

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.317.328

**С. В. БИРЮКОВ
Л. В. ЩАПОВА**Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВИДЕ ПЛОСКОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛАСТИНЫ В ФОРМЕ КВАДРАТА

Измерение уровня воздействия электрических полей на технические и биологические объекты ещё долгое время будет актуальной задачей. Для решения этой задачи необходимы датчики напряженности электрического поля с заданными метрологическими характеристиками. Целью исследования является создание теоретических предпосылок для расчета плоских датчиков напряженности электрического поля. Доказано, что погрешность датчика не превышает 2 % в пространственном диапазоне измерений $0 < a < 0,14$ и во всем пространственном диапазоне измерения отрицательная. Используя методы расчета электростатических полей, в данной статье исследуется однокоординатный электроиндукционный датчик, в основе которого лежит проводящая пластина в форме квадрата со стороной L и дается оценка его погрешности, вызванная неоднородностью поля. Максимум этой погрешности составляет 2 % в пространственном диапазоне от 0 до $7L$ до источника поля, что позволяет проектировать качественно лучшие датчики, используемые в составе различных измерительных систем широкого применения.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, датчик, погрешность от неоднородности поля.

Введение. Окружающие нас электрические поля неблагоприятно воздействуют как на технические, так и на биологические объекты. Для исследования влияния электрических полей на указанные объекты необходимы датчики и средств измерений на их основе. Разработка таких средств измерений началась с 70-х годов прошлого века. Она проводилась как в России [1 – 5], так и за рубежом [6, 7]. В данной работе исследованию подвергается однокоординатный плоский датчик напряженности электрического поля, выполненный в виде проводящей пластины с квадратными основаниями. Причиной такого исследования послужило то, что в настоящее время на

рынке появляется большое количество приборов для измерения напряженности электрического поля, которые не подтверждены научными исследованиями, статьями, патентами на полезную модель и изобретение. В связи с этим представленные на рынке приборы для измерения напряженности электрического поля ничем не подтверждают свои метрологические характеристики.

Постановка задачи. В физической основе большинства датчиков, используемых в приборах для измерения напряженности электрического поля (ЭП), лежит явление электростатической индукции, то есть появление электрических зарядов на поверх-

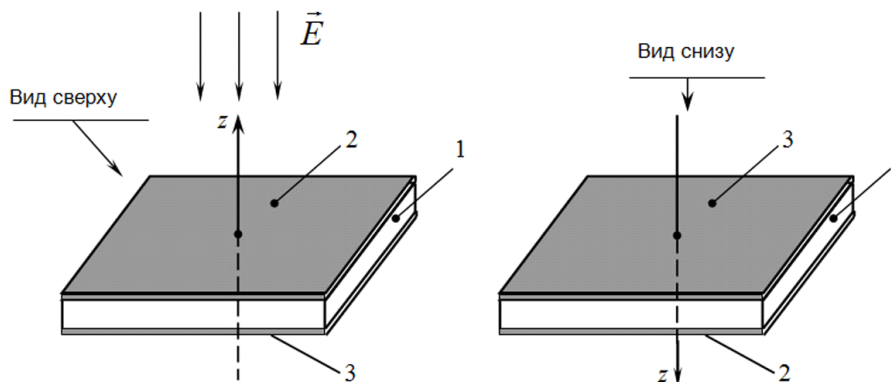


Рис. 1. Датчик напряженности электрического поля с подложкой в форме квадратной пластины

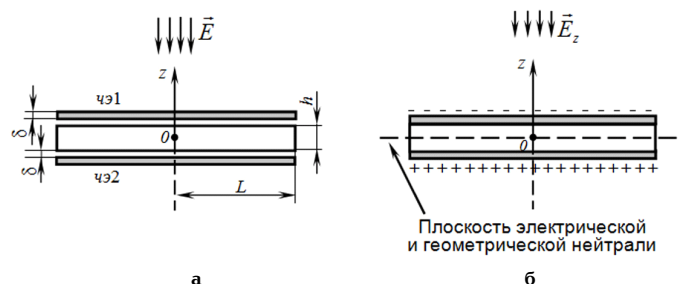


Рис. 2. Конструктивные параметры датчика и его взаимодействие с электрическим полем

ности проводника под действием электрического поля. Такие заряды называются индукционными. В конструктивной основе датчика может лежать как диэлектрическая, так и проводящая подложка. Разница в таких датчиках заключается в том, что датчики с диэлектрической подложкой имеют плавающий потенциал средней точки, а датчики с проводящей подложкой имеют потенциал средней точки, равный потенциалу точки пространства расположения датчика. Нашему исследованию будут подвергаться однокоординатные электроиндукционные датчики с проводящей подложкой в форме квадратной пластины.

Теория. Теория работы датчика основана на рассмотрении проводящей пластины квадратной формы толщиной h и с размерами сторон $x = 2L$ ($h \ll x$), помещенной в однородное и неоднородное квазистатическое ЭП $E = E_0 \cdot \sin \omega t$. Далее по тексту просто E_0 .

Рассмотрим взаимодействие датчика напряженности с электрическими полями различной неоднородности. В качестве таких полей выберем однородное ЭП и поле точечного источника. Однородное поле будет рассматриваться как эталонное, образцовое поле. По отношению к нему будет оцениваться погрешность датчика, работающего в реальных условиях, в которых поля часто бывают неоднородными. Неоднородность поля при этом будет рассматриваться как одна из составляющих при оценке предельной погрешности датчика. Далее будем считать, что погрешность датчика в других неоднородных полях меньше, чем в поле точечного источника. Поле точечного источника выбирается из условия наибольшей неоднородности, которую можно смоделировать при анализе поведения датчика в неоднородном поле. Следует заметить, что имеются еще и другие источники ЭП с большей неоднородностью, чем у точечного источника. К ним можно отнести ЭП

диполя и квадруполь [8–10]. Однако электрические поля этих источников быстро убывают обратно пропорционально третьей и четвертой степени соответственно от расстояния до исследуемой точки поля. На расстояниях, где все-таки эти поля существуют методы измерения, основанные на явлении электростатической индукции непригодны.

Датчик представляет собой проводящую квадратную пластину 1 с размерами сторон $x = 2L$ и толщиной h ($h \ll x$). На двух противоположных поверхностях пластины располагаются проводящие чувствительные элементы 2 и 3, как показано на рис. 1.

Чувствительные элементы 2 и 3, представляющие собой тонкий проводящий слой толщиной δ , имеют одинаковые размеры и форму и расположены на расстоянии ε от поверхности проводящей пластины 1 (рис. 2).

Принятые допущения $\delta \ll h$ и $\varepsilon \ll L$ дают основание считать, что потенциал чувствительных элементов 2 и 3 равен потенциалу проводящей пластины 1, а чувствительным элементом является ничто иное, как сама поверхность пластины. Далее будут приняты дополнительные меры, позволяющие считать проводящий чувствительный элемент поверхностью проводящей пластины. Таким образом, датчик в общем случае представляет ничто иное, как плоскую проводящую пластину с квадратными основаниями.

Датчик в однородном поле. Поместим проводящую квадратную пластину в однородное ЭП перпендикулярно его силовым линиям. Тогда, согласно теории, в пластине произойдет разделение электрических зарядов: положительные заряды переместятся по направлению поля, отрицательные — против этого направления. В результате на одной поверхности пластины индуцируются отрицательные, а на другой — положительные заряды, разграниченные плоскостью электрической и геометрической нейтральности.

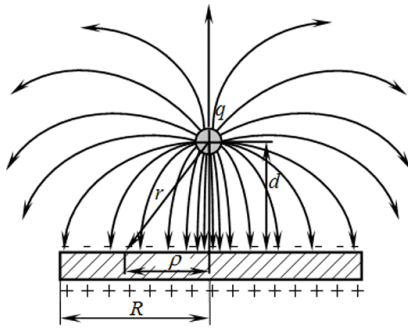


Рис. 3. Вид силовых линий в системе точечный заряд–проводящая квадратная пластина

рали (рис. 2б). Индуцированные на поверхностях пластины внешним полем электрические заряды создадут собственное электрическое поле, направленное противоположно внешнему полю. В результате этого внутри пластины результирующее поле будет равно нулю. При этом все точки пластины будут иметь одинаковый потенциал, равный потенциалу точки пространства расположения пластины.

Величины этих зарядов можно определить из взаимодействия проводящей пластины с однородным ЭП. Решение этой задачи показывает, что на поверхности проводящей плоскости существует только нормальная составляющая E_n напряженности электрического поля, равная напряженности внешнего однородного поля E_0 [11]. Это электрическое поле, согласно теореме Гаусса, и определяет поверхностную плотность электрического заряда [12]

$$\sigma = -2\epsilon\epsilon_0 E_n = -2\epsilon\epsilon_0 E_0, \quad (1)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, окружающая проводящий диск; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная. Как видно из выражения (1), поверхностная плотность зарядов на проводящем диске, находящемся в однородном поле, постоянна. Следовательно, в этом случае заряд распределяется по поверхности проводящей пластины равномерно.

Общий заряд на плоскости проводящего диска можно определить из выражения

$$Q = \iint_S \sigma \cdot dS. \quad (2)$$

Тогда величины зарядов по выражению (2), индуцированные на двух плоскостях проводящей квадратной пластины, можно вычислить по формуле

$$\begin{aligned} Q_0 &= \pm \int_{-L_y}^{+L_y} \int_{-L_x}^{+L_x} 2\epsilon\epsilon_0 E_0 dx dy = \\ &= \pm 2\epsilon\epsilon_0 E_0 \int_{-L_y}^{+L_y} \int_{-L_x}^{+L_x} dx dy = \pm 8\epsilon\epsilon_0 L_x L_y E_0, \end{aligned}$$

где Q_0 — заряд, индуцируемый однородным полем; знак «-» относится к верхней плоскости диска, а знак «+» — к нижней плоскости диска (рис. 2б).

