

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

на диссертационную работу Бадарина Артема Александровича «Колебательные явления в релятивистских электронных потоках с виртуальным катодом в полях резонансных систем и фотонных кристаллов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 «Радиофизика» и 01.04.04 «Физическая электроника»

Диссертационная работа Бадарина А.А. посвящена выявлению особенностей колебательных явлений в релятивистских электронных потоках с виртуальным катодом (ВК) при их взаимодействии с электромагнитными полями резонансных систем и фотонных кристаллов, а также изучению механизмов усиления положительной обратной связи в генераторах на базе ВК. Интерес к подобным исследованиям обусловлен важностью изучения объектов и явлений, способных генерировать сверхмощное электромагнитное излучение сантиметрового и миллиметрового диапазонов, что находит применение в задачах ускорения электронных и ионных пучков, физики плазмы, технологических процессах, задачах дальней радиолокации и дистанционного зондирования атмосферы и др.

В диссертационном исследовании были получены новые физические результаты на стыке радиофизики и физической электроники, полученные с применением современных методов теоретического исследования и заключающиеся в поиске путей создания эффективных сверхмощных источников электромагнитного излучения и в выявлении физических особенностей нелинейно-динамических процессов, характерных для пучково-плазменных электронных приборов на базе релятивистского электронного потока с ВК.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 150 страниц.



Во **введении** обосновывается актуальность, новизна и практическая значимость работы, формулируются цель и задачи исследования, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертационной работы представлены результаты анализа динамики частоты колебаний электромагнитного поля в электронном потоке с ВК в системе без внешних электродинамических структур. На основе полученных результатов о собственной динамике электронного потока с ВК, разработана оригинальная модель релятивистской виркаторной системы, использующей в качестве пространства взаимодействия эллиптический резонатор. Предложенная автором схема характеризуется высокими расчетным КПД ( $\eta \approx 6\%$ ), что является очень хорошим результатом для виркаторов.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена изучению физических процессов, протекающих в многолучевых виркаторах. Автор проанализировал различные конфигурации многолучевого виркатора, отличающиеся взаимным расположением электронных пучков и их количеством. Получена и проанализирована карта динамических режимов, реализующихся при взаимодействии трех электронных потоков со сверхкритическими токами. Показано, что увеличение количества электронных потоков позволяет существенно повысить не только мощность, но и КПД генерации.

В **третьей главе** диссертационной работы представлены результаты исследования процессов взаимодействия интенсивного релятивистского электронного потока с полями фотонного кристалла (ФК). Проведен анализ электродинамических характеристик ФК, находящегося в цилиндрическом волноводе. Показано, что подстройка конфигурации источников излучения в соответствии с пространственным распределением поля конкретной моды позволяет проводить селекцию мод в генераторе с ФК, что приводит к существенному увеличению частоты генерации за счет возбуждения высших мод. Предложена и исследована оригинальная модель двухсекционного



виркатора на базе ФК с высоким для подобных систем КПД равным 12.8%, достигаемого за счет добавления механизма обратной связи.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Степень обоснованности научных положений, научная новизна и значимость полученных в диссертации результатов не вызывают сомнения.

Среди наиболее значимых с научной точки зрения результатов диссертационного исследования можно отметить следующие:

- Предложена и исследована оригинальная схема виркатора, в которой эллиптический резонатор используется в качестве пространства взаимодействия. Показано, что данный тип электродинамической структуры позволяет увеличить эффективность взаимодействия электромагнитного поля и электронного пучка с ВК за счет хорошей локализации поля в области взаимодействия.
- Проведен анализ процессов взаимодействия между пучками в многолучевом релятивистском виркаторе с токами, превышающими критический ток для данной системы. Обнаружен эффект, заключающийся в подстройке частоты колебаний ВК в менее интенсивных электронных потоках к частоте ВК в более интенсивном электронном потоке через общее электромагнитное поле.
- Предложен подход, позволяющий существенно увеличить частоту генерации за счет работы на высших модах ФК. Возбуждение конкретной собственной моды ФК в многолучевой схеме осуществляется за счет настройки конфигурации источников излучения в соответствии с пространственным распределением электромагнитного поля конкретной моды.
- Предложена принципиальная схема двухсекционного виркатора, в первой секции которого располагается ФК, способствующий увеличению положительной обратной связи и КПД генерации. Возрастание КПД связано с тем, что данная модель позволяет организовать распределённую



обратную связь как с помощью электромагнитного поля внутри ФК, так и за счет предварительной модуляции пучка, формирующего ВК во второй секции.

Результаты работы носят также прикладной характер, открывая новые возможности для конструкторской деятельности в области радиофизики и физической электроники сантиметрового и миллиметрового диапазонов, актуальных для систем дальней радиолокации, дистанционного зондирования атмосферы, спутниковой связи, ускорения электронных и ионных пучков. В частности, показана возможность увеличения КПД схем генераторов на ВК за счет использования нескольких электронных потоков, связанных через общее электромагнитное поле. Предложены новые виркаторные схемы на базе эллиптического резонатора и ФК, позволяющие уменьшить недостатки, свойственные данному классу устройств (сравнительно низкие КПД и частота генерации).

