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

Кафедра электроники, колебаний и волн

# Исследование дисперсионных характеристик системы двух взаимодействующих ленточных электронных пучков

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4031 группы

направления 03.03.03 – «Радиофизика»

института физики

Белякова Дмитрия Владимировича

| | | |
|---|---|---|
| Научный руководитель | | |
| доцент кафедры электроники, колебаний и волн | 06.06.22<br>подпись, дата | Титов А.В. |
| Зав. кафедрой электроники, колебаний и волн | | |
| к. ф.-м. н., доцент | 06.06.22<br>подпись, дата | Гришин С.В. |

Саратов 2022 г.

**Введение.** Волновые процессы в распределенных неравновесных средах, взаимодействующих электронных потоках – одно из основных направлений исследований в радиофизике и сверхвысокочастотной вакуумной электронике. Это направление, взявшее свое начало в первой половине 20 века, обрело большую популярность в связи с перспективами создания СВЧ-приборов О-типа. Наибольшую распространение среди исследователей по всему миру, это направление получило благодаря работам Дж. Пирса, А. Гаева, Л. Ниргаарда и других. Интерес к исследованиям связан с классическими проблемами радиофизики по изучению миллиметрового и субмиллиметрового диапазона (сейчас наиболее интересен терагерцовый диапазон) и с уменьшением физических размеров радиофизических устройств. Одним из вариантов продвижения в терагерцовый диапазон является возможность замены замедляющей системы приборов О-типа вторым электронным пучком. Тогда же полагалось, что при введении дополнительного скоростного разброса в электронный пучок в целом повысит эффективность прибора. Появилось два направления исследований, первое основывалось на возможности создания приборов, принцип которых основан на взаимодействии двух электронных пучков (электронно-волновая лампа и двухлучевой усилитель), второе направление занималось конструированием двухлучевых модернизаций уже существующих приборов (двухлучевая ЛБВ, двухлучевые релятивистские пролетные клистроны, двухлучевые мазеры и тд.). Отметим, что к концу XX века интерес к двухпотоковым системам в низкочастотной области СВЧ диапазона значительно снизился, однако исследование высокомощных релятивистских двухпотоковых систем, активно продолжались.

Таким образом, актуальность работы определяется большим интересом научного сообщества к приборам, работающим в терагерцевом диапазоне. В связи с тем, что поставленная задача в конечном итоге предполагает выйти именно в этом направлении, передо мной были поставлены задачи исследования дисперсионных уравнений системы с двумя взаимодействующими электронными потоками.

Целью данной работы является получение дисперсионных характеристик двух взаимодействующих ленточных электронных пучков.

**Основное содержание работы.** Ранее в работе рассматривалась такая задача, но лишь для одного потока, учитывая влияние одного потока на другой, перепишем уравнения для двух потоков. Чтобы это сделать нужно проанализировать взаимодействия двух потоков, они взаимодействуют посредством полей пространственного заряда. Уравнения для суммарных полей пространственного заряда имеют вид:

$$\mathrm{E}_{\text{хпз}} = \mathrm{E}_{\text{хпз}1} + \mathrm{E}_{\text{хпз}2}$$

$$\mathrm{E}_{\text{упз}} = \mathrm{E}_{\text{упз}1} + \mathrm{E}_{\text{упз}2}$$

Распишем:

$$\begin{aligned} E_{x,пз} &= -\omega_{p1}^2 \frac{\Delta_1}{2\eta}\frac{\partial y}{\partial x} g_1 - 2j\omega_{p1}^2 \frac{\Delta_1}{2\eta}\frac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} g_{1x} - \omega_{p2}^2 \frac{\Delta_2}{2\eta}\frac{\partial y}{\partial x} g_2 - 2j\omega_{p2}^2 \frac{\Delta_2}{2\eta}\frac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} g_{1x} \\ E_{y,пз} &= \omega_{p1}^2 \frac{\Delta_1}{2\eta}\frac{\partial y}{\partial x} g_1 + 2j\omega_{p1}^2 \frac{\Delta_1}{2\eta}\frac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} g_{1x} + \omega_{p2}^2 \frac{\Delta_2}{2\eta}\frac{\partial y}{\partial x} g_2 + 2j\omega_{p2}^2 \frac{\Delta_2}{2\eta}\frac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} g_{2y} \end{aligned} \tag{1.1}$$

