

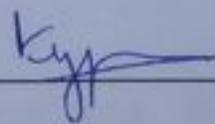
Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Нелинейная динамика пучка со сверхкритическим током в сильно  
неоднородном магнитном поле  
АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента 4 курса 411 группы  
направления 03.03.01 «Прикладные математика и физика»  
Факультета Нелинейных Процессов  
Короновского Александра Алексеевича

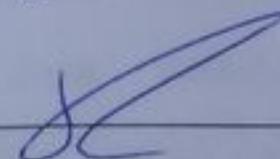
Научный руководитель  
Доцент, д.ф.-м.н.



---

С.А. Куркин

Заведующий кафедрой  
Доцент, к.ф.-м.н.



---

Е.Н. Бегинин

Саратов 2018 год

**Введение.** Большой практический и теоретический интерес представляет исследование влияния внешнего магнитного поля на формирование и динамику виртуального катода в электронном потоке как в релятивистском, так и в нерелятивистском случае. Одной из первых работ, посвященных изучению влияния внешнего магнитного поля на характеристики генерации виркатора, была работа [1], в которой были получены экспериментальные зависимости мощности и частоты СВЧ-излучения виркатора от величины внешнего магнитного поля. Позднее аналогичные экспериментальные исследования проводились в работах [2–4], которые также показали сильное влияние внешнего магнитного поля на характеристики СВЧ-излучения виртуального катода.

Данная выпускная квалификационная работа бакалавра посвящена исследованию воздействия приложенного внешнего магнитного поля на характер поведения релятивистских электронных пучков, со значениями над- и сверхкритических токов.

В данной выпускной квалификационной работе бакалавра проделана работа, связанная с постановкой численного моделирования виртуального катода во внешнем приложенном неоднородном аксиально-симметричном магнитном поле и анализу полученных результатов.

### **Структура работы:**

Глава 1. Численное моделирование релятивистских процессов.

Первая глава данной работы посвящена выбору программных средств для поставленных в ходе работы задач и обоснованию использования, описанию и рассмотрению возможностей численного моделирования в целях исследования ряда задач, непосредственно касающихся целей данной работы.

## Глава 2. Построение модели

Вторая глава посвящена деталям создания трехмерной модели и подготовкой данной модели к реализации численного моделирования процессов, происходящих в релятивистском электронном пучке.

Глава 3. Моделирование процессов, происходящих в релятивистском электронном потоке во внешнем однородном магнитном поле

В третьей главе была подробно описана постановка численного моделирования процессов, происходящих в релятивистском электронном потоке во внешнем однородном магнитном поле

Глава 4. Сжатие электронного пучка приложенным внешним магнитным полем.

Результаты, полученные в четвертой главе, демонстрируют возможность плавной транспортировки пучка за счет внешнего неоднородного аксиально-симметрического магнитного поля и создания виртуального катода в области неоднородности приложенного внешнего неоднородного магнитного поля, при значениях тока меньшего критического.

## Глава 5. Построение «границы отражений».

В пятой главе для оценки влияния внешнего неоднородного магнитного поля на характер поведения отраженных в пучке частиц, была построена «граница отражений» — линия на плоскости параметров  $(I, \Delta B)$ , при которых образуется часть электронов с отрицательными скоростями и возвращается на плоскость инжекции или оседает на боковых стенках.

## Глава 6. Построение карты режимов.

Шестая глава описывает постановку и построение карты режимов взаимодействия релятивистского электронного пучка с приложенным внешнем неоднородным аксиально-симметричным магнитным полем, и рассмотрение полученных результатов приведено в шестой главе данной работы.

### **Основное содержание работы.**

При изменении геометрических параметров цилиндрического пространства дрейфа при заданном значении поданного на катод напряжения  $U_0$ , также изменяется значение предельного вакуумного тока для рассматриваемой системы.