**Достоверность** и **обоснованность** полученных результатов, сформулированных положений и сделанных выводов обеспечивается адекватностью применённых моделей, корректностью исходных и упрощающих допущений, использованием уравнений, методов и подходов, строго обоснованных в научной литературе. Достоверность результатов подтверждается их соответствием современным физическим представлениям о процессах, происходящих в интенсивных пучково-плазменных системах. Ряд полученных научных результатов (значения частоты генерации, токов электронных потоков и характеристики электродинамических систем), согласуется с известными теоретическими и экспериментальными данными, опубликованными в авторитетных отечественных и зарубежных высокорейтинговых научных изданиях.

Диссертационная работа написана ясным языком, имеет логически выстроенную структуру, содержит достаточное количество ссылок на предшествовавшие научные исследования. Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 47 научных работах, включая 12 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, главу в коллективной монографии, 27 тезисов в трудах всероссийских и международных конференций, из них 12, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

По содержанию работы есть замечания:

1. Текст диссертации изобилует новыми «физическими» терминами: стр. 22 «фазовый круг», стр. 25 «положительное воздействие», стр. 64 «линии напряженности электронного потока», стр. 94 «область замедления групповой скорости» и т.д. В диссертационной работе хотелось бы видеть более аккуратное использование технических терминов;
2. Использование виркаторов автор работы видеть в том числе в РЛС. Спорный термин – для РЛС требуется уникальная чистота спектра, которую в принципе не обеспечивает ни один из видов генераторов;
3. Несколько обидно с точки зрения отечественной науки упоминание в качестве первой аналитической теории виркатора иностранной статьи 2002 года, хотя первая аналитическая теория возбуждения колебаний в системах с виртуальным катодом дана в статье А.Н. Диденко и В.П. Григорьева еще в 1988 году (РЭ, т. 33, №2, стр. 353-356). Так же упоминание о многолучевых приборах автор связывает с работами ученых из Китая, не упоминая работы отечественных разработчиков;
4. Очень много выводов автора связано с конфигурацией возбуждаемой моды резонатора и «собственного поля ВК». На стр.45, 49, 54 автор особо отмечает что «обнаружено наиболее эффективное взаимодействие ВК с Е-модой электромагнитного поля в резонаторе». Мне кажется не стоит уделять столько времени на анализ факта, имеющего прямое следствие из уравнений возбуждения резонаторов по



- Кисунько, или Вайнштейну, где в правой части дифференциального уравнения возбуждающая сила суть скалярное произведение конвекционного тока и вектора собственной моды резонатора;
5. На стр. 45 автор связывает низкий КПД ВК без резонаторной системы с отсутствием «стабилизации частоты». Хотелось бы отметить, что генерация ВК принципиально не связана с электродинамической структурой, наличие резонатора в качестве «стабилизатора» частоты возможно при его высокой нагруженной добротности. В то же время (стр. 48, 50) при анализе схем генератора значений нагруженной добротности не приводится вообще, так же как и влияния нагруженной добротности на КПД генератора, хотя известно, что контурное КПД во многом определяет КПД электроники;
  6. А.Н. Диденко был обнаружен двойственный (двухчастотный) механизм генерации излучения ВК: генерация за счет отраженных от ВК электронов, и генерация за счет колебаний самого ВК. Интересно, что в представленных автором спектральных характеристиках подобный двойной механизм не просматривается. С чем это связано?
  7. Интересен эффект «навязывания» частоты генерации в многолучевом виркаторе, пучком с наибольшим током (стр. 74). Остается на совсем ясным вопрос – режим по магнитному полю, с точки зрения образования ВК, а так же геометрия пространства генератора была выбрана исходя из возникновения ВК для наименьшего тока?
  8. Красивое и вполне «модное» название «фотонный кристалл» в тексте диссертации, есть, ни что иное, как замедляющая система типа «встречные штыри». Автор отмечает на стр. 104, что «структура в форме фотонного кристалла демонстрирует свойства резонатора», и анализирует их. Не совсем корректное утверждение: судя по кривым дисперсии линия синхронизма выбрана в расчете на границе зоны Бриллюэна, т.е. в области нулевой групповой скорости. Очевидно, что такой выбор привел к резонансу. Согласование самой замедляющей

системы с выводом энергии не рассмотрено вовсе, что может говорить о КСВн более 5, 10 и т.д. во всей рабочей полосе частот.

Указанные недостатки не носят принципиального характера и не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы.

Диссертационная работа «Колебательные явления в релятивистских электронных потоках с виртуальным катодом в полях резонансных систем и фотонных кристаллов» удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Бадарин Артем Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 «Радиофизика» и 01.04.04 «Физическая электроника».

Доктор технических наук,  
заместитель генерального директора – директор по  
научной работе Акционерного общества научно-  
производственного предприятие «Торий»



Комаров Д.А.

18ноября 2020 г.

Адрес места работы: АО НПП «Торий», 117393, г. Москва, ул. Обручева, 52;  
тел.: +7 (499) 789-96-62

e-mail: komardmitrij@yandex.ru

Специальность по диссертации: 05.27.02 - Вакуумная и плазменная электроника.

Подпись д.т.н. Комарова Дмитрия Александровича удостоверяю.

Должность, ФИО

*Иванови*  
*отдела кадров*  
Иван Майоров И.  
Blue circular stamp of the HR Department (ОТДЕЛ КАДРОВ) of AO NPP 'Toriy' with a signature over it.