Поскольку пластина квадратная, то $L_x = L_y = L$, тогда заряд будет равен

$$Q_0 = \pm 8\epsilon\epsilon_0 L^2 E_0. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что заряды на поверхностях проводящего диска пропорциональны напряженности электрического поля. Поэтому они могут

выступать мерой напряженности. Если снять их с поверхностей пластины и измерить, то можно получить датчик напряженности электрического поля. Такой датчик был описан в начале статьи. Поскольку датчик имеет два чувствительных элемента, то получается двойной датчик. Поэтому при дифференциальном включении датчика его суммарный, то есть дифференциальный заряд будет удвоен согласно выражению

$$Q_0^{diff} = (+Q_0) - (-Q_0) = 2Q_0 = 8\epsilon\epsilon_0 L^2 E_0. \quad (4)$$

Анализ выражений (3) и (4) для величин зарядов, индуцированных электрическим полем на поверхностях проводящего диска, показывает их зависимость от размера L квадратной пластины.

Датчик в неоднородном поле точечного источника. Поместим проводящую квадратную пластины в поле точечного источника. В качестве точечного источника будем рассматривать положительный точечный заряд q , находящийся на расстоянии d от проводящей пластины. И в этом случае на проводящей пластине с одной стороны индуцируются отрицательные, а с другой — положительные заряды. Линии поля и индуцированные на проводящей пластине заряды представлены на рис. 3.

Воспользовавшись методом изображения в плоскости можно получить потенциал вблизи поверхности проводящей плоскости, нормальную составляющую напряженности ЭП и поверхностную плотность заряда на поверхности проводящего диска

$$\sigma = -\frac{2\epsilon\epsilon_0 d^3}{r^3} E_n, \quad (5)$$

где r — расстояния от заряда q до точки наблюдения, E_n — напряженность неоднородного ЭП в точке наблюдения.

Воспользовавшись формулой (5), можно узнать поверхностную плотность заряда в каждой точке поверхности проводящей пластины. Рассмотрим точку поверхности проводящей пластины на расстоянии ρ от её центра (рис. 3), при условии, если точечный заряд q расположен над центром пластины. Поскольку r в выражении (5) — это расстояние от точечного заряда до точки наблюдения, то выразим его через параметр ρ

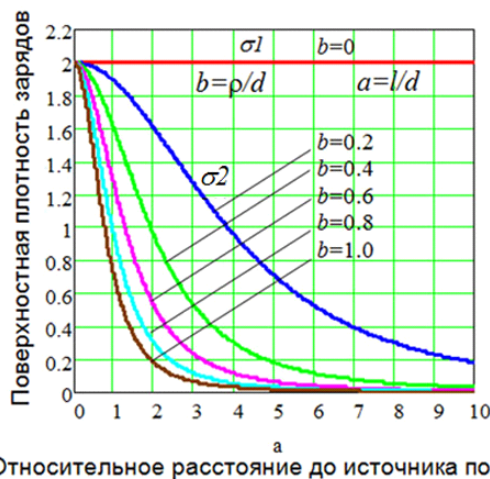
$$r = (d^2 + \rho^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Тогда выражение для поверхностной плотности зарядов в зависимости от расстояния ρ от центра проводящей пластины будет иметь вид

$$\sigma(\rho) = -\frac{2\epsilon\epsilon_0 d^3}{(d^2 + \rho^2)^{\frac{3}{2}}} E_n = -\frac{2\epsilon\epsilon_0}{\left[1 + \left(\frac{\rho}{d}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} E_n. \quad (7)$$

Как видно из выражения (7), поверхностная плотность зарядов на проводящем диске, в отличие от однородного поля, не постоянна по всей площади проводящей пластины и зависит не только от расстояния от центра пластины, но и от расстояния пластины до источника поля d . Следовательно, в этом случае заряд распределяется по поверхности пластины неравномерно.

Величины зарядов, индуцированных на двух плоскостях пластины, формируются внешним неоднородным полем и определяются выражением (2).



Относительное расстояние до источника поля

Рис. 4. Зависимости плотности электрических зарядов на поверхности чувствительных элементов датчика, находящегося в однородном σ_1 и в неоднородном σ_2 электрическом поле

Воспользуемся математическим редактором MathCAD 14 и таблицами интегралов [13], найдем эти заряды

$$Q_H = \pm \iint_s \sigma_n \cdot dS = \int_{-L_y}^{+L_y} \int_{-L_x}^{+L_x} \frac{2\epsilon\epsilon_0 d^3 E_n}{(d^2 + x^2 + y^2)^{3/2}} dx \cdot dy =$$

$$= \pm 8\epsilon\epsilon_0 L^2 \cdot \left(\frac{1}{L^2} \arctan \frac{\frac{L^2}{d^2}}{\sqrt{1 + 2\frac{L^2}{d^2}}} \right) E_H, \quad (8)$$

где знак «-» относится к верхней плоскости диска, а знак «+» — к нижней плоскости диска (рис. 2б); E_H — напряженность внешнего измеряемого поля.

При дифференциальном включении датчика его суммарный дифференциальный заряд будет равен

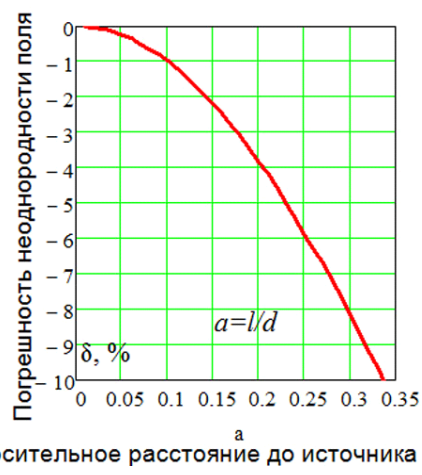
$$Q_H^{qu\phi} = (-Q_H) - (-Q_H) = 2Q_0 =$$

$$= 16\pi\epsilon\epsilon_0 L^2 \left(\frac{1}{L^2} \arctan \frac{\frac{L^2}{d^2}}{\sqrt{1 + 2\frac{L^2}{d^2}}} \right) E_H. \quad (9)$$

Результаты исследования. Проанализируем различия поведения датчика напряженности ЭП в крайних случаях — в однородном (эталонном) поле и в поле точечного источника, обладающего значительной неоднородностью.

В первую очередь, рассмотрим, как распределяются электрические заряды на поверхностях проводящей пластины-датчика. Воспользуемся математическим редактором MathCAD 14 и построим графики распределения плотности электрического заряда на поверхности чувствительных элементов датчика, находящегося в однородном и неоднородном полях в зависимости от относительного расстояния до источника поля $a=L/d$, где L — половина стороны квадратной пластины датчика; d — расстояние от центра датчика до источника поля (рис. 4).

Из рис. 4 следует, что плотность электрического заряда на поверхности датчика в однородном поле постоянна на всем чувствительном элементе, а в неоднородном поле она уменьшается к краю чувстви-



Относительное расстояние до источника поля

Рис. 5. Зависимость погрешности неоднородности поля от относительного расстояния до источника поля

тельного элемента и зависит от a , то есть от удаленности датчика от источника поля. И это уменьшение тем сильнее, чем выше неоднородность поля, то есть чем ближе датчик к источнику поля.

Оценим погрешность датчика от неоднородности ЭП. Для этого воспользуемся выражениями (4) и (8) и нормировкой $a=L/d$, где L — половина стороны квадратной пластины основания датчика; d — расстояние от центра датчика до источника поля. Нормирующий параметр a характеризует близость датчика к источнику поля. Таким образом, чем меньше a , тем дальше датчик находится от источника поля, а поле становится более однородным. Наиболее приемлемый диапазон изменения параметра a от 0 до 1.

С учетом этой нормировки выражение для погрешности от неоднородности ЭП примет вид

$$\delta = \frac{Q_H^{qu\phi} - Q_0^{qu\phi}}{Q_0^{qu\phi}} = \left\{ \frac{1}{a^2} \arctan \frac{a^2}{\sqrt{1 + 2a^2}} - 1 \right\} \times 100 \% . \quad (10)$$

Воспользуемся математическим редактором MathCAD 14 и построим графики погрешности от неоднородности электрического поля в зависимости от параметра a . График погрешности представлен на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что погрешность датчика отрицательная и уже при $a > 0,15$ выходит за пределы 2%. И это уже на расстояниях от источника поля d , равных приблизительно семи линейным размерам l проводящей квадратной пластины датчика ($d \approx 7L$).

Выводы и заключение. Из результатов исследования следует: рассмотренный датчик напряженности ЭП обладает невысокими метрологическими характеристиками (погрешность до 2%) и его пространственный диапазон при этом ограничен предельным расстоянием до источника поля, равным $7L$, где L — линейный размер квадратной проводящей пластины — основы датчика. Кроме этого, датчик дает заниженные значения зарядов в неоднородном поле, что приведет к необъективной оценке влияния напряженности ЭП на технические и биологические объекты.

В заключение хотелось бы предположить, что решение задачи о минимизации погрешности от неоднородности поля кроется в оптимизации раз-

меров чувствительных элементов датчика. Дальнейшие исследования будут проводиться в этом направлении.

Библиографический список

1. Юркевич В. М., Кондратьев Б. Л. О методике измерения напряженности и других характеристик электрического поля // Измерительная техника. 1980. № 5. С. 57–59.
2. Чутунов С. А., Юркевич В. М. Расширение зоны измерения параметров электрического поля при применении зондового метода // Измерительная техника. 1981. № 1. С. 33–35.
3. Климашевский И. П., Кондратьев Б. Л., Полетаев В. А. [и др.]. Измеритель вектора напряженности электрического поля высоковольтного оборудования // Измерительная техника. 1983. № 1. С. 48–49.
4. Biryukov S. V., Kaidanov F. G., Kats R. A., Lozhnikov V. Ya. Calculation and measurement of fields on EHV and UHV substations and near transmission lines // CIGRE-86: International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Report 36-06, Session 27th August-4th September. Paris. 1986. 5 p.
5. Бирюков С. В. Теория и практика построения электроиндукционных датчиков потенциала и напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2000. Вып. 11. С. 89–93.
6. Берент Г. Н., Плейс И. Р. Датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1971. № 6. С. 141–142.
7. Мисакян М., Коттер Ф. Р., Калер Р. Л. Миниатюрный датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1978. № 7. С. 52–55.

8. Даревский А. И., Кухаркин Е. С. Теоретические основы электротехники / под ред. П. А. Ионкина. М.: Высш. школа, 1965. 283 с.

9. Ремизов А. Н. Медицинская и биологическая физика. 3-е изд. испр. М.: Высшая школа, 1999. 616 с.

10. Физики и техники. Справочник по физике. Формулы, таблицы, схемы / Под ред. Х. Штёкера. М.: Техносфера, 2009. 1264 с. ISBN 978-5-94836-205-2, 978-3-81711-720-8.

