

PACS numbers: 42.82. - m, 84.40.Dc

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВОЛН В
МНОГОСВЯЗНЫХ КВАЗИОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С
ПЕРИОДИЧЕСКИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ**

***Г.С. Воробьев, В.О. Журба, А.С. Кривец, М.В. Петровский,
А.А. Рыбалко, А.И. Рубан, Ю.В. Шульга***

Сумский государственный университет,
ул. Римского-Корсакова, 2, 40007, Сумы, Украина
E-mail: vp@sumdu.edu.ua

В данной статье описаны экспериментальная установка и общая методика моделирования электромагнитных волновых процессов в многосвязных квазиоптических системах, содержащих периодические неоднородности различных модификаций (ленточные и отражательные дифракционные решетки, металлодиэлектрические структуры), на которых происходит трансформация поверхностных волн диэлектрического волновода в объемные электромагнитные волны. Приведены примеры выбора оптимальных режимов моделирования и основных параметров исследуемых электродинамических систем. Описана функциональная схема экспериментальной установки, позволяющая проводить исследования в диапазоне длин волн $\lambda = 4-8$ мм. Впервые представлена общая методика моделирования электромагнитных явлений в резонансных и волноведущих многосвязных квазиоптических системах.

***Ключевые слова:* ВОЛНА, ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД, МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА, ОТКРЫТЫЙ РЕЗОНАТОР, ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ.**

(Получено 10.11.2010, в отредактированной форме – 09.01.2011)

1. ВВЕДЕНИЕ

Многосвязные квазиоптические системы (МКС) в настоящее время находят широкое применение как в электронике, так и в технике СВЧ [1-4]. Основные принципы возбуждения электромагнитных колебаний в таких системах основаны на преобразовании поверхностных волн диэлектрического волновода (ДВ) или волн пространственного заряда электронного потока (ЭП) в объемные волны дифракционного излучения (ДИ) на периодических неоднородностях, расположенных в объеме открытого резонатора (ОР) или открытого волновода (ОВ).

Современные теоретические методы моделирования электромагнитных полей не позволяют однозначно решить вопросы оптимизации электродинамических параметров МКС с точки зрения их практической реализации. В связи с этим предпочтение, по оперативности получения информации и достоверности результатов, отдается экспериментальным методам, некоторые из которых изложены в работах [5-8], применительно к конкретным объектам исследований. Поэтому актуальным является развитие этих методов в плане расширения класса задач, которые могут быть решены путем экспериментального моделирования волновых процессов в сложных МКС.

В данной работе впервые предложен и реализован общий подход по экспериментальному моделированию электромагнитных явлений в сложных многосвязных квазиоптических системах, содержащих периодические неоднородности.

2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ВОЛНОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПОСТРОЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Общие принципы волнового моделирования основаны на аналогии свойств плоской неоднородной волны собственного поля монохроматического ЭП с поверхностной волной диэлектрического волновода, которые подробно изложены и обоснованы в [9]. Методика построения и реализации такой модели в эксперименте заключается в следующем:

1. *Определении основных требований к экспериментальной установке:* измерительная установка должна обеспечивать трансформацию поверхностных волн в объемные; измерение углов излучения пространственных гармоник в секторе углов $0-180^\circ$ с абсолютной погрешностью, не превышающей 1° ; контроль длины волны и величины мощности, распространяющейся в диэлектрическом волноводе.

2. *Выборе оптимальной связи полей дифракционной решетки (ДР) с поверхностной волной ДВ,* которая характеризуется минимальными искажениями в спектре пространственных гармоник дифракционного излучения при их максимальной интенсивности.

3. *Определении уровня излучаемой мощности.* Излучаемая мощность является важнейшей характеристикой при трансформации поверхностных волн в объемные и сосредоточена в лепестках диаграммы направленности. Для ее измерения можно использовать два метода. Первый заключается в измерении диаграмм направленности излучения. Второй метод основан на измерении волноводных характеристик ДВ: коэффициентов стоячей волны (КСВ) и коэффициентов прохождения волны в согласованную нагрузку или измеритель мощности.

3. ВЫБОР РЕЖИМОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВОЛН

Описанные выше принципы волнового моделирования базировались на примере использования отражательной металлической ДР, обладающей ограниченными функциональными возможностями по реализации свойств дифракционного излучения, которое может также возникать на периодических металлодиэлектрических структурах (МДС) [5]. Поскольку МКС содержат элементы связи в виде сложных двухрядных металлических и металлодиэлектрических ДР, то при их исследовании основным является вопрос выбора режимов моделирования волновых процессов, соответствующих заданному типу квазиоптической системы: открытому резонатору или открытому волноводу с излучателями объемных волн. В связи с этим рассмотрим общий случай возбуждения ДИ на периодической МДС, предполагая, что металлические ДР в некотором приближении являются частным вариантом выполнения излучающей системы с диэлектрическим слоем при $\varepsilon = 1$.