Реализуя переход электронного пучка в цилиндрическое пространство дрейфа большего радиуса, можно сформировать виртуальный катод в области пространства дрейфа большего радиуса при выполнении условия  $I_{кр2} < I_0 < I_{кр1}$ , где  $I_{кр1}$  – величина критического тока в области пространства дрейфа меньшего радиуса,  $I_{кр2}$  – величина критического тока в области пространства дрейфа большего радиуса,  $I_0$  – значение величины тока, эмитируемого с катода.

Такой тип реализации формирования виртуального катода был применен в вакуумных плазменных генераторах для создания сжатого состояния пучка [5]. В рассматриваемых системах на области пространства дрейфа задано постоянное однородное магнитное поле, которое фокусирует электронный пучок. Значение такого приложенного внешнего магнитного поля для релятивистских виркаторов составляет величину порядка 0.2-1 Тл [6].

Принципиально новая идея создания виртуального катода связана с изменением радиуса электронного пучка, который движется в цилиндрическом пространстве дрейфа, имеющим постоянный радиус (Рис. 2). Так как при сжатии электронного пучка, то есть уменьшении его внешнего

радиуса, согласно закону Богданкевич-Рухадзе, будет уменьшаться значение предельного вакуумного тока [6].

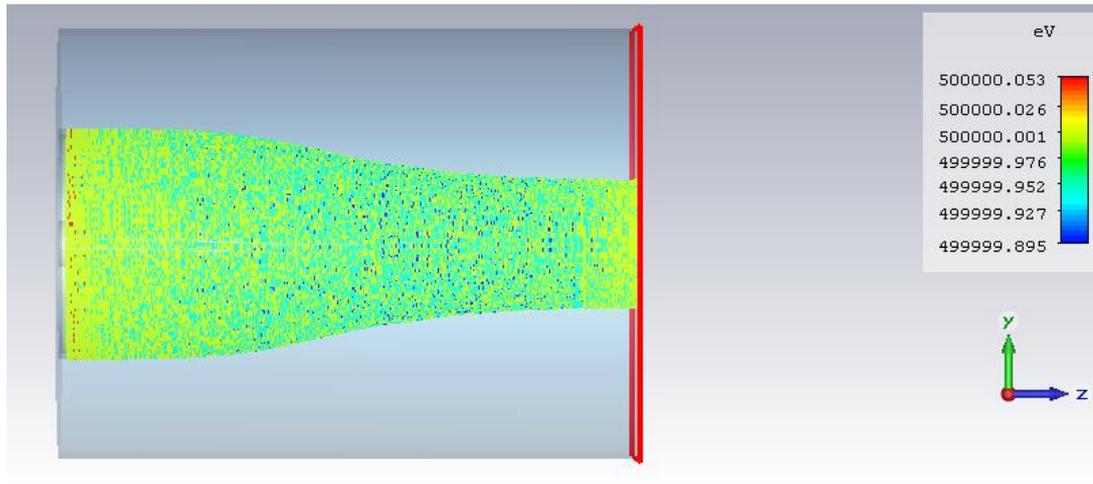


Рисунок 1. Изменение радиуса электронного пучка магнитным полем

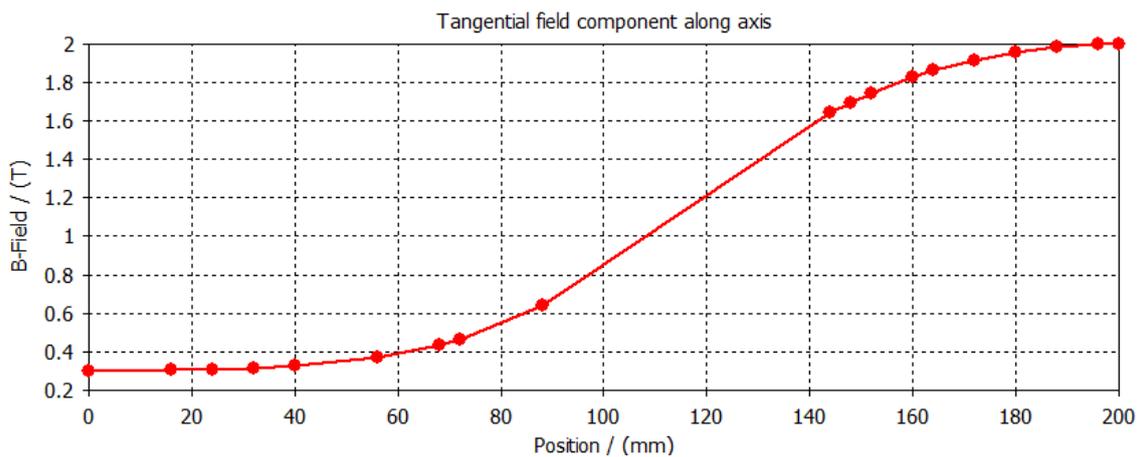


Рисунок 2. Вид функции распределения магнитного поля, заданной на оси

Приложенное внешнее магнитное поле задано функцией распределения магнитного поля на оси (Рис. 3). Модуль и направление вектора магнитной индукции в каждой точке рассматриваемой системы определяется из теоремы Гаусса для вектора магнитной индукции.