11. Нейман Л. Р., Демирчан И. С. Теоретические основы электротехники. В 2-х т. Т. 2. Ч. 3. Теория нелинейных электрических и магнитных цепей. Ч. 4. Теория электромагнитного поля. М., Л.: Энергия, 1966. Т. 2. 407 с.

12. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1978. 231 с.

13. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Под ред. К. А. Семендяева. М.: Наука, 1977. 224 с.

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Физика».

ЩАПОВА Лилия Владимировна, студентка гр. ПР-141 радиотехнического факультета.

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29.08.2017 г.

© С. В. Бирюков, Л. В. Щапова

Книжная полка

Щепетов, А. Г. Основы проектирования приборов и систем. Задачи и упражнения. Mathcad для приборостроения / А. Г. Щепетов. – 2-е изд., стереотип. – М. : Юрайт, 2017. – 272 с. – ISBN 978-5-534-03915-3.

Перед вами учебное пособие, которое активно использовалось в ряде вузов при проведении занятий по дисциплине «Автоматизация инженерных расчетов» и другим дисциплинами учебного плана направления подготовки «Приборостроение». Оно получило высокую оценку студентов, а представленные материалы прошли многократную апробацию в учебном процессе. В книге даются начальные сведения о работе в интерактивной программной среде компьютерной математики Mathcad и примеры решения в этой среде типовых задач анализа, синтеза и оптимизации характеристик измерительных устройств. Изложение сопровождается большим количеством примеров с использованием оригинальных алгоритмов и программных модулей, разработанных автором.

Басов, К. А. ANSYS для конструкторов / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2016. – 248 с. – ISBN 978-5-97060-372-7.

В книге рассмотрен Графический интерфейс пользователя (GUI) комплекса метода конечных элементов (МКЭ) ANSYS. В книгу входят общее описание комплекса, сведения о графическом интерфейсе пользователя и типах применяемых конечных элементов. Книга предназначена лицам, изучающим комплекс под руководством инструктора (преподавателя). При написании книги автор опирался на собственный опыт преподавания на кафедре одного из московских технических университетов и учитывал опыт, накопленный учебным центром компании ЕМТ. Книга может быть использована студентами машиностроительных специальностей высших технических учебных заведений и инженерами-исследователями.

Раннев, Г. Г. Интеллектуальные средства измерений : учеб. / Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. – М. : Курс; Инфра-М, 2016. – 280 с. – ISBN 978-5-906818-66-9, 978-5-16-012058-4.

В учебнике в соответствии с требованиями Государственного общеобразовательного стандарта по дисциплине интеллектуальные средства измерений рассмотрены проблемы интеллектуализации измерений, применение нейроструктуры в средствах измерений; измерительные базы знаний; особенности аппаратной и программной частей интеллектуальных средств измерений. Материал базируется на современном понимании и состоянии интеллектуальных средств измерений. Учебник написан для студентов и аспирантов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Приборостроение» и специалистов в области информационно-измерительной техники и технологий, информационных систем и метрологии.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В г. ОМСКЕ

Рассмотрены проблемы мониторинга загрязнений атмосферного воздуха в г. Омске. Проведен анализ загрязнения атмосферы в Октябрьском АО г. Омска за период 2007–2017 гг. Выявлен рост приземных концентраций отдельных загрязняющих веществ. В целях совершенствования системы мониторинга атмосферного воздуха г. Омска предложена информационная система, позволяющая проводить расчётный мониторинг атмосферного воздуха по всему спектру выбрасываемых загрязняющих веществ, получать консолидированную информацию по объектам негативного воздействия, собранную из различных открытых источников информации, определять области возможного расположения источников сверхнормативного загрязнения. Информационная система апробирована в Октябрьском АО г. Омска.

Ключевые слова: атмосфера, загрязнение атмосферы, мониторинг, информационная система, контроль, поиск источника загрязнения, анализ загрязнения атмосферы.

Введение. Система мониторинга загрязнения атмосферного воздуха является ключевым элементом всей системы управления качеством атмосферного воздуха населенного пункта. От полноты и достоверности данных, полученных в ходе наблюдений за загрязнением атмосферы, зависит комплекс мероприятий государственных органов власти в области охраны атмосферного воздуха.

Мониторинг атмосферного воздуха г. Омска осуществляется с использованием шести стационарных постов (ПНЗ) федеральной сети наблюдения и четырех постов региональной сети, два из которых работают в автоматическом режиме [1]. Восемь ПНЗ работают дискретно, осуществляя отбор проб 3 раза в сутки, кроме выходных дней. Наблюдения проводятся по 25 загрязняющим веществам (ЗВ), включая 9 тяжелых металлов. Мониторинг осуществляется исключительно инструментальными методами исследований. Только на основании этого можно обозначить ряд проблем существующей системы мониторинга г. Омска.

Во-первых, перечень контролируемых ЗВ не охватывает даже 10 % всех веществ, выбрасываемых в атмосферу города (по открытым данным из [2] в атмосферу выбрасывается 263 загрязняющих вещества).

Во-вторых, использование исключительно инструментальных методов исследования качества атмосферного воздуха не гарантирует адекватную оценку уровня загрязнения атмосферы в произвольной точке местности, так как ПНЗ может дать адекватный результат определения концентрации только в месте своего расположения [3].

В-третьих, работа большинства ПНЗ в дискретном режиме дает практически неограниченные

возможности недобросовестным природопользователям нарушать нормативы предельно допустимых выбросов в атмосферу (ПДВ) ночью и в выходные дни без должного внимания со стороны контролирующих органов. Найти виновника загрязнения атмосферы на сегодняшний день в г. Омске становится достаточно проблематично уже через сутки после выявления нарушений.

Вопросам поиска источников загрязнения атмосферы (ИЗА) посвящен ряд теоретических исследований как в России, так и за рубежом. При этом можно выделить два направления разработки методов поиска. Первое направление связано с совершенствованием инструментальных методов контроля загрязнений. Так, в работе [4] предложен алгоритм оптимального движения транспортного средства, оснащенного датчиками ЗВ для поиска ИЗА. В работах [5, 6] предлагаются варианты организации системы мониторинга атмосферы с использованием стационарных постов наблюдений, работающих в режиме реального времени. Недостатками предложенных в [4–6] решений может служить как высокая стоимость их внедрения в существующую систему мониторинга, так и использование в работе средств контроля, не прошедших сертификацию в Российской Федерации.

Второе направление связано с разработкой математических моделей определения концентраций ЗВ в атмосферном воздухе и решения так называемой «обратной задачи», т.е. локализации местоположения ИЗА и определения его параметров по результатам единичных измерений концентраций ЗВ и расчётам полей загрязнений. Так, в [7, 8] предлагается способ идентификации ИЗА путем сравнения соотношений концентраций основных ЗВ, присут-

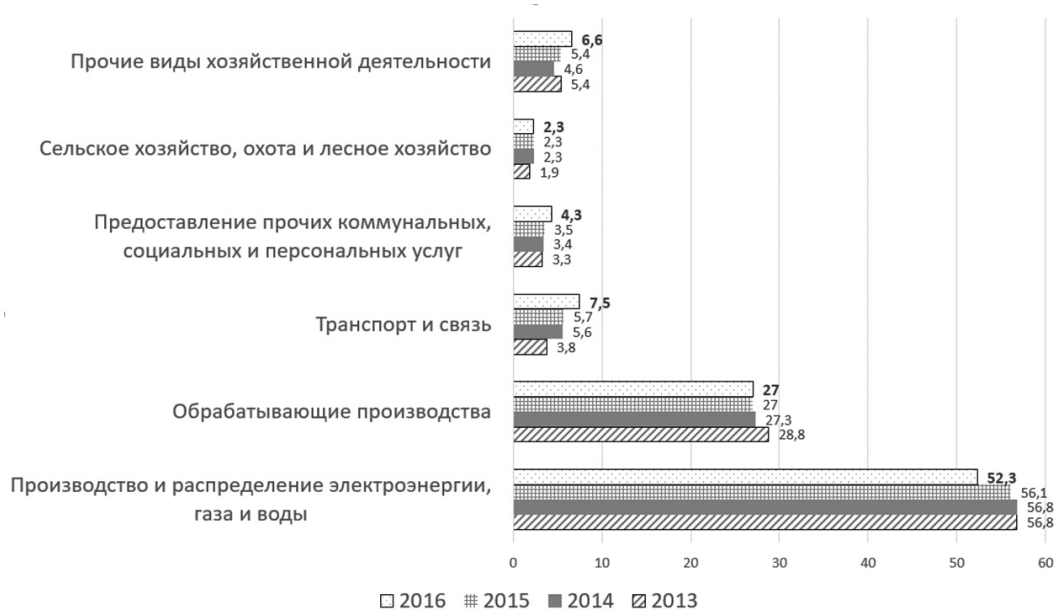


Рис. 1. Распределение выбросов загрязняющих веществ по видам хозяйственной деятельности

ствующих в выбросах при работе предприятий нефтяной промышленности, с аналогичными соотношениями, полученными в результате расчётов полей концентраций по [9]. В работе [10] рассматриваются вопросы идентификации постоянно действующих ИЗА с использованием методов распознавания образов. Главным недостатком работ [7, 8, 10] является то, что разработанный в них математический аппарат применим только к конкретным видам хозяйственной деятельности и не учитывает наличие в одной области поиска ИЗА, относящихся к различным видам производств.

Более универсальное решение представлено в работе [11], где предлагается алгоритм обработки и анализа больших объемов данных, поступающих от ПНЗ, с целью выявления причинно-следственных связей загрязнения атмосферного воздуха. Однако авторы работы [11] не ставят целью поиск ИЗА, ограничиваясь лишь определением направления, откуда могло поступить ЗВ без локализации более-менее оптимальной для дальнейшего поиска области.

Одним из развиваемых подходов к поиску ИЗА за рубежом является Receptor Modeling (метод «отпечатка пальцев»), детально рассмотренный в [12–14]. Однако при использовании Receptor Modeling в России возможны дополнительные юридические проблемы доказательства достоверности полученных результатов в рамках существующих утвержденных на государственном уровне методик расчёта концентраций [15] и измерений.

