

В диссертационный совет Д 212.243.01  
в Саратовском государственном  
университете  
410012, г. Саратов,  
ул. Астраханская, 83

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Фролова Никиты Сергеевича «**Колебательные процессы, синхронизация и усиление сигналов в низковольтном виркаторе и виртоде**», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – радиофизика и 01.04.04 – физическая электроника.

Диссертационная работа Фролова Н.С. посвящена изучению колебательных и волновых процессов в электронных приборах с виртуальным катодом (ВК).

Согласно автореферату, диссертация содержит 158 стр. текста и состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

В диссертационной работе проведено:

1. Разработаны аналитическая и численная 1D-модели неавтономной динамики электронного пучка в режиме образования ВК в нерелятивистском виркаторе. Нестационарная самосогласованная численная модель нерелятивистского электронного потока с ВК и скоростной модуляцией пучка основана на методе «частиц в ячейке» в квазистатическом приближении.
2. В рамках построенных одномерных моделей детально изучены зависимости выходной мощности нерелятивистского генератора на ВК от частоты и мощности внешнего воздействия. Получено хорошее согласие теоретических и численных результатов с экспериментальными данными.
3. Изучено влияние сигналов различной формы на процессы образования и колебания ВК при рассмотрении однонаправленно связанных виркаторов. Изменение формы внешнего сигнала осуществлялось путем настройки ведущего

генератора на различные колебательные режимы, которые варьировались от периодического и слабохаотического до режима развитого хаоса.

4. Исследован процесс установления синхронной динамики однонаправленно связанных виркаторных систем посредством анализа обобщенной синхронизации и синхронизации временных масштабов. Для диагностики обобщенной синхронизации применялись метод вспомогательной системы и расчет спектра показателей Ляпунова, которые показали высокую эффективность при анализе синхронного поведения связанных систем. При изучении вопроса об установлении синхронизации временных масштабов был использован аппарат непрерывного вейвлетного преобразования. Показана возможность использования режима обобщенной синхронизации низковольтного виркатора для реализации скрытой передачи информации.

5. В рамках лицензионного программного комплекса CST Particle Studio построена полностью электромагнитная трехмерная численная модель неавтономного нерелятивистского генератора на ВК; проведена оптимизация геометрических параметров пушечной части, резонатора, а также электродинамических систем для ввода и вывода СВЧ-сигнала для достижения наилучшего взаимодействия пучка с электромагнитными полями замедляющих систем.

6. В рамках построенных численных моделей пучка, а также сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными была показана высокая эффективность изучаемого подхода по увеличению выходной мощности виркаторных систем за счет предварительной скоростной модуляции частиц слабым внешним сигналом.

7. Предложена конструкция нового высокомоощного регенеративного усилителя, основанная на схеме релятивистского двухзазорного генератора на виртуальном катоде с внешней обратной связью (виртода). Проведена математическая оптимизация параметров усилительной системы (как геометрических параметров резонаторной и волноведущей систем, так и параметров пучка) для достижения максимальной эффективности усиления внешнего сигнала средней мощности.

8. Проведено исследование усиления сигнала в предложенной релятивистской модели усилителя на ВК. Особое внимание уделялось анализу выходных характеристик в зависимости от параметров входного сигнала и изучению вопроса

о возможности управления выходными характеристиками за счет механической перестройки геометрии прибора.

В работе были получены следующие основные результаты:

1. В рамках теоретического анализа и численного моделирования показано, что скоростная модуляция пучка на входе в рабочую камеру низковольтного виркатора внешним сигналом с частотой, близкой к частоте колебаний ВК, позволяет максимально увеличить мощность выходного СВЧ-излучения виркатора в  $4 \div 7$  раз за счет улучшения группировки электронного потока в области образования ВК. Данный эффект носит резонансный характер и наблюдается только на частотах, близких к частоте колебаний ВК.
2. Увеличение выходной мощности неавтономного нерелятивистского генератора на ВК с увеличением мощности внешнего сигнала носит пороговый характер и возникает после установления синхронизации временных масштабов между внешним воздействием и колебаниями ВК – резкий рост мощности выходного излучения происходит в тот момент, когда энергия вейвлетного спектра, приходящейся на область синхронных временных масштабов, близка к полной энергии всего вейвлетного спектра выходных СВЧ-колебаний. Существует оптимальная амплитуда внешнего сигнала, при которой выходная СВЧ-мощность максимальна. Падение выходной мощности при воздействии мощного внешнего сигнала связано с ухудшением эффективности группировки пучка вследствие роста глубины модуляции пучка и последующей перегруппировки электронов в пространстве дрейфа.
3. Ограничение длительности импульса СВЧ-излучения в релятивистском двухззорном виртоде, кроме известных плазменных эффектов, определяется также изменением конфигурации электромагнитного поля в первом зазоре двухсекционного резонатора релятивистского виртода из-за накопления в нем избыточного пространственного заряда вследствие смещения ВК в область первого зазора. Изменение формы и вида колебаний поля в первой секции резонатора нарушает механизм обратной связи в виртоде и препятствует формированию плотного электронного сгустка в области ВК из-за ухудшения взаимодействия пучка с полем, что приводит к срыву СВЧ-колебаний в виртоде.
4. Предложенная схема мощного релятивистского усилителя на ВК, основанная на схеме двухсекционного релятивистского виртода, включающая в себя две

раздельные секции, в первой из которых происходит предварительная скоростная модуляция пучка внешним усиливаемым сигналом, вводимым посредством коаксиального волновода, а во второй, выходной, секции формируются электронные сгустки, усиливающие входной сигнал, представляет собой регенеративный узкополосный усилитель с рабочим током, лежащим между первым и вторым критическими токами, с шириной полосы порядка 0.6%, максимальным коэффициентом усиления по мощности порядка 18 дБ и возможностью механической перестройки частоты за счет изменения геометрических параметров модулирующего резонатора.

Основные результаты работы были изложены автором в 10 статьях в ведущих российских и зарубежных журналах, многократно апробировались на конференциях различного уровня.

Серьезных замечаний автореферат Н.С.Фролова не вызывает, он оформлен достаточно хорошо, в нем ясно изложена суть диссертации. Можно только отметить, что:

- в автореферате отсутствует рисунок со схемой предложенного автором релятивистского виртода, его можно было бы привести;
- кое-где в тексте автореферата встречаются стилистические погрешности типа «Конструкция рассматриваемого двухзачорного виртода представляет собой электронную пушку ...» и т.п., затрудняющие понимание.

Переходя к общей оценке диссертационной работы, необходимо отметить, что она представляет собой законченное исследование, посвященное актуальной научной проблеме и выполненное на высоком уровне. То, что диссертация выполнена на стыке двух специальностей 01.04.03 – радиопизика и 01.04.04 – физическая электроника, указано верно.

Рекомендуется использовать результаты диссертации в научно-исследовательских центрах, в которых ведутся работы по разработке, созданию и эксплуатации электронных СВЧ-приборов с ВК.

По объему и оригинальности полученных результатов, достоверности, научной и практической ценности диссертационная работа **"Колебательные процессы, синхронизация и усиление сигналов в низковольтном виркаторе и виртоде"**, представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических

наук, соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – Фролов Никита Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Заместитель директора

НТЦФ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» по НИР,  
доктор физико-математических наук, доцент

Дубинов Александр Евгеньевич

ФГУП

«Российский Федеральный Ядерный Центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт экспериментальной физики»,  
607188, Нижегородская обл., г. Саров,  
пр. Мира, 37,  
тел. (83130)45144  
[dubinov@ntc.vniief.ru](mailto:dubinov@ntc.vniief.ru)

Подпись Дубинова А.Е. заверяю

Заместитель научного руководителя

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

директор НТЦФ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

доктор физико-математических наук



Селемир Виктор Дмитриевич