

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Богачева Николая Николаевича «Режимы работы и излучение сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенной», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы

Сегодня хорошо известно, что на неидеальном цилиндрическом проводнике распространяется поверхностная электромагнитная волна из-за конечной величины проводимости материала. Компоненты поля такой волны  $E_r$ ,  $E_z$  и  $H_\phi$  резко убывают по радиусу амплитудой внутрь от границы и более медленным экспоненциальным спадом снаружи. Впервые теоретический анализ распространения такой волны провел А. Зоммерфельд. Проводник с конечной проводимостью можно рассматривать как замедляющую структуру для распространяющейся по нему волны, так как часть поля ПЭВ, проникающая в проводник на глубину скин-слоя возвращается на поверхность с заметным опозданием. К таким проводникам относятся металлы и плазма. Начиная с работ Трайвелспилса, Гранатштейна, Муассана активно исследовалось создание протяженных плазменных образований в газоразрядных трубках с помощью разрядов на поверхностных волнах. Особенностью таких разрядов является возможность управления длиной плазменного образования и концентрацией носителей. Использование получаемой таким образом плазмы в качестве токоведущего элемента антенны позволяет реализовать ряд преимуществ, связанных с электронным управление параметрами антенны, такими как рабочий диапазон частот, диаграмма направленности, эффективная площадь рассеяния и др. Плазменные антенны с разрядом, поддерживаемым поверхностной волной представляют большой исследовательский интерес, что видно из опубликованных работ по этой тематике. Исследование поверхностной волны и режимов работы плазменной несимметричной вибраторной антенны из газоразрядной трубы, а также спектров излучаемого сигнала представляют собой актуальную научную задачу.

В **введении** диссертации обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования, новизна, научная значимость и практическая ценность, представлены основные положения, выносимые на защиту. Также указана информация об апробации работы, личном вкладе автора, изложена разделов диссертации.

В **главе 1** проведен обзор исследований по плазменным антеннам. Отдельно рассмотрены антенны из газоразрядных трубок, как наиболее актуальный тип плазменных антенн. На основании проведенного обзора литературы выбрана конструкция плазменной несимметричной вибраторной антенны с прямым вводом излучения от коаксиального кабеля, которым относится исследуемая автором плазменная несимметричная

вибраторная антenna. Для выбранного типа антennы приведено описание схемы, основных особенностей и параметров антennы.

**Глава 2** посвящена методам численного и экспериментального исследования характеристик плазменной антennы. Достаточно подробно рассмотрены основные численные методы и программы для моделирования антenn. В главе представлены результаты верификации и обоснование выбора электродинамического кода КАРАТ для численного моделирования, описание численных моделей ПНВА. Кроме того, приведены методика эксперимента и схема лабораторного стенда, использованных при измерении диаграмм направленности и спектров излучения плазменной и металлической несимметричных вибраторных антenn.

**В главе 3** приведены численные решения дисперсионного уравнение поверхности электромагнитной волны на цилиндре конечного радиуса для различных значений электронной концентрации и частоты столкновений в плазме. На основе полученных дисперсионных кривых демонстрируется существование трёх режимов распространения поверхности электромагнитной волны на плазменном цилиндре конечного радиуса. Первый из них – режим существования стоячей поверхности электромагнитной волны на плазменном цилиндре, второй – нелинейный режим и третий режим – линейный. Указанные режимы определяются по дисперсионной характеристике из заданных концентрации плазмы и частоты электромагнитной волны. Далее приведены результаты моделирования в численном коде КАРАТ распределений составляющих напряженности электрического поля в ближней волновой зоне и диаграмм направленности металлической и плазменной антenn. Из результатов видно, что в первом из режимов формируется сильно укороченная стоячая поверхность электромагнитная волна с длиной  $\lambda \approx 1,5$  см и амплитуда диаграммы направленности близка к 0, в нелинейном режиме распределения поля и диаграмма направленности плазменной антennы сильно отличаются от характеристик металлической антennы, а в линейном режиме характеристик плазменной и металлических антenn слабо отличаются друг от друга. Кроме того в главе 3 представлены нормированные диаграммы направленности в  $E$ -плоскости для плазменной и металлической несимметричных вибраторных антenn в полярных и декартовых координатах. Из представленных диаграмм видно, что максимумы их основных лепестков близки по положению в пространстве, а уровень бокового лепестка по отношению к основному у плазменной антennы много меньше, чем у металлической.

**Глава 4** посвящена экспериментальным и численным исследования спектральных характеристик немодулированного и модулированного сигнала, излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антennой. Результаты сравнения спектральных характеристик немодулированного сигнала показывают заметное превышение высокочастотных гармоник в спектре сигнала плазменной антennы по сравнению с металлической. Аналогичные результаты наблюдаются и в численном моделировании.

