**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА**

**Луценко Ю.Ю., Власов В.А., Зеленецкая Е.П.**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: luts@mail.ru*

Высокочастотный факельный разряд представляет собой высокочастотный одноэлектродный разряд емкостного типа. В случае его возбуждения при атмосферном давлении он имеет вид тонкого плазменного шнура, окружённого слабосветящейся диффузионной оболочкой. Горение факельного разряда осуществляется за счёт диссипации энергии поверхностной электромагнитной волны, распространяющейся вдоль канала разряда. Вследствие этого для описания свойств разряда необходимо знать характеристики его электромагнитного поля. Наиболее важным параметром электромагнитной волны, распространяющейся в плазме разряда, является её волновое число. Волновое число представляет собой комплексную величину, действительная часть которой представляет собой коэффициент фазы, а мнимая часть – коэффициент затухания. Коэффициент затухания позволяет оценить величину затухания амплитуды электромагнитного поля вдоль оси разряда, а коэффициент фазы – изменение фазового сдвига, и как следствие, длину электромагнитной волны, поддерживающей горение разряда.

В настоящей работе проведены измерения волнового числа электромагнитной волны, поддерживающей горение факельного разряда, горящего в воздухе, при атмосферном давлении. Измерения волнового числа проводились по двум независимым методикам. Первая методика позволяет оценить отношение коэффициента затухания к коэффициенту фазы электромагнитной волны на основе измерений фазового сдвига сигнала, наводимого на рамке, помещённой в электромагнитное поле разряда. Вторая методика позволяет провести непосредственное измерение коэффициента фазы и коэффициента затухания посредством анализа радиального распределения амплитуды и фазы радиальной компоненты напряжённости электрического поля разряда.

Измерения проводились для факельного разряда, который возбуждался в разрядной камере диаметром 28 мм на частоте 37 МГц. Измерения радиальной компоненты электрического поля проводились посредством емкостного зонда. Емкостной зонд представлял собой медный щтырь длиной 3 мм, сигнал с которого подавался на вход измерительного прибора. При определении величины отношения коэффициентов фазы и затухания вместо зонда использовалась одновитковая рамка диаметром 5 мм.

Рассмотрим методику измерения величины отношения коэффициента затухания к коэффициенту фазы электромагнитной волны.

При вращении рамки в электромагнитном поле разряда на ней будет наводиться сигнал, состоящий из наводок от аксиальной компоненты магнитного поля и наводок от радиальной компоненты электрического поля. Учитывая, что геометрические размеры рамки и частота электромагнитного поля постоянны, можно записать:

  (1)

Здесь: I – сигнал, наводимый на рамке; ψI – фазовый сдвиг сигнала; Er – радиальная компонента электрического поля; Hφ – аксиальная компонента магнитного поля; φ – угол поворота рамки; A и B – константы; j – мнимая единица.

Если принять, что ψEr = 0, то из выражения (1) после ряда преобразований можно получить формулу, описывающую фазовый сдвиг между аксиальной компонентой магнитного поля и радиальной компонентой электрического поля:

  (2)

Выражение (2) в случае φ = π/2 и φ = -π/2 запишется в виде системы уравнений:

  (3)

  (4)

Таким образом, проводя измерения фазового сдвига сигнала, наводимого на рамке при её повороте на угол π/2 и на угол - π/2 можно определить фазовый сдвиг между радиальной компонентой электрического поля и аксиальной компонентой магнитного поля.

Заметим, что для факельного разряда, фазовый сдвиг между радиальной компонентой электрического поля и аксиальной компонентой магнитного поля однозначно определяет величину отношения коэффициента затухания к коэффициенту фазы электромагнитной волны. Форма канала факельного разряда близка к цилиндрической, вследствие чего для него будет выполняться [1] следующее соотношение:

  (5)

Здесь: h = α + jβ – волновое число; β – коэффициент затухания; α – коэффициент фазы; ε0 - абсолютная диэлектрическая проницаемость; ω – угловая частота электромагнитного поля.

Выражение (5) можно записать в виде:

  (6)

Следовательно, на основе выражений (3), (4), (6), и полученных результатов измерений можно однозначно определить величину β/α. Результаты измерений величины β/α для факельного разряда, горящего в воздухе и аргоне, представлены на рис. 2. Как видно из вышеприведённых рисунков, величина β/α близка к единице. Этот результат достаточно хорошо совпадает с результатами расчёта волнового числа, проведёнными на основе модели канала факельного разряда в виде [2] однородного проводящего цилиндра. Также из представленных рисунков следует, что при увеличении мощности разряда наблюдается увеличение величины β/α. Этот результат в свою очередь не вполне согласуется с теоретическими расчётами волнового числа электромагнитной волны, распространяющейся вдоль радиально неоднородного [3] канала разряда.

0

0,5

1,0

1,5

2,0

W, кВт

0,8

1,0

1,2

β/α

Рис. 1. Зависимость величины β/α от тепловой мощности факельного разряда, горящего в воздухе

Для определения конкретных величин коэффициентов затухания и фазы электромагнитной волны должна использоваться иная методика. Провести определение волнового числа электромагнитной волны распространяющейся в разряде можно по радиальному распределению радиальной компоненты электрического поля. Заметим, что для цилиндрических структур в непроводящей зоне радиальное распределение радиальной компоненты электрического поля описывается [1] функцией Ханкеля 1 – го рода 1 – порядка, или что тоже, первой производной функции Ханкеля нулевого порядка. Данная зависимость имеет следующий вид:

  (7)

Здесь: А – константа; k – постоянная распространения электромагнитной волны в воздухе; h – волновое число электромагнитной волны; r – радиальная координата.

Таким образом, сопоставляя результаты расчётов величины Er, проведённых по формуле (7) с результатами экспериментальных измерений, можно получить информацию о волновом числе и соответственно определить величины коэффициентов фазы и затухания электромагнитной волны, распространяющейся в разряде. Так как волновое число, фигурирующее в выражении (7) является комплексной величиной и определяется двумя параметрами α и β,то и для его однозначного нахождения требуется проводить сопоставление расчётных и экспериментальных результатов по двум параметрам. В нашем случае этими параметрами являлись отношение амплитуд Er|r=30/Er|r=90 и разность фаз ΨEr|r=30−ΨEr|r=90 радиальной компоненты электрического поля на расстоянии 30 мм и 90 мм от оси разряда.

Результаты измерений волнового числа электромагнитной волны, полученные на основе этой методики для случая факельного разряда, горящего в воздухе и аргоне, представлены на рис. 2.

α,

м-1

β,

м-1

8

8

β

α

4

4

0

0

1,50

1,00

1,25

0,75

0,5

W, кВт

Рис. 2. Зависимость коэффициентов фазы и затухания электромагнитной волны от мощности высокочастотного факельного разряда, горящего в воздухе

Заметим, что результаты, приведённые на рис. 2 лучше совпадают с теоретическими результатами по сравнению с результатами по определению величины отношения коэффициента затухания к коэффициенту фазы. Совпадение наблюдается не только по абсолютным значениям величин коэффициентов фазы и затухания, но и по характеру их изменения в зависимости от величины мощности разряда.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Д. Стрэттон *Теория электромагнетизма*. Гостехиздат, Москва, 1948.

2. А.В. Качанов, Е.С. Трехов, Е.П. Фетисов *Журнал технической физики.* **17** (1970) 340

3. И.А. Тихомиров, Ю.Ю. Луценко *Известия СО АН СССР. Сер. техн. наук*. **3** (1989) 109.