

Коаксиально-секторная антенна для генератора с магнитной изоляцией

Сомов В.А., Ткач Ю.В., Ляховский А.Ф.
ИЭМИ, пр. Правды 5, Харьков-22, 61022, а.я 10857, Украина
e-mail: tkach@iemr.vl.net.ua

Содержание

1. Введение	474
2. Конструкция и описание работы коаксиального волноводно-секторного антенно-фидерного устройства	475
3. Результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования коаксиального волноводно-секторного антенно-фидерного устройства	478
4. Заключение	482

Аннотация

В работе предложено коаксиально-секторное антенно-фидерное устройство (АФУ), предназначенное для продольного вывода мощного импульсного микроволнового излучения из генераторов с магнитной изоляцией. Предлагаемое устройство достаточно компактно и позволяет формировать диаграмму направленности излучения с максимумом на оси генератора. Приведено описание конструкции, результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования коаксиально-секторного АФУ, предназначенного для работы в составе генератора с магнитной изоляцией, работающего в диапазоне $1,8 \div 2,1$ ГГц при уровне мощности ~ 1 ГВт и длительности импульса генерации ~ 100 нс.

1. Введение

В последнее время интенсивно исследуются мощные короткоимпульсные генераторы микроволнового излучения с магнитной изоляцией (ГМИ) [1-5]. Интерес к устройствам такого типа прежде всего обусловлен их низким внутренним сопротивлением и слабой зависимостью параметров генерируемого микроволнового излучения от характеристик источника питания. Фактически, в ГМИ, параметры микроволнового излучения определяются только амплитудой импульса приложенного напряжения и слабо зависят от его формы. Именно, эти две особенности ГМИ и делают такие устройства весьма перспективными для ряда приложений.

К сожалению, основное внимание при исследовании ГМИ сосредоточено на изучении физических процессов, приводящих к генерации и очень мало внимания уделяется проблемам вывода излучения и формирования диаграммы направленности с заданными характеристиками, хотя последний вопрос и имеет большое значение при использовании

генераторов с магнитной изоляцией. В большинстве случаев, для решения конкретных задач, представляет интерес, именно, формирование диаграммы направленности излучения ГМИ с максимумом мощности на оси генератора.

Как известно, в устройстве такого типа, рабочей модой является аксиально-симметричная ТЕМ-мода. Диаграмма направленности, формируемая антенно-фидерным устройством, возбуждаемым такой модой, имеет форму воронки с нулевым уровнем мощности излучения вдоль оси, перпендикулярной к плоскости излучающей апертуры антенного устройства. Для того, чтобы сформировать диаграмму направленности с максимумом на оси, необходимо преобразовать рабочую ТЕМ-моду ГМИ так, чтобы распределение полей в излучающей апертуре антенного устройства было синфазным или близким к нему. С нашей точки зрения, оптимальным для ГМИ образом, такое распределение может быть реализовано с помощью разработанного нами коаксиального волноводно-секторного преобразователя моды, совмещенного с

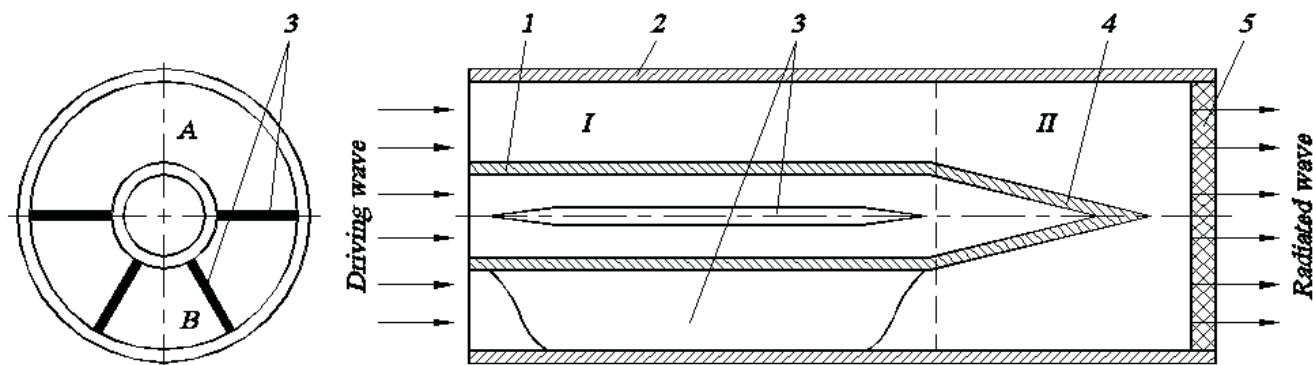


Рис. 1. I – секция коаксиального волноводно-секторного преобразователя моды; II – секция излучателя; 1 – внутренний проводник коаксиального волновода; 2 – внешний проводник коаксиального волновода; 3 – продольно-радиальные диафрагмы разделяющие волновод на секторы; 4 – конический согласователь секции излучателя, 5 – диэлектрическое окно для вывода излучения.

излучателем, что собственно и образует АФУ рассматриваемого типа.

2. Конструкция и описание работы коаксиального волноводно-секторного антенно-фидерного устройства

Упрощенная схема иллюстрирующая конструкцию коаксиального волноводно-секторного АФУ приведена на Рис. 1.