Где:

$$g_{1,2} = \frac{th[\beta_0(d-y_{01,2})] - th(\beta_0 - y_{01,2})}{th[\beta_0(d-y_{01,2})] + th(\beta_0 - y_{01,2})}$$

$$g_{1x,2x} = \frac{th[\beta_0(d-y_{01,2})]th(\beta_0 - y_{01,2})}{th[\beta_0(d-y_{01,2})] + th(\beta_0 - y_{01,2})}$$

$$g_{1y,2y} = \frac{1}{th[\beta_0(d-y_{01,2})] + th(\beta_0 - y_{01,2})}$$

Учитывая взаимодействие, составим систему уравнений:

$$\begin{cases}
\dfrac{\partial^2 \tilde{x}_1}{\partial t^2} + 2v_{01}\dfrac{\partial^2 \tilde{x}_1}{\partial x \partial t} + v_{01}^2 \dfrac{\partial^2 \tilde{x}_1}{\partial x^2} = -\omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x} g_1 - 2j\omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} g_{1x} - \omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x} g_2 - 2j\omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} g_{2x} \\
\dfrac{\partial^2 \tilde{y}_1}{\partial t^2} + 2v_{01}\dfrac{\partial^2 \tilde{y}_1}{\partial x \partial t} + v_{01}^2 \dfrac{\partial^2 \tilde{y}_1}{\partial x^2} = -\omega_c^2 \tilde{y}_1 + \omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} g_1 + 2j\omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x} g_{1y} + \omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} g_2 + 2j\omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x} g_{2y} \\
\dfrac{\partial^2 \tilde{x}_2}{\partial t^2} + 2v_{02}\dfrac{\partial^2 \tilde{x}_2}{\partial x \partial t} + v_{02}^2 \dfrac{\partial^2 \tilde{x}_2}{\partial x^2} = -\omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x} g_1 - 2j\omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} g_{1x} - \omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x} g_2 - 2j\omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} g_{2x} \\
\dfrac{\partial^2 \tilde{y}_2}{\partial t^2} + 2v_{02}\dfrac{\partial^2 \tilde{y}_2}{\partial x \partial t} + v_{02}^2 \dfrac{\partial^2 \tilde{y}_2}{\partial x^2} = -\omega_c^2 \tilde{y}_2 + \omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} g_1 + 2j\omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x} g_{1y} + \omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} g_2 + 2j\omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x} g_{2y}
\end{cases}$$

(1.2)

Преобразуем, считая, что все переменные величины $\sim e^{j\omega t}$

$$\begin{cases}
-\omega^2 \tilde{x}_1 + 2j\omega v_{01}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} + v_{01}^2 \dfrac{\partial^2 \tilde{x}_1}{\partial x^2} + \omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x} g_1 + 2j\omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} g_{1x} + \omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x} g_2 + 2j\omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} g_{2x} = 0 \\
-\omega^2 \tilde{y}_1 + 2j\omega v_{01}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x} + v_{01}^2 \dfrac{\partial^2 \tilde{y}_1}{\partial x^2} + \omega_c^2 \tilde{y}_1 - \omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} g_1 - 2j\omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x} g_{1y} - \omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} g_2 - 2j\omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x} g_{2y} = 0 \\
-\omega^2 \tilde{x}_2 + 2j\omega v_{02}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} + v_{02}^2 \dfrac{\partial^2 \tilde{x}_2}{\partial x^2} + \omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x} g_1 + 2j\omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} g_{1x} + \omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x} g_2 + 2j\omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} g_{2x} = 0 \\
-\omega^2 \tilde{y}_2 + 2j\omega v_{02}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x} + v_{02}^2 \dfrac{\partial^2 \tilde{y}_2}{\partial x^2} + \omega_c^2 \tilde{y}_2 - \omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} g_1 - 2j\omega_{p1}^2 \dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x} g_{1y} - \omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} g_2 - 2j\omega_{p2}^2 \dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x} g_{2y} = 0
\end{cases}$$