В качестве достаточно простого и эффективного метода поиска ИЗА, совершившего сверхнормативный выброс, можно выделить работы [16–18]. Суть метода заключается в поиске минимума среднеквадратического критерия рассогласования между вычисленной и измеренной в заданной точке местности концентрацией загрязняющего вещества:

$$J(M, V) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n (C_f(j) - C_m(x_j, y_j, M, V))^2,$$

где $C_f(j)$ — измеренная концентрация загрязняющего вещества в точке j с координатами x_j, y_j ; $C_m(x_j, y_j, M, V)$ — вычисленные по методике [9] значения, M, V — вектора масс и объемов выбросов отдельных источников; N — количество точек измерения.

При этом поиск минимума $J(M, V)$ основан на градиентном методе наискорейшего спуска. Метод является довольно простым в алгоритмическом исполнении и быстрым. Недостатками этого метода является то, что, во-первых, для расчёта концентрации использованы модифицированные формулы [9], которые в настоящий момент являются устаревшей методикой в связи с выходом [15], а во-вторых, метод основан на поиске параметров ИЗА (массы выброса и расхода газовой смеси в устье), местоположение которого заранее известно. При этом локализация возможной области расположения ИЗА не проводится.

Таким образом, для эффективного управления качеством атмосферного воздуха в г. Омске актуальной является задача совершенствования системы мониторинга атмосферного воздуха с целью внедрения в систему эффективного алгоритма определения приземных концентраций всех ЗВ, поступающих в атмосферу города и поиска ИЗА, совершившего сверхнормативный выброс.

Постановка задачи. Целью нашей работы является совершенствование системы мониторинга атмосферного воздуха г. Омска.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- 1) совершенствовать метод определения приземных концентраций ЗВ в г. Омске с использованием утвержденных в РФ методов;
- 2) разработать алгоритм поиска ИЗА, совершившего сверхнормативный выброс;
- 3) разработать информационную систему для мониторинга и управления качеством атмосферного воздуха в г. Омске.

Теория. Анализ загрязнения атмосферного воздуха г. Омска. Оценка выбросов загрязняющих веществ в г. Омске, по данным [1, 19–21], показывает, что за 2013–2016 гг. произошло перераспределение выбросов между промышленными предприятиями различных видов экономической и хозяйственной деятельности (рис. 1). Так, если в 2013 году вклад предприятий производства и распределения электроэнергии, газа и воды составлял 56,8 %, то в 2016 году вклад составил 52,3 %. В то же время вырос вклад транспорта (с 3,8 % в 2013 г. до 7,5 % в 2016 г.),

Максимальные уровни загрязнения атмосферы г. Омска за 2007–2017 гг.

Вещество	Административный округ				
	Кировский	Ленинский	Октябрьский	Центральный	Советский
	Уровень загрязнения, доли ПДК				
Диоксид азота	2,45	1,65	3,10	4,55	3
Аммиак	1,30	5,60	1,40	4,20	6,9
Оксид азота	3,60	2,70	2,30	2,50	3,4
Хлористый водород	3,10	5,50	14,20	9,00	8,1
Сажа	4,70	1,80	4,80	1,00	3,7
Сероводород	1,30	3,00	1,10	1,10	1,4
Оксид углерода	3,20	3,80	5,60	3,00	4,4
Бензол	1,90	0,50	3,10	1,50	1,5
Ксилол	0,50	–	1,50	0,50	2
Толуол	0,20	0,30	1,30	0,20	4,7
Этилбензол	0,50	2,00	5,50	1,50	6
Фенол	2,90	3,00	2,40	1,70	3,5
Формальдегид	4,85	1,50	15,80	2,00	3,7
Пыль	1,40	2,20	3,00	2,00	4,4

предприятий по предоставлению коммунальных услуг (с 3,3 % в 2013 г. до 4,3 % в 2016 г.), прочих предприятий (с 5,4 % в 2013 г. до 6,6 % в 2016 г.). Всё больший вклад в общий выброс ЗВ оказывают средние и мелкие промышленные предприятия, как вновь образующиеся, так и образованные в результате выделения из состава крупных промышленных объектов вспомогательных производств в качестве дочерних предприятий.

Следует отметить, что, в соответствии с нормами законодательства РФ, предприятия, выбрасывающие в атмосферный воздух менее 10 т/год, ЗВ не предоставляют в Росстат информацию о своих выбросах.

В результате складывается парадоксальная ситуация: с одной стороны, статистика показывает, что выбросы ЗВ в атмосферу снижаются (с 213,6 тыс. т в 2013 г. до 200 тыс. т в 2016 г.), а с другой стороны — среднесуточные концентрации ЗВ в атмосферном воздухе растут (табл. 1). Полужирным шрифтом в табл. 1 отмечены уровни загрязнения, достигнутые в 2017 году.

Проведенный нами анализ открытых данных, содержащихся в реестре [2], показал, что реально задекларированный выброс ЗВ всех промышленных предприятий г. Омска составляет более 300 тыс. тонн в год. То есть более 30 % выбросов всех ЗВ в г. Омске приходится на мелкие предприятия, вклад которых в загрязнение атмосферы считается незначительным. При этом, если на ПНЗ г. Омска контролируется 25 веществ, то, по данным [2], количество загрязняющих веществ составляет 263, т.е. экологическая обстановка по более чем 90 % загрязнений не отслеживается, а факты превышения предприятиями нормативов ПДВ выявляются чаще всего в моменты плановых проверок.

Причины нарушения качества атмосферного воздуха в г. Омске. Как указывалось выше, одной из причин нарушения качества атмосферного воздуха в г. Омске является дискретная работа большинства ПНЗ в городе. Очевидно, что отбора проб воздуха три раза в сутки, кроме выходных дней, явно

недостаточно, чтобы избежать сверхнормативного загрязнения атмосферы. Второй причиной является малая эффективность системы установления нормативов ПДВ для предприятий.

Считается, что установление для предприятия норматива ПДВ и выполнение предприятием необходимых мероприятий по сокращению выбросов ЗВ в периоды неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) является достаточным условием, чтобы концентрации ЗВ не превышали санитарно-гигиенических нормативов. При этом установление норматива ПДВ для предприятия основано, прежде всего, на результатах расчёта приземных концентраций ЗВ, создаваемых ЗВ предприятия с учётом фоновой концентрации, т.е. для определения приземной концентрации ЗВ используется формула:

$$C = C_{\text{уст}} + C_{\text{ф}},$$

где C — концентрация ЗВ в атмосферном воздухе, мг/м³; $C_{\text{ф}}$ — значение фоновой концентрации, мг/м³; $C_{\text{уст}}$ — концентрация, создаваемая выбросами предприятия, мг/м³.

Значения $C_{\text{ф}}$ определяются Росгидрометом по результатам проведения многолетних наблюдений за загрязнением атмосферы. Если наблюдение за ЗВ не производится, то значение $C_{\text{ф}}$ определяется по результатам расчёта не менее 95 % всех ИЗА, расположенных в зоне влияния выбросов конкретного предприятия. Для этого в населенном пункте должна быть организована система сводных расчётов. Однако такой системы расчёта в г. Омске на данный момент нет. В результате установление ПДВ для предприятия происходит при допущении, что это предприятие является единственным источником эмиссии ЗВ в атмосферу. Как итог: даже если все предприятия соблюдают установленные нормативы ПДВ и выполняют весь комплекс мер по сокращению выбросов при НМУ, неизбежны случаи нарушений качества атмосферного воздуха и, конкретно в этом случае, привлечь к ответственности ни одного природополь-

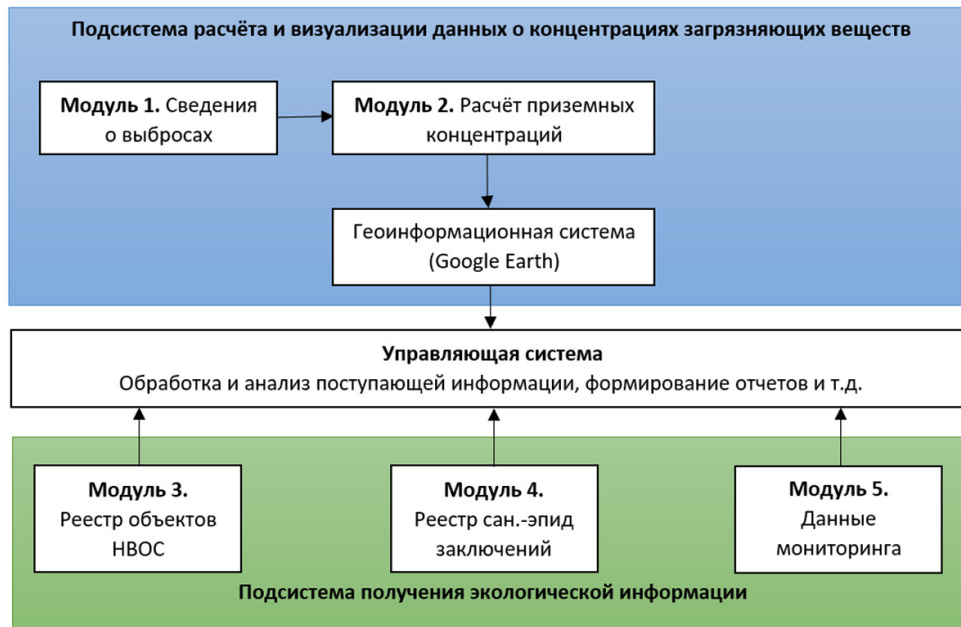


Рис. 2. Схема организации работы информационной системы

зователя невозможно, т.к. сверхнормативного загрязнения нет — все предприятия работают в рамках законодательства.

Решением представленных выше проблем, с нашей точки зрения, может служить совершенствование системы мониторинга атмосферного воздуха в г. Омске.

