

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

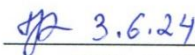
Кафедра электроники, колебаний и волн

**Некоторые вопросы подавления сигнала при использовании  
метаматериала в вакуумной СВЧ-электронике**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ


Студента 4 курса 4031 группы  
направления 03.03.03 «Радиофизика»  
Института Физики  
Бизяева Кирилла Алексеевича

Научный руководитель  
Старший преподаватель кафедры  
электроники, колебаний и волн

  
3.6.24  
дата, подпись

А.А. Фунтов

Заведующий кафедрой  
электроники, колебаний и волн.  
к.ф.-м.н., доцент

  
дата, подпись

С.В. Гришин

03.06.2024г.

Саратов 2024 год

## Введение

**Актуальность работы.** Электровакуумные приборы широко распространены в различных сферах. Особое внимание уделяют их выходным характеристикам: мощность сигнала, КПД, усиление сигнала. Для улучшения таких характеристик можно использовать вставки из метаматериала. В данной работе рассмотрен гибридный прибор лампы бегущей волны и резистивного усилителя, представляющего собой метаматериальную вставку с комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП – вставка).

**Цель работы.** Для получения некоторых параметров системы используют метод, в котором прибор работает в режиме полного подавления сигнала. Цель данной работы заключается в изучении режима подавления сигнала с помощью построения зависимостей коэффициента усиления гибрида ЛБВ и резистивного усилителя от различных параметров, определения условий полного подавления и сравнения полученных результатов с ЛБВ с локальным поглотителем и без него.

**Задачи.** В ходе этой работы в рамках линейной теории были получены уравнения распространения из дисперсионного уравнения лампы бегущей волны и построены три модели: прозрачной лампы, лампы с разрывом, выполняющим роль локального поглотителя, и трехсекционной лампы, в которой роль второй секции выполняет метаматериальная вставка. По результатам расчетов были построены зависимости для всех трех ламп и проведен их анализ.

Работа состоит из следующих частей:

1. Линейная теория срыва Компфнера в ЛБВ с локальным поглотителем и без него:
  - Основные уравнения распространения;
  - Усиление;
  - Срыв Компфнера;

- Подавление сигнала в ЛБВ с локальным поглотителем;
- 2. Подавление сигнала в гибриде ЛБВ с резистивным усилителем;
- Модель исследуемого гибрида;
- Зависимость подавления сигнала от различных параметров гибрида.
- 3. Сравнение подавления в гибриде ЛБВ с резистивным усилителем и подавления в ЛБВ с локальным поглотителем и без него.

## Основное содержание работы

В первом разделе рассмотрены два типичных вида ламп: прозрачная ЛБВ и ЛБВ с локальным поглотителем. Для этого построены модели этих ламп с использованием уравнений распространения поля, тока и скорости. Они получены из дисперсионного уравнения в предположении, что параметр усиления Пирса много меньше единицы ( $C \ll 1$ ) и учитывают три парциальные волны в системе при отсутствии затухания в ЗС. Отраженная волна в расчетах не учитывается. Все расчеты в работе проводятся в размерных величинах.

В начале рассмотрен самый простой случай – прозрачная лампа. Для нее была получена карта зависимости коэффициента усиления, который определяется как  $G = 20 \lg \left( \left| \frac{E(z)}{E(0)} \right| \right)$ , от параметра ПЗ и параметра рассинхронизма (рис. 1). Также были построены карты зависимостей коэффициента усиления от безразмерной длины  $\beta_e z$  и параметра

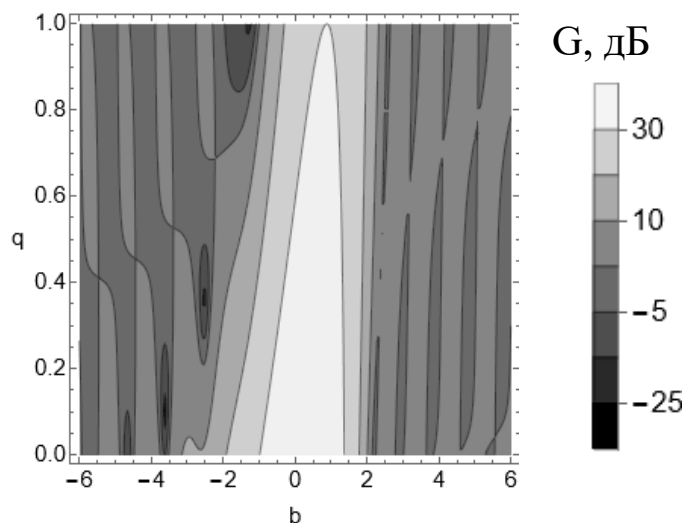


Рис. 1. Зависимость коэффициента усиления лампы от пространственного заряда и параметра рассинхронизма.