Рассматриваемое устройство состоит из двух секций: секции преобразователя моды (I) и секции излучателя (II). Секция преобразователя моды (I), представляет собой коаксиальный волновод, разделенный продольно-радиальными диафрагмами на два равных сектора А и В с длиной дуги каждого 180° . Один из секторов – сектор В (нижний), дополнительно разделен с помощью двух продольно-радиальных диафрагм на три меньших равных сектора с длиной дуги каждого 60° . Секция излучателя (II) представляет собой участок коаксиального волновода с коническим центральным электродом, радиус которого уменьшается по направлению к излучающему концу АФУ.

В основе работы волноводно-секторного преобразователя лежит эффект зависимости фазовой скорости, распространяющейся в каждом из его секторов волны, от $\frac{D}{\lambda}$ – отношения характерного размера сектора к длине волны λ . Рассматриваемый преобразователь сконструирован так, что он является естественным продолжением электродинамической структуры ГМИ. Вследствие этого, поскольку рабочей модой генератора является аксиально-симметричная ТЕМ-мода, то эта же мода и поступает на вход преобразователя, возбуждая его. Как, отмечалось выше секция волноводно-

секторного преобразователя (I) представляет собой коаксиальный волновод, разделенный вдоль оси на две части продольно-радиальными диафрагмами. Вследствие этого, поступающая на его вход волна также делится на две части. Одна часть проходит через сектор А волновода с длиной дуги 180° , а вторая – через сектор В, разделенный на три меньших сектора с длиной дуги каждого 60° . Поскольку $\frac{D}{\lambda}$ для каждого из секторов различно, то фазовые скорости волн распространяющихся в них различны, причем в большем секторе А фазовая скорость ниже, а в меньшем – В выше. При правильном выборе длины преобразователя, разность фаз между волнами, распространяющимися по двум секторам А и В может составлять π . Это позволяет на выходе такого устройства получить распределение поля, соответствующее моде H_{11} , которая достаточно хорошо излучается с помощью рупора или открытого конца волновода. Структура поля в различных частях волноводно-секторного преобразователя приведена на Рис. 2.

Далее, преобразованная волна поступает в секцию излучателя – секцию (II). Эта секция представляет собой отрезок коаксиального волновода с коническим центральным электродом, радиус которого уменьшается к излучающему концу устройства. Оканчивается излучающий конец секции диэлектрической пластиной, пропускающей микроволновое излучение и, одновременно, обеспечивающей вакуумирование АФУ.

Рассматриваемая конструкция является довольно простой в инженерном исполнении, и является естественно частью конструкции генератора с магнитной изоляцией. Поскольку в ней функции преобразователя моды и функции излучающего устройства совмещены, это позволяет получить минимальные размеры всего устройства в целом. Кроме того, распределение электромагнитных полей в рассматриваемой конструкции таково, что позволяет уменьшить вероятность образования

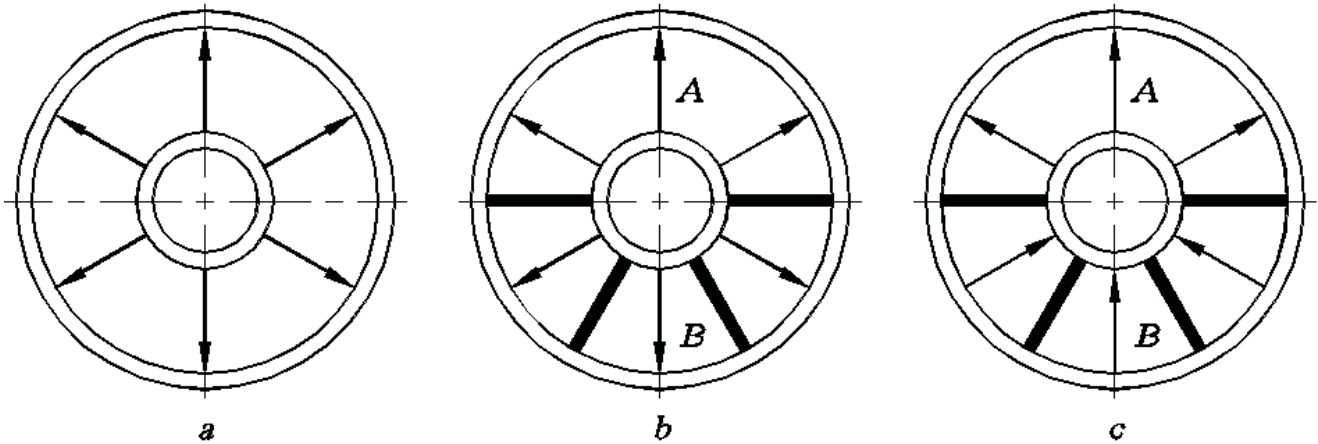


Рис. 2. Структура поля в различных частях коаксиального волноводно-секторного преобразователя моды: А – сектор с длиной дуги 180°; В – сектор разделенный на три равных сектора с длиной дуги 60° каждый; а – структура поля на выходе ЭДС генератора и на входе преобразователя в его коаксиальной части; б – структура поля в начале секторной части преобразователя; с – структура поля в конце секторного преобразователя.