Также в численном моделировании излучения немодулированного сигнала для разных режимов работы плазменной антенны показано, что в линейный режиме спектр излучаемого сигнала близок к наблюдаемому в эксперименте. Кратко указаны возможные причины обнаруженного явления. Экспериментально продемонстрировано, что плазменная антenna по качеству излучения частотно-модулированного сигнала не уступает металлической антенне.

В **заключении** перечислены основные полученные результаты диссертационной работы.

Список литературы, состоящий из 120 ссылок, является достаточным и отлично отражает основные исследования по тематике представленной диссертации.

**Достоверность** полученных результатов подтверждена обоснованным выбором современных проверенных средств моделирования, методик экспериментальных измерений, согласием с результатами других научных групп.

**Научная значимость и практическая ценность** заключается в том, что представленные результаты исследований демонстрируют физические и технические особенности работы плазменных антенн, связанные с управлением её характеристиками и спектрами излучаемого сигнала. Практическая направленность результатов проведенных исследований отражена, в полученном с участием Богачева Н.Н., патенте на изобретение «Плазменная вибраторная антenna с ионизацией поверхностной волной» RU 2544806 C1. .

**Новизна** представленных основных результатов не вызывает сомнений, особенно хотелось бы отметить следующие из них:

1. Выделены три режима работы плазменной несимметричной вибраторной антены, определяемые по дисперсионному уравнению: режим стоячей поверхностной электромагнитной волны, нелинейный и линейный режимы. Получены параметры и характеристики антены для этих режимов.
2. Экспериментально обнаружено, что в линейном режиме в излучении ПНВА присутствуют спектральные составляющие на кратных гармониках входного сигнала с амплитудами отличными от излучения МНВА.
3. С помощью численной РИС-модели плазменной антены обнаружены нелинейные искажения сигнала в трёх режимах работы, что подтверждается результатами эксперимента.
4. В результате исследования излучения ПНВА узкополосного частотно-модулированного сигнала показано, что в его спектре амплитуды нелинейных

комбинационных частот ниже, чем в спектре сигнала, излучаемого металлической несимметричной вибраторной антенной.

Все представленные в диссертации результаты получены лично автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке задачи, планировании экспериментов и анализе полученных результатов. Численные расчеты, представленные в диссертации, проводились лично автором или с его непосредственным участием. Диссертант самостоятельно выполнил экспериментальные измерения.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 статьях в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и прошли **апробацию** на международных и всероссийских конференциях, научных семинарах ИОФ РАН и РГУ МИРЭА.

Представленная диссертация выполнена на высоком научном уровне и соответствует заявленной специальности. Автореферат верно и полно отражает содержание диссертации.

Несмотря на высокую оценку представленной диссертации Богачева Н.Н. есть ряд замечаний, вопрос и пожеланий:

1. Хотя автореферат и диссертации написаны и оформлены достаточно хорошо, но встречаются опечатки в тексте и несогласованность окончаний в словах. Стоит отметить, что стиль написания иногда очень труден для прочтения и восприятия из-за длины и избыточной сложности построения предложений.
2. В тексте диссертации встречается путаница с вводимыми автором понятиями. Например, в главе используются термин «режим насыщения», который здесь же указывается еще и как «режим стоячей поверхностной волны». В главе 4 есть чередование терминов «мощность» и «плотность мощности», хотя в общем случае они не являются полностью эквивалентными.
3. Очень жаль, что не представлены распределения тока по плазменной антенне (с модулем и фазой) для исследуемых режимов работы..
4. Глава 4 в основном представляет собой описание проводимых экспериментов, численного модулирования и полученных в них результатах с кратким их анализом, более глубокий анализ отлично дополнил бы полученные результаты.

Указанные замечания не являются существенными и не снижают высокой оценки диссертации Богачева Н.Н\

Автор продемонстрировал высокий уровень владения, как экспериментальными методами, так и методами численного моделирования. Богачев Н.Н. внес значительный вклад в исследование плазменных антенн. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития физики плазмы.

Диссертация Н.Н. Богачева «Режимы работы и излучение сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенной» полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335, а ее автор Богачев Николай Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

### Официальный оппонент

Высококвалифицированный главный научный сотрудник  
лаборатории теории плазменных явлений  
отделения ядерной физики и астрофизики  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
доктор физико-математических наук, профессор

18.11.2021 

Алиев Юрий Миронович

Согласен на обработку персональных данных

Почтовый адрес места работы: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д.53

Телефон: +7(499) 132-66-23

E-mail: yumaliev@yandex.ru

Подпись Алиева Ю.М.. заверяю  
ученый секретарь ФИАН,  
к.ф.-м.н.



А.В. Колобов