(1.3)

Разделим 1-е и 2-е уравнения на $v_{01}^2$, а 3-е и 4-е на $v_{02}^2$

$$\begin{cases}
-\left(\dfrac{\omega}{v_{01}}\right)^2 \tilde{x}_1 + 2j\dfrac{\omega}{v_{01}}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} + \dfrac{\partial^2 \tilde{x}_1}{\partial x^2} + \dfrac{\omega_{p1}^2}{v_{01}^2}\dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x} g_1 + j\dfrac{\omega_{p1}^2}{v_{01}^2}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x}\Delta_1 g_{1x} + \dfrac{v_{02}^2}{v_{01}^2}\dfrac{\omega_{p2}^2}{v_{02}^2}\dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x} g_2 + j\dfrac{v_{02}^2}{v_{01}^2}\dfrac{\omega_{p2}^2}{v_{02}^2}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x}\Delta_2 g_{2x} = 0 \\
-\left(\dfrac{\omega}{v_{01}}\right)^2 \tilde{y}_1 + 2j\dfrac{\omega}{v_{01}}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x} + \dfrac{\partial^2 \tilde{y}_1}{\partial x^2} + \dfrac{\omega_c^2}{v_{01}^2}\tilde{y}_1 - \dfrac{\omega_{p1}^2}{v_{01}^2}\dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} g_1 - j\dfrac{\omega_{p1}^2}{v_{01}^2}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x}\Delta_1 g_{1y} - \dfrac{v_{02}^2}{v_{01}^2}\dfrac{\omega_{p2}^2}{v_{02}^2}\dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} g_2 - j\dfrac{v_{02}^2}{v_{01}^2}\dfrac{\omega_{p2}^2}{v_{02}^2}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x}\Delta_2 g_{2y} = \\
-\left(\dfrac{\omega}{v_{02}}\right)^2 \tilde{x}_2 + 2j\dfrac{\omega}{v_{02}}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} + \dfrac{\partial^2 \tilde{x}_2}{\partial x^2} + \dfrac{v_{01}^2}{v_{02}^2}\dfrac{\omega_{p1}^2}{v_{01}^2}\dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x} g_1 + j\dfrac{v_{01}^2}{v_{02}^2}\dfrac{\omega_{p1}^2}{v_{01}^2}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x}\Delta_1 g_{1x} + \dfrac{\omega_{p2}^2}{v_{02}^2}\dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x} g_2 + j\dfrac{\omega_{p2}^2}{v_{02}^2}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x}\Delta_2 g_{2x} = 0 \\
-\left(\dfrac{\omega}{v_{02}}\right)^2 \tilde{y}_2 + 2j\dfrac{\omega}{v_{02}}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x} + \dfrac{\partial^2 \tilde{y}_2}{\partial x^2} + \dfrac{\omega_c^2}{v_{02}^2}\tilde{y}_2 - \dfrac{v_{01}^2}{v_{02}^2}\dfrac{\omega_{p1}^2}{v_{01}^2}\dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_1}{\partial x} g_1 - j\dfrac{v_{01}^2}{v_{02}^2}\dfrac{\omega_{p1}^2}{v_{01}^2}\dfrac{\partial \tilde{y}_1}{\partial x}\Delta_1 g_{1y} - \dfrac{\omega_{p2}^2}{v_{02}^2}\dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial \tilde{x}_2}{\partial x} g_2 - j\dfrac{\omega_{p2}^2}{v_{02}^2}\dfrac{\partial \tilde{y}_2}{\partial x}\Delta_2 g_{2y}
\end{cases}$$