Результаты экспериментов. Совершенствование системы мониторинга атмосферного воздуха может вестись в двух направлениях. Первое направление связано с расширением наблюдательной сети ПНЗ, их оснащение автоматическими пробоотборными устройствами и перевод в круглосуточный режим работы. Это позволит значительно повысить точность работы системы мониторинга, его оперативность, комплексность и т.д. Однако подобный подход имеет ряд серьезных недостатков. Во-первых, высокая стоимость оборудования. Так, несмотря на то, что проблема недостаточности количества ПНЗ в городе была обозначена в 2011 году в докладе [22] и был запланирован запуск пяти новых ПНЗ до 2012 года, на данный момент план выполнен только на 40 %. Во-вторых, на сегодняшний день по многим ЗВ, выбрасываемым в атмосферу города, отсутствуют законодательно утвержденные методики выполнения измерений (МВИ) концентраций ЗВ в атмосферном воздухе населенного пункта. Например, отсутствуют МВИ концентраций угольной золы, золы тепловых электростанций и т.д., выброс которых в атмосферу г. Омска составляет более 40 000 т/год. В-третьих, ПНЗ не могут охватить весь город и показать реальное значение концентрации ЗВ в любой точке населенного пункта. К примеру, исследование [23] показывает, что репрезентативность данных ПНЗ о концентрациях ЗВ в атмосфере г. Санкт-Петербурга составляет примерно 300 метров и для охвата всей площади города необходимо порядка 5000 ПНЗ.

Второе направление работ связано с введением в систему мониторинга расчётных методов контроля загрязнений, позволяющих определять концентрации ЗВ в атмосфере в зависимости от метеорологических условий.

Подобные системы активно используются в крупных городах РФ, например, в Санкт-Петербурге [23],

Казани [24] и др. Достаточно продолжительное время трудности внедрения расчётных систем мониторинга в городах РФ объяснялись прежде всего большими финансовыми и временными затратами на начальном этапе разработки системы — требовалось практически вручную обрабатывать большие массивы исходных данных по каждому ИЗА (например, в г. Омске их более 16 000), организовывать полевые исследования транспортных потоков и т.д. В своей работе мы предлагаем более простой способ организации сводных расчётов в г. Омске.

Нами разработан прототип информационной системы, обеспечивающий обработку, анализ и хранение данных об ИЗА. Информационная система построена по модульному принципу, где каждый модуль может выступать как в виде самостоятельной программы, так и обмениваться информацией с другими модулями системы, обеспечивая комплексный подход к обработке экологической информации, полученной из различных источников информации. Схема организации работы информационной системы представлена на рис. 2.

Модуль 1 «Сведения о выбросах» предназначен для получения информации об ИЗА города. При этом информация предоставляется в виде части проекта ПДВ (в формате Excel). Это позволяет поддерживать базу данных по ИЗА в актуальном состоянии при минимальных затратах времени. Учитывая, что, согласно действующему законодательству, при разработке проектов нормативов ПДВ, предприятия могут использовать локальные системы координат для описания местоположения ИЗА, в модуле реализован алгоритм преобразования локальных координат в систему WGS-84.

Модуль «Расчёт приземных концентраций» реализует положения методики [15] для расчёта приземных концентраций от всех ИЗА при заданных метеорологических условиях. Пример результатов работы модуля представлен на рис. 3.

Данные полученные в результате расчётов в модуле позволяют рассчитывать фоновые концентрации ЗВ, не контролируемых на ПНЗ. Так, фоновая концентрация в расчётной точке определяется по формуле:

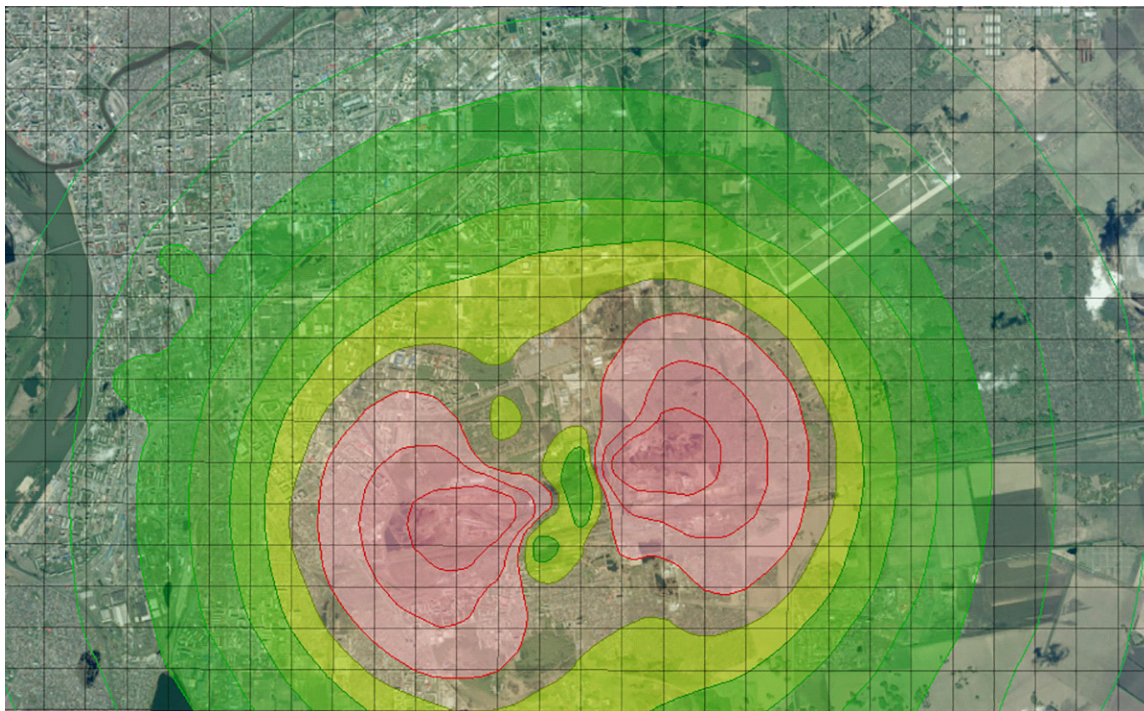


Рис. 3. Изолинии концентраций диоксида серы в Октябрьском АО г. Омска при произвольном направлении ветра

$$C_{\phi} = \frac{C_r}{\sqrt{1+V^2}} \cdot e^{1.2728 \cdot \sqrt{\ln(1+V^2)}},$$

где C_{ϕ} — фоновая концентрация загрязняющего вещества, мг/м³; C_r — среднегодовая концентрация загрязняющего вещества, мг/м³; V — коэффициент вариации концентраций в рассматриваемой точке, определяемый по формуле:

$$V = \frac{\sigma}{C_r^2},$$

где σ — дисперсия концентраций.

Среднегодовая концентрация (C_r) определяется по формулам [15], с учётом розы ветров.

Модуль 3 «Реестр объектов НВОС» предназначен для чтения сведений о выбросах ЗВ из реестра НВОС [2], в т.ч. при наличии доступа к служебной части реестра, сведений о параметрах ИЗА. Основная задача модуля — обработка сведений о выбросах ЗВ в атмосферу города и определение перечня веществ, выбросы которых могут создавать концентрации, превышающие предельно допустимые концентрации (ПДК) в атмосфере.

Определение перечня веществ основано на расчёте реального и требуемого параметра потребления воздуха по [25]. Параметр реального потребления воздуха определяется по формуле:

$$ПВ_p = \frac{M}{C},$$

где M — суммарный выброс ЗВ от всех ИЗА города, тыс. тонн; C — максимальная концентрация ЗВ, создаваемая всеми ИЗА города, мг/м³.

Значение C может задаваться как по результатам многолетних наблюдений на ПНЗ города, так и по результатам расчёта максимальных концентраций в модуле 2 информационной системы.

Параметр требуемого потребления воздуха определяется по формуле:

$$ПВ_m = \frac{M}{ПДК},$$

где ПДК — предельно допустимая концентрация ЗВ, мг/м³.

Если выполняется условие:

$$ПВ_m > ПВ_p,$$

то, при существующем объеме выброса, выбросы ЗВ могут создавать концентрации, превышающие ПДК.

Полученный перечень может использоваться, например, для определения первоочередных мероприятий по охране атмосферного воздуха в г. Омске.

Модуль 4 «Реестр санитарно-эпидемиологических заключений» считывает в автоматическом режиме данные из реестра [26] по заключениям Роспотребнадзора на проекты ПДВ предприятий и хранит полученные данные в хронологическом порядке. Модуль является вспомогательным и позволяет восстановить, при необходимости, всю «историю» предприятия по установлению нормативов ПДВ за всё время работы начиная с 2007 года.

Модуль 5 «Данные мониторинга» предназначен для автоматического чтения и накопления данных о среднесуточных концентрациях ЗВ в атмосфере г. Омска из [27]. Полученные данные позволяют отслеживать тенденции изменения концентраций ЗВ в зависимости от периода года, метеорологических условий, района расположения ПНЗ и т.д. На сегодняшний день база данных по мониторингу атмосферы на ПНЗ содержит информацию за 10 лет (с 2007 по 2017 год) и насчитывает свыше 26 000 измерений.

Разработанная информационная система позволяет:

1. Получать данные об ИЗА промышленных предприятий из различных источников информации и предоставлять «историю» работы предприятия за многолетний период.

2. Рассчитывать приземные концентрации всех ЗВ, выбрасываемых в атмосферу города.

3. Определять перечень веществ, которые могут создавать концентрации в атмосфере, превышающие ПДК.

4. Получать данные о тенденциях изменения концентраций ЗВ в атмосфере города и рассчитывать фоновые концентрации ЗВ.

Одновременно с этим, создание базы данных по ИЗА города и поддержании её в актуальном состоянии не требует серьезных временных и финансовых затрат. На базе разработанной информационной системы разработан алгоритм поиска ИЗА, повлекшего сверхнормативное загрязнение атмосферного воздуха.

Алгоритм поиска источника загрязнения атмосферы, совершившего сверхнормативный выброс. Алгоритм использует положения, изложенные в [28]. Алгоритм построен, исходя из предположения о том, что на начальном этапе поиска ИЗА, совершившего сверхнормативный выброс, известна следующая информация о большинстве ИЗА в предполагаемом районе поиска:

- местоположение (географические координаты);
- утвержденные нормативы ПДВ для ИЗА;
- параметры ИЗА (высота, скорость выхода газовой смеси (ГВС) из устья, расход ГВС и её температура).

Подобная информация может быть запрошена из базы данных представленной выше информационной системы.

Учитывая то, что сверхнормативное загрязнение окружающей среды может вызвать как известный ИЗА с установленными нормативами ПДВ, так и не учтенный ранее ИЗА, возможны несколько вариантов сверхнормативного загрязнения атмосферы:

1. Один или несколько известных ИЗА превысили установленные ПДВ для ЗВ, контролируемого инструментальными методами.