Исходя из общего решения задач волнового моделирования ДИ [5, 9] следует, что моделью черенковского излучения является канал транс-

формации волн диэлектрического волновода в объемные, обусловленный нарушением полного внутреннего отражения в диэлектрическом волноводе. Такой канал реализуется, если диэлектрическая проницаемость ε_e волновода не превышает ε среды, а фазовая скорость распространения волны в диэлектрическом волноводе удовлетворяет условию возбуждения черенковского излучения. Моделью дифракционного излучения ЭП являются каналы вытекающих волн из ДВ в диэлектрическую среду или одновременно в вакуум и диэлектрик. Исходя из идентификации поверхностных волн ЭП и ДВ [10], а соответственно и относительных скоростей электронов β_e и волн в ДВ – β_e , общие условия излучения электромагнитных колебаний в вакуум (1) и в диэлектрик (2) имеют следующий вид:

$$\frac{\kappa}{|n| + \kappa} \leq \frac{\beta_e}{\beta_e} \leq \frac{\kappa}{|n| - \kappa}, \quad (1)$$

$$\frac{\kappa}{|n| + \kappa\sqrt{\varepsilon}} \leq \frac{\beta_e}{\beta_e} \leq \frac{\kappa}{|n| - \kappa\sqrt{\varepsilon}}, \quad (2)$$

где $\kappa = l/\lambda$, l – период решетки, λ – длина волны излучения.

Исходя из (1), (2), углы излучения электромагнитных волн в вакуум γ_{nv} и диэлектрик $\gamma_{n\varepsilon}$ для заданных параметров β_e и β_e определяются соотношениями:

$$\beta_e \rightarrow \gamma_{nv} = \arccos\left(\sqrt{\varepsilon_e} + \frac{n}{\kappa}\right), \quad \gamma_{n\varepsilon} = -\arccos\frac{\sqrt{\varepsilon_e} + \frac{n}{\kappa}}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (3)$$

$$\beta_e \rightarrow \gamma_{nv} = \arccos\left(\frac{1}{\beta_e} + \frac{n}{\kappa}\right), \quad \gamma_{n\varepsilon} = -\arccos\frac{\frac{1}{\beta_e} + \frac{n}{\kappa}}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (4)$$

Из анализа соотношений, (1), (2) следует, что для параметров κ , β_e (β_e) и ε в свободном пространстве возбуждаются только отрицательные пространственные гармоники с $n = -1, -2, -3, \dots$, а в диэлектрической среде – гармоники с $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Излучение на нулевой ($n = 0$) пространственной гармонике происходит при скоростях электронов $\varepsilon\beta_e^2 > 1$ с углом излучения $\cos\gamma_{0\varepsilon} = 1/(\beta_e\varepsilon^{0,5})$. Поэтому такое излучение можно назвать черенковским (ЧИ), а решетку рассматривать как экранирующий фактор, влияющий на коэффициент связи ЭП или ДВ с диэлектрической средой [11].

Описанные выше режимы излучений можно наглядно проанализировать путем построения диаграмм Бриллюэна по методике, изложенной в [5], для заданных значений диэлектрической проницаемости среды. Учитывая наличие в настоящее время достаточно широкого спектра материалов, обладающих малыми потерями на СВЧ, которые могут использоваться как при экспериментальном моделировании (малые значения ε - фторопласт, полистирол, поликор), так и при рассмотрении вариантов создания низковольтных источников колебаний с применением

МДС (высокие значения ε , например, керамика на основе оксидов бария и титана [12]), в качестве примера, на рис. 1 в координатных осях κ и $\eta = \kappa/\beta$ приведены основные фрагменты диаграмм для вакуумной среды $\varepsilon = 1$ и наиболее распространенных в диапазоне СВЧ материалов со значениями $\varepsilon = 2-150$.

Из сравнительного анализа диаграмм Бриллюэна видно, что при нанесении ленточной ДР на поверхность диэлектрического слоя, электродинамические свойства системы значительно изменяются, по сравнению с металлической решеткой в вакууме, за счет появления новых каналов трансформации поверхностных волн ДВ-ЭП, что продемонстрировано на рис. 1 б-г.