(1.4)

$$
\begin{cases}
-\beta_{e1}^2\tilde{x}_1+2j\beta_{e1}\dfrac{\partial\tilde{x}_1}{\partial x}+\dfrac{\partial^2\tilde{x}_1}{\partial x^2}+\beta_{p1}^2\dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial\tilde{y}_1}{\partial x}g_1+j\beta_{p1}^2\dfrac{\partial\tilde{x}_1}{\partial x}\Delta_1 g_{1x}+v^2\beta_{p2}^2\dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial\tilde{y}_2}{\partial x}g_2+jv^2\beta_{p2}^2\dfrac{\partial\tilde{x}_2}{\partial x}\Delta_2 g_{2x}=0\\
-\beta_{e1}^2\tilde{y}_1+2j\beta_{e1}\dfrac{\partial\tilde{y}_1}{\partial x}+\dfrac{\partial^2\tilde{y}_1}{\partial x^2}+\beta_{c1}^2\tilde{y}_1-\beta_{p1}^2\dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial\tilde{x}_1}{\partial x}g_1-j\beta_{p1}^2\dfrac{\partial\tilde{y}_1}{\partial x}\Delta_1 g_{1y}-v^2\beta_{p2}^2\dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial\tilde{x}_2}{\partial x}g_2-jv^2\beta_{p2}^2\dfrac{\partial\tilde{y}_2}{\partial x}\Delta_2 g_{2y}=0\\
-\beta_{e2}^2\tilde{x}_2+2j\beta_{e2}\dfrac{\partial\tilde{x}_2}{\partial x}+\dfrac{\partial^2\tilde{x}_2}{\partial x^2}+\dfrac{1}{v^2}\beta_{p1}^2\dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial\tilde{y}_1}{\partial x}g_1+j\dfrac{1}{v^2}\beta_{p1}^2\dfrac{\partial\tilde{x}_1}{\partial x}\Delta_1 g_{1x}+\beta_{p2}^2\dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial\tilde{y}_2}{\partial x}g_2+j\beta_{p2}^2\dfrac{\partial\tilde{x}_2}{\partial x}\Delta_2 g_{2x}=0\\
-\beta_{e2}^2\tilde{y}_2+2j\beta_{e2}\dfrac{\partial\tilde{y}_2}{\partial x}+\dfrac{\partial^2\tilde{y}_2}{\partial x^2}+\beta_{c2}^2\tilde{y}_2-\dfrac{1}{v^2}\beta_{p1}^2\dfrac{\Delta_1}{2}\dfrac{\partial\tilde{x}_1}{\partial x}g_1-j\dfrac{1}{v^2}\beta_{p1}^2\dfrac{\partial\tilde{y}_1}{\partial x}\Delta_1 g_{1y}-\beta_{p2}^2\dfrac{\Delta_2}{2}\dfrac{\partial\tilde{x}_2}{\partial x}g_2-j\beta_{p2}^2\dfrac{\partial\tilde{y}_2}{\partial x}\Delta_2 g_{2y}=0
\end{cases}
$$

(1.5)

Где $v=\dfrac{v_{02}}{v_{01}},\beta_{e1}=\dfrac{\omega}{v_{01}},\beta_{e2}=\dfrac{\omega}{v_{02}},\beta_{p1}=\dfrac{\omega_{p1}}{v_{01}},\beta_{p2}=\dfrac{\omega_{p2}}{v_{02}},\beta_{c1}=\dfrac{\omega_{c1}}{v_{01}},\beta_{c2}=\dfrac{\omega_{c2}}{v_{02}}$.

Полагая, что все переменные величины меняются пропорционально $\exp(-j\beta x)$ и $\dfrac{\partial}{\partial t}=j\omega$ запишем:

$$
\begin{cases}
-\left[\left(\beta-\beta_{e1}\right)^2-\beta\beta_{p1}^2\Delta_1 g_{1x}\right]\tilde{x}_1-j\beta\beta_{p1}^2\dfrac{\Delta_1}{2}g_1\tilde{y}_1+\beta v^2\beta_{p2}^2\Delta_2 g_{2x}\tilde{x}_2-j\beta v^2\beta_{p2}^2\dfrac{\Delta_2}{2}g_2\tilde{y}_2=0\\
-\left[\left(\beta-\beta_{e1}\right)^2+\beta\beta_{p1}^2\Delta_1 g_{1y}-\beta_{c1}^2\right]\tilde{y}_1+j\beta\beta_{p1}^2\dfrac{\Delta_1}{2}g_1\tilde{x}_1+j\beta v^2\beta_{p2}^2\dfrac{\Delta_2}{2}g_2\tilde{x}_2-\beta v^2\beta_{p2}^2\Delta_2 g_{2y}\tilde{y}_2=0\\
-\left[\left(\beta-\beta_{e2}\right)^2-\beta\beta_{p2}^2\Delta_2 g_{2x}\right]\tilde{x}_2-j\beta\dfrac{1}{v^2}\beta_{p1}^2\dfrac{\Delta_1}{2}g_1\tilde{y}_1+\beta\dfrac{1}{v^2}\beta_{p1}^2\Delta_1 g_{1x}\tilde{x}_1-j\beta\beta_{p2}^2\dfrac{\Delta_2}{2}g_2\tilde{y}_2=0\\
-\left[\left(\beta-\beta_{e2}\right)^2+\beta\beta_{p2}^2\Delta_2 g_{2y}-\beta_{c2}^2\right]\tilde{y}_2+j\beta\dfrac{1}{v^2}\beta_{p1}^2\dfrac{\Delta_1}{2}g_1\tilde{x}_1-\beta\dfrac{1}{v^2}\beta_{p1}^2\Delta_1 g_{1y}\tilde{y}_1+j\beta\beta_{p2}^2\dfrac{\Delta_2}{2}g_2\tilde{x}_2=0
\end{cases}
$$

(1.6)

Определитель системы:

$$
\begin{pmatrix}
-((\beta-\beta_{e1})^2-\beta\beta_{p1}^2\Delta_1 g_{x1}) & \beta_{p1}^2\dfrac{g_1}{2}\Delta_1(-j\beta) & v^2\beta_{p2}^2\Delta_2 g_{x2}\beta & v^2\beta_{p2}^2\Delta_2 g_x(-j)\\
\beta_{p1}^2\dfrac{g_1}{2}\Delta_1 j & -((\beta-\beta_{e1})^2-\beta\beta_{p1}^2\Delta_1 g_{y1}-\beta_{c1}^2) & v^2\beta_{p2}^2\Delta_2 g_x j\beta & v^2\beta_{p2}^2\Delta_2 g_{y2}(-\beta)\\
\beta_{p1}^2\dfrac{g_{x1}}{v}\Delta_1\beta & \beta_{p1}^2\dfrac{g_1}{2v^2}\Delta_1(-j\beta) & -((\beta-\beta_{e2})^2-\beta\beta_{p2}^2\Delta_2 g_{x2}) & \beta_{p2}^2\dfrac{g_2}{2}\Delta_2 j\beta\\
\beta_{p1}^2\dfrac{g_1}{2v^2}\Delta_1 j\beta & \beta_{p1}^2\dfrac{g_{x1}}{v}\Delta_1\beta & \beta_{p2}^2\dfrac{g_2}{2}\Delta_2 j\beta & -((\beta-\beta_{e2})^2-\beta\beta_{p2}^2\Delta_2 g_{y2}-\beta_{c2}^2)
\end{pmatrix}
$$

(1.7)

Так как дисперсионное уравнение, получается слишком большое приводить его не будем, оно получается, путем приравнивая матрицу к 0 и найдя определитель. Дисперсионное уравнение представляет собой уравнение восьмого порядка, что соответствует наличие восьми волн (2 быстрых и медленных волн пространственного заряда, 2 быстрых и медленных циклотронных волн).

Анализируя дисперсионные характеристики, делаем вывод, что с учетом пространственного заряда волны начали взаимодействовать и наличие постоянного продольного магнитного поля вызывает возникновение новых областей неустойчивости связано с воздействием волн пространственного заряда и циклотронных волн пучков.

