

СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ВВОД АНТЕННОГО ТИПА

© 2013 г. А. М. Барняков, В. И. Иванников*, А. Е. Левичев, В. М. Павлов,
Ю. Д. Черноусов*, И. В. Шеболаев*

Институт ядерной физики СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

**Институт химической кинетики и горения СО РАН*

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3

E-mail: skalpel@inbox.ru

Поступила в редакцию 12.09.2012 г.

Описан с.в.ч.-ввод антенного типа для подачи сигналов на высоковольтные электроды. Устройство представляет собой приемную и передающую с.в.ч.-антенны, разделенные высоковольтным изолятором. Антенны выполнены в виде двух симметричных частей разрезанного поперек полуволнового коаксиального сильносвязанного резонатора, изолятор выполнен в виде керамического диска. Представлены характеристики устройства: высокое напряжение >60 кВ, коэффициент передачи с.в.ч.-сигнала S_{21} на рабочей частоте — более 0.97, полоса пропускания по уровню $S_{21} = -3$ дБ — более 70%.

DOI: 10.7868/S0032816213050017

ВВЕДЕНИЕ

Антенные вводы для подачи с.в.ч.-сигналов на изолированные, находящиеся под высоким напряжением электроды используются в области с.в.ч. и ускорительной технике. Например, рупорный с.в.ч.-ввод, содержащий волноводные приемную и передающую с.в.ч.-антенны, разделенные высоковольтным изоляционным промежутком, применяется для подачи с.в.ч.-сигнала на высоковольтный электрод электронной пушки с с.в.ч.-управлением током инъекции [1, 2]. Антенны выполнены в виде двух рупоров — отрезков расширяющегося прямоугольного волновода [2]. За счет большого расстояния между антеннами устройство обладает высокой пробойной прочностью, однако при разнесении антенн неизбежно возникают потери с.в.ч.-сигнала. Так, при напряжении 50 кВ потери составляют около -6 дБ, с.в.ч.-энергия излучается в окружающее пространство, что ограничивает область применения устройства.

В более поздних разработках [3] для подачи с.в.ч.-сигнала на высоковольтный электрод пушки использовалась высоковольтная развязка в виде двух коаксиально-волноводных переходов, разделенных плоским диэлектрическим изолирующим диском. Однако использование волноводов значительно увеличивает габариты устройства.

Для с.в.ч.-измерений используется коаксиальный дроссельный с.в.ч.-ввод, выполненный в виде двух частей коаксиальной линии, разорванной по внешней и внутренней жилам. Для осуществления с.в.ч.-контакта и уменьшения потерь места

разрывов снабжены четвертьволновыми дросселями. Устройство обладает малыми потерями и относительно небольшими габаритными размерами, однако в дроссельном соединении с малыми потерями расстояния между изолированными электродами также малы. Поэтому устройство может использоваться при относительно небольшом (до 5 кВ) напряжении и применяется для развязки по постоянному току в измерительных целях для уменьшения импульсных помех, например, при регистрации слабых с.в.ч.-сигналов, а также для передачи с.в.ч.-сигнала во вращающихся соединениях [4].

Задачей являлась разработка с.в.ч.-ввода антенного типа для системы управления током инъекции высоковольтной пушки ускорителя электронов, работающего на частоте 2450 МГц. Ввод должен обладать одновременно как высокой пробойной прочностью, так и малыми с.в.ч.-потерями.

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

На рис. 1 изображена конструкция с.в.ч.-ввода, разработанного для системы управления током инъекции электронной пушки высокочастотного ускорителя. Представленный с.в.ч.-ввод состоит из двух симметричных частей коаксиального полуволнового проходного сильносвязанного резонатора. Резонатор разрезан по плоскости симметрии, перпендикулярной продольной оси, и его половины изолированы друг от друга сплошным диэлектрическим диском.