Параметры:  $C = 0.01$ ,  $U_0 = 1000$  В,  $\beta_e z = 628$ .

рассинхронизма при двух типичных значениях параметра пространственного заряда ( $q$ ) (рис. 2).

Было установлено, что при значениях ПЗ близких к нулю ( $q = 0$ ) параметры лампы необходимые для работы в режиме полного подавления строго определены ( $b = -1.59, CN = 0.315$ ). При больших ПЗ ( $q > 1$ ) режим подавления определяется параметром  $q$  ( $b = -\sqrt{q}, CN = \frac{\sqrt[4]{q}}{2\sqrt{2}}$ ).

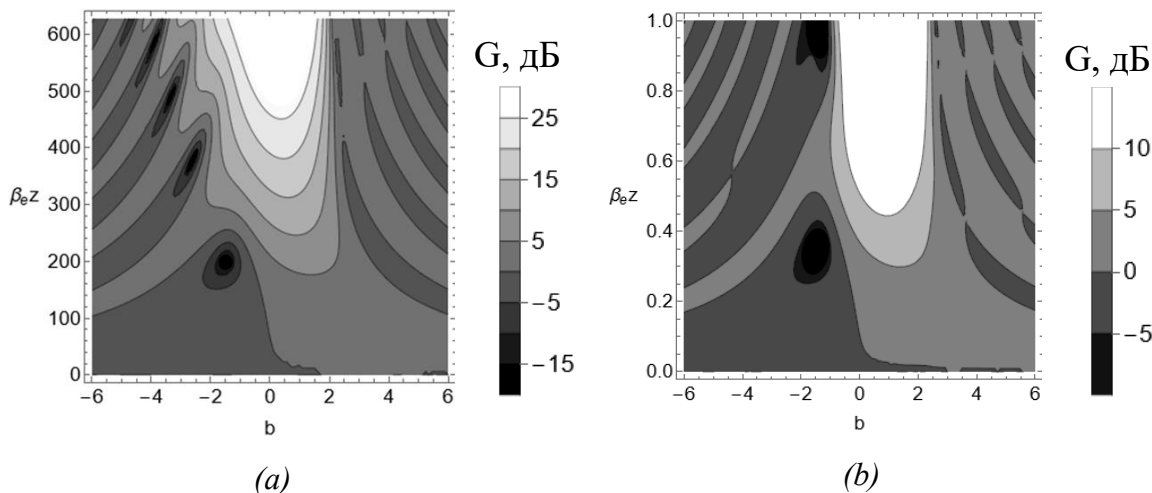


Рис. 2. Зависимость коэффициента от параметра рассинхронизма  $b$  и параметра  $CN$  ( $\beta_e z$ ) при: а)  $q = 0, C = 0.01, U_0 = 1000$  В, б)  $q = 1, C = 0.01, U_0 = 1000$  В.

Далее представлен анализ лампы бегущей волны с локальным поглотителем, роль которого в модели выполняет разрыв конечной определенной длины. Для описания распространения сгруппированного тока были использованы дифференциальные уравнения тока и скорости.