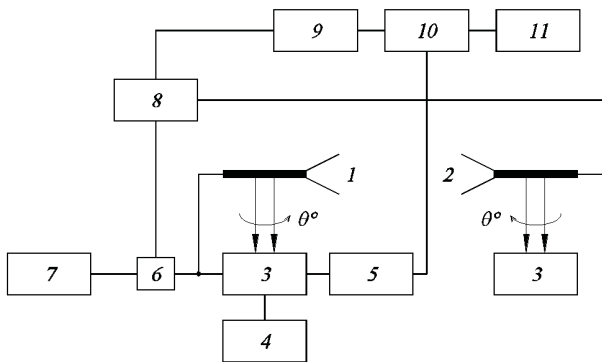


Рис. 3. Блок-схема стенда для исследования коаксиального волноводно-секторного АФУ: 1 – исследуемое устройство; 2 – приемно-регистрирующая рупорная антенна; 3 – поворотный стол; 4 – потенциометр; 5 – цифровой вольтметр В7-40; 6 – направленный ответвитель; 7 – генератор синтезированных СВЧ-импульсов; 8 – измеритель разности фаз и отношений уровней мощности; 9 – интерфейс; 10 – адаптер; 11 – ПЭВМ для обработки и управления работой стенда.

СВЧ-пробоев на ее выходе. Как показало проведенное компьютерное моделирование, разработанное АФУ формирует достаточно хорошую диаграмму направленности излучения мощных импульсных генераторов данного класса, и позволяет обеспечить хорошее согласование с их электродинамической структурой.

Для расчета АФУ рассматриваемого типа на основе апертурного метода (векторизованного интеграла Кирхгофа), была построена математическая модель. При этом были сделаны следующие предположения.

- распределение полей в излучающей апертуре такое же, как в поперечном сечении регулярного волновода;
- взаимное влияние апертур не учитывается;
- токи на кромках и внешней поверхности волновода не учитываются;
- точка наблюдения находится в дальней зоне излучателя.

Электрическая составляющая поля излучения, формируемая коаксиально волноводно-секторным АФУ в дальней зоне описывается выражением [6]

$$\vec{E} = \frac{ik\Psi(R)}{4\pi} \int_S \left\{ W_0 [\vec{R}^0 [\vec{R}^0, \vec{J}^e] + [\vec{R}^0, \vec{J}^m] e^{ik(\vec{r}, \vec{R})}] \right\}, \quad (1)$$

где k – волновое число; $\Psi(R)$ – функция сферической волны; \vec{R}_0 – орт точки наблюдения в дальней зоне; \vec{J}^e – плотность электрического тока на апертуре; \vec{J}^m – плотность "магнитного тока" на апертуре, $W_0 = 120\pi$ – волновое сопротивление свободного пространства;

$$\vec{J}^e = [\vec{n}^0, \vec{H}_S]; \quad \vec{J}^m = -[\vec{n}^0, \vec{E}_S]; \quad (2)$$

Здесь H_S, E_S – составляющие поля в апертуре; n – орт нормали к апертуре.

Используя известные собственные функции кольцевой секторной области можно получить выражение для полей H -типа в секторном волноводе [6,8]:

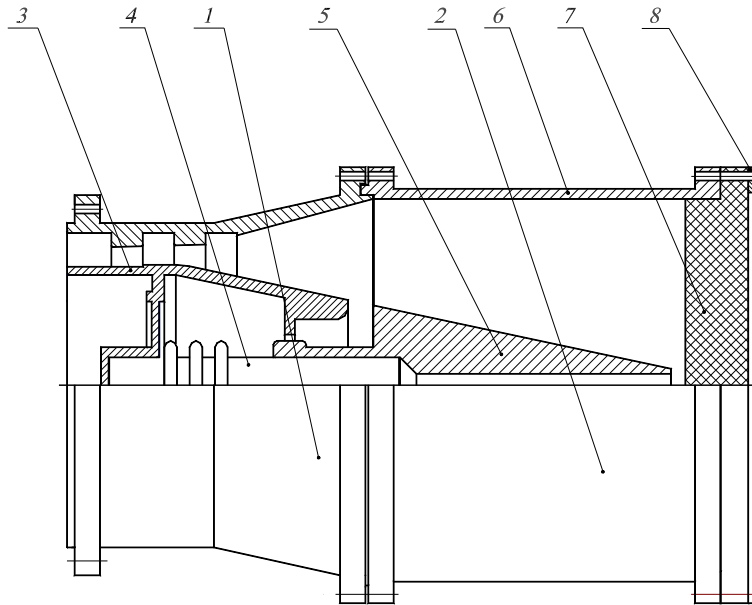


Рис. 4. Конструкция коаксиального волноводно-секторного АФУ вместе с согласующим устройством и элементами генератора с магнитной изоляцией. 1 – коаксиальная согласующая секция, установленная между ЭДС генератора с магнитной изоляцией и АФУ; 2 – секция коаксиального волноводно-секторного АФУ; 3 – внутренний электрод согласующей секции; 4 – центрирующая вставка; 5 – внутренний конический электрод АФУ; 6 – внешний электрод АФУ; 7 – выходное диэлектрическое окно; 8 – прижимное металлическое кольцо.