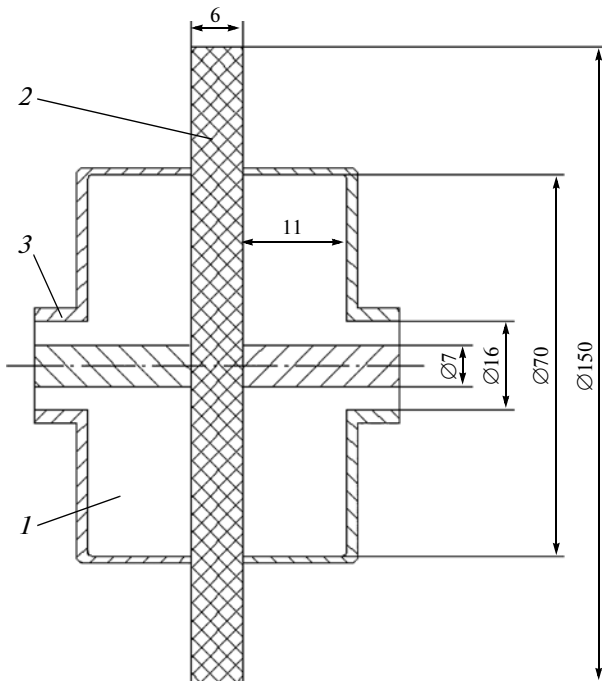


Рис. 1. С.в.ч.-ввод антенного типа. 1 — половина коаксиального резонатора; 2 — диэлектрический диск; 3 — подводящая коаксиальная линия.

Ввод работает следующим образом. С.в.ч.-сигнал в резонатор подается от генератора через коаксиальную линию, и в резонаторе возбуждается стоячая волна *TEM*-типа. Длина резонатора выбрана такой, что с учетом диэлектрического диска на длине резонатора укладывается половина длины волны. В полуволновом резонаторе в соответствии со структурой поля стоячей волны *TEM*-типа в плоскости симметрии — месте расположения диэлектрического диска — формируется максимум радиального электрического поля, минимум угловой компоненты магнитного поля и соответственно минимум продольных с.в.ч.-токов по внутренней и внешней жилам коаксиальной линии.

Разрыв коаксиальной линии, в котором установлен диэлектрический изолирующий диск, не вызывает разрыва продольных токов и не нарушает структуру поля резонатора. По этой причине излученная волна не формируется, и с.в.ч.-сигнал проходит резонатор практически без потерь.

Пробойная прочность определяется напряжением пробоя выбранного изолирующего диэлектрика. В данном случае в качестве материала диэлектрика использована керамика ВГ-4 с параметрами на рабочей частоте 2450 МГц: относительная диэлектрическая проницаемость 9.6, тангенс угла диэлектрических потерь $< 5 \cdot 10^{-4}$, напряжение пробоя > 150 кВ/см.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для расчета основных характеристик ввода использовалась программа Ansoft HFSS [5]. Варьировались размеры резонатора и толщина диэлектрического диска. Целью расчетов являлась минимизация переходного ослабления и амплитуды отраженной волны в рабочей полосе частот по уровню коэффициента передачи $S_{21} = -3$ дБ. Минимизировались также внутренние потери и потери на излучение во внешнюю среду на рабочей частоте.

Минимальная ширина рабочей полосы частот определялась из условия сохранения формы огибающей коротких импульсно-модулированных с.в.ч.-сигналов из соотношения [6, с. 459]

$$\Delta f = 1/\pi\tau, \quad (1)$$

где τ — длительность фронта передаваемого на высоковольтный электрод с.в.ч.-импульса с огибающей прямоугольной формы. При $\tau = 10$ нс полосу $\Delta f = 30$ МГц.

Согласно установленному стандарту [7] облучение с.в.ч.-полем считается безопасным при продолжительных дозах (в течение всего рабочего дня), если уровень потока мощности при частоте 2450 МГц не превышает 10 мкВт/см² и 100 мкВт/см² при облучении в течение 2 ч.

Итак, требования, предъявляемые к устройству, следующие:

- плотность потока мощности на расстоянии 1 м от с.в.ч.-ввода не должна превышать уровень 10 мкВт/см²;
- полоса пропускания по уровню переходного ослабления -3 дБ — не менее 30 МГц;
- коэффициент передачи на рабочей частоте 2450 МГц — не менее 0.85;
- коэффициент отражения на рабочей частоте — не более 0.1;
- напряжение пробоя не менее 60 кВ;
- токи утечки не более 10 мкА.

Как показали расчеты, уровнем активных потерь в керамике ВГ-4 и в стенках резонатора (латунь) можно пренебречь. Это обусловлено низкой нагруженной добротностью устройства и соответственно малым уровнем запасенной энергии в нем.

На рис. 2 изображена картина ближнего поля на расстоянии 1 м от с.в.ч.-ввода (ось координат Y направлена вдоль оси резонатора). Для расчета использовались следующие характеристики с.в.ч.-сигнала: длительность импульса 5 мкс, скважность 1000, импульсная мощность 1 кВт, средняя мощность 1 Вт.

Амплитудно-частотные характеристики рассчитанного антенного ввода приведены на рис. 3.