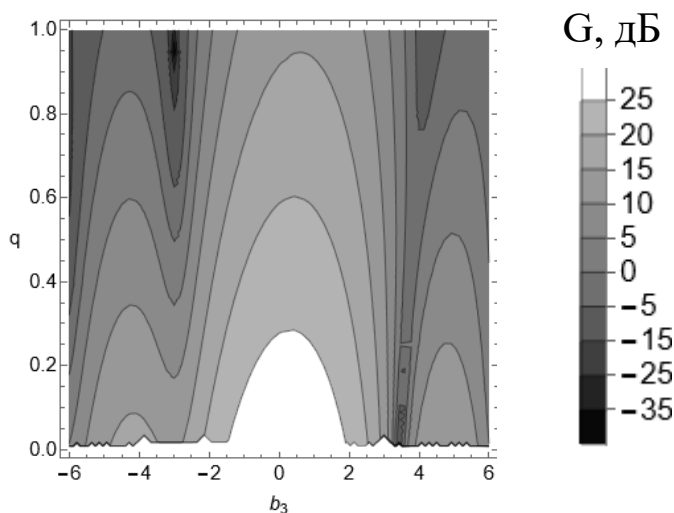


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления лампы от пространственного заряда и параметра рассинхронизма 3-ей части.

Параметры:  $C = 0.01, U_0 = 1000$  В,  $\beta_e z = 628, b_1 = 0$

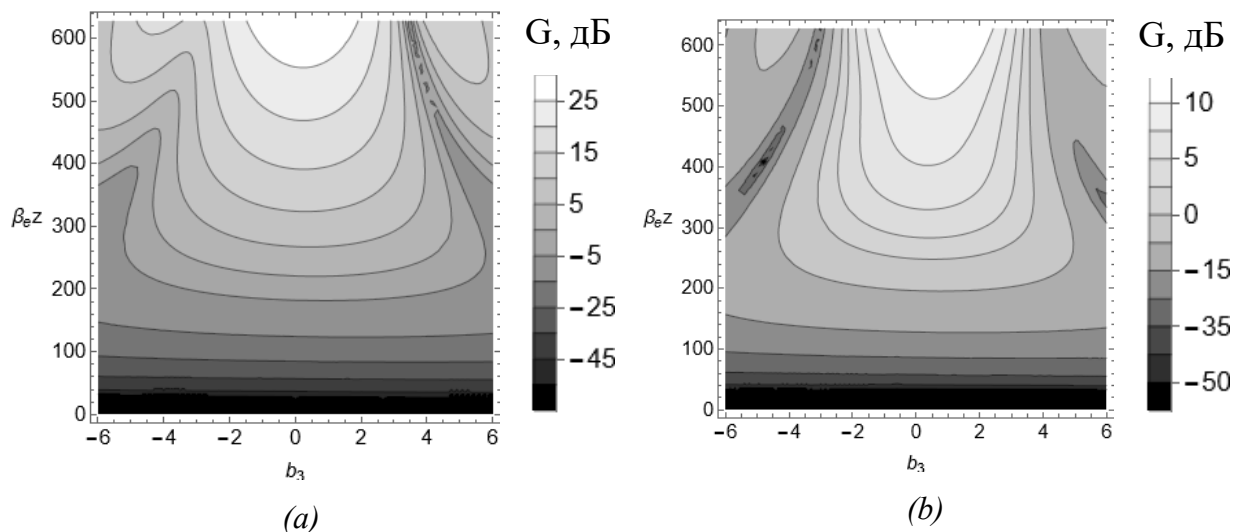
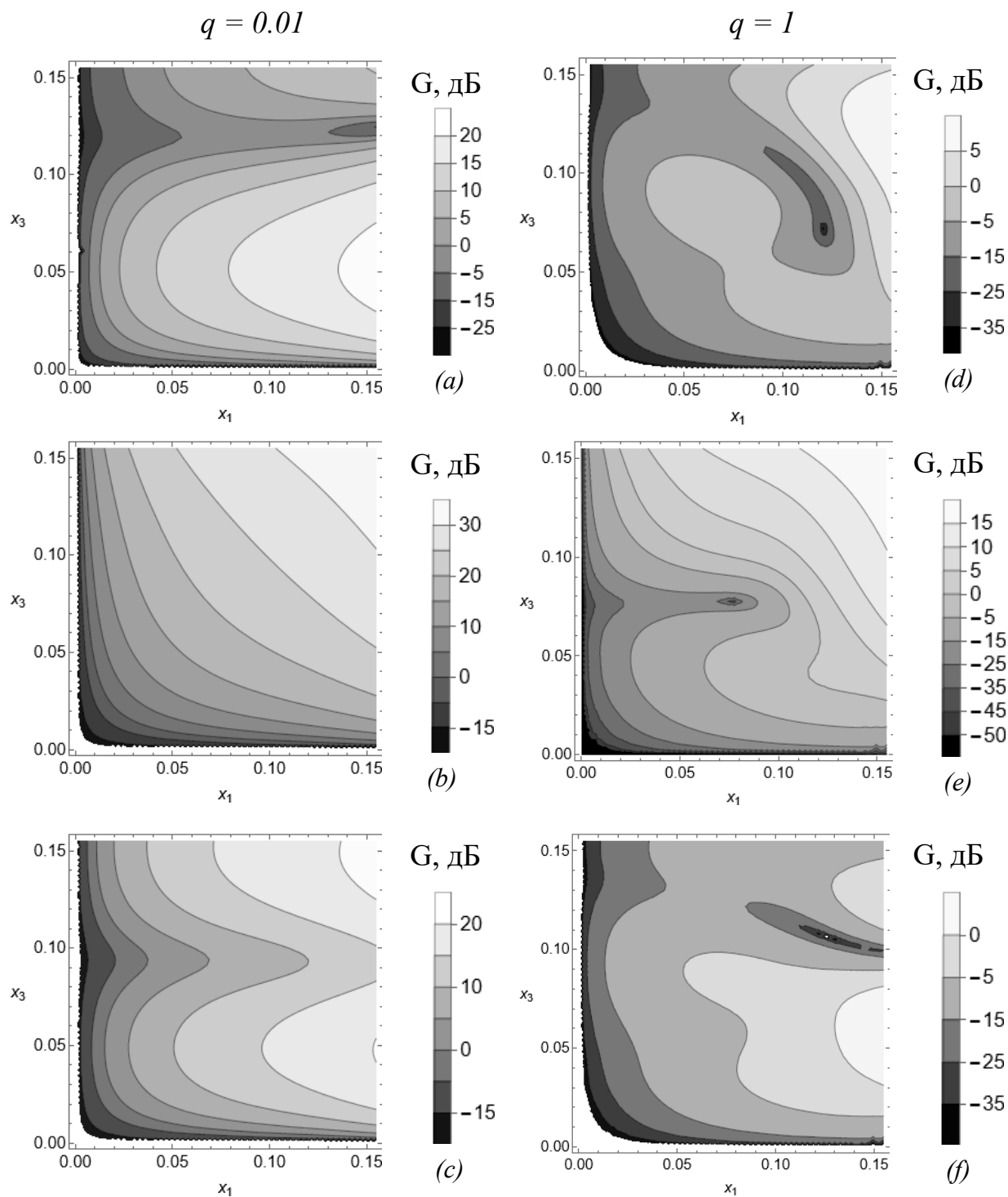


