

## **Анализ распространения короткого радиоимпульса во временной области в среде с заданной частотной дисперсией диэлектрической проницаемости.**

**К.И. Конов, К.Н. Климов**

ПАО «НПО «Алмаз»

**Аннотация:** в работе проведен анализ во временной области распространения короткого радиоимпульса через среду с отрицательной диэлектрической проницаемостью, на частоте заполнения короткого радиоимпульса. Даная среда моделирует слой плазмы без учета столкновений и движения положительных ионов с заданной частотной дисперсией диэлектрической проницаемости. Показан процесс формирования сигнала в пространстве в различные моменты времени. Для анализа использовался метод импедансного аналога электромагнитного пространства, реализованный в программном комплексе Tamic Planar Rt-H Analyzer.

**Ключевые слова:** короткий радиоимпульс, численное электродинамическое моделирование, нормированная спектральная плотность.

### **1. Введение**

В настоящее время вычислительные методы и алгоритмы электромагнитного анализа достаточно интенсивно развиваются как в нашей стране, так и за рубежом не только в частотной области, но и во временной [1-7]. Востребованы методики и программные комплексы, позволяющие проводить численный электродинамический анализ антенн и СВЧ-устройств [8-11]. Одной из разработок для численного электромагнитного анализа во временной области является программный пакет Tamic Planar Rt-H Analyzer [12-17]. Данный программный комплекс создан для решения задач рефлектометрической диагностики плазмы в токамаке T-10 и проектируемой международной установке ИТЭР[12].

### **2. Геометрия задачи**

В данной работе мы рассмотрим распространение короткого радиоимпульса с частотой заполнения 10 ГГц и длительностью 0,1 нс через плазменный слой, задаваемый диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , показанный на рис. 1. Геометрия состоит из двух согласованных входов (Вход 1 и Вход 2), между которыми находится плазменный слой толщиной 600 мм. Согласованные входы отделены от плазмы вакуумом 100 мм слева и 100 мм справа. При расчете с помощью программного обеспечения Tamic Planar Rt-H Analyzer использовался шаг пространственной дискретизации 0,1 мм (что соответствует временной дискретизации 0,000235865 нс), отношение шага сетки к длине волны на частоте 10 ГГц составило 299,792458 .

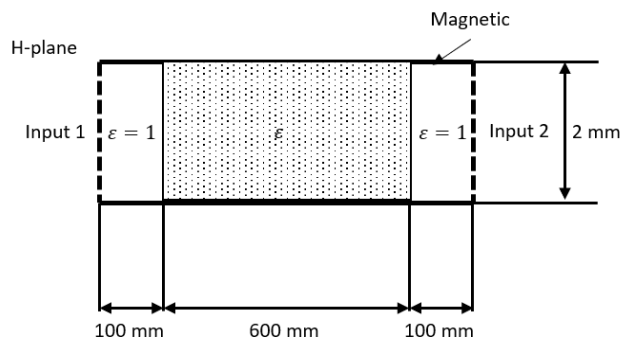


Рисунок 1. Геометрия рассматриваемой задачи.

## 2. Расчет распространения радиоимпульса в плазме

Расчет задачи с заданными параметрами при диэлектрической проницаемости  $\epsilon = -0,01$  проводился с использованием программного пакета Tamic Planar Rt-H Analyzer. Результат расчета представлен на рис.2.