Изменить радиус электронного пучка позволяет приложенное внешнее неоднородное статическое магнитное поле, заданное на оси. Однако, следует учитывать тот факт, что образование виртуального катода при сжатии пучка может также достигаться за счет эффекта "магнитной ловушки", фазовый портрет которой изображен на рисунке 4, образующейся за счет сильной

неоднородности статического магнитного поля. Виртуальный катод в области сильной неоднородности магнитного поля образуется для величины тока сильно ниже значения, при котором образуется ограничивающий пространственный заряд при постоянном магнитном поле [7].

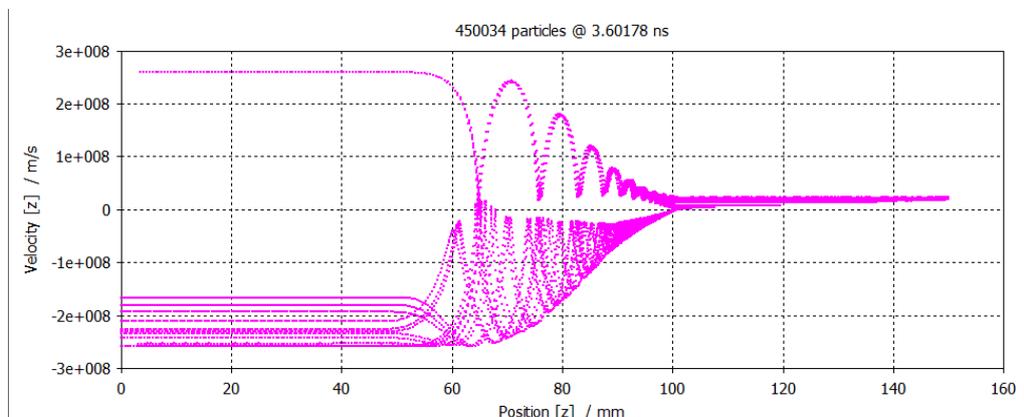


Рисунок 3. Фазовый портрет «магнитной ловушки». Величина изменения магнитного поля равна 2 Тл. на 50 мм при токе 100 А

Плавное изменение величины магнитного поля на оси (Рис. 3) будет постепенно сжимать электронный пучок, уменьшая значение его внешнего радиуса. При таком задании магнитного поля эффект "магнитной ловушки" не проявляется, в области изменения внешнего магнитного поля колебания энергии частиц значительно меньше энергии пучка для значений тока порядка ниже критического значения для данной системы.

Для установления различных режимов отражений для начала необходимо установить «границу отражений» (назовем ее так) — линия на плоскости параметров ( $I$ ,  $dV$ ), при которых образуется часть электронов с отрицательными скоростями и возвращается на плоскость инъекции или оседает на боковых стенках.

Построенная таким образом «граница отражений» является линией бифуркации, разделяя два состояния релятивистского электронного пучка, когда в нем образуются отражения, и когда нет.