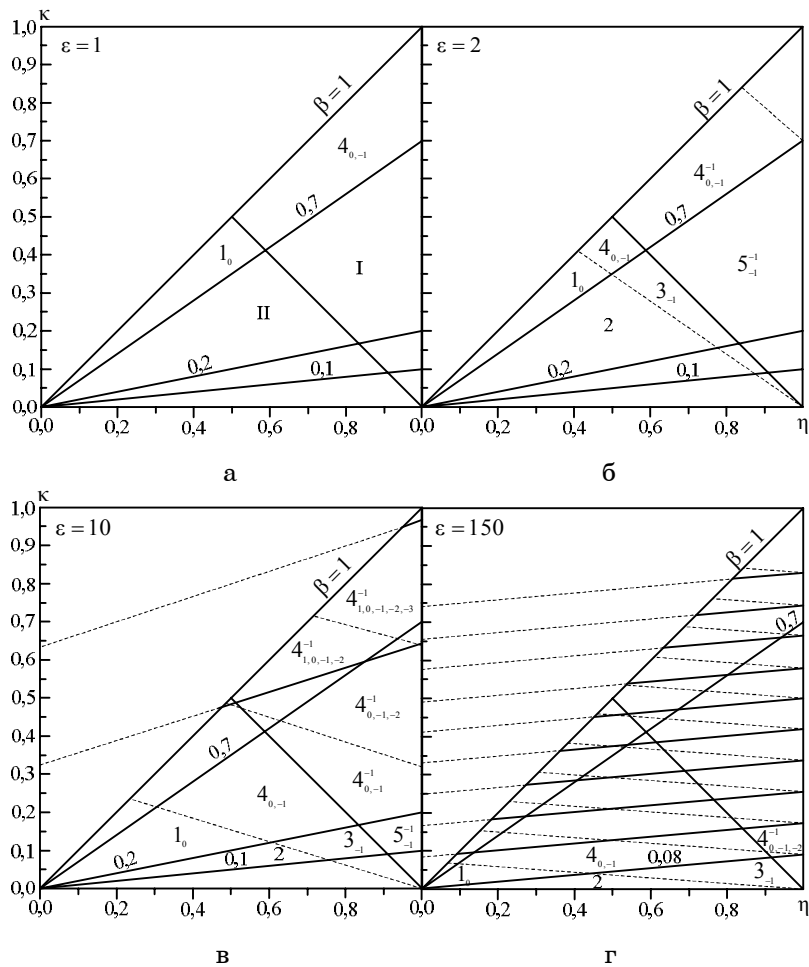


Рис. 1 – Диаграммы Бриллюэна при возбуждении пространственных волн на металлических решетках (а) и на МДС (б) – (г) при различных значениях ε

В связи с этим дискретные области на диаграмме Бриллюэна обозначим цифрами N_s^m ($N = 1-5$), которые определяют наиболее характерные случаи возбуждения электронным потоком (поверхностной волной диэлектрического волновода) электромагнитных волн. Нижние индексы $s = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ указывают номера пространственных гармоник, излучаемых в диэлектрик, а верхние индексы $m = -1, -2, \dots$ – в вакуум. Так, например, область 1_0 соответствует возбуждению основной черенковской гармоники, область 2 – поверхностным волнам, 3 – дифракционному излучению только в диэлектрическую среду, области $4, 5$ характеризуются возможностью возбуждения гармоник ДИ как в свободное пространство, так и в диэлектрическую среду.

Из рис. 1 видно, что с увеличением ε количество зон Бриллюэна возрастает при неизменном k , а области интервалов по параметрам k и β , в которых они возбуждаются, уменьшаются. В частности, для значений $\varepsilon \geq 100$ в области нерелятивистских ЭП возможна реализация как режимов ЧИ, так и режимов дифракционно-черенковского излучения (ДЧИ) (рис. 1г). С точки зрения создания низковольтных источников излучения, практический интерес представляет зона 3_{-1} , в которой дифракционное излучение, подобно черенковскому, возникает только в диэлектрике МДС, но при значительно меньших скоростях электронов. Учитывая специфику условий возбуждения объемной волны такого режима, условно назовем его аномальным дифракционным излучением (АДИ) [13]. Для реализации низковольтных приборов типа ГДИ (оротрон) практический интерес представляет режим излучения в зоне 5_{-1}^{-1} при параметрах решетки, обеспечивающих излучение по нормали относительно зеркал ОР.

4. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И НАЗНАЧЕНИЕ ЕЕ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ

В [5, 6] описаны схемы установок для исследования преобразования поверхностных волн ДВ в объемные на МДС полубесконечной толщины и на металлических периодических структурах, позволяющие решить только частные вопросы волнового моделирования без учета специфики исследуемых МКС: возможности присутствия пространственных волн, как в области связи, так и за ее пределами в объемах ОР и ОВ, влияния толщины диэлектрического слоя на характеристики излучения в МДС, необходимости автоматизированного контроля основных параметров волноводного тракта и учета потерь на излучение в окружающее пространство.