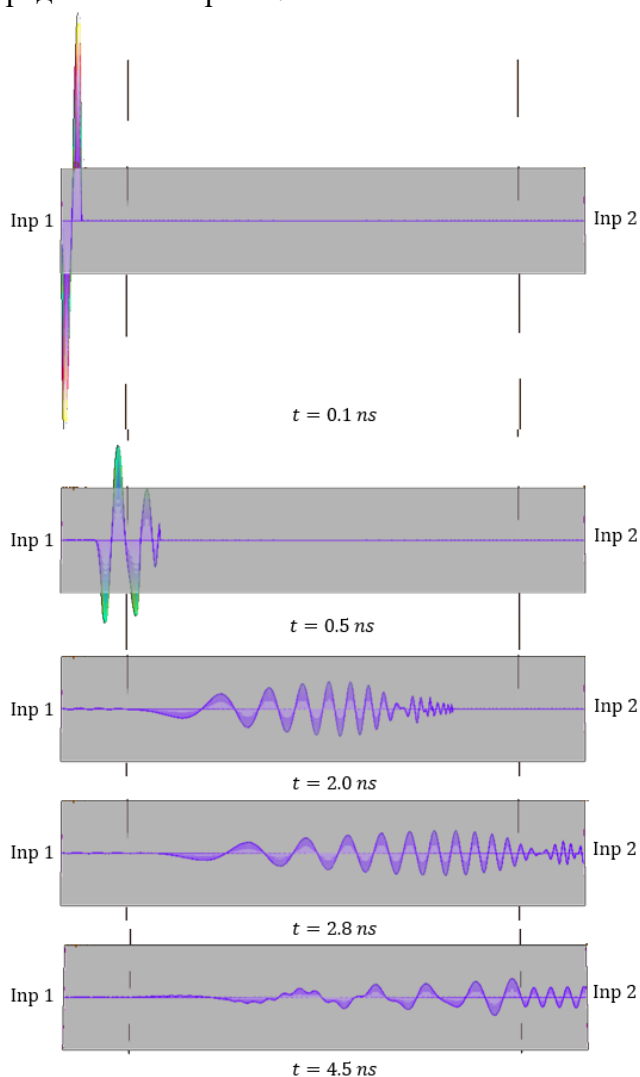


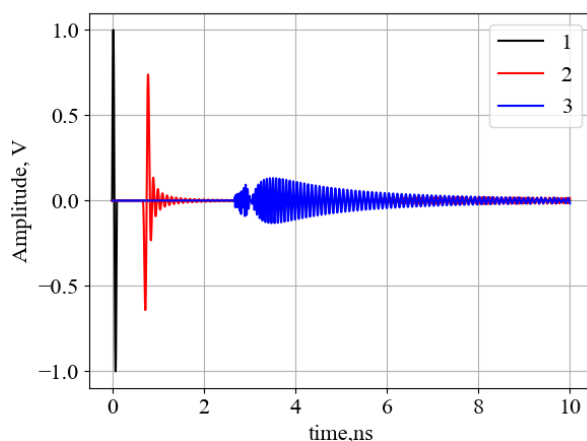
Рисунок 2. Распределение амплитуды электрического поля в разные моменты времени.

Процесс формирования сигнала можно проследить, рассматривая пространственное распределение амплитуды электрического поля в анализируемой

геометрии в разные моменты времени (рис. 2). На рис. 2 граница, разделяющая вакуум и плазму, показана пунктирной линией. В момент времени 0,1 нс видно распределение, соответствующее падающему сигналу. В момент времени 0,5 нс формируется первый период отраженного сигнала. Ко вторым нс сформировался передаваемый сигнал, который уже был достаточно сильно растянут в пространстве. За 2,8 нс прекурсор прошел через вторую границу раздела плазма-вакуум. К 4.5 нс уже видны биения, которые являются следствием многократного отражения от границы вакуум - диэлектрик.

Амплитуда сигнала, падающего на первый вход (кривая 1), результат расчета амплитуды отраженного сигнала на первом входе (кривая 2) и прошедшего сигнала на втором входе для диэлектрической проницаемости  $\epsilon = -0,01$  (кривая 3), показаны на рис.3.

Как видно из рис. 3, из-за дисперсии диэлектрической проницаемости плазмы отраженный и прошедший сигналы сильно растянуты во времени. Длительность отраженного на первый вход сигнала увеличилась в 1,4 раза. Амплитуда сигнала, отраженного на первый вход, составляет 73% от амплитуды падающего сигнала. На второй вход сигнал поступает с задержкой 3,66 нс. В этом случае сначала приходит предвестник длительностью 0,33 нс, а затем остальной сигнал (начиная с 3 нс). Амплитуда предвестника 0,09 В, амплитуда оставшейся части от 0,13 В до 0,016 В.