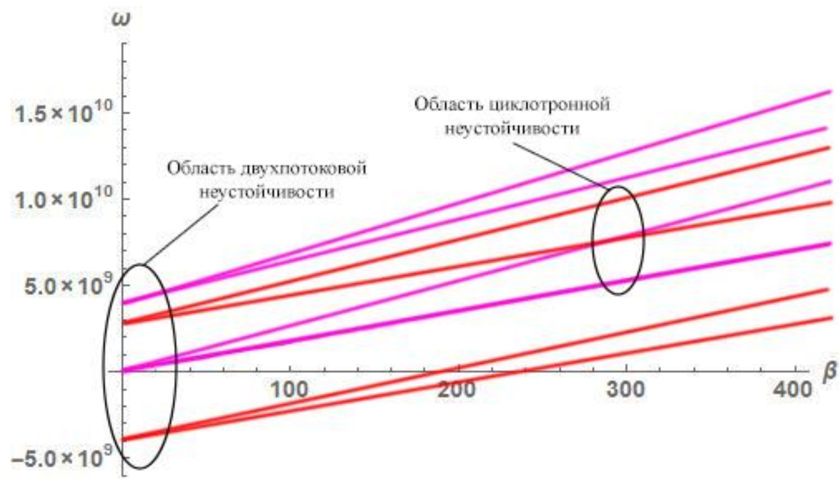


Рис.1 Дисперсионная характеристика действительной части системы двух взаимодействующих ленточных электронных пучков

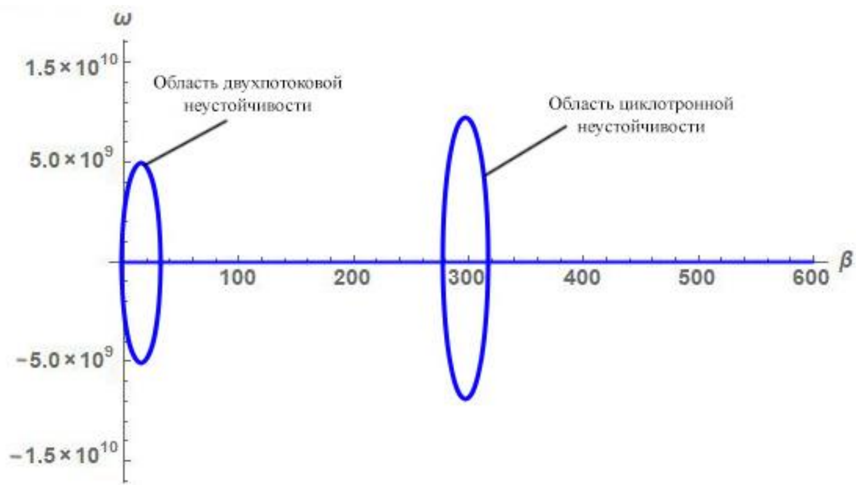


Рис. 2 Дисперсионная характеристика мнимой системы двух взаимодействующих ленточных электронных пучков

Анализируя дисперсионные характеристики, делаем вывод, что с учетом пространственного заряда волны начали взаимодействовать и наличие постоянного продольного магнитного поля вызывает возникновение новых областей неустойчивости связано с воздействием волн пространственного заряда и циклотронных волн пучков.

**Заключение**. В данной работе методом последовательных приближений и методом дисперсионного уравнения проанализирована теория волновых процессов в системе «Электронный поток в продольном магнитном поле», а также, аналогичные случаи с двумя электронными потоками. Были построены дисперсионные характеристики для каждого случая и проведен их анализ. В моделях учитывается пространственный заряд и конечное фокусирующее магнитное поле.

## Список используемой литературы

1. Электронные приборы сверхвысоких частот : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Радиофизика и электроника" / Саратовский гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского ; ред.: В. Н. Шевчик, М. А. Григорьев. - 2-е изд., перераб. и доп. - Саратов : СГУ, 1980
2. Шевчик В. Н., Трубецков Д. И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. - М.: Советское радио, 1970
3. Цейтлин М.Б., Кац А.М. Лампа с бегущей волной: Советское радио, 1964
4. Шевчик В. Н., Шведов Г. Н., Соболева А. В. Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1962
5. Трубецков Д.И., Рожнѐв А.Г., Соколов Д.В. Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроэлектронике. – Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 1996.
6. Андрушкевич В.С., Козлов Г.А., Трубецков Д.И. К двумерной линейной теории СВЧ приборов О-типа // Изв. вузов. Радиофизика, 1967. Т.10. №1.
7. Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. – М.: Наука, 2001.