

**УТВЕРЖДАЮ**

**Проректор Московского государственного**

**университета имени М.В.Ломоносова,**

**профессор**

**А.А.Федягин**



**2021 г.**

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

**Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»** 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

В последние годы в ряде прикладных областей возникает необходимость управления электродинамическими параметрами антенн (например, обеспечение электромагнитной совместимости антенн различного частотного диапазона, управление диаграммой направленности, управление эффективной площадью рассеяния антенн и т.п.). Как правило, антенны представляют собой токопроводящие цепи из элементов, изготовленных из металла. Однако в некоторых приложениях плазменный столб, управляемый поверхностными волнами, может заменить металл в качестве токонесущего элемента.

Предложение использовать плазму в качестве проводника в радиолокационной антенне отнюдь не ново. Попытки применениям плазмы в антенных системах известны с середины XX века. В ИОФ РАН одним из пионеров плазменных антенн был профессор А.А.Рухадзе, который занимался обоснованием физических принципов работы таких устройств.

Сегодня наблюдается возрождение интереса к плазменным антеннам, в первую очередь обусловленное возможностью создания антенных структур с малой радиолокационной заметностью (антенны радиолокаторов, станции радиоэлектронного противодействия и т.д.). Однако есть дополнительные причины для исследования плазменных антенн. Использование плазмы позволяет изменять конфигурацию антенных структур по форме, частоте, ширине полосы, направленности и усилию во временных масштабах от миллисекунд до микросекунд. С помощью нее можно формировать элементы антенной решетки, что приводит к существенному уменьшению веса и габаритов по сравнению с металлическими конструкциями.

Хотя в настоящее время разработано много различных конструкций плазменных антенн, исследованы их характеристики, но остаётся ряд нерешенных фундаментальных и прикладных задач. Диссертационная работа Н.Н. Богачева посвящена теоретическому и численному исследованиям режимов работы, а также численному и экспериментальному исследованию излучения сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенной (ПНВА). Вибраторные антенны применяются в системах радиосвязи, радионавигации, телевидении, телеметрии и других областях радиотехники. Следовательно, данная диссертационная работа не только актуальна, но и имеет большую практическую значимость.

#### Остановимся вкратце на **содержании диссертационной работы**.

Диссертация Богачева Н.Н. имеет достаточно стандартную структуру. состоит из введения, четырех глав, заключения библиографического списка, включающего в себя свыше 100 источников.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, дана общая характеристика работы и приведено краткое изложение основных разделов диссертации.

В **первой главе** представлен краткий обзор основных направлений исследований и приведена плазменных антенн. Заметная часть обзора посвящена антеннам из газоразрядных трубок, а именно одному из видов таких антенн — плазменной несимметричной вибраторной антенне. Для этого типа антенн описаны его общие свойства, основные параметры, представлены схемы различных конструкций и выбрана одна из них для проведения исследований.

Во **второй главе** рассмотрены основные численные методы и программы для моделирования характеристик антенн. В этой главе проведен сравнительный анализ

результатов моделирования в нескольких программах и результатов измерений диаграммы направленности металлической несимметричной вибраторной антенны. На основании полученных выводов для численного моделирования был выбран полный электродинамический код КАРАТ. Описаны две численные модели плазменной антенны: одна модель с проводимостью плазмы, описываемой по теории Друде, другая – с использование Particle-in-Cell (PiC) метода.

Также в этой главе описана методика экспериментального исследования характеристик плазменной антенны. Приведены схема лабораторного стенда, использованных при измерении диаграмм направленности и спектров излучения плазменной и металлической несимметричных вибраторных антенн.

**В третьей главе** приведены результаты исследований режимов работы и характеристик плазменной антенны. С использованием дисперсионного уравнение продемонстрировано влияние вариации значений электронной концентрации и частоты столкновений в плазме на существование трёх качественно различающихся режимов распространения поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре конечного радиуса. Представлены результаты исследования распределения компонент напряженности электрического поля вблизи антенны и диаграммы направленности. Изменение этих характеристик объясняется сменой режимов работы плазменной антенны, выделенных по дисперсионной кривой: режима поверхностной электромагнитной волны (насыщения), нелинейного и линейного режимов. Представлены результаты экспериментальных измерений диаграммы направленности для плазменной и металлической несимметричных вибраторных антенн.

**Четвертая глава посвящена** численным и экспериментальным измерениям спектральных характеристик немодулированного и модулированного сигналов, излучаемого плазменной несимметричной вибраторной антенной. В экспериментальных измерениях проведено сравнение металлической и плазменной антенн по спектрам излучаемых сигналов. В результате была обнаружена генерация кратных гармоник в спектре немодулированного сигнала от плазменной антенны. Кратко описаны возможные причины обнаруженного явления. Основный вывод данной главы, что плазменная антenna по качеству излучения частотно-модулированного сигнала не уступает металлической антенне.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе, и сделаны выводы.

**Достоверность результатов диссертации** обусловлена применяемыми современными математическими и численными методами, а также хорошей согласованностью с имеющимися экспериментальными данными. Диссертант применяет достаточно известные научные методы для обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Все разработанные модели и комплексы программ были проверены с использованием тестовых задач. Кроме того, результаты данного исследования хорошо согласуются с другими работами по данной тематике.