2. Выброс осуществили один или группа рядом расположенных ИЗА, не учтенных в информационной системе и ЗВ контролируется инструментальными методами.

3. Один или несколько известных ИЗА превысили установленные ПДВ для вещества, контроль которого осуществляется расчётным методом.

Для осуществления поиска ИЗА необходима информация о метеорологических условиях в момент обнаружения нарушения (скорость и направление ветра, температура воздуха), а также, для вариантов 1 и 3, данные о концентрациях ЗВ на ПНЗ.

Алгоритм поиска следующий:

1. Если ЗВ контролируется инструментальными методами на ПНЗ, на первом этапе предполагаем, что сверхнормативный выброс осуществил известный источник (вариант 1).

1.1. Расчётом определяем концентрацию загрязняющего вещества (C_i), создаваемую каждым известным ИЗА, в точке расположения ПНЗ, учитывая при этом метеорологические параметры.

1.2. Используя полученные значения C_i , определяем максимально разовую фоновую концентрацию по упрощенной формуле [15]:

$$C_{\phi} = 0,4 \max(C_i).$$

1.3. Поиск ИЗА осуществляем для источников, которые создают расчётную концентрацию в точке ПНЗ, которая отвечает условию:

$$C_i \geq C_{\phi}.$$

1.4. Для ИЗА, не участвующих в поиске, рассчитываем коэффициент G :

$$G = \sum_{i=1}^n C_i.$$

1.5. Рассчитываем функционал J по формуле:

$$J = \sum_{i=1}^n ((C_{изм}^i - G) - C)^2,$$

где $C_{изм}^i$ — измеренная концентрация загрязняющего вещества на ПНЗ, мг/м³; C — суммарная расчётная концентрация загрязняющего вещества, создаваемая всеми ИЗА, участвующими в поиске.

1.6. Варьируя величиной массового выброса каждого ИЗА, минимизируем функционал J , например, используя метод, изложенный в [16].

1.7. Принимаем за значения фактических массовых выбросов загрязняющих веществ ($m_{иф}$) основных ИЗА значения массовых выбросов, при которых достигается минимум функционала J ;

1.8. Если для ИЗА выполняется условие:

$$m_{иф} > m_{пгв},$$

где $m_{пгв}$ — это установленный для конкретного ИЗА норматив ПДВ, то ИЗА может относиться к источникам, совершившим сверхнормативный выброс.

2. Если последовательность действий 1.1 — 1.8 не выявила ИЗА, которые могли превысить значения ПДВ, то нарушение качества атмосферного воздуха произошло по вине не учтенного ранее ИЗА и его поиск осуществляется следующим образом (вариант 2):

2.1. Рассчитываем суммарную концентрацию загрязняющего вещества (C_{max}), создаваемую всеми известными ИЗА в точке расположения ПНЗ.

2.2. Область, расположенную с наветренной стороны ПНЗ и удаленную на расстояние до 10 км, разбиваем на равные квадраты со стороной 500 м.

2.3. В каждом квадрате, начиная с ближайшего от ПНЗ, подбираем такие параметры ИЗА и массовый выброс, при которых выполняется одно из условий:

$$C_p \geq C_{гон}, \quad (1)$$

$$0,9C_{гон} \leq C_p < C_{гон}, \quad (2)$$

$$0,7C_{гон} \leq C_p < 0,9C_{гон}, \quad (3)$$

$$C_p < 0,7C_{гон}, \quad (4)$$

где $C_{гон}$ — концентрация, создаваемая неизвестным ИЗА, которая приводит к нарушению качества атмосферного воздуха. $C_{гон}$ определяется как разность между $C_{изм}$ и C_{max} .

В зависимости от полученных значений каждый квадрат области определяется следующим образом:

1. Если выполняется условие (1) — квадрат наиболее вероятного расположения ИЗА.

2. Если выполняется условие (2) — квадрат вероятного расположения ИЗА.

3. Если выполняется условие (3) — квадрат наименее вероятного расположения ИЗА.



Рис. 4. Концентрации группы суммации [ацетон, фурфурол, формальдегид и фенол] при северо-восточном направлении ветра

4. Если выполняется условие (4) — квадрат, в котором расположение ИЗА невозможно.

2.4. По результатам расчётов выстраивается графическая карта с определением областей наиболее вероятного, вероятного и наименее вероятного расположения ИЗА и выполняются мероприятия по поиску неучтенного ИЗА на местности.

3. Если один или несколько известных ИЗА превысили установленные ПДВ для вещества, контроль которых осуществляется расчётным методом, используя [15], рассчитывается поле концентраций при заданных метеоусловиях и за источники возможного сверхнормативного загрязнения принимаются ИЗА, вклад которых в суммарную концентрацию составляет более 80 %.

Обсуждение результатов. С использованием разработанной информационной системы было проведено исследование загрязнения атмосферного воздуха в Октябрьском АО г. Омска. Расчёт приземных концентраций проводился с учетом выбросов 63 крупнейших промышленных предприятий округа. При расчёте учитывались сезонность работы котельных, режим работы предприятий, а также возможные залповые выбросы, например, при розжиге котлов ТЭЦ.

Так было определено, что предприятия Октябрьского АО выбрасывают в атмосферу города 142 ЗВ, которые создают 25 групп суммаций, т.е. в атмосфере округа могут создаваться такие условия, при которых воздействие одних ЗВ будет усиливаться другими.

Периодически в Октябрьском АО могут создаваться метеорологические условия, при которых концентрации ЗВ превышают ПДК, однако расположенные в административном округе посты не могут зафиксировать их. Например, при северо-восточном ветре уровень загрязнения по группе суммации [ацетон, фурфурол, формальдегид и фенол] может превышать значение 1 ПДК, однако ПНЗ это превы-

шение не зафиксирует, что наглядно представлено на рис. 4, где штриховыми линиями отмечены четыре области, в которых уровень загрязнения составляет от 1 до 5 ПДК. Аналогичная ситуация может складываться и в отношении таких контролируемых на ПНЗ веществ, как сажа, оксид азота и др.

Кроме этого, анализ данных мониторинга атмосферы на ПНЗ г. Омска за 2007–2017 гг. показал, что в Октябрьском АО:

1. Максимальные уровни загрязнения атмосферы по всем контролируемым на ПНЗ веществам достигались при метеоусловиях, не относящихся к НМУ, т.е. при нормальной работе предприятий.

2. Количество превышений уровня загрязнения по гидрохлориду в 2017 году увеличилось по сравнению с 2016 годом в 3 раза (6 случаев превышений в 2017 году). Максимальный уровень загрязнения по гидрохлориду наблюдался в 2010 году и составил 14,2 доли среднесуточной ПДК. В 2017 году максимальный уровень загрязнения гидрохлоридом составляет 4,7 ПДК среднесуточной. Одновременно с этим прослеживается тенденция к росту уровня загрязнения атмосферы этим веществом (рис. 5).

Наибольшее количество превышений ПДК в Октябрьском АО за последние 10 лет наблюдается по формальдегиду (310 случаев за 10 лет, в т.ч. 10 в 2017 году).

Выводы и заключение. Обеспечение надлежащего качества атмосферного воздуха в населенном пункте невозможно без профилактики нарушений установленных нормативов. Не менее актуальной задачей является поиск ИЗА, совершившего сверхнормативный выброс.

Система мониторинга атмосферного воздуха г. Омска содержит ряд недостатков, усложняющих контроль качества атмосферного воздуха и поиск ИЗА. Сеть ПНЗ в г. Омске охватывает всего около 10 % всех выбрасываемых в атмосферу ЗВ, большинство ПНЗ работают дискретно и не могут пре-



Рис. 5. Максимальные уровни загрязнения гидрохлоридом (доли ПДК среднесуточной)

доставить информации о загрязнении в выходные дни, когда наиболее вероятно нарушение предприятиями установленных нормативов ПДВ.

Использование современных расчётных методов мониторинга позволяет определять зоны возможного превышения уровней загрязнения и при этом определять группы веществ, обладающих эффектом суммации вредного воздействия на организм человека без использования дорогостоящей аппаратуры. Также имеется возможность определять ИЗА с максимальным вкладом в уровень загрязнения в любой заданной точке местности при заданных метеорологических условиях.

В целях совершенствования системы мониторинга г. Омска нами разработана информационная система, использующая расчётные методы мониторинга, которая позволяет:

1) определять фоновое загрязнение по неконтролируемому на ПНЗ ЗВ, повышая тем самым точность установления ПДВ для предприятий;

2) реализованный алгоритм поиска ИЗА позволяет искать как ранее установленные ИЗА, превысившие норматив ПДВ, так и неизвестные ИЗА, выброс которых спровоцировал повышенный уровень загрязнения.

В сочетании с инструментальными методами контроля информационная система позволяет проводить анализ концентраций контролируемых веществ, выявлять тенденции изменения уровня загрязнения, а также проводить эффективный поиск ИЗА.

Библиографический список

1. Доклад об экологической ситуации в Омской области за 2016 год / Министерство природных ресурсов и экологии Омской области. Омск: Омскбланкиздат, 2016. 318 с. ISBN 978-5-8042-0541-7.
2. ПТО УОНВОС. Общедоступная информация государственного реестра объектов НВОС. URL: <https://onv.fsrpn.ru/#/public/root> (дата обращения: 05.06.2017).
3. Штриплинг Л. О., Баженов В. В., Калинин Ю. В. Определение источника сверхнормативного загрязнения атмосферы населенного пункта // Омский научный вестник. 2012. № 2 (114). С. 211–215.

4. Bayat B., Crasta N., Li H. [et al.]. Optimal search strategies for pollutant source localization // Intelligent Robots and Systems (IROS), October 9–14, 2016. NY: IEEE / RSJ International Conference on. P. 1801–1807. ISBN 978-1-5090-3762-9.

5. He T., Zhang S. Application of Localization Algorithm in Monitor System of Pollution Emergency // Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), June 24–26, 2011. Nanjing, China: IEEE / International Conference on. P. 7402–7405. DOI: 10.1109/RSETE.2011.5966080.

6. Bathiya B., Srivastava S., Mishra B. Air Pollution Monitoring using Wireless Sensor Network // Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), December 19–21, 2016. Pune, India: IEEE International WIE Conference on. P. 112–117. DOI: 10.1109/WIECON-ECE.2016.8009098.