$$\begin{aligned}
 H_{m,m} &= \frac{-\Gamma H_0}{\chi_{nm}} \left[J'_n(x_{nm}) - DN'_n(x_{nm}r) \right] \cos n\alpha, \\
 H_{\alpha n,m} &= \frac{-in\Gamma H_0}{\chi_{nm}^2} \left[J_n(x_{nm}) - DN_n(x_{nm}r) \right] \sin n\alpha, \\
 E_{rn,m} &= \frac{iKW_0}{\chi_{nm}^2} \left[J_n(x_{nm}) - DN_n(x_{nm}r) \right] H_0 n \sin n\alpha, \\
 E_{\alpha n,m} &= \frac{-iKW_0}{\chi_{nm}^2} \left[J'_n(x_{nm}) - DN'_n(x_{nm}r) \right] \cos n\alpha,
 \end{aligned} \quad (3)$$

где X_{nm} – поперечное волновое число, связанное с постоянной распространения Γ_{nm} и волновым числом k и удовлетворяющее дисперсионному уравнению для волн магнитного типа [6]:

$$\begin{aligned}
 X_{n,m}^2 &= k^2 - \Gamma_{nm}^2, \\
 D &= \frac{J'_n(x_{nm}R_1)}{N'_n(x_{nm}R_1)}, \\
 \frac{J'_n(x_{nm}R_1)}{J'_n(x_{nm}R_2)} &= \frac{N'_n(XR)}{N'_n(XR_2)}.
 \end{aligned} \quad (4)$$

Отметим, что n – целое только в том случае, когда π/α_0 , $J = 1, 2, 3, \dots$. Для сектора с длиной дуги 180° низшим типом волны является волна H_{11} , а для сектора с длиной дуги 60° волна $\sim H_{13}$ [8]. В связи с этим, в дальнейшем, нами рассматривались только эти типы волн.

Используя изложенное выше математическое описание, было разработано программное обеспечение, позволяющее проводить компьютерное мо-

делирование работы коаксиально-секторного АФУ. При его разработке применялись численные методы интегрирования с использованием составной формулы Гаусса 4-го порядка. Цилиндрические функции, входящие в выражение для компонент полей, вычислялись с применением стандартных пакетов программ.

Поскольку рассматриваемое АФУ предназначено для работы в составе импульсного микроволнового генератора с высоким уровнем мощности, то очень важным элементом, определяющим его работоспособность, является выходное радиопрозрачное окно. Такое окно одновременно должно удовлетворять нескольким требованиям: обладать высокой электрической прочностью и малыми потерями в рабочем диапазоне частот, хорошими вакуумными свойствами и высокой механической прочностью. В связи с этим, в процессе разработки АФУ, отдельно был проведен расчет и компьютерная оптимизация параметров выходного окна, а также его влияние на диаграмму направленности формируемую антенным устройством и эффективность вывода микроволнового излучения. Для расчета коэффициента отражения R по мощности и коэффициента пропускания T использовались выражения для прохождения плоской волны через слой диэлектрика [7,8].



Рис. 5. Фотография блока коаксиального волноводно-секторного АФУ вместе с секцией согласования ЭДС генератора с магнитной изоляцией и конической системой ввода мощности, установленного на поворотном столе испытательного стенда

$$R = \frac{r^2[(1 - A^2)^2 + 4A^2 \sin^2 \varphi]}{(1 - A^2 r^2)^2 + 4A^2 r^2 \sin^2(\varphi + \chi)}, \quad (5)$$

$$T = \frac{A^2[r^2[(1 - A^2)^2 + 4A^2 \sin^2 \chi]}{(1 - A^2 r^2)^2 + 4A^2 r^2 \sin^2(\varphi + \chi)},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость, $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь, λ – длина волны излучения;

$$\chi = \operatorname{arctg} \left[\frac{2\alpha}{n^2(1 + \alpha^2) - 1} \right], \quad A = \exp \left[-\frac{n^2 d \operatorname{tg} \delta}{\lambda} \right],$$

$$\psi = \frac{2nd}{\lambda}, \quad \alpha = \frac{\operatorname{tg} \delta}{2} \left(1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \delta}{8} \right),$$

$$r = \frac{n - 1}{n + 1}, \quad n = \sqrt{\varepsilon}.$$

Проведенные предварительные расчеты показали, что, в нашем случае, наилучшим материалом, соответствующим большинству требований и обеспечивающим эффективный вывод микроволнового излучения, являются полистирол и высокочастотная керамика.

3. Результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования коаксиального волноводно-секторного антенно-фидерного устройства

Вначале было проведено компьютерное моделирование работы АФУ без выходного окна. В процессе моделирования определялось оптимальное количество продольно-радиальных диафрагм и длина секции преобразователя (I). Увеличение количества продольных диафрагм приводит к сокращению длины секции преобразователя и, соответственно, к уменьшению продольных размеров АФУ. Однако, в этом случае выходные характе-