Коэффициент передачи $S_{21} = 0.997$ на рабочей частоте 2.450 ГГц, коэффициент отражения $S_{11} = 0.002$ на частоте 2.442 ГГц.

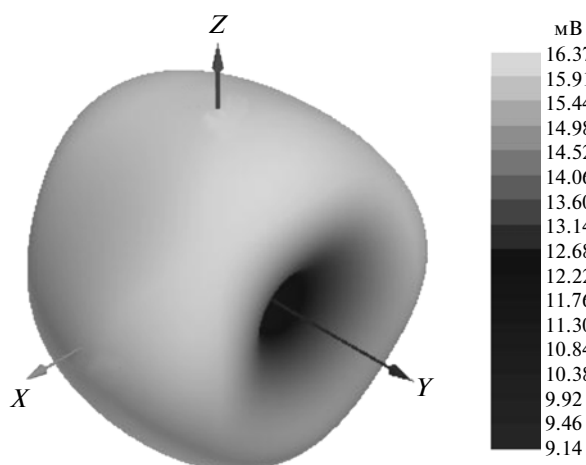


Рис. 2. Поток вектора напряженности электрического поля (мВ) на расстоянии 1 м от антенного с.в.ч.-ввода.

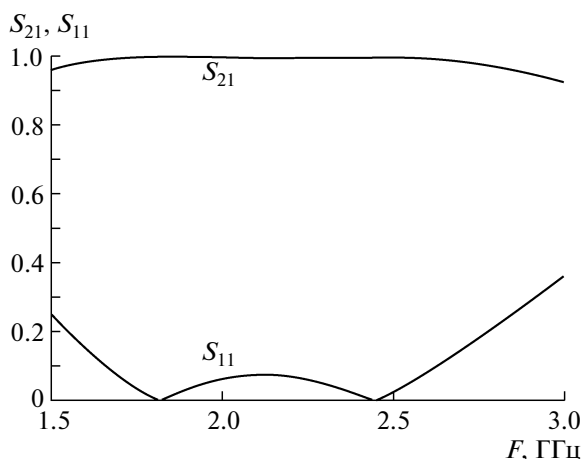


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения S_{11} и коэффициента передачи S_{21} от частоты.

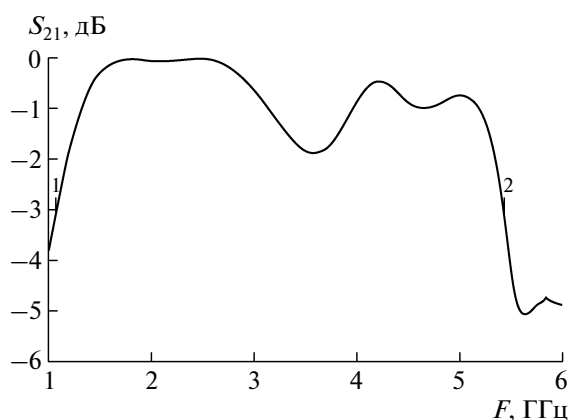


Рис. 4. Зависимость переходного ослабления от частоты. $X_1 = 1.08$ ГГц, $X_2 = 5.42$ ГГц, $Y_1 = Y_2 = -3$ дБ.

На рис. 4 представлена кривая переходного ослабления в широком диапазоне частот.

Полоса пропускания по уровню -3 дБ более 4.3 ГГц (175%).

Ввиду требования к допустимому уровню излучаемого устройством с.в.ч.-поля, можно провести соответствующую оценку. Уровень мощности излучения во внешнюю среду равен [6, с. 82]

$$P_{\text{изл}} = P(1 - (S_{21}^2 + S_{11}^2)), \quad (2)$$

где P – мощность в подводящей линии.

Из расчетов ближнего поля (рис. 2) видно, что распределение интенсивности излучения близко к сферически равномерному распределению, поэтому плотность потока мощности можно оценить по формуле

$$p_{\text{изл}} = P_{\text{изл}}/S_{\text{сф}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{сф}} = 4R^2$ – площадь сферы радиусом R , ограничивающей некоторый объем вокруг с.в.ч.-ввода. В соответствии с формулой (2) и полученными в результате моделирования значениями S_{21} и S_{11} потери с.в.ч.-мощности на излучение во внешнюю среду на рабочей частоте не превышают 0.5% от мощности в линии, и рассчитанная по формуле (3) плотность потока импульсной с.в.ч.-мощности на расстоянии 1 м от антенного ввода равна 0.042 мВт/см², а поток средней мощности – 0.042 мкВт/см².