Дальнейшее увеличение параметров  $I$  и/или  $dV$  приводит к увеличению

количества электронов, имеющих отрицательную скорость. В области, выше этой границы также могут существовать различные режимы, при которых будет различаться поведение электронов.

Построение кривых отражений проводилось для различных  $V_0$  в диапазоне от 0.3 Т (нижней границы рабочего значения магнитного поля) до 1 Т (0.7 - верхняя граница рабочего значения магнитного поля для магнетрона). Ниже, на рисунке 6 представлены результаты построенных кривых для 0.3 Т (нижняя линия), 0.5 Т (средняя линия) и 0.7 Т (верхняя линия).

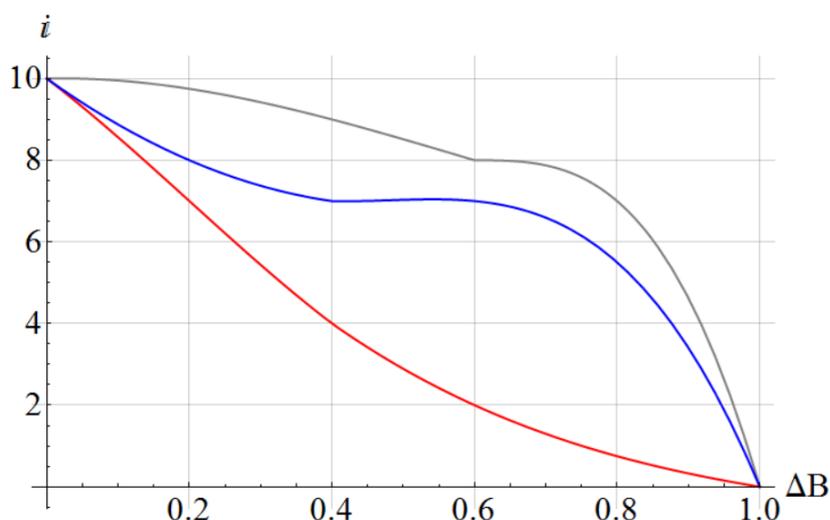


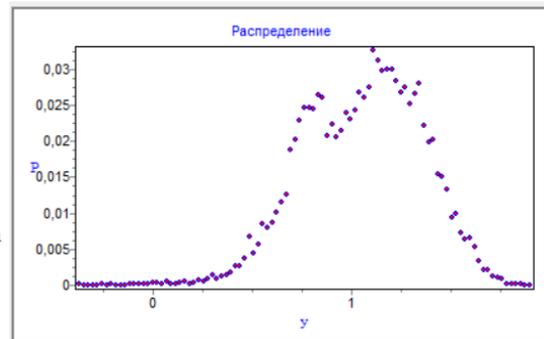
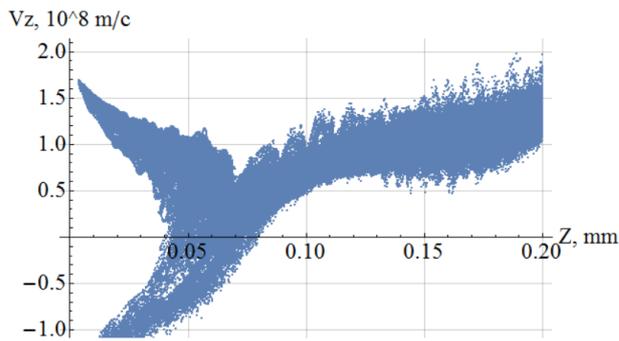
Рисунок 4. Вид «границ отражений» на плоскости параметров ( $I$ ,  $dB$ ) для различных значений  $V_0$

После установления «границы отражений» на плоскости параметров ( $I$ ,  $dB$ ), появляется возможность провести статистический анализ поведения частиц при различных значениях  $I$  и  $dB$ . Карта режимов строилась для  $V_0 = 0.3$  Тл.