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления приведенной длины и параметра рассинхронизма 3-ей части ЛБВ. Параметры:  $C = 0.01$ ,  $U_0 = 1000$  В,  $\beta_e z = 628$ ,  $b_l = 0$ ,  
а)  $q = 0.01$ , б)  $q = 1$

Для расчета были выбраны длины: общая длина –  $l = 0.31$  м, расстояние от входа до локального поглотителя –  $l_l = 0.15$  м, длина локального поглотителя –  $l_{лп} = 0.06$  м, расстояние от конца поглотителя до выхода –  $l_3 = 0.10$  м. По аналогии с прозрачной лампой были построена карта зависимости коэффициента усиления от параметра пространственного заряда и параметра рассинхронизма третьей зоны (отрезка ЗС после ЛП) (рис. 3).

По данной карте были определены точки с наименьшим усилением (две точки  $q = 0$  и  $q = 1$ ). Для этих точек были построены карты зависимостей коэффициента усиления от безразмерной длины и параметра рассинхронизма третьей зоны (рис. 4). Было определено, что в ЛБВ с ЛП существуют такие параметры, при которых лампа работает в режиме полного подавления. Такой режим наблюдается при больших ПЗ (при данном распределении длин зон  $q = 1$ ) и параметре рассинхронизма меньше нуля. Это объясняется зависимостью сгруппированного тока в зоне поглотителя от пространственного заряда (с увеличением параметра ПЗ ток уменьшается за счет сил расталкивания) и влиянием его на параметр рассинхронизма системы.

