлении результатов.

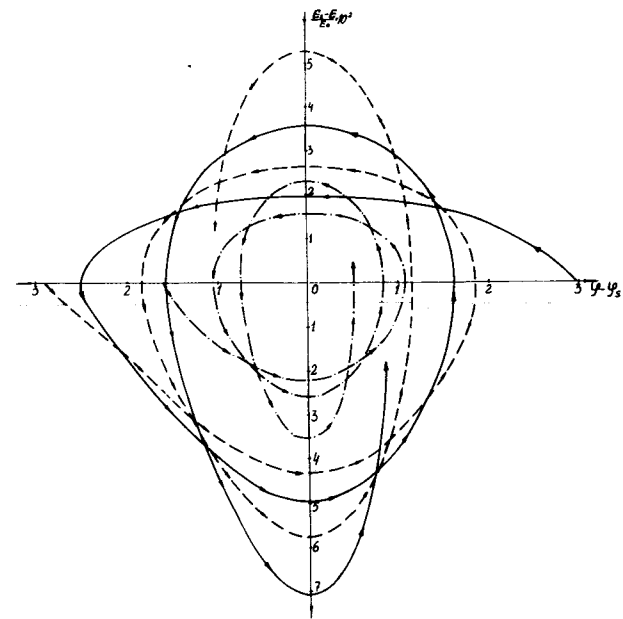


Рис. 15. Сепаратриса для $\phi_{BX} = 2,98$ рад /сплошная линия/; $\phi_{BX} = -2,88$ рад /пунктирная линия/ и $\phi_{BX} = -1,57$ рад /штрих-пунктирная линия/.

Литература

1. Г.А.Иванов, В.Н.Мамонов, Л.В.Светов. Сообщение ОИЯИ, Р9-6883, Дубна, 1973.
2. Некоторые вопросы инженерной физики, вып. 2, Москва, 1957.
3. С.П.Стрелков. Введение в теорию колебаний. Гостехиздат, М.-Л., 1951.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 августа 1974 года.