

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗБРОСА ПУЧКА НА РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ТОКЕ, БЛИЗКОМ К ПРЕДЕЛЬНОМУ

Г.Э. Саруханян, А.М. Горбань

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина

E-mail: gorban@kipt.kharkov.ua

Исследовано влияние энергетического разброса на развитие неустойчивости широкого электронного пучка с током, близким к предельному, ограниченному пространственным зарядом. Выделены фазы развития неустойчивости, определены их длительности. Определена зависимость характера установившегося режима виртуального катода от начального энергетического разброса пучка.

1. ВВЕДЕНИЕ

Предметом исследования данной работы является сценарий развития неустойчивости широкого сильноточного электронного пучка с током, близким или незначительно превышающим предельный, ограниченный пространственным зарядом, а также влияние энергетического разброса пучка на развитие неустойчивости, характер и параметры установления режима виртуального катода.

В литературе [1] указывается на возможность существования виртуального катода при токах инжекции I_0 , меньших предельного тока I_{lim} . Мы же попытались разрешить вопрос о возможности установления режима виртуального катода при $I_0 < I_{lim}$. Как указывается в [1], характер зависимости прошедшего через плоский дрейфовый промежуток тока нерелятивистского электронного пучка от тока инжекции имеет вид, представленный на Рис.1. Из диаграммы видно, что виртуальный катод может существовать при токах инжекции I_0 , меньших предельного тока I_{lim} , в диапазоне $0,5 \cdot I_{lim} < I_0 < I_{lim}$. При адиабатически плавном увеличении тока инжекции виртуальный катод образуется при $I_0 > I_{lim}$ в результате развития бурсиановской неустойчивости. При этом виртуальный катод возникает на удалении $x \approx 0,3 \cdot d$ от плоскости инжекции и пропадает при адиабатическом уменьшении I_0 в точке $x = 0,5 \cdot d$ за счет развития той же бурсиановской неустойчивости. Здесь d – длина дрейфового промежутка.

Можно предположить, что система, находящаяся в устойчивом состоянии 1 на Рис.1 с $0,5 \cdot I_{lim} < I_0 < I_{lim}$ может перейти в состояние 2 и 3 при фиксированном токе инжекции за счет локального увеличения плотности заряда и, соответственно, потенциала. В работе [2] рассматриваются два возможных механизма раскачки колебаний электронного потока со сверхпредельным током – двухпучковая неустойчивость, обусловленная взаимодействием пролетных электронов с облаком осциллирующих частиц и неустойчивость, связанная с нелинейностью движения электронов в потенциальной яме. Оба механизма можно рассматривать в качестве потенциальных инициаторов развития неус-

тойчивости при значениях токов инжекции ниже предельных.

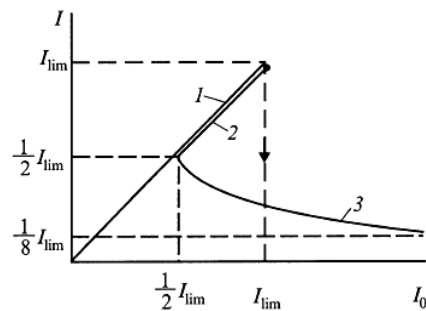


Рис.1. Ток I , прошедший через плоскую область дрейфа, в зависимости от тока инжекции I_0 .

1 – устойчивые однопоточные состояния;
2 – неустойчивые однопоточные состояния;
3 – состояния с ВК. По материалам [1]

В качестве объекта моделирования рассматривается область дрейфа, ограниченная в направлении распространения пучка заземлёнными плоскостями, прозрачными для электронов. В поперечном направлении область дрейфа не ограничена. Электрическое поле самосогласованное, потенциальное. В систему осуществляется постоянная инжекция электронов со средней энергией ≈ 20 кэВ. Начальные импульсы частиц подчиняются распределению Гаусса. Исследовались значения параметра относительного разброса импульсов dp/p_0 от 0 до $5 \cdot 10^{-2}$, где p_0 – среднее значение начального импульса частиц, dp – разброс импульсов.

Контролировались распределение плотности заряда и потенциала вдоль системы, мгновенное положение виртуального катода и потенциал в точке его нахождения, фазовые характеристики частиц, а также прошедший и отражённый ток.

2. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Система описывается уравнениями для самосогласованного потенциала φ и напряженности электрического поля E :

$$\Delta\varphi = -4\pi\rho, \quad \varphi|_G = 0, \quad (1)$$

$$E = -grad \varphi, \quad (2)$$

а также уравнениями движения электронов:

$$\frac{dp}{dt} = qE, \quad p|_{x=0} = f(p_0), \quad (3)$$

где $f(p_0)$ – статистическая функция распределения по импульсам; p – импульс частицы и q – ее заряд. Уравнение для координат x частиц с учетом релятивистской поправки имеет вид:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{pc}{\sqrt{p^2 + m^2 c^2}}, \quad (4)$$

где m – масса частицы; c – скорость света.

Таким образом, имеем задачу распространения широкого электронного пучка размерности $1d1v$.

Решение выполнялось путем моделирования методом крупных частиц (PIC). Подробно вычислительная модель описана в [3].

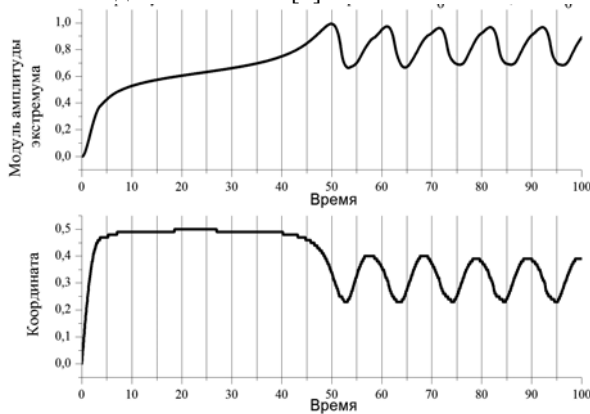


Рис.2. Зависимость амплитуды (вверху) и координаты (внизу) экстремума потенциала от времени для холодного ($dp/p_0 = 0$) пучка

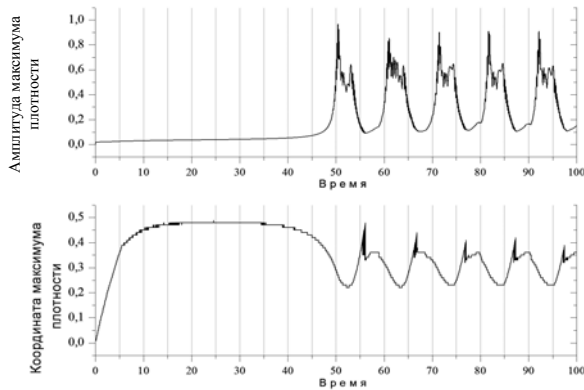


Рис.3. Зависимость амплитуды (вверху) и координаты (внизу) экстремума плотности заряда от времени для холодного ($dp/p_0 = 0$) пучка

Основные результаты исследования сводятся к следующему.

Выявлены три основные фазы развития неустойчивости электронного пучка:

- начальная – характеризуется медленным, плавным ростом экстремума потенциала и медленным увеличением плотности заряда; протяжённость этой стадии до 40 пролётных времен (Рис.2,3);

- линейная – характеризуется экспоненциальным ростом экстремума потенциала и плотности заряда; завершается разрывом тока пучка; значение потенциала; при этом превышает ускоряющее напряжение на $\approx 15\%$; продолжительность линейной стадии 2...5 пролётных времен;

- нелинейная – область существования виртуального катода с установившимися колебаниями потенциала, имеется прошедший и отраженный электронный поток электронов.

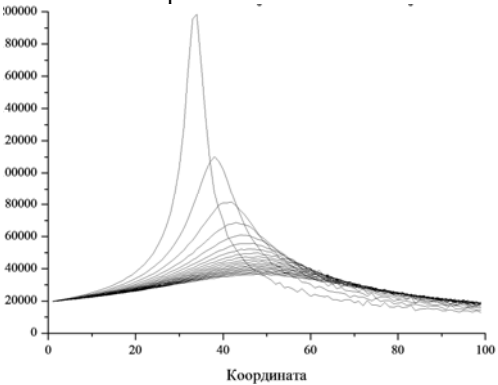


Рис.4. Профили плотности частиц в различные моменты времени от 20 до 50 пролётных времен для пучка с $dp/p_0 = 1 \cdot 10^{-3}$

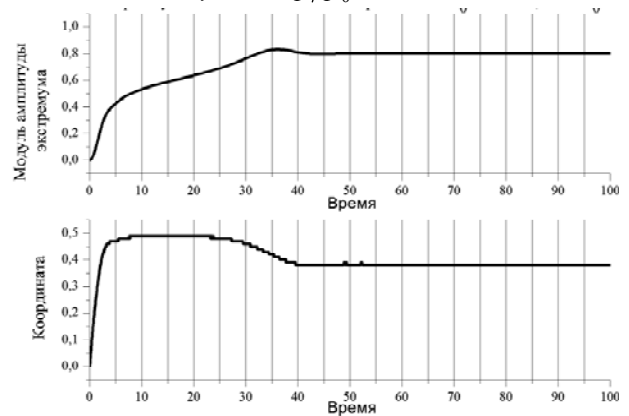


Рис.5. Зависимость амплитуды (вверху) и координаты (внизу) экстремума потенциала от времени для пучка с $dp/p_0 = 5 \cdot 10^{-2}$