Также в работе представлены зависимости коэффициента усиления от длины и расположения ЛП (рис. 5). Из этих зависимостей видно, что при



параметре пространственного заряда равном 1 вне зависимости от параметра рассинхронизма можно подобрать такие длины зон, при которых лампа будет работать в режиме полного подавления.

Рис. 5. Зависимость коэффициента от длины и расположения локального поглотителя. Параметры:  $C = 0.01$ ,  $U_0 = 1000$  В,  $\beta_e z = 628$ ,  $b_1 = 0$ , а), d)  $b_3 = 3.015$ ; б), e)  $b_3 = 0$ ; в), f)  $b_3 = -3.015$

**Во втором разделе** рассмотрен гибрид ЛБВ и резистивного усилителя, роль которого выполняет метаматериальная вставка. Для построения модели была использована модель Друде, с использованием которой определяется диэлектрическая проницаемость среды ( $\varepsilon$ ) с помощью формулы (при отсутствии затухания в среде):  $\varepsilon = 1 - k$ , где  $k = \frac{\omega_{ps}^2}{\omega^2}$ ,  $\omega$  – рабочая частота лампы, а  $\omega_{ps}$  – плазменная частота среды. Распределение длин секции аналогично ЛБВ с ЛП.

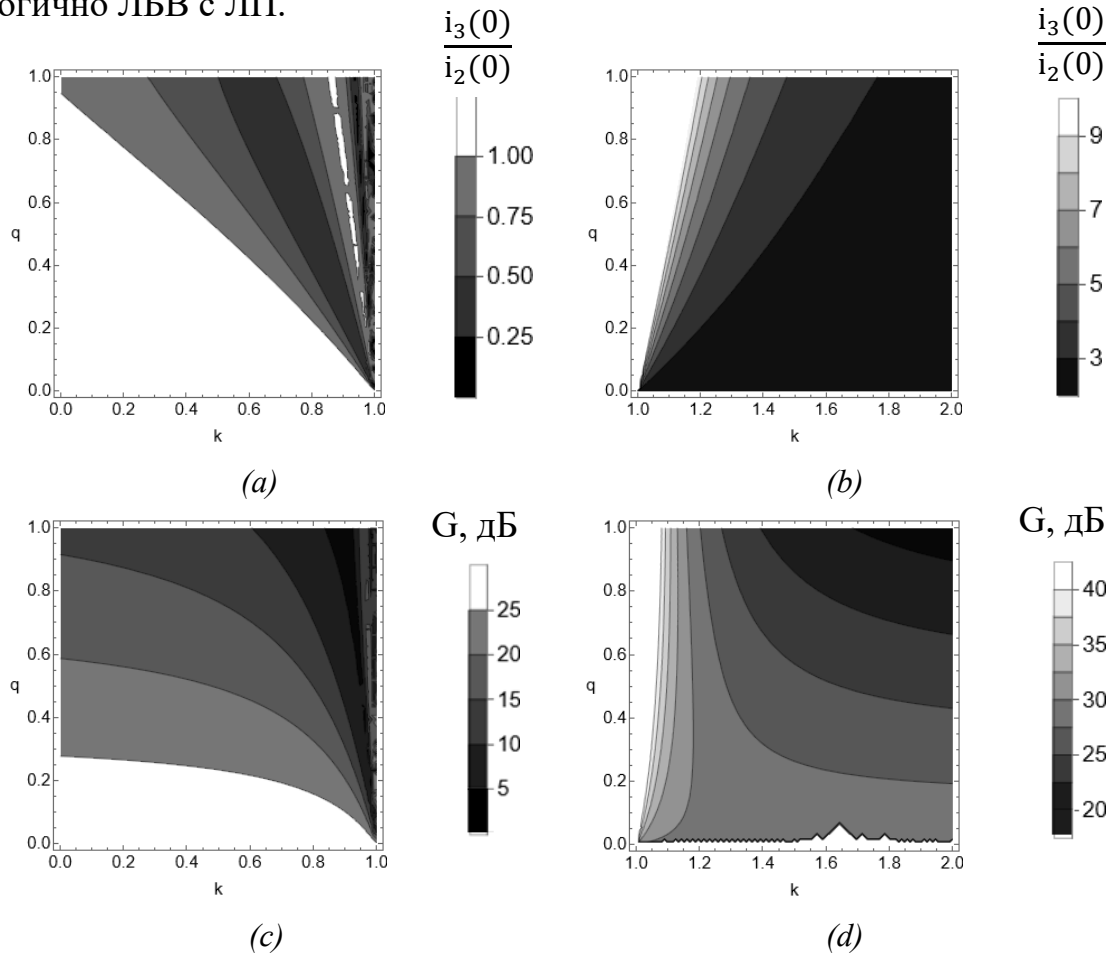


Рис. 6. Зависимость модуля отношений тока на входе к току на выходе из второй секции ((a), (b)) и коэффициента усиления ((c), (d)) от пространственного заряда и параметра  $k$ .