Из сформулированных выше общих принципов волнового моделирования следует, что одним из основных узлов экспериментальной установки является преобразователь поверхностных волн ДВ (ЭП) в объемные электромагнитные волны, который может быть выполнен для МКС в различных модификациях: ленточных и отражательных ДР, периодических МДС и различных их комбинациях (двойных ДР, ДР – МДС и т.д.). Ключевым элементом в этом плане является формирующий поверхностную (возбуждающую) волну диэлектрический волновод, который запитывается от источника СВЧ колебаний и является основным волноводным элементом в МКС, через который контролируются КСВ и коэффициенты прохождения электродинамической системы.

Исходя из вышеизложенного, на рис. 2 представлена универсальная функциональная схема по измерению электродинамических характеристик МКС, которая путем незначительных изменений в конструкции может быть модифицирована применительно к конкретным исследуемым объектам.

Как указывалось выше, основным функциональным узлом установки является система связи и возбуждения пространственных волн – I, которая входит в исследуемый объект – II и на рис. 2 условно показана в виде ДВ – 1 и периодических неоднородностей – 2. Диэлектрический волновод – 1 через согласующие переходы – 3 подключен к блоку измерения волноводных характеристик – III и к блоку контроля согласования выходной мощности – IV. Периферийными устройствами схемы измерений рис. 2 являются системы регистрации полей в дальней и ближней зонах излучений – V, VI, сигналы от которых регистрируются на графопостроителе (ГП), а также общая механическая система угловой и 3-х координатной юстировки элементов исследуемого объекта – VII.

Система связи и возбуждения пространственных волн (I) может быть выполнена в различных модификациях. Излучаемые волны являются источником электромагнитных колебаний в квазиоптических структурах типа ОР и ОВ, элементы которых в свою очередь оказывают влияние на источник излучения за счет возвращения объемных волн в область связи от их отражающих апертур, что будет проявляться в изменении интегральных волноводных характеристик ДВ. Поэтому при реализации схемы измерений рис. 2 одними из основных являются блоки III, IV, которые позволяют контролировать КСВ и коэффициенты передачи (K_{II}) МКС.

Блок измерения волноводных характеристик III, представленный на рис. 2, построен на основе стандартного панорамного измерителя КСВН и ослаблений, который состоит из блока генератора качающей частоты (ГКЧ), связанного с индикатором КСВН и ослабления через систему автоматического регулятора мощности (АРМ), направленных ответвителей 4, 5 с детекторными секциями, подключенными к соответствующим разъемам индикатора КСВН. АРМ используется для обеспечения постоянного уровня мощности на входе в исследуемый объект. В зависимости от способа включения ответвителей в измерительную линию, определялись либо КСВ (схема включения ответвителей на рис. 2), либо коэффициенты передачи.

Обработка полученных данных осуществлялась при помощи специально разработанного аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) с интерфейсом USB, при помощи которого на персональный компьютер (ПК) передавались данные измерений для дальнейшей их обработки. Особенностью получения и обработки данных являлось то, что они поступали на ПК синхронно и через равные промежутки времени (0,5 с), что позволяло фиксировать результаты измерений волноводных характеристик с высокой точностью.

Блок контроля и согласования выходной мощности IV состоял из направленного ответвителя 6, в прямое плечо которого включался болометрический или термисторный измеритель мощности 7, а в основной тракт – согласованная нагрузка 8, обеспечивающая малые значения КСВ в передающем тракте установки. При измерении значений K_{II} ответвитель 5 включался в основной тракт перед ответвителем 6, что позволяло проводить автоматический контроль отношений падающей и прошедшей в нагрузку 8 мощностей.