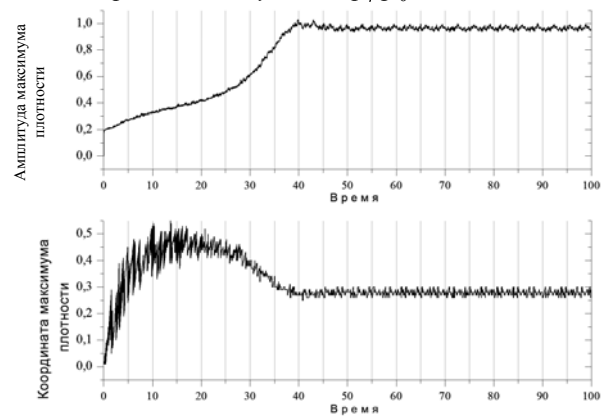


Рис.6. Зависимость амплитуды (вверху) и координаты (внизу) экстремума плотности заряда от времени для пучка с $dp/p_0 = 5 \cdot 10^{-2}$

Установлено, что развитие неустойчивости начинается с изменения вида распределения плотности заряда и потенциала таким образом, что их точка экстремума сдвигается в направлении плоскости инжекции пучка (Рис.4). В результате это приводит к развитию неустойчивости пучка при значениях токов ниже, чем дает аналитическое решение [4]. Этим можно объяснить наличие длительной предварительной стадии развития неустойчивости.

В случае разброса энергии пучка для значений параметра $dp/p_0 \geq 10^{-2}$ начальная фаза развития неустойчивости переходит в нелинейную, практически минуя линейную фазу. При этом амплитуда колебаний виртуального катода и его смещение по координате становятся существенно ниже (Рис.5,6). Отраженный и прошедший ток при этом представляется в виде непрерывных потоков.

Процесс развития потенциальной неустойчивости в электронном пучке с малым параметром запределности характеризуется временами существенно больше времени пролёта системы и слабо зависит от энергетического разброса.

Характер установившихся колебаний виртуального катода существенно зависит от энергетического разброса пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Ф. Ковалев. О стационарных состояниях электронных пучков в дрейфовом пространстве // *ЖТФ*, 2002, т.72, в.7, с.113-116.
2. В.И. Григорьев, В.И. Ильин, Т.В. Коваль, Н.И. Саблин, М.В. Урев. Численное исследование формирования виртуального катода при инжекции сверхпределных токов в цилиндрическую трубу дрейфа // *Матем. моделирование*. 1991, т.3, №8, с.14-20.
3. Г.Э. Саруханян. Компьютерное моделирование виртуального катода в широком диапазоне энергетического разброса электронного пучка // *Труды научно-технической конференции с международным участием «Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях»*. Харьков, май 2010 г., с.304-307.
4. Р. Миллер. *Введение в физику сильнооточных пучков заряженных частиц*. М.:«Мир», 1984, 432 с.

Статья поступила в редакцию 07.06.2010 г.

THE ENERGETICAL BEAM SCATTERING INFLUENCE ON THE INSTABILITY EVOLUTION WITH THE CURRENT CLOSE TO THE LIMITING

G.E. Sarukhanyan, A.M. Gorban'

The influence of power scattering on the instability evolution of the wide electronic beam with the current close to the limiting limited by the spatial charge. Phases of evolution of instability are allocated and their durations are defined. The dependence of character of the steady-state mode of the virtual cathode from initial power of scattering of the beam is determined.

ВПЛИВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РОЗМИТТЯ ПУЧКА НА РОЗВИТОК НЕСТІЙКОСТІ ПРИ СТРУМІ, БЛИЗЬКОМУ ДО ГРАНИЧНОГО

Г.Е. Саруханян, А.М. Горбань

Досліджено вплив енергетичного розмиття на розвиток нестійкості широкого електронного пучка зі струмом, близьким до граничного, обмеженого просторовим зарядом. Виділено фази розвитку нестійкості, визначено їх протяжності. Встановлена залежність характеру усталеного режиму віртуального катода від початкового енергетичного розмиття пучка.