Соответствующие этим, достигнутым в результате численного моделирования, электротехническим характеристикам размеры основных элементов устройства приведены на рис. 1. Эти размеры использовались при его изготовлении.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Были проведены измерения коэффициентов отражения и передачи с.в.ч.-сигнала в широком диапазоне частот и токов утечки при подаче варьированного в диапазоне 0–60 кВ высокого напряжения. Измерение полосовых характеристик осуществлялось с помощью анализатора с.в.ч.-цепей Agilent N5230A. Для высоковольтных испытаний использовался источник высокого напряжения ИВН-100. При подаче варьированного напряжения фиксировался ток утечки. Значение тока утечки 10 мкА принималось за максимальное, поскольку при дальнейшем повышении напряжения ток резко возрастал и возникал пробой. Результаты измерений приведены в табл. 1.

На рис. 5 приведены измеренные полосовые характеристики разработанного ввода. Коэффициент отражения на рабочей частоте 0.098, коэффициент передачи 0.976.

Полоса пропускания по уровню ослабления -3 дБ составляет более 1.8 ГГц (73%). На рис. 6 приведено сравнение измеренной характеристики переходного ослабления устройства с расчетной. Отклонение измеренных значений от расчетных вблизи ра-

Таблица 1. Сравнительная таблица измерений с.в.ч.-вводов

Параметры	С.в.ч.-вводы		
	Рупорный волноводный	Коаксиальный дроссельный	Разработанный
Напряжение, кВ	>60	5	>60
Ток утечки, мкА	<10	>10	<5
Коэффициент передачи	0.25	>0.98	>0.97

Таблица 2. Сравнительная таблица параметров разработанного с.в.ч.-ввода

Параметр	Требование	Расчет	Эксперимент
Напряжение пробоя, кВ	>60	>60	>60
Ток утечки, мкА	<10	—	<5
Коэффициент передачи S_{21}	>0.85	>0.997	>0.97
Коэффициент отражения S_{11}	<0.1	<0.002	0.098
Полоса пропускания (по уровню $S_{21} = -3$ дБ), МГц	>30	4300	>1800
Плотность потока средней мощности с.в.ч.-излучения на расстоянии 1 м, мкВт/см ²	<10	<0.05	<0.5

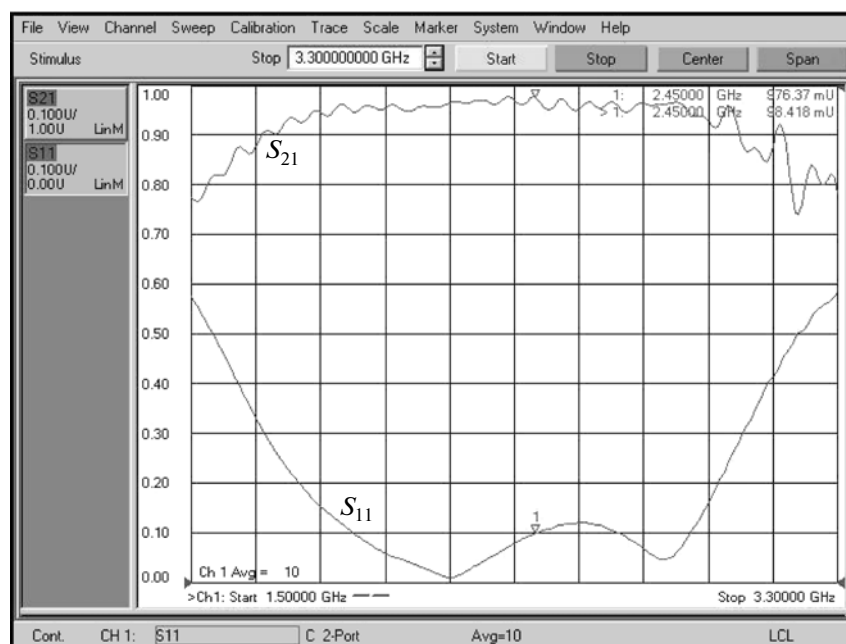
бочей частоты не более 3%, неравномерность экспериментальной кривой вблизи рабочей частоты около 1.5%.

Уровень излучаемой мощности, рассчитанный по формуле (2), не более 6%. При средней мощности в линии 1 Вт плотность потока излучаемой мощности на расстоянии 1 м от с.в.ч.-ввода не превышает 0.48 мкВт/см² по формуле (3). Для

сравнения, у рупорного волноводного ввода это значение составляет 7.2 мкВт/см².