7. Гендель Г. Л., Сосновцева Е. В., Клейменова И. Е. [и др.]. Способ идентификации источников несанкционированных выбросов как инструмент повышения экологической и промышленной безопасности объектов ОГХК // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 10. С. 6–10.

8. Пат. 2466433 Российская Федерация, МПК G 01 W 1/00. Способ идентификации источника выброса вредных веществ в атмосферу / Гендель Г. Л., Сосновцева Е. В., Клейменова И. Е., Клейменов Ф. В. № 2011128951/28; заявл. 12.07. 11; опубл. 10.11.12, Бюл. № 31.

9. ОНД-86. Методика расчёта концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Л.: Госкомгидрометеоздат, 1987. 9 с.

10. Трунин Е. Г. Идентификация источников загрязнения атмосферного воздуха при хранении сыпучих грузов в речных портах // Транспортное дело России. 2014. № 1. С. 34–35.

11. Zhu J. Y., Zheng Y., Yi X. [et al.]. A Gaussian Bayesian Model to Identify Spatio-Temporal Causalities for Air Pollution Based on Urban Big Data // Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHP), April 10–14, 2016 IEEE Conference on. San Francisco, CA, USA. P. 3–8. DOI: 10.1109/INFOCOMW.2016.7562036.

12. Hopke P. K. Recent developments in receptor modeling // Journal of Chemometrics. 2003. Vol. 17, Issue 5. P. 255–265. DOI: 10.1002/cem.796.

13. Hopke P. K. Receptor Modeling for Air Quality Management. Vol. 7, 1st Edition. Amsterdam: Elsevier Science, 1991. 328 p. ISBN 978-0-0808-6834-9.

14. Hopke P. K. A Guide to Positive Matrix Factorization. URL: <http://people.clarkson.edu/~phopke/PMF-Guidance.htm> (дата обращения: 27.09.2017).

15. Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе: приказ Минприроды Российской Федерации от 06 июня 2017 г. № 273. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_222765/ (дата обращения: 05.06.2017).
16. Степанченко И. В., Камаев В. А. О структуре системы экологического мониторинга атмосферного воздуха города // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. 2014. № 4 (54). С. 132–138.
17. Крушель Е. Г., Степанченко И. В. Исследование чувствительности алгоритма идентификации режимных параметров стационарных источников выбросов к исходным данным // Научные труды Sworld. 2013. Т. 6, № 3. С. 68–76.
18. Степанченко И. В. Исследование метода дистанционной идентификации режимных параметров стационарных источников выбросов // Фундаментальные исследования. 2014. № 12-1. С. 63–66.
19. Доклад об экологической ситуации в Омской области за 2013 год / Министерство природных ресурсов и экологии Омской области. Омск: Минприроды, 2014. 46 с.
20. Доклад об экологической ситуации в Омской области за 2014 год / Министерство природных ресурсов и экологии Омской области. Омск: Стивэс, 2015. 258 с.
21. Доклад об экологической ситуации в Омской области за 2015 год / Министерство природных ресурсов и экологии Омской области. Ижевск: Принт-2, 2016. 312 с.
22. Доклад об экологической ситуации в Омской области за 2010 год / Министерство природных ресурсов и экологии Омской области. Омск: Минприроды, 2011. 31 с.
23. Недре А. Ю., Азаров В. Н., Недре Ю. А. Использование сводных расчётов уровней загрязнения атмосферы при выборе градостроительных решений в рамках оптимизации городской транспортной схемы // Интернет-вестник ВолГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. № 2 (22). С. 1–7.
24. Шагидулина Р. А., Шагидулина А. Р. Развитие системы расчётного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха г. Казани промышленными предприятиями // Экология и промышленность России. 2013. № 5. С. 52–54.
25. РД 52.04.186–89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1991. С. 696.
26. Реестр санитарно-эпидемиологических заключений на проектную документацию. URL: <http://fp.crc.ru/doc/?type=max> (дата обращения: 05.06.2017).
27. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Обь-Иртышское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». URL: <http://omsk-meteo.ru> (дата обращения: 27.09.2017).
28. Пат. 2161321 Российская Федерация, МПК G 01 W 1/00. Способ контроля за выбросами загрязняющих веществ источниками загрязнения атмосферы / Колодий В. П., Киселев В. И. № 98114132/28; заявл. 14.07.98; опубл. 27.12.00, Бюл. № 36.

ШТРИПЛИНГ Лев Оттович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Промышленная экология и безопасность» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

Адрес для переписки: los@omgtu.ru

БАЖЕНОВ Владислав Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность» ОмГТУ.

Адрес для переписки: bvv36@yandex.ru

ВАРАКИНА Наталья Сергеевна, аспирант кафедры «Промышленная экология и безопасность», ассистент кафедры «Промышленная экология и безопасность» ОмГТУ.

Адрес для переписки: n.s.v91@mail.ru

КУПРИЯНОВА Наталья Петровна, аспирант кафедры «Промышленная экология и безопасность»; главный специалист-эксперт отдела санитарного надзора Управления Роспотребнадзора по Омской области. Адрес для переписки: grn-knp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.10.2017 г.

© Л. О. Штриплинг, В. В. Баженов, Н. С. Варакина, Н. П. Куприянова

Книжная полка

Бунаков, П. Ю. Технологическая подготовка производства в САПР / П. Ю. Бунаков, Э. В. Широких. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 208 с. – ISBN 978-5-97060-527-1.

Книга учит решать вопросы технологической подготовки производства и основана на конкретных задачах, решаемых на машиностроительных предприятиях — построение модели детали и сборочного узла, проектирование процесса изготовления, в том числе управляющей программы для станка с ЧПУ и разработку расчетно-аналитического модуля конструкторско-технологического назначения. Издание предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Технология машиностроения», специализация «САПР технологических процессов», а также будет полезна студентам ссузов, конструкторам и технологам машиностроительных предприятий.

Клепиков, В. В. Технология обработки зубчатых колес / В. В. Клепиков. – М. : Инфра-М, 2017. – 412 с. – ISBN 978-5-16-012469-8, 978-5-16-105616-5.

Изложен системный подход к применению результатов исследований технологических систем производства зубчатых колес. Приведены результаты теоретических, экспериментальных и производственных исследований элементов технологических систем производства зубчатых колес. Раскрыты технологические возможности основных операций и технологических процессов. Раскрыты пути повышения эффективности процессов обработки зубчатых колес. Монография рассчитана на специалистов, работающих в области машиностроения в целом и производства зубчатых колес в частности, может быть полезна также преподавателям и студентам вузов машиностроительного профиля.

ГИБРИДНАЯ 3D ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ГОЛОВКА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ И БЕСКОНТАКТНЫХ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В статье рассматривается гибридная 3D измерительная головка, состоящая из контактной измерительной головки касания с полым рубиновым сферическим наконечником радиусом r_n и введенной внутрь нее разработанной бесконтактной волоконно-оптической измерительной головкой. Разработанная 3D головка может использоваться для контактных измерений с триггерным выходным сигналом $U_{\text{вых1}} \sim 1(r-r_n)$ и может измерять бесконтактно:

- 1) с линейным выходным сигналом как у головки отклонения;
- 2) со вторым триггерным выходным сигналом $U_{\text{вых2}} \sim 1(r-r_{nc})$, где r_{nc} — радиус пространственно-чувствительной полусферы при $r_{nc} > r_n$ как у головки касания;
- 3) в режиме допускового контроля для гибридного контактно-бесконтактного способа измерений с двумя триггерными перепадами сигнала $U_{\text{вых3}} \sim 1(r-r_n) - 1(r-r_{nc})$ и управляемой шириной поля допуска $r_d = r_{nc} - r_n$.

В статье описаны принцип действия и узлы разработанной головки, рассчитаны основные тактико-технические характеристики, показаны технологические возможности для их реализации.

Ключевые слова: измерительная головка, головка касания, головка отклонения, координатная измерительная машина, координатные измерения.

Введение. Успешное развитие ракетно-космической техники невозможно без обеспечения высокого качества изделий и, в частности, высокоточных координатных измерений геометрических параметров изделий сложной формы широко распространенными контактными головками касания (рис. 1) на координатных измерительных машинах (КИМ). Существенной проблемой таких измерений является ограничение между стремлением к высокой точности измерений, уже достигающей значений не более $N \approx 1,0 \dots 1,5$ мкм, за счет вынужденного снижения производительности, контроля и увеличения времени измерений [1]. Для малых объектов с небольшим числом точек контроля потери времени невелики, но для больших изделий, таких как узлы космических аппаратов, например, космический радиотелескоп и/или его элементы они становятся значительными.

Один из путей преодоления этого ограничения заключается в создании и использовании высокоточных бесконтактных 3D измерительных головок. И в этом направлении предприняты многочисленные попытки за рубежом и в России [1–3]. Однако к полной замене широко используемых контактных головок касания с переходом на принципиально другие бесконтактные промышленность пока не готова по разным причинам. Более перспективными можно считать гибридные 3D измерительные головки с возможностями как традиционных контактных, так и бесконтактных координатных измерений за счет совмещения контактной и бесконтактной измерительных головок.

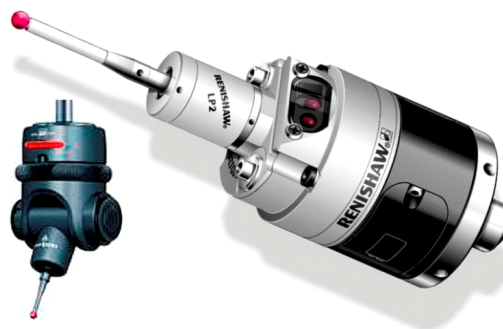


Рис. 1. Контактные головки касания

В данной статье дано описание одной из таких головок, основное внимание уделено принципам построения и достигаемым техническим характеристикам вводимой бесконтактной волоконно-оптической измерительной головки.