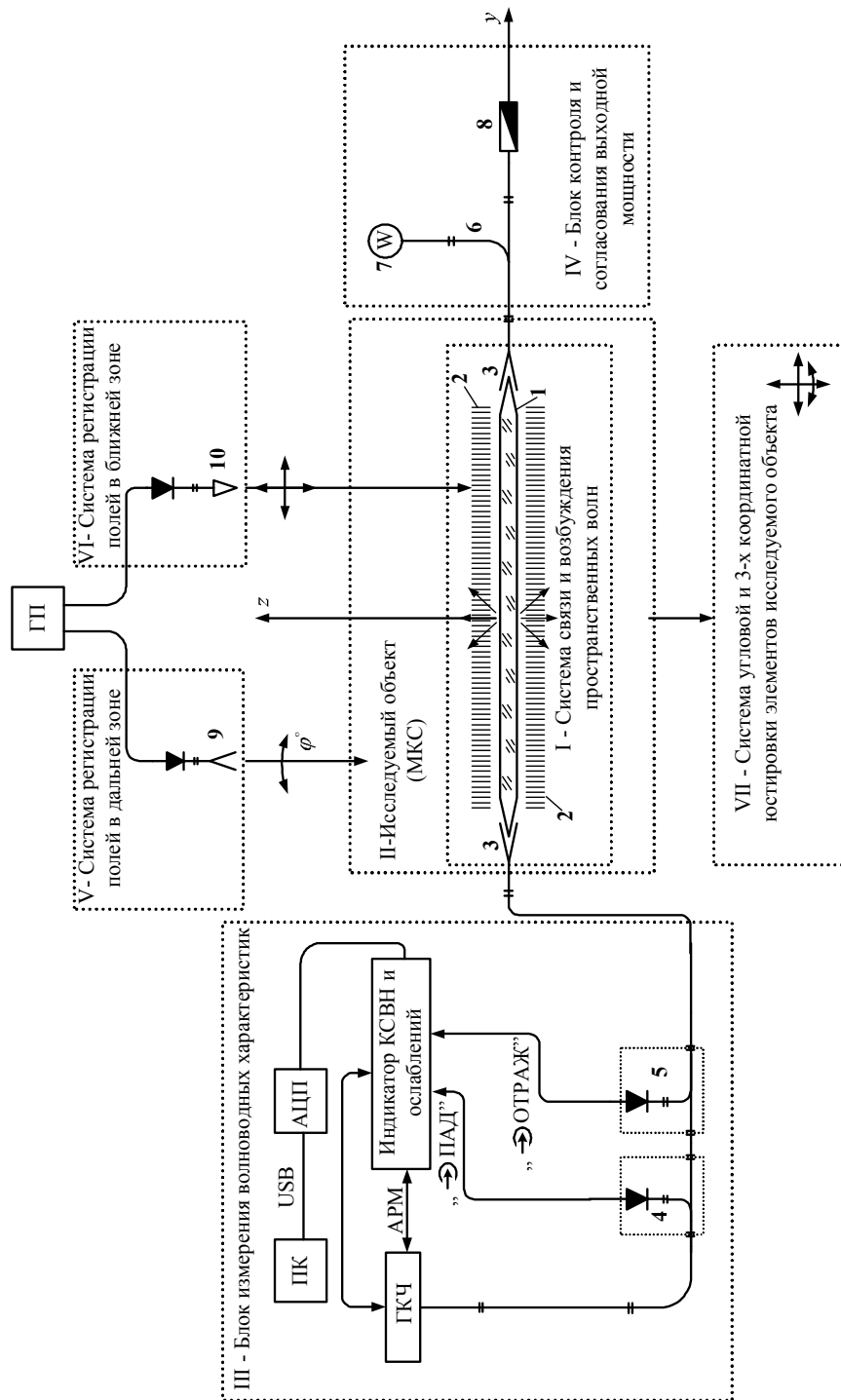


Рис. 2 – Функциональная схема измерения электродинамических характеристик МЭС

Система регистрации полей в дальней зоне V состояла из подвижной рупорной антенны 9 с детекторной секцией, ось вращения которой в E -плоскости проходит через излучающую апертуру и совмещена с вертикальной осью исследуемой излучающей структуры – z , а ось вращения в H -плоскости совпадает с продольной осью ДВ 1 – y . Это обеспечивает регистрацию углов излучения в интервале $\varphi = 10-170^\circ$ с точностью $\Delta\varphi = \pm 0,5^\circ$. Монтаж подвижной части системы регистрации полей выполнен на специальном прецизионном передвижном устройстве, позволяющем устанавливать рупорную антенну в дальней зоне исследуемых полей, которая определяется известным соотношением $z \geq a_m^2/\lambda$, где a_m – максимальный размер апертуры антенны.

В ходе измерения диаграммы направленности (ДН) излучения сигнал, принимаемый рупором, после детектирования поступал на вход «Y» двухкоординатного графопостроителя, вход «X» которого подключен к датчику угла поворота приемного рупора. Таким образом, при перемещении подвижной антенны на графопостроителе фиксируется ДН излучения, которая после преобразования в цифровой вид используется для компьютерной обработки полученных данных.