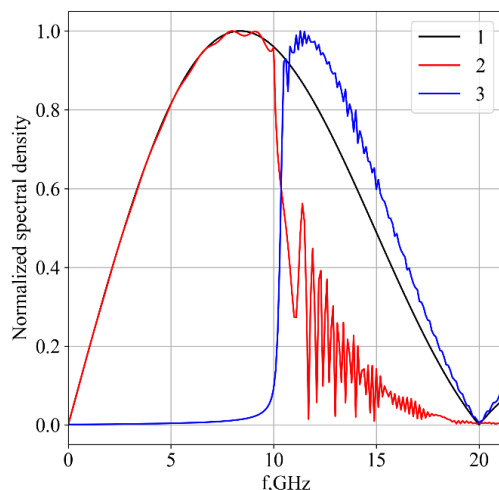


**Рисунок 3.** Зависимость амплитуды падающих (кривая 1), отраженных (кривая 2) и прошедших через плазменный слой (кривая 3) сигналов от времени при значении диэлектрической проницаемости  $\epsilon = -0,01$ .

69,96% падающей мощности отражается от слоя плазмы обратно на первый вход. На второй ввод поступает 27,48% процентов энергии, вырабатываемой на первом вводе.

На рис.4 показаны нормированные спектральные плотности сигналов падающего (кривая 1) и отраженного (кривая 2) сигналов на Входе 1 и прошедшего сигнала (кривая 3) на Входе 2 в диапазоне частот до 20 ГГц, полученные из результата расчета.

Как следует из рис.4, среда с отрицательной диэлектрической проницаемостью, моделирующая плазменный слой, является высокочастотным фильтром: составляющие сигнала с частотой ниже 10 ГГц отражаются от плазменного слоя на первом входе, а составляющие сигнала с частотой выше 10 ГГц передается на второй вход.



**Рисунок 4.** Зависимость нормированных спектральных плотностей падающих (кривая 1), отраженных (кривая 2) и прошедших через плазменный слой (кривая 3) сигналов от частоты при значении диэлектрической проницаемости  $\epsilon = -0,01$

Наличие гармоник в отраженном сигнале на частотах выше 10 ГГц можно объяснить наличием градиента диэлектрической проницаемости на расстоянии 100 мм от первого входа.

### 3. Заключение

Проведено численное электродинамическое моделирование во временной области распространения короткого радиоимпульса через плазму. Представлен процесс изменения амплитуды сигнала в пространственной и временной областях. Приведены амплитудные характеристики сигнала на входах рассматриваемой системы в зависимости от времени. Рассмотрено влияние плазменного слоя на спектральную плотность сигнала. Показано, что плазменный слой представляет собой фильтр верхних частот. Приведены примеры изменения характеристик прошедшего сигнала для плазменных частот 5 ГГц и 15 ГГц.

#### Список литературы

1. Klimov, C. N. Modification of the Maxwell's equations for the electromagnetic analysis in the time domain mode / C. N. Klimov, B. V. Sestroretsky // IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest) : 2001 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium-Adaptive Arrays in Communications-, 08–13 июля 2001 года. – Boston, MA, 2001. – P. 514-515. – DOI 10.1109/APS.2001.959512.
2. Sestroretsky, B. V. Construction and transformation of impedance grids for the scalar analysis of the axisymmetric waveguides and radiators in the time domain / B. V. Sestroretsky, C. N. Klimov, S. A. Korolev // CriMiCo 2001 - 11th International Conference : Conference Proceedings, Sevastopol, Crimea, 10–14 сентября 2001 года. – Sevastopol, Crimea: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2001. – P. 363-367.
3. Klimov, K. N. Analysis of planar structures with arbitrary distribution of permittivity in the time-domain mode / K. N. Klimov, B. V. Sestroretsky, S. V. Soldatov // International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, MMET, Kharkov, 12–15 сентября 2000 года. – Kharkov, 2000. – P. 128-130. – DOI 10.1109/MMET.2000.888523.
4. Electric field distribution modelling of the distributing system 5-beam APAR in time area / S. V. Serebryannikov, S. S. Serebryannikov, K. N. Klimov [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering : 4, Strasbourg, 11 сентября 2019 года. – Strasbourg, 2019. – P. 111630N.