Параметры:  $C = 0.01$ ,  $U_0 = 1000$  В,  $\beta_e z = 628$ ,  $b_1 = b_3 = 0$ .

Для понимания влияния вставки приведены карты зависимостей отношения тока на выходе из КДП – секции к току на входе в нее и коэффициента усиления от параметров ПЗ и  $k$  (рис. 6). При  $k < 1$  наблюдается уменьшение усиления с ростом пространственного заряда и параметра  $k$ . При

переходе через 1 наблюдается рост усиления с ростом пространственного заряда. С увеличением  $k$  коэффициент усиления начинает падать с ростом ПЗ, но его значения несколько больше, чем в случае  $k < 1$ . Для анализа была выбран материал с отрицательной диэлектрической проницаемостью,

поскольку  $\varepsilon > 0$  не дает выигрыша в усилении сигнала и поэтому использование такой лампы на практике бессмысленно.

По аналогии с предыдущими лампами, были построены зависимости коэффициента усиления от параметров пространственного заряда и рассинхронизма третьей секции (рис.7).

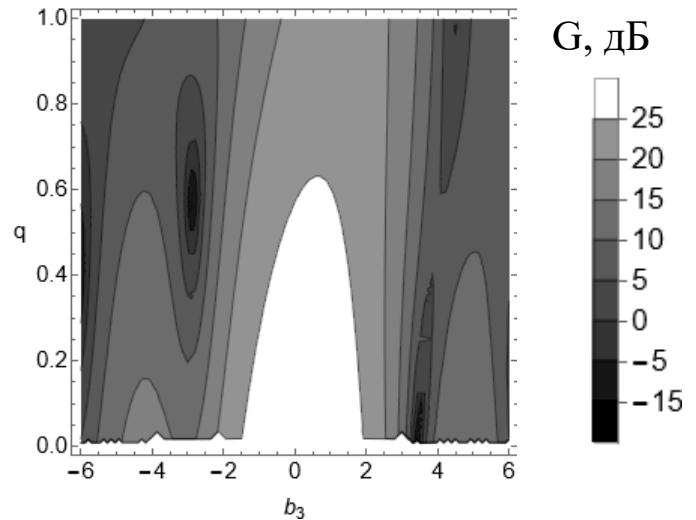


Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления лампы от пространственного заряда и параметра рассинхронизма 3-ей секции.

Параметры:  $C = 0.01$ ,  $U_0 = 1000$  В,  $\beta_{eZ} = 628$ ,  $b_l = 0$ ,  $k = 1.5$