Экспериментальное исследование полей в ближней зоне необходимо по той причине, что процесс преобразования поверхностных волн в объемные происходит в области системы ДВ-ДР. Блок измерения VI полей в ближней зоне ($z \approx \lambda$) содержит малоразмерный зонд 10 (рис. 2), выполненный в виде диэлектрического клина ($\varepsilon = 2,05$), сопряженного со стандартным металлическим волноводом через согласующий переход. Система индикации поверхностных полей устанавливалась на каретке перемещения, обеспечивающей точность отсчета по координатам x, y, z порядка 0,05 мм. Для проведения измерений необходимо выставить расстояние $z \approx \lambda$ от зонда до исследуемого объекта и включить систему перемещения зонда вдоль оси y . Сигнал с зонда после детектирования поступал на вход ГП, после чего проводилась компьютерная обработка полученных данных. Аналогичным образом амплитудные распределения полей проводились по оси x . Характерные размеры зонда составляли величину порядка 0,1-0,2 λ , что обеспечивало минимальные искажения полей при измерениях.

Система крепления и юстировки элементов исследуемого объекта VII представляла собой общую станину, на которой размещены и закреплены (при необходимости могут перемещаться) стойки крепления и фиксации волноводных трактов (в зависимости от поставленных задач возможно размещение одного или двух трактов), а также юстировочные устройства, на которые крепятся исследуемые объекты (решетки, зеркала и т.д.). Юстировочные устройства были разработаны и выполнены в ИРЭ НАНУ. Они представляют собой систему взаимно перпендикулярных платформ, которые позволяют ориентировать и перемещать решетки и зеркала ОР, ОБ по осям x, y, z с помощью микрометрических винтов, обеспечивающих точность измерений по координатным осям $\pm 0,01$ мм и возможность угловой корректировки $\Delta\varphi \approx 0,1^\circ$.

Описанная функциональная схема была реализована в диапазоне частот $f = 30-80$ ГГц путем использования 3-х комплектов стандартной измерительной аппаратуры и волноводной техники миллиметрового диапазона волн.

5. ОБЩАЯ МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В МНОГОСВЯЗНЫХ КВАЗИОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Исходя из функциональных возможностей представленной на рис. 2 схемы установки, была разработана общая методика моделирования электромагнитных полей в МКС, которая заключается в выполнении следующих операций:

1. *Проведении калибровки основных измерительных элементов тракта СВЧ по методикам [14] и используемых в эксперименте диэлектрических волноводов.*

Калибровка ДВ заключается в определении относительной скорости поверхностной волны от частоты ($\beta_e = F(f)$) серии волноводов различных сечений, либо одного сечения, изготовленных из различных материалов. Для этих целей используется отражательная ДР из прямоугольных брусьев, параметры которой рассчитываются, исходя из условия излучения на центральной частоте под углом $\gamma_n = 90^\circ$, определяемым по формуле:

$$\gamma_n = \arccos(1/\beta_e + n/\kappa). \quad (5)$$

Калибровка ДВ включает в себя несколько этапов:

- согласование ДВ с волноводным трактом, при этом отражательная ДР **2** выводится из зоны взаимодействия с поверхностной волной ($a > \lambda$), и путем оптимизации параметров согласующих переходов **3** достигаются значения КСВ = 1,1-1,2 для заданного диапазона частот;
- получение однолепестковой диаграммы направленности под углом $\gamma_{-1} = 90^\circ$ путем приближения ДР к поверхности ДВ на расстояние $a \leq \lambda$;
- определение углов излучения ДН в зависимости от частоты;
- расчет значений β_e от частоты по формуле (5);
- построение калибровочных характеристик ДВ.

В качестве примера в таблице приведены основные параметры калибруемых ДВ для заданного диапазона частот, а на рис. 3 их характеристики. При переходе в другие поддиапазоны частот процедура калибровки ДВ идентифицируется для объекта с заданными параметрами κ , β_e и ε .

Из сравнения калибровочных характеристик рис. 3 следует, что наименьшую частотную зависимость имеют ДВ из фторопласта (№1, №2) и полистирола (№5). Данный факт необходимо учитывать при постановке серии экспериментов по моделированию полей в излучающих системах МКС.

2. *Определении оптимального значения прицельного параметра a для заданного типа ДВ.*

Оптимальное значение a определяется по минимальным искажениям в лепестках ДН при максимальных значениях их амплитуд на центральной частоте исследуемого диапазона.

3. *Определении параметров заданного типа периодических неоднородностей области связи и ДВ.*

Области значений оптимальных параметров периодических структур и ДВ определяются для заданных режимов излучения пространственных волн по диаграммам Бриллюэна рис. 1, а углы излучений рассчитываются по формулам (3), (4).