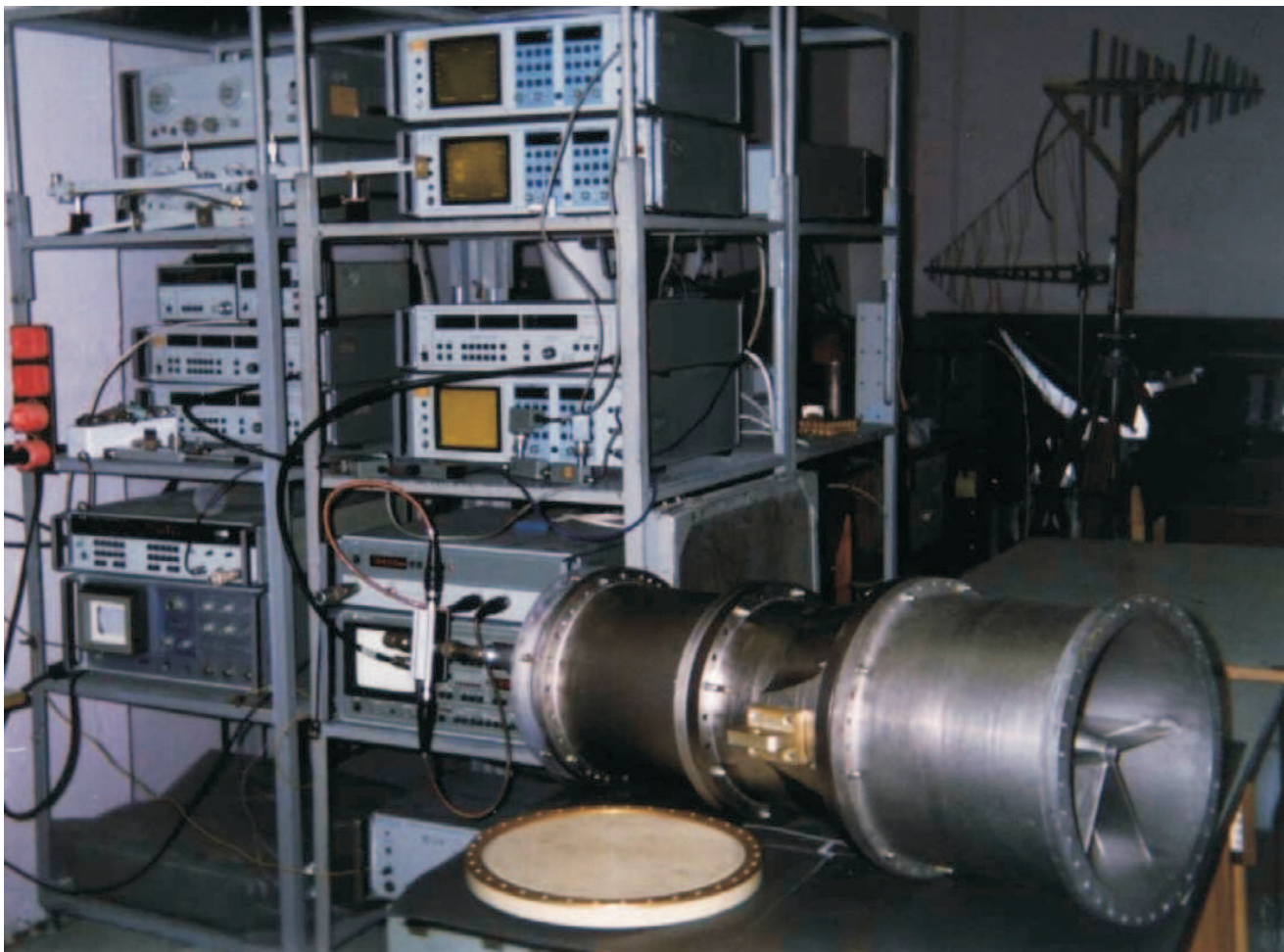


Рис. 6. Блок-схема стенда для исследования коаксиального волноводно-секторного АФУ: 1 – исследуемое устройство; 2 – приемно-регистрационная рупорная антенна; 3 – поворотный стол; 4 – потенциометр; 5 – цифровой вольтметр В7-40; 6 – направленный ответвитель; 7 – генератор синтезированных СВЧ-импульсов; 8 – измеритель разности фаз и отношений уровней мощности; 9 – интерфейс; 10 – адаптер; 11 – ПЭВМ для обработки и управления работой стенда.

ристики устройства сильно зависит от частоты, а также снижается предельный уровень выводимой мощности. В результате компьютерной оптимизации был выбран вариант конструкции АФУ содержащий три секторных волновода в нижней части В (Рис. 1). Для выбранной конструкции АФУ, вначале без учета влияния выходного окна, рассчитывалась диаграмма направленности в рабочем диапазоне частот исследуемого устройства $1,8 \div 2,1$ ГГц в E и H плоскости.

Независимо проводились расчеты и оптимизация характеристик выходного окна с использованием выражений (5). В результате анализа всех требований к конструкции АФУ, была выбрана однослойная модификация выходного окна, выполненного из монолитного полистирола. Расчеты показали, что при величине $\varepsilon = 2,55$, оптимальная толщина окна в рабочем диапазоне частот $1,8 \div 2,1$ ГГц равна 47 мм. Для того, чтобы величина коэффициента отражения по мощности R не превышала 0,01 мак-

симальное отклонение толщины на диаметре выходного окна не должны превышать $0,02\lambda$. Потери в выходном окне толщиной d вычислялись по формуле, определяющей коэффициент пропускания по мощности T [9].

$$T = \exp[-2\pi\sqrt{\varepsilon} \operatorname{tg} \delta d/\lambda]$$

Для окна, выполненного из высокочастотного полистирола с $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$ вычисленная величина коэффициента пропускания имеет приемлемую величину $T = 0,998$.