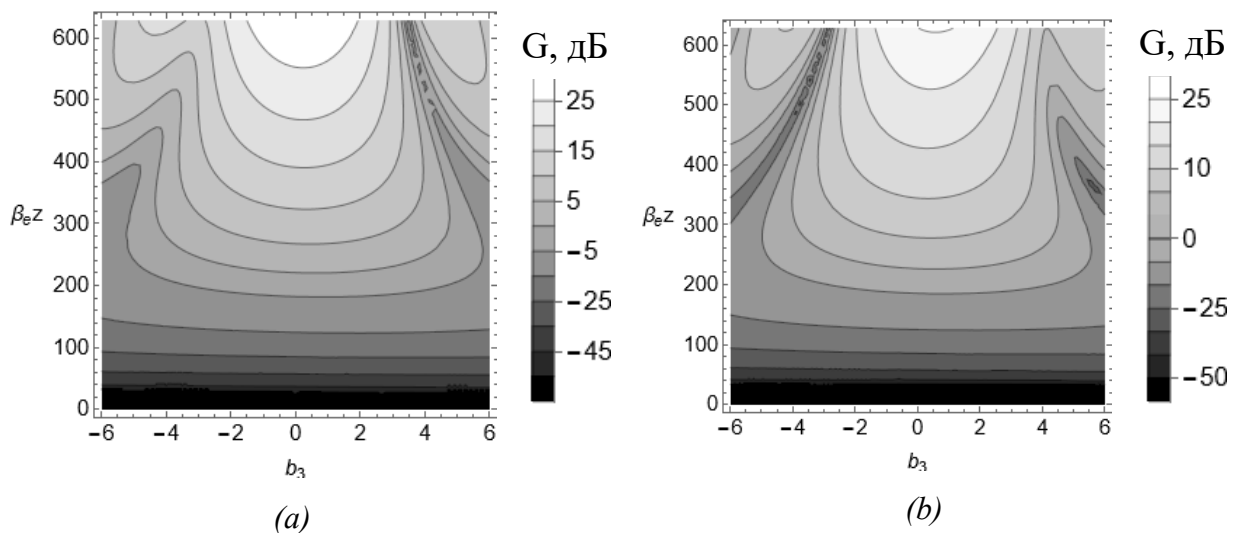


Рис. 8. Зависимость коэффициента усиления приведенной длины и параметра рассинхронизма 3-ей части ЛБВ. Параметры:  $C = 0.01$ ,  $U_0 = 1000$  В,  $\beta_{eZ} = 628$ ,  $b_l = 0$ ,  $k = 1.5$  а)  $q = 0.01$ , б)  $q = 0.5776$



Из рис. 7 видно, что наибольшее подавление наблюдается при меньшем параметре ПЗ ( $q = 0.5776$ ), поскольку сгруппированный ток растет в секции КДП и оказывает большее влияние на наведенное поле в третьей секции.

Далее были построены карты зависимостей коэффициента усиления при двух значениях ПЗ ( $q = 0$ ,  $q = 0.5776$ ) от безразмерной длины и параметра