5. Klimov, K. Modification of the Integration Variable Selection Method in Numerical Simulation of Electromagnetic Wave Propagation in the Time Domain / K. Klimov, K. Konov // 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production, SED 2019 - Proceedings, Prague, 23–24 апреля 2019 года. – Prague, 2019.
6. Development of the integration variable selection method in numerical simulation of electromagnetic wave propagation in the time domain mode / K. N. Klimov, I. K. Epaneshnikova, A. M. Belevtsev [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering : 12, Strasbourg, 09–10 сентября 2019 года. – Strasbourg, 2019. – P.
7. Конов, К. И. Электродинамическое моделирование частотных характеристик направленного ответвителя диаграммообразующей системы фазированной антенной решётки / К. И. Конов, В. Г. Жилков, А. А. Осипов // Вестник Концерна ПВО Алмаз-Антей. – 2015. – № 3(15). – С. 20-28.
8. Использование импедансногласованных материалов для увеличения рабочей длины волны излучателей / А. С. Годин, В. В. Перфильев, А. Д. Дризе, К. И. Конов // Вестник воздушно-космической обороны. – 2017. – № 3(15). – С. 56-61.
9. Дризе, А. Д. Численное электродинамическое моделирование волноводного режекторного фильтра для станции спутниковой связи / А. Д. Дризе, К. И. Конов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2019. – № 1. – С. 472-476.
10. Боловин, А. А. Электродинамическое моделирование распределительно-суммирующей системы твердотельного передающего устройства в s-диапазоне частот / А. А. Боловин, К. И. Конов, В. О. Коркинец // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского : Материалы конференции, Москва, 17–29 февраля 2016 года / Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». – Москва: Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ, 2016. – С. 268-270.
11. Конов, К. И. Оценка погрешности численного электродинамического моделирования симметричных устройств в программном комплексе Ansoft HFSS / К. И. Конов, А. А. Боловин // Проблемы СВЧ электроники. – 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 138-141
12. Method of impedance analogue of electromagnetic space at research of dispersion of electromagnetic waves from nonuniform plasma in tokamak T-10 / V. A. Ruchenkov, K. N. Klimov, B. V. Sestroretskij [et al.] // Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, ММЕТ : Conference Proceedings, Dnepropetrovsk, 14–17 сентября 2004 года / sponsors: Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE. – Dnepropetrovsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004. – P. 142-143.
13. Климов, К. Н. Применение метода импедансных сеток к электродинамическому анализу во временной области двумерных моделей неоднородных, в том числе плазменных сред : специальность 05.12.07 "Антенны, СВЧ-устройства и их технологии" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Климов Константин Николаевич. – Москва, 2001. – 245 с.
14. Электродинамический анализ двумерных неоднородных сред и плазмы: монография / Климов К. Н. [и др.]. – [Б.м.] : ООО МАКС Пресс, 2005. – ISBN 5317014050.
15. Construction of the equivalent circuit of elementary volume of space for biasing plasmas / K. N. Klimov, T. V. Kamyshev, B. V. Sestroretskij [et al.] // Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, ММЕТ : Conference Proceedings, Dnepropetrovsk, 14–17 сентября 2004 года / sponsors: Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE. – Dnepropetrovsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004. – P. 206-207.
16. Direct study of fields and radiation patterns of antennas with the account of closely located objects / V. A. Ruchenkov, C. N. Klimov, B. V. Sestroretsky [et al.] // Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, ММЕТ, Conference Proceedings : 9, Kiev, 10–13 сентября 2002 года. – Kiev, 2002. – P. 210-212. – DOI 10.1109/ММЕТ.2002.1106864.
17. Klimov, K. N. Planar R $\tau$  grid for the analysis of of electromagnetic wave scattering in structures with any distribution of permittivity / K. N. Klimov, B. V. Sestroretsky, S. A. Ivanov // 2000 10th International Crimean Microwave Conference "Microwave and Telecommunication Technology", CriMico 2000 : 10, Crimea, 11–15 сентября 2000 года. – Crimea, 2000. – P. 391-395. – DOI 10.1109/CRMICO.2000.1256155.