Таблица 1 – Параметры используемых в эксперименте диэлектрических волноводов

Номер волновода	Поперечное сечение, мм	Материал
№1	3,4 × 1,9	фторопласт
№2	5,2 × 2,6	фторопласт
№3	5,8 × 3,1	фторопласт
№4	5,2 × 2,6	винипласт
№5	7,2 × 3,4	полистирол
№6	7,2 × 3,4	винипласт

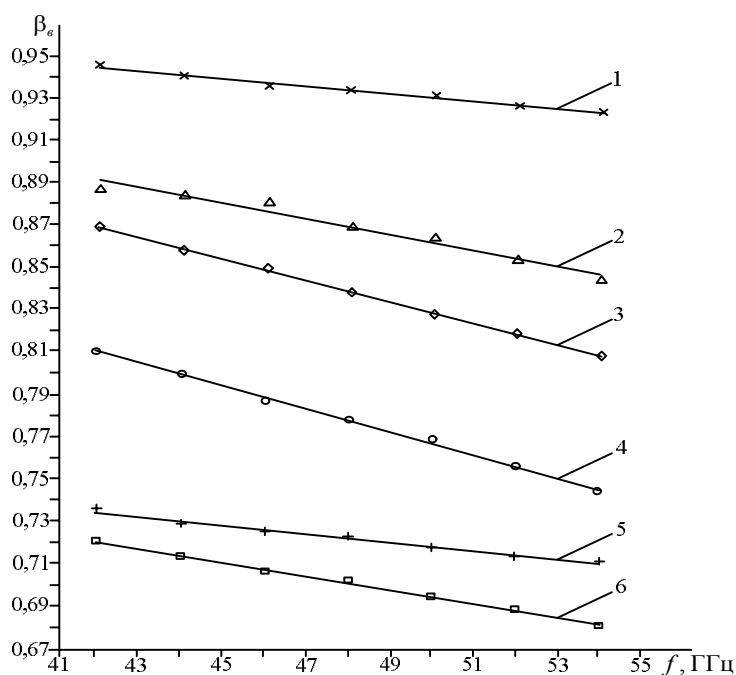


Рис. 3 – Калибровочные характеристики используемых в эксперименте ДВ для заданного диапазона частот

4. Измерения пространственных характеристик области связи (в дальней и ближней зонах) с одновременным, автоматическим контролем их волноводных характеристик.

При проведении данного цикла измерений для конкретной конфигурации системы связи используется установка рис. 2.

5. Измерения электродинамических характеристик МКС заданных модификаций (ОР, ОВ) с последующей компьютерной обработкой и анализом полученных результатов.

Описанная выше методика является общей как для резонансных, так и для волноведущих систем. Однако в зависимости от специфики исследуемых МКС, она может уточняться и дополняться периферийными схемами измерений, например, при определении спектров и добротности ОР системами регистрации полей через элементы связи в зеркалах.

6. ВЫВОДЫ

1. Сформулированы общие принципы моделирования пространственных волн в МКС, которые базируются на идентификации поверхностных полей ЭП и ДВ.
2. Разработана универсальная экспериментальная установка миллиметрового диапазона волн, которая позволяет реализовать моделирование электромагнитных явлений для широкого класса МКС: двухрядных ДР и периодических МДС, многосвязных ОР и ОБ.
3. Разработана общая методика моделирования электромагнитных явлений в МКС, которая концептуально заключается в следующем:
 - проведении калибровки основных измерительных элементов тракта СВЧ, а также используемых в эксперименте ДВ;
 - определении оптимального значения прицельного параметра a для заданного типа ДВ;
 - определении параметров заданного типа периодических неоднородностей области связи и ДВ;
 - измерении пространственных характеристик области связи (в дальней и ближней зонах) с одновременным, автоматическим контролем их волноводных характеристик;
 - измерении электродинамических характеристик МКС заданных модификаций (ОР, ОБ) с последующей компьютерной обработкой и анализом полученных результатов.
4. Разработанная схема экспериментальной установки и общая методика моделирования применимы для всех видов МКС, что особенно важно при изучении электромагнитных полей в объектах, строгое математическое описание которых отсутствует.