В табл. 2 приведены основные параметры, которым должно удовлетворять устройство, результаты расчета и результаты измерения параметров разработанного с.в.ч.-ввода антенного типа.

Отличия измеренных характеристик от расчетных обусловлены, по-видимому, неидеальностью

**Рис. 5.** Коэффициенты передачи S_{21} и отражения S_{11} в широком диапазоне частот.

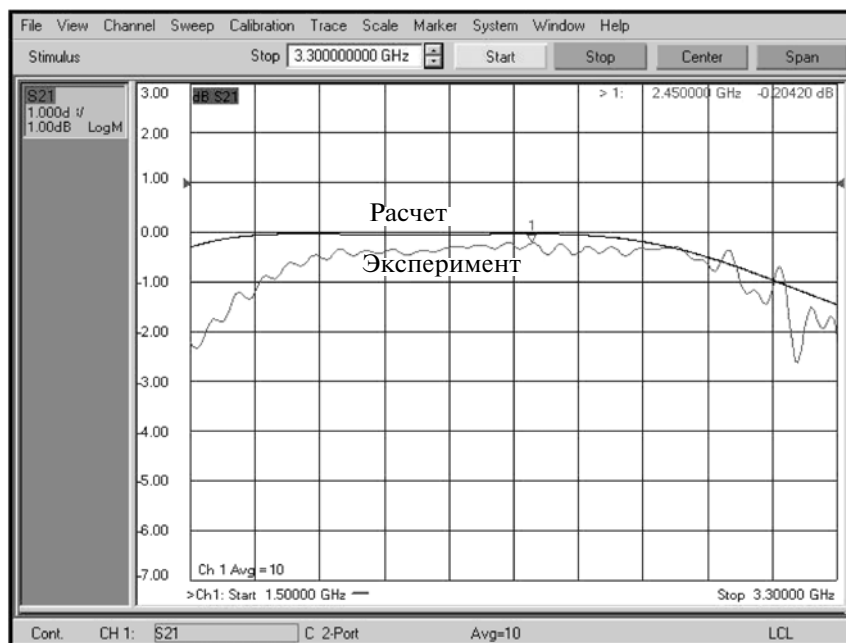


Рис. 6. Зависимость переходного ослабления (S_{21} , дБ) от частоты. Сравнение расчета с экспериментом.

с.в.ч.-элементов — разъемов, переходов и кабелей, вносящих дополнительные отражения и затухания. При моделировании не учитывалось влияние изолирующего корпуса из оргстекла, в котором смонтировано устройство, а также некоторые отклонения от реальной геометрии, такие как, например, скругления острых краев и углов центрального и внешнего электродов резонатора. Неравномерность кривой переходного ослабления объясняется, вероятно, наличием стоячих волн в измерительных кабелях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом численного моделирования разработан и спроектирован с.в.ч.-ввод антенного типа, состоящий из двух симметричных частей коаксиального полуволнового проходного сильносвязанного резонатора. Резонатор разрезан по плоскости симметрии, перпендикулярной продольной оси, и его половины изолированы друг от друга сплошным диэлектрическим диском. Найденные параметры устройства удовлетворяют всем предъявленным требованиям. Результаты проведенных экспериментов показали хорошее совпадение с расчетом и подтвердили, что изготовленный с.в.ч.-ввод антенного типа одновременно обладает высо-

кой электрической прочностью, малыми с.в.ч.-потерями и широкой полосой пропускания. Устройство было применено в системе управления током инжекции трехэлектродной электронной пушки для изучения параметров ускорителя на структуре с параллельной связью [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (договор №14.740.11.0836).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богомолов А.С. А.с. № 438357 // Б.И. 1975. № 47. С. 170.
2. Богомолов А.С., Закутов Е.М. // ПТЭ. 1973. № 3. С. 23.
3. Becker R.J. // Nucl. Instrum. and Methods. 1991. V. A307. P. 543.
4. Теория линий передачи сверхвысоких частот. Т. 1 / Пер. под ред. А.И. Шпунтова. М.: Сов. радио, 1951. С. 207–208.
5. HFSS (High Frequency Structure Simulator). Users Guide, Ansoft Corporation, Pittsburgh, 1999.
6. Альтман Дж. Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968.
7. Краев А.А. 11-я Научно-техническая конференция МГТУ. М., 2006; http://www.mstu.edu.ru/science/conferences/11ntk/materials/section17/section17_12.html
8. Chernousov Yu., Ivannikov V., Shebolaev I. et al. // Proceedings of EPAC08. Genoa, Italy, 2008. P. 2737.