Статистический анализ проводился для значений скорости частиц в определенный временной интервал численного моделирования при устоявшейся динамике частиц.

По полученным функциям плотности распределения  $p(v)$  на плоскости ( $I$ ,  $dB$ ) можно выделить 4 режима, изображенных на рисунках 5.1 – 5.4:

а)



б)

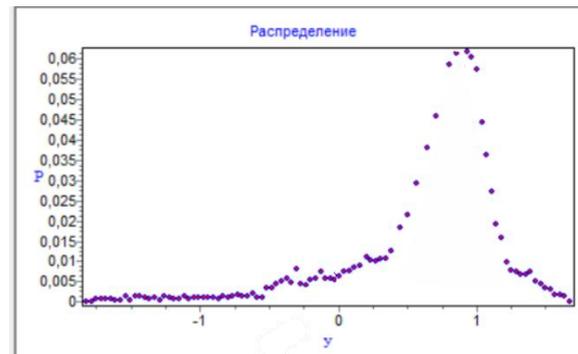
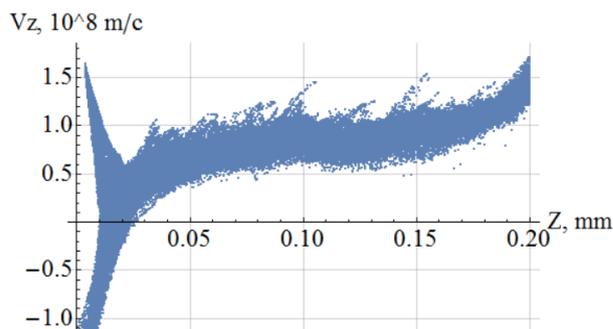


Рисунок 5.1. Режим преобладание влияния пространственного заряда при отражении частиц в релятивистском электронном пучке. а)  $I = 9$  кА,  $dB = 0.2$  Тл., б)  $I = 25$  кА,  $dB = 0$  Тл.

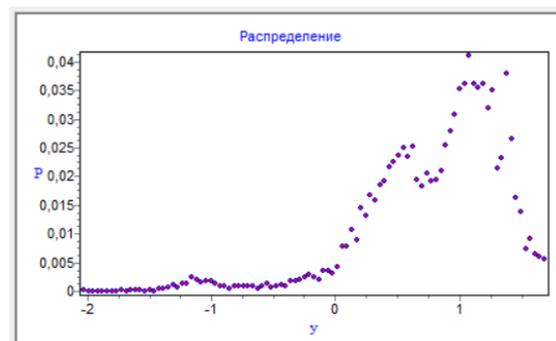
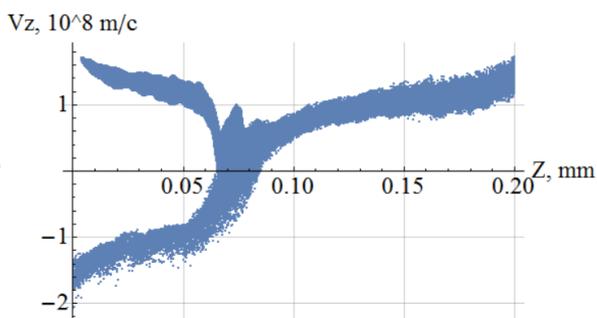


Рисунок 5.2. Смешанный режим, влияние механизмов, как сил пространственного заряда ловушки, так и магнитной неоднородности в релятивистском электронном пучке при отражении частиц в релятивистском электронном пучке.  $I = 6$  кА,  $dB = 0.4$  Тл.