THE EXPERIMENTAL PLANT AND MODELING METHOD FOR SPATIAL WAVES IN MULTICOUPLED QUASI-OPTICAL SYSTEMS WITH PERIODIC INHOMOGENETITIES

G.S. Vorobjov, V.O. Zhurba, A.S. Krivets, M.V. Petrovskii, A.A. Rybalko, A.I. Ruban, Yu.V. Shulga

Sumy State University,
2, Rimsky-Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine
E-mail: vp@sumdu.edu.ua

The experimental plant and the general method of modeling of electromagnetic wave processes in multicoupled quasi-optical systems are described. Examples of choosing the optimum regimes of modeling and basic parameters of the investigated electrodynamic systems are shown. The functional scheme of the experimental plant is also described. The general method of modeling of electromagnetic phenomena in resonant and waveguide multicoupled quasi-optical systems is presented for the first time.

Keywords: WAVE, DIFFRACTION GRATING, DIELECTRIC WAVEGUIDE, METAL-DIELECTRIC STRUCTURE, OPEN RESONATOR, ELECTROMAGNETIC RADIATION.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ТА МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ
ПРОСТОРОВИХ ХВИЛЬ У БАГАТОЗВ'ЯЗНИХ КВАЗІОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ
З ПЕРІОДИЧНИМИ НЕОДНОРІДНОСТЯМИ**

**Г.С. Воробйов, В.О. Журба, О.С. Кривець, М.В. Петровський, О.О. Рибалко,
А.І. Рубан, Ю.В. Шульга**

Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, 40007, Суми, Україна
E-mail: vp@sumdu.edu.ua

У даній статті описані експериментальна установка та загальна методика моделювання електромагнітних хвильових процесів у багатозв'язних квазіоптичних системах, що містять періодичні неоднорідності різних модифікацій (стрічкові та відбивні решітки, металодіелектричні структури), на яких відбувається трансформація поверхневих хвиль діелектричного хвилеводу в об'ємні електромагнітні хвилі. Наведені приклади вибору оптимальних режимів моделювання та основних параметрів досліджуваних електродинамічних систем. Описана функціональна схема експериментальної установки, що дозволяє проводити дослідження в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 4-8$ мм. Вперше представлена загальна методика моделювання електромагнітних явищ у резонансних та хвилевідних багатозв'язних квазіоптичних системах.

Ключові слова: ХВИЛЯ, ДИФРАКЦІЙНА РЕШІТКА, ДІЕЛЕКТРИЧНИЙ ХВИЛЕВІД, МЕТАЛОДІЕЛЕКТРИЧНА СТРУКТУРА, ВІДКРИТИЙ РЕЗОНАТОР, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. G.S. Vorobyov, M.V. Petrovsky, V.O. Zhurba, A.I. Ruban, O.I. Belous, A.I. Fisun, *Telecomm. Radio Eng.* **66** No 20, 1839 (2007).
2. G.S. Vorobjov, V.O. Zhurba, A.S. Krivets, Yu.A. Krutko, A.A. Rybalko, *Instrum. Exp. Tech.* **52**, 551 (2009).
3. G.S. Vorob'yov, M.V. Petrovskii, A.S. Krivets, *Radioelectronics and Communications Systems* **49** No7, 38 (2006).
4. G.S. Vorobjov, A.S. Krivets, M.V. Petrovsky, A.I. Tsvyk, A.A. Shmatko, *Telecomm. Radio Eng.* **59** No 10-12, 80 (2003).
5. В.П. Шестопапов, *Генераторы дифракционного излучения* (Київ: Наукова думка: 1991).
6. В.П. Шестопапов, *Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Открытые структуры. Т. 1* (Київ: Наукова думка: 1985).
7. Г.С. Воробьев, В.О. Журба, М.В. Петровский, *Приборы и техника эксперимента* **4**, 74 (2010) (G.S. Vorobjev, V.O. Zhurba, M.V. Petrovsky, A.A. Rybalko, *Instrum. Exp. Tech.* **53**, 536 (2010)).
8. Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, М.В. Петровский и др., *Вісник СумДУ: Серія «Фізика»* № 10 (56), 110 (2003).
9. В.П. Шестопапов, *Дифракционная электроника* (Харьков: Изд-во ХГУ: 1976).
10. Г.С. Воробйов, *Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки»* № 16, 60 (2000).
11. Г.С. Воробьев, К.А. Пушкарев, А.И. Цвык, *Радиотехника и электроника* **42**, 738 (1997).
12. Е.А. Ненашева, О.Н. Трубицина, Н.Ф. Картенко, О.А. Усов, *ФТТ* **41**, 882 (1999) (E.A. Nenasheva, O.N.Trubitsyna, N.F. Kartenko, O.A. Usov, *Phys. Solid State* **41**, 799 (1999)).
13. Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, А.И. Цвык, *Вісник СумДУ* №4(76), 159 (2005).
14. *Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах: Методы и техника* (Ред. Р.А. Валитова, Б.И. Макаренко) (М.: Радио и связь: 1984).