**Практическая ценность** исследований состоит в том, что обнаружены три режима работы ПНВА по дисперсионной кривой. Линейный режим определен как оптимальный с точки зрения характеристик антенны, для него указан диапазон параметров плазмы; получены модельные и экспериментальные характеристики такой антенны и передаваемого ею сигнала. По результатам проведённых исследований предложены рекомендации по оптимизации и использованию плазменной несимметричной вибраторной антенны. По результатам исследований получен патент на изобретение RU 2544806 C1, 20.03.2015 «Плазменная вибраторная антенна с ионизацией поверхностной волной».

**Новизна** научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений. Можно выделить следующие результаты:

- Три качественно различных режима работы плазменной несимметричной вибраторной антенны (режим стоячей поверхностной электромагнитной волны, нелинейный и линейный режимы) и показана зависимость этих режимов от параметров плазмы и их связь с распространением поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре конечного радиуса.
- В излучении плазменной антенны присутствуют спектральные составляющие на кратных гармониках входного сигнала с амплитудами отличными от излучения металлической антенны.
- В спектре узкополосного частотно-модулированного сигнала от плазменной антенны амплитуды нелинейных комбинационных частот ниже, чем в спектре сигнала, излучаемого металлической несимметричной вибраторной антенной.

**Апробация.** По результатам диссертационной работы были опубликованы 11 статей в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, получен 1 патент РФ на изобретение.

Основные результаты были представлены на тематических международных и всероссийских конференциях, неоднократно обсуждались на научных семинарах ИОФ РАН и РТУ МИРЭА.

Характеризуя диссертацию в целом, отметим, что она выполнена на весьма высоком научном уровне. При этом диссидентант проявил себя исследователем, способным анализировать и находить подходы к решению сложных проблем.

Как и любая работа, диссертация Н.Н.Богачева не лишена ряда **недостатков**. Имеются следующие замечания или вопросы:

1. Достаточно неаккуратно изложены теоретические вопросы работы рассматриваемой антенны. В частности, формулы (3.3а) и (3.3б) в представленном нам экземпляре диссертации содержат сместившиеся в сторону символы, затрудняющие понимание, что же имелось в виду автором. Там же отсутствуют мнимые единицы в экспонентах, определяющих временную и аксиальную зависимости. Не выписаны граничные условия для сшивания решений на границе плазменной трубы. Непонятно для чего упоминаются на стр. 63 граничные условия Леонтovichа.
2. Полученное в главе 3 дисперсионное уравнение для поверхностных волн на границе плазмы содержит двузначную функцию – корень, а правило выбора ветви не обсуждается, при этом подкоренные выражения комплексны за счет учета мнимой части диэлектрической проницаемости.
3. Не очень понятен режим работы антенны, названный режимом насыщения. В диссертации указано, что он реализуется при условии, когда частота генератора и плазменная частота связаны соотношением  $\omega_p = \sqrt{2}\omega_0$  (кстати, далее в следующей главе, в параграфе 4.2 это же условие уже написано в виде  $\omega_p = 2\omega_0$ ).
4. В параграфе 3.4 приводятся результаты экспериментального исследования плазменной антенны. Не очень рационально, что параметры плазменной трубы в эксперименте и параметры в предшествующих численных расчетах так сильно различаются между собой.

5. В параграфе 4.2 в подписях к рисункам неоднократно используется выражение «ближняя волновая зона» и не поясняется что это такое, на каком расстоянии от излучателя производятся измерения.
6. Глава 4, посвященная спектральному анализу излучения плазменной антенны, могла бы быть существенно более интересной, чем она представлена сейчас. Один из выводов по главе 4 состоит в том, что генерация гармоник в спектре немодулированного сигнала обусловлена нелинейностью плазмы. Вроде бы это очевидное утверждение для стационарной во времени системы. Графики типа 4.1, демонстрирующие соотношение амплитуд различных гармоник имело бы смысл привести для различных значений амплитуды основной гармоники. Казалось бы, красивым результатом этой главы могло бы быть выяснение условий, когда нелинейные искажения сигнала плазменной антенной не будут существенными и, соответственно, плазменная антenna может конкурировать с металлической. Однако, этот вопрос остался открытым.

В целом указанные замечания не носят принципиального характера, а часть из них может рассматриваться как рекомендация для последующих исследований.

Содержание диссертационной работы соответствует указанной специальности 1.3.9. Физика плазмы. Содержание основных положений диссертации и другие необходимые сведения в целом достаточно полно отражены в автореферате.

### **Заключение.**

Существенных замечаний нет, диссертационная работа, выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной, практической ценностью, является самостоятельной и законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. В своей диссертационной работе автор продемонстрировал высокий уровень владения методами численного моделирования и экспериментальных измерений. 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.

Доклад соискателя был заслушан и одобрен на семинаре «Физика плазмы» кафедры физической электроники физического факультета МГУ 12 мая 2021 года (протокол №4). Решением семинара было поручено подготовить отзыв на представленную работу доценту кафедры физической электроники И.Н.Карташову.

Диссертация Богачева Николая Николаевича «Режимы работы и излучение сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенной» полностью соответствует паспорту специальности 1.3.9. Физика плазмы и 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 Богачев Николай Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Руководитель семинара «Физика плазмы»

кафедры физической электроники,  
д.ф.-м.н., проф.



М.В.Кузелев

Доцент

кафедры физической электроники,  
к.ф.-м.н., доц.



И.Н.Карташов