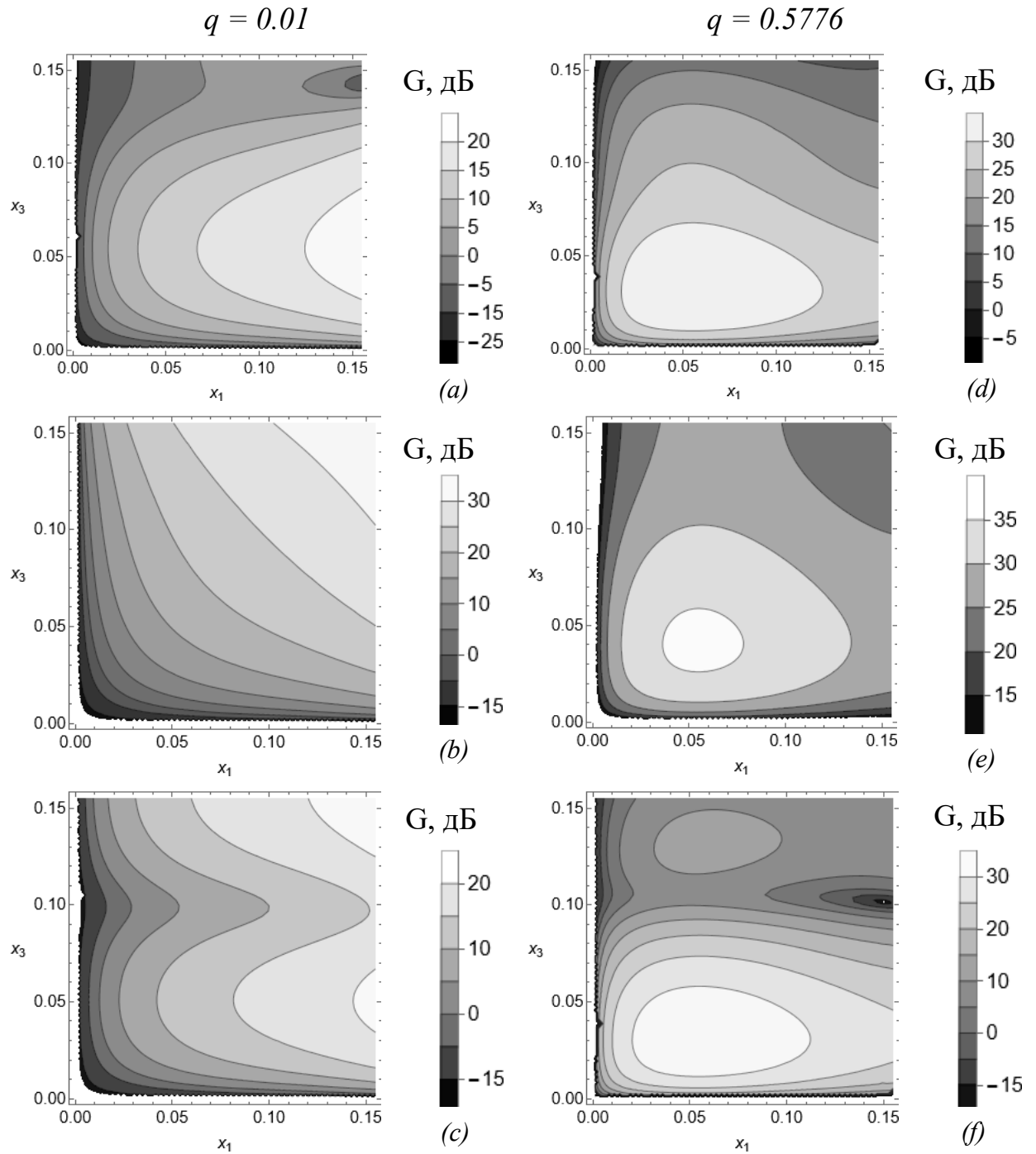


Рис. 9. Зависимость коэффициента от длины и расположения локального поглотителя. Параметры:  $C = 0.01$ ,  $U_0 = 1000$  В,  $\beta_{ez} = 628$ ,  $b_l = 0$ ,  $k = 1.5$  a), d)  $b_3 = 2,8$ ; b), e)  $b_3 = 0$ ; c), f)  $b_3 = -2,8$

рассинхронизма третьей секции (рис. 8). При  $q = 0.5776$  были найдены параметры, при которых лампа работает в режиме полного подавления.

При малом пространственном заряде ( $q = 0$ ) гибрид начинает работать как ЛБВ с ЛП (если учитывать в третьей секции только поле, наведенное сгруппированным током), т.е. модель принимает вид ЛБВ с разрывом.

Приведены также зависимости коэффициента усиления от длин секций (рис. 9). В отличие от ЛБВ с локальным поглотителем, при больших пространственных зарядах подавление наблюдается только при определенном параметре рассинхронизма, т.е. при изменении синхронизма в системе нельзя подобрать такие длины секции, чтобы лампа работала в режиме подавления. При малых пространственных зарядах зависимости для гибрида практически идентичны зависимостям для ЛБВ с ЛП.

**В третьем разделе** представлено обобщение выводов по первым двум разделам и проведено сравнение всех ламп.

## **Заключение**

В ходе выполнения бакалаврской работы были решены поставленные задачи и получены следующие основные результаты:

1. С помощью уравнений распространения поля, тока и скорости, полученных из дисперсионного уравнения, и дифференциальных уравнений для тока и скорости были построены модели трех ламп: прозрачной ЛБВ, ЛБВ с локальным поглотителем, гибрида ЛБВ и резистивного усилителя.
2. Были построены зависимости коэффициента усиления от различных параметров для всех трех ламп. На их основе были сделаны выводы о режиме полного подавления для каждой из ламп.
3. Было проведено сравнение, по результатам которого было установлено, что полное подавление в гибриде ЛБВ и резистивного усилителя, как и в ЛБВ с ЛП, наблюдается при больших пространственных зарядах. Для

гибрида, в отличие от ЛБВ с ЛП нельзя подобрать распределение длин секций для разных параметров рассинхронизма так, чтобы для каждого из них лампа работала в режиме полного подавления.