Следует заметить, что рассматриваемое АФУ предназначено для мощных импульсных генераторов в которых высокие значения коэффициента пропускания выходного окна имеют большое значение, поскольку малая величина отраженной мощности, позволяет избежать пробоев в электродинамической структуре генератора и предотвратить разрушение выходного окна. Для проверки

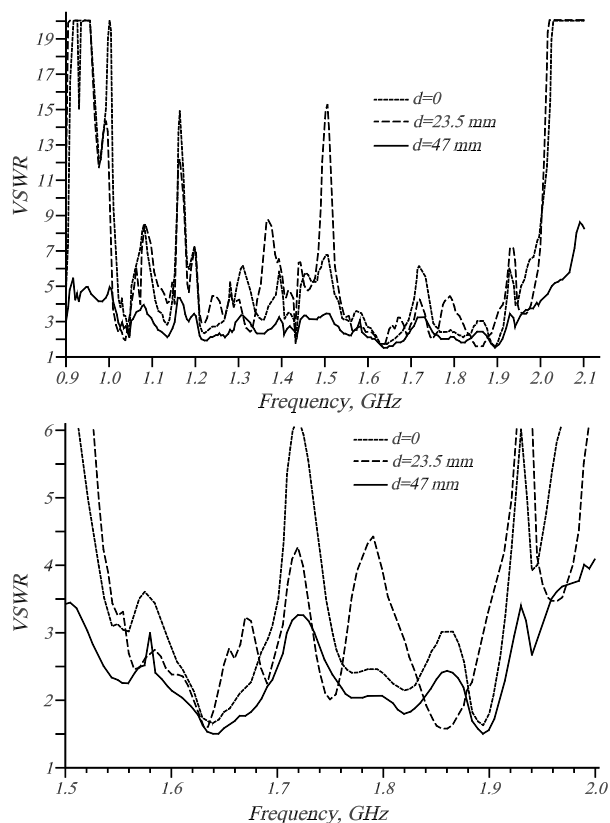


Рис. 7. Зависимость КСВН от частоты для генератора с магнитной изоляцией без блока брегговских зеркал в диапазоне $0,9 \div 2,1$ ГГц (вверху) и в диапазоне $1,5 \div 2$ ГГц (внизу) для различных толщин выходного окна.

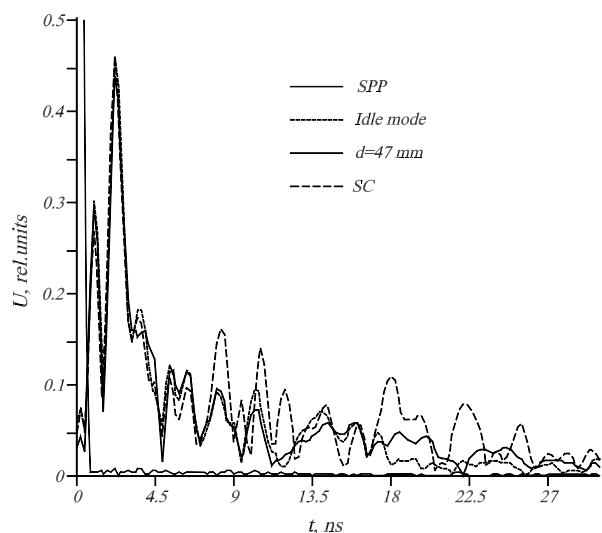


Рис. 8. Временные характеристики отражений в блоке составленном из электродинамической структуре согласующего устройства синтезированного импульса длительностью 1,2 нс, с несущей частотой 1,8 ГГц и шириной спектра $0,5 \div 3,1$ ГГц.

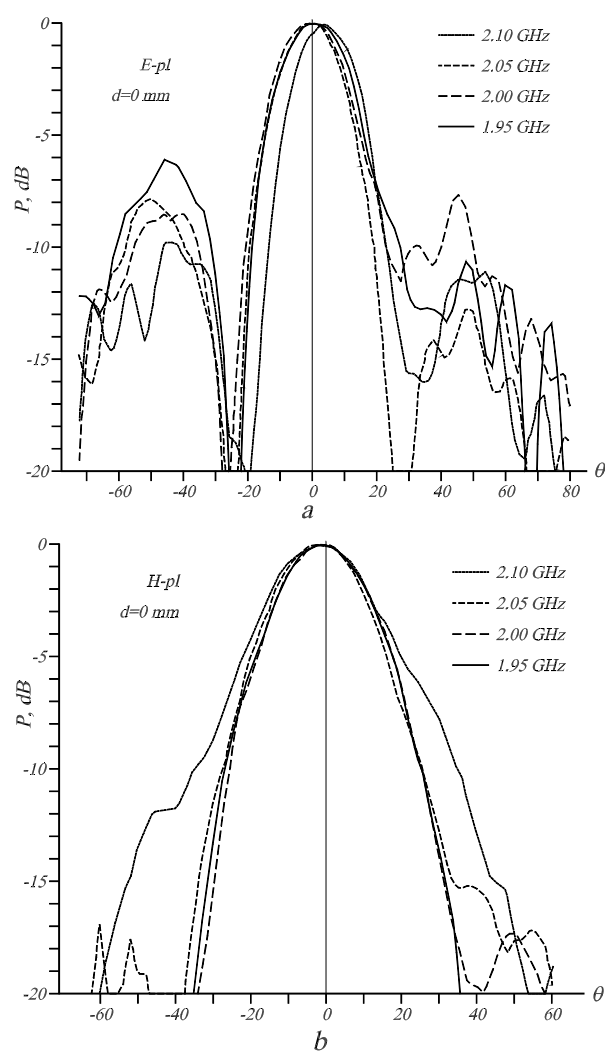


Рис. 9. Диаграмма направленности в рабочем диапазоне генератора с магнитной изоляцией в E -плоскости (а) и в H -плоскости со снятым выходным окном в диапазоне $1,95 \div 2,1$ ГГц.