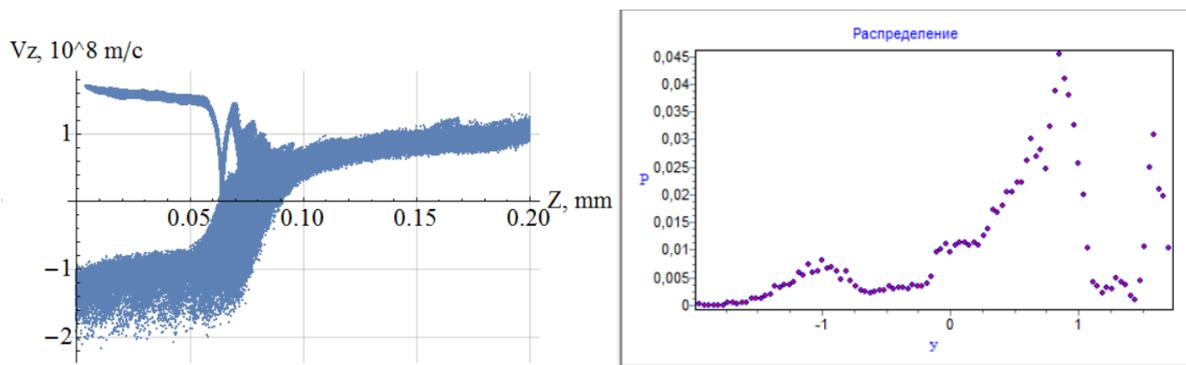


Рисунок 5.3. Преобладание влияния магнитной неоднородности при отражении частиц в релятивистском электронном пучке.  $I = 2$  кА,  $dB = 0.8$  Тл.

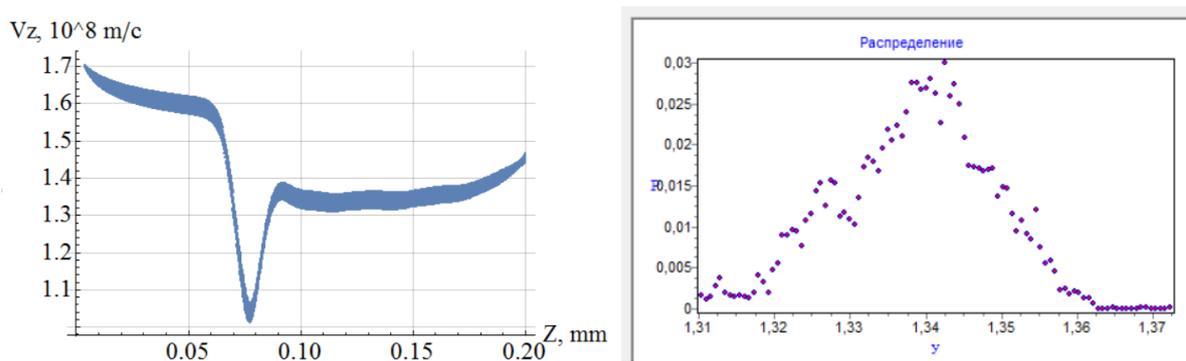


Рисунок 5.4. Режим отсутствия отраженных частиц.  $I = 2$  кА,  $dB = 0.2$  Тл.

Режим преобладание влияния пространственного заряда (Рисунок 6.1) при отражении частиц в релятивистском электронном пучке характеризуется плотностью распределения, сконцентрированной в области положительных значений, равномерным распределением стремящемуся к нормальному распределению Гаусса.

Влияние неоднородного магнитного поля при отражении частиц в релятивистском электронном пучке оценивается характерным «горбом» на функции плотности распределения частиц в области отрицательных скоростей.

Таким образом точно определить четкую границы между состояниями, где преобладает влияние пространственного заряда, от состояния в котором преобладает влияние неоднородного магнитного поля не представляется возможным.

Можно выделить область плавного перехода 2 на рисунке 6, и область, в

которой преобладает влияние неоднородного магнитного поля – 3. Область 4 соответствует области, где отраженные частицы отсутствуют, находится ниже «границы отражений».