правильности результатов получаемых с помощью разработанного программного обеспечения с его использованием было рассчитано, изготовлено и исследовано четыре модификации макетов коаксиального волноводно-секторного АФУ. Сравнение их характеристик, полученных расчетным путем с экспериментально полученными данными показало их хорошее совпадение. После этого, разработанное программное обеспечение было использовано для компьютерного моделирования оптимизированного полномасштабного коаксиально-секторного АФУ, предназначенного для работы в диапазоне $1,8 \div 2,1$ ГГц в качестве системы вывода мощного импульсного микроволнового излучения ГМИ. Конструкция рабочего варианта АФУ вместе с согласующим устройством, установленным между ЭДС генератора с магнитной изоляцией и АФУ показана на Рис. 4. На испытательном стенде, схема которого

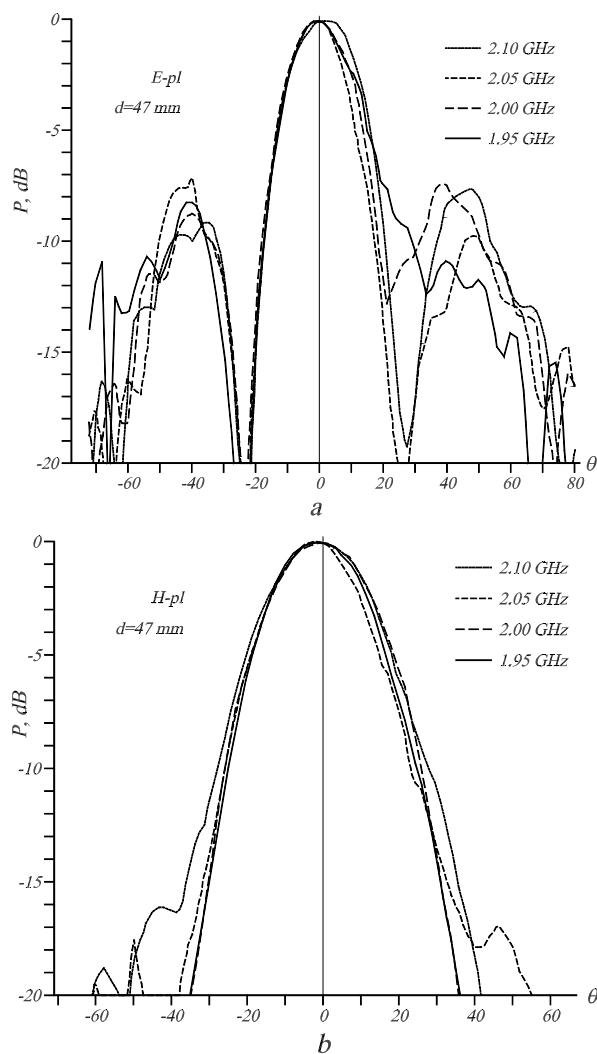


Рис. 10. Диаграммы направленности в рабочем диапазоне частот генератора с магнитной изоляцией $1,95 \div 2,1$ ГГц в E -плоскости (а) и в H -плоскости при толщине выходного окна $d = 47$ мм.

показана на Рис. 3 измерялись основные характеристики АФУ, соединенного в единый блок с согласующим устройством и ЭДС генератора. С нашей точки зрения, исследование выходных характеристик АФУ вместе с основными узлами ГМИ позволяет наиболее достоверно определить реальные выходные параметры разработанного устройства.

При проведении измерений, использовался метод синтезированного импульса. Этот метод позволяет измерить фазовую скорость волны в исследуемом устройстве, а также определить коэффициент отражения от различных элементов устройства в широком диапазоне частот, соответствующем спектру сформированного зондирующего импульса. Используемый в данных измерениях синтезированный импульс имел следующие параметры:

- длительность на высоте, соответствующей 0,1

уровня амплитуды — 1,2 нс

- несущая частота — 1,8 ГГц
- ширина спектра — $0,5 \div 3,1$ ГГц

Таким образом, соответственно, он обеспечивает измерение основных характеристик АФУ в диапазоне $0,5 \div 3,1$ ГГц.

Исследуемая сборка с конической системой ввода установленная на поворотном столе показана на Рис. 5. Измерительный стенд с генератором синтезированных импульсов, и исследуемая сборка со снятым выходным окном показаны Рис. 6. Измерение КСВ сборки производились с помощью стандартных рефлектометров P2-102 с рабочей полосой частот $0,5 \div 2,1$ ГГц и P2-103 с рабочей полосой частот $2,0 \div 6,1$ ГГц, входящих в состав испытательно стенда.

На Рис. 7 (а,б) показаны измеренные зависимости КСВН исследуемого устройства в диапазоне частот $0,9 \div 2,0$ ГГц для различных толщин полистиролового выходного окна, установленного на выходе АФУ. Из этих зависимостей видно, что в рабочем диапазоне частот АФУ, наименьшие значения КСВ наблюдаются при толщине выходного окна $d = 47$ мм, соответствующей половине длины волны генерируемого излучения. Таким образом, полученные экспериментальные результаты достаточно хорошо совпадают с величиной толщины выходного окна, полученной независимо расчетным путем.

Временные характеристики рефлектограмм в исследуемом блоке состоящем из ЭДС генератора с магнитной изоляцией, согласующего устройства и АФУ при толщине выходного окна $d = 47$ мм синтезированного импульса длительностью 1,2 нс, с несущей частотой 1,8 ГГц показаны на Рис. 8. Анализ временных характеристик рефлектограмм показывает, что в данной конструкции системы вывода излучения, все ее элементы достаточно хорошо согласованы. Это обстоятельство является чрезвычайно важным. так как в режиме генерации больших импульсных мощностей хорошее согласование элементов ГМИ позволяет избежать высокочастотных пробоев в генераторе и снижения, обусловленного ими уровня выводимой мощности, а также предотвратить уменьшение длительности генерации.

Диаграммы направленности излучения, формируемые коаксиальными волноводно-секторными АФУ в E и H плоскостях в диапазоне $1,95 \div 2,10$ ГГц, соответствующем максимальной мощности генератора со снятым выходным окном приведены на Рис. 9. На Рис. 10 приведены экспериментально полученные диаграммы направленности АФУ в этом же диапазоне частот с установленным выходным окном. Исследовалось также влияние на диаграммы направленности прижимного кольца фиксиру-

ющего выходное окно. Геометрия кольца в процессе проведения экспериментов подбиралась такой, чтобы обеспечить минимальные искажения диаграммы направленности. Как следует из анализа экспериментально полученных результатов, рассматриваемое коаксиально-секторное антенное устройство совмещенное с преобразователем моды позволяет формировать диаграмму направленности генератора с магнитной изоляцией с максимумом на оси генератора и узким основным лепестком.

Экспериментально наблюдаемая асимметрия диаграмм направленности, которая видна на Рис. 9 (а,в) и Рис. 10 (а,в) связана с искажением фазового фронта волны в выходной апертуре антенны обусловленным влиянием конструктивных элементов в блоке АФУ. При последующей инженерной доработке устройства, асимметрия диаграммы направленности была значительно уменьшена.

4. Заключение

Предложено и экспериментально исследовано коаксиально-секторное антенное устройство совмещенное с преобразователем аксиально-симметричной моды в моду H_{11} , предназначенное для работы в качестве системы вывода генератора с магнитной изоляцией и формирования диаграммы направленности с максимумом на оси.

Рассмотренное АФУ является эффективной системой вывода излучения из ГМИ и обладает рядом преимуществ по сравнению с уже используемыми, такими, например, как широко распространенная антенна Власова [5].

Благодаря особенностям конструкции, предложенное устройство обеспечивает эффективный вывод микроволнового излучения и формирование достаточно узкой диаграммы направленности с полушириной $15 \div 20^\circ$ в рабочем диапазоне частот генератора $1,8 \div 2,1$ ГГц. Рассматриваемое устройство также может использоваться как облучатель в более сложных широкополосных антеннах, используемых в различных модификациях генератора с магнитной изоляцией и генераторах других типов.

Список литературы

- [1] Calico S.E., Clark M.C., Lemke R.W., Scott M.C. Experimental and theoretical investigation of magnetically insulated line oscillator (MILO) in Intense Microwave Pulses III, Proc. SPIE 2557, H.E. Brandt, Ed. 1995 pp. 50-59, SPIE.
- [2] Lemke R.W., Calico S.E., and Clark M.C. Investigation of a load limited magnetically insulated transmission line oscillator (MILO) // IEEE Trans. Plasma Sci. - 1997. - V. PS-25, - N 2. - pp. 364-374.
- [3] Eastwood J.W., Hawkins K.C. and Hook M.P. The Farpered MILO // IEE Trans. Plasma Sci. - 1998. - V. 26, - N 3. - pp 698-712.
- [4] Балакирев В.А., Марков П.И., Сотников Г.В., Ткач Ю.В. Теория генераторов с магнитной самоизоляцией // Электромагнитные явления. - 1998. - Т. 1, - N 1. -С. 111-148.
- [5] Lemke R.W., De Muth G.E., Biggs A.W. Theoretical and experimental investigation of axial power extraction from a magnetical insulated transmission line oscillator // in Intense Microwave and Particle Beams, Proc 1226, Brandt H.E., Ed. - 1990. - pp. 199-206. SPIE.
- [6] Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн - М.: "Наука". - 1973. - 607 с.
- [7] Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств -М.: "Энергия". - 1973. - 440 с.
- [8] Carr J.J. Practical antenna handbook // third edition, Mc Craw-Hill. - 1998.
- [9] Обтекатели антенн // Пер. с английского под ред. Шпунтова А.М. -М.: Советское радио. - 1950. - 263 с.