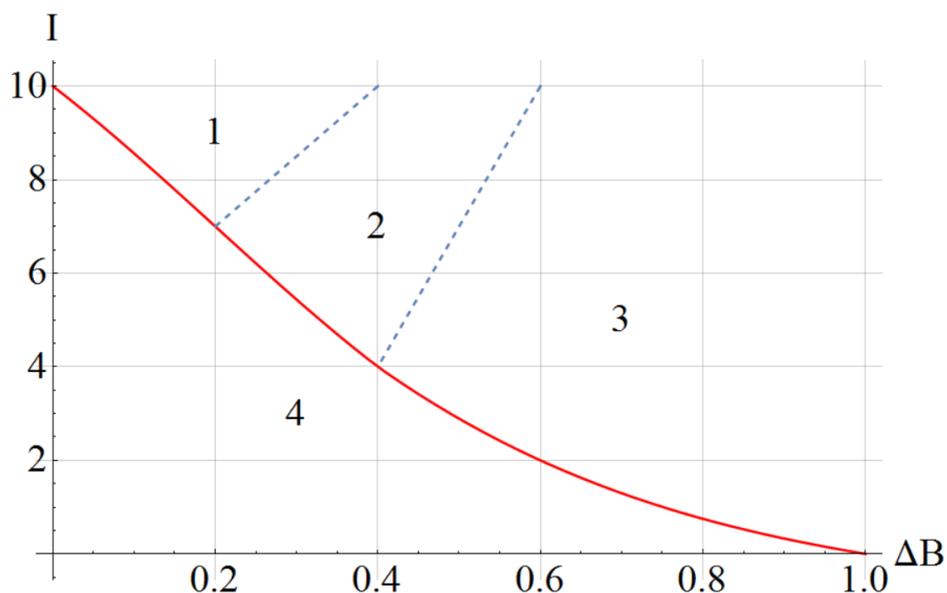


Рисунок 6. Вид карты режимов на плоскости параметров ( $I$ ,  $\Delta B$ ) для  $B_0 = 0.3$  Тл.

**Заключение.** В настоящей работе было исследовано воздействие внешнего неоднородного магнитного поля на характер поведения релятивистских электронных пучков со значениями над- и сверхкритических токов, проведено численное моделирование виртуального катода во внешнем неоднородном аксиально-симметричном магнитном поле при различных заданных управляющих параметрах.

Было показано, что введение неоднородного магнитного поля в систему пространства дрейфа виркатора приводит к появлению новых режимов динамики электронного пучка.

В поставленном в рамках работы численном моделировании было продемонстрировано изменение радиуса электронного пучка, движущегося в цилиндрическом пространстве дрейфа, имеющим постоянный радиус. Получены различные режимы динамики электронного пучка, связанные с его взаимодействием с неоднородным внешним магнитным полем в соответствии

с выбранными управляющими параметрами тока, и приложенного внешнего магнитного поля.

На плоскости параметров ( $I$ ,  $\Delta V$ ) было выделено 4 основных режима: 1) режим преобладания влияния пространственного заряда при отражении частиц в релятивистском электронном пучке, 2) смешанный режим при отражении частиц, 3) преобладание влияния магнитной неоднородности при отражении частиц в релятивистском электронном пучке, 4) режим отсутствия отраженных частиц.

### **Список литературы**

1. Nikolov N.A., Kostov K.G., Spassovsky I.P., Spassov V.A. // Electronics Letters. 1988. Vol. 24. N 23. P. 1445.
2. Kostov K.G., Nikolov N.A., Spassovsky I.P., Spassov V.A. // Appl. Phys. Lett. 1992. Vol. 60. N 21. P. 2598.
14. Kostov K.G., Nikolov N.A., Spassov V.A. // Electronics Letters. 1993. Vol. 29. N 12. P. 1069.
3. Kostov K.G., Nikolov N.A. // Phys. Plasmas. 1994. Vol. 1. N 4. P. 1034.
4. Петрик А.Г. //Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 22, 6 (2014) 35-41
5. А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир// Письма в ЖТФ, 2001, том 27, вып. 13
6. Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Устойчивость релятивистских электронных пучков в плазме и проблема критических токов // Успехи физ. наук. - 1971. - Т. 103, N 4. - С. 609-640.
7. Shulim E. Tsimring "Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics". A John Wiley & Sons, inc., Publication, 2007.