1. Устройство и принцип действия. Разработанная гибридная 3D измерительная головка в одном из вариантов (рис. 2) состоит из контактного 1 и бесконтактного 2 (на основе низкокогерентного интерферометра, показан на рис. 3) измерителей, измерительного стержня 3 в виде трубки диаметром не более 2–4 мм с полым сферическим рубиновым наконечником 4 диаметром d_n не более 2,5–7 мм. Внутри последних введен световодный элемент 5, представляющий параллельное оптическое соединение прямого 6 и спирального 7 многомодовых световодов

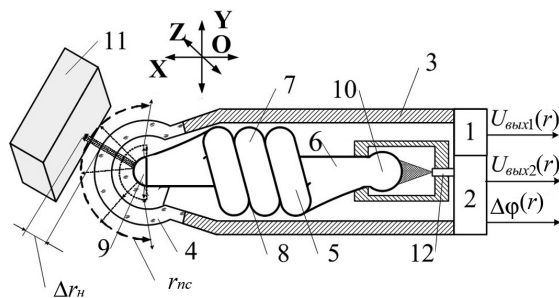


Рис. 2. Схема гибридной 3D измерительной головки

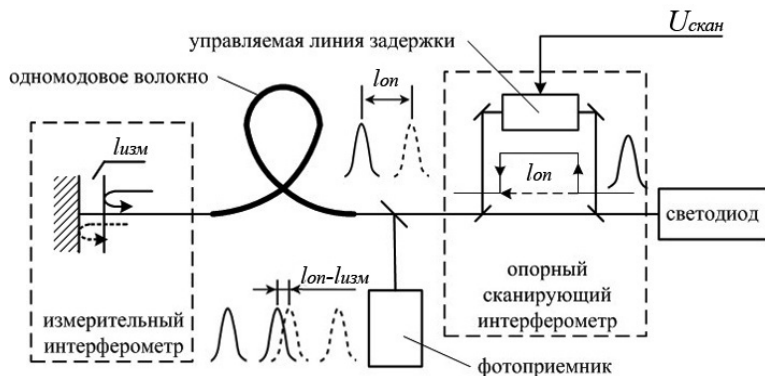


Рис. 3. Низкокогерентный интерферометр

с металлизированным покрытием 8 и сформированными на переднем и заднем торцах рассеивающей 9 и фокусирующих 10 микролинз.

1.1. Контактные измерения

Для контактных координатных измерений в КИМ используется механическая конструкция 3D измерительной головки: измерительный стержень 2 со сферическим рубиновым наконечником 4. При касании рубиновым наконечником 4 поверхности изделия 11 контактным измерителем 1 электромеханически формируется триггерный выходной сигнал (рис. 4а) $U_{\text{вых1}}(r_n) \sim 1(r - r_n)$, где r_n — радиус рубинового наконечника 4) для измерения трех координат: I_x , I_y и I_z с соответствующим оцифровыванием точки касания.

1.2. Бесконтактные измерения

Реализация бесконтактных координатных измерений основана на сочетании двух следующих возможностей бесконтактным измерителем 2:

1) формирование с помощью прямого 6, спирального 7 многомодовых световодов, рассеивающей микролинзы 9 и рубинового наконечника 4 оптического потока с трехмерной полусферической диаграммой излучения и приема $\pm \pi/2$ ср;

2) создание пространственно-чувствительной координаты с заданной разностью хода Δl для максимума контраста регистрируемой интерференционной картины низкокогерентного интерферометра, формирующей в вышеуказанном оптическом потоке за пределами рубинового наконечника 4 единственную пространственно-чувствительную полусферу радиусом $r_{нс}$. При прохождении изделия через эту координату в пределах $\pm \pi/2$ ср амплитуда регистрируемой интерференционной картины достигает максимума (рис. 4б).

Режим бесконтактных координатных измерений гибридной 3D измерительной головкой реализуется следующим образом. Излучение от бесконтактного измерителя 2, проходя через одномодовое волокно 12

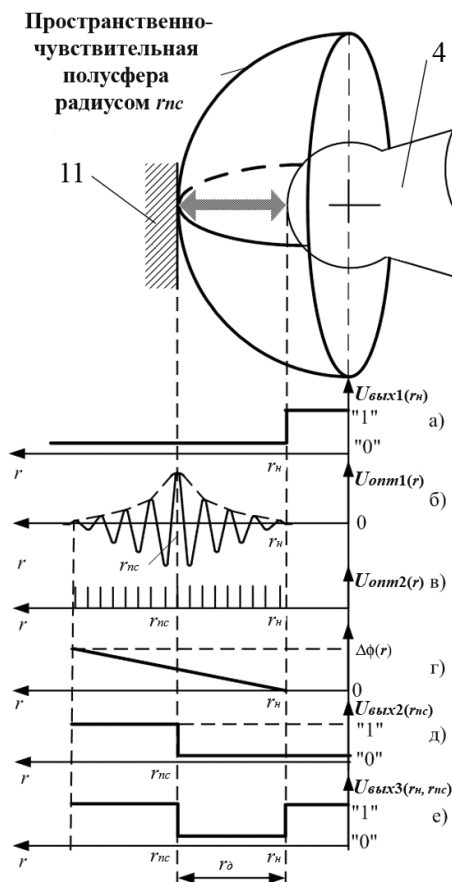


Рис. 4. Сигналы гибридной 3D измерительной головки, формируемые при контактных и бесконтактных измерениях

и направляясь на фокусирующую микролинзу 10, вводится в световодный элемент 5 с разделением потока пополам прямым 6 и спиральным 7 многомодовыми световодами. Оптический поток, следующий по прямому световоду 6, сохраняет изначальное гауссово распределение по сечению с преобладанием меридиональных лучей, проходящих через ось этого световода. Далее оптический поток из этих меридиональных лучей выходит через переднюю сторону рассеивающей микролинзы 9 преимущественно вдоль его оси, формируя центральный угловой сектор трехмерной полусферической диаграммы излучения.

Оптический поток, следующий по спиральному световоду 7, также приобретает за счет его изгибов спиральную закрутку, создавая преобладание сагиттальных (косых) лучей. Внешняя металлизация 8 препятствует выходу их наружу. К концу световодного элемента 5, в рассеивающей микролинзе 9 эти лучи выходят через её боковые стороны, формируя боковой угловой сектор трехмерной полусферической диаграммы излучения. Вместе с центральным угловым сектором они создают единый полусферический оптический поток в пределах $\pm \pi/2$ ср. Возможные неравномерности диаграммы направленности сглаживаются за счет искусственно созданной шероховатости поверхности R_z и/или материала рассеивающей микролинзы 9.

При приближении головки к изделию 11 его поверхностью формируется поток отраженного света, состоящий из лучей, включающих самый короткий, следующий по нормали от поверхности изделия 11 к рубиновому наконечнику 4. Проходя последовательно через него, рассеивающую линзу 9, световодный элемент 5, одномодовое волокно 12, этот отраженный оптический поток возвращается для измерения в бесконтактный измеритель 2, в котором сформирована заданная разность хода Δl первой пары опорных интерферирующих потоков.

Вторая пара оптических измерительных потоков создается потоком, отраженным от изделия 11 и, как вариант, внешней поверхностью рубинового наконечника 4. Вблизи равенства разности хода опорных и измерительных потоков в бесконтактном измерителе 2 формируется интерференционная картина, максимум интенсивности «по огибающей» соответствует положению отражающей поверхности изделия на координате r_{nc} . Фиксация максимума интерференционной картины позволяет в итоге сформировать триггерный сигнал $U_{вых2}(r) \sim 1(r-r_{nc})$, подобно контактным измерениям, а в диапазоне $\approx \pm 5 \dots 7\lambda$ возможны высокоточные измерения линейных смещений поверхности изделия 11 «по фазе».

Режим допускового контроля при контактно-бесконтактном контроле разработанной головки возможен при формировании двух триггерных выходных сигналов контактным 1 и бесконтактным 2 измерителями: $U_{вых3}(r_H, r_{nc}) \sim 1(r-r_H) - 1(r-r_{nc})$ с возможностью управления поля допуска $r_g = r_{nc} - r_H$.

1.3. Бесконтактный измеритель

Работа бесконтактного измерителя 2, реализованного на основе стандартного волоконного низкокогерентного интерферометра [4–6], состоящего из опорного (сканирующего) и измерительного интерферометров (рис. 3), основана на применении оптического излучателя, спектральная плотность мощности которого описывается функцией Гаусса:

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\Delta\omega)^2} \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2(\Delta\omega)^2}\right), \quad (1)$$

где ω_0 — центральная длина волны источника излучения, $\Delta\omega$ — ширина спектра источника излучения, а интенсивность интерферирующих оптических потоков, освещающих фотоприемник, будет иметь вид

$$I(z) = I_0 \exp\left(-\frac{(z-D)^2}{2L_{кор}^2}\right) \cos[k(z-D)], \quad (2)$$

где z — разность длин плеч опорного (сканирующего) интерферометра (внутри бесконтактного измерителя 2), $D = l_{он} - l_{изм}$ — толщина зазора между рубиновым наконечником 4 и поверхностью изделия 11 (по нормали), $L_{кор}$ — длина когерентности источника излучения, $k = 2\pi/\lambda$, где λ — центральная длина волны источника излучения.

Определение положения максимума аналогично измерениям «по огибающей»

$$A(z) = A_0 \exp\left(-\frac{(z-D)^2}{2L_{кор}^2}\right), \quad (3)$$

для сигнала $U_{онм1}(r)$, а определение фазы заполнения соответствует измерениям «по фазе» для интерференционного сигнала $\sim U_{онм2}(r)$ и цифрового выходного кода N_ϕ с учетом двойного хода луча (рис. 4 в, г):

$$N_\phi = 2k_{инт} \Delta l / \lambda, \quad (4)$$

где $k_{инт}$ — коэффициент интерполяции периода интерференционной картины.

Уравнения (3) и (4) показывают возможность работы в двух режимах измерений: «по огибающей» — с возможностью формирования триггерного выходного сигнала, «по фазе» — для высокоточных измерений с линейным выходным сигналом.

2. Основные технические характеристики. Для понимания потенциала, заложенного в разработанную 3D измерительную головку, опишем её функции измерительного преобразования, применяя математическую функцию Хэвисайда, расчет диаметра пространственно-чувствительной полусферы d_{nc} разрешающей способности, массогабаритных параметров.

Итак, данная головка реализует следующие функции измерительного преобразования:

для головки касания
при контактном контроле (рис. 4а)

$$U_{вых1}(r_H) \sim 1(r-r_H), \quad (5)$$

при бесконтактном контроле (рис. 4б)

$$U_{вых2}(r_{nc}) \sim 1(r-r_{nc}), \quad (6)$$

для головки отклонения (рис. 4г):

$$\Delta\Psi(r) \sim \phi_0 + \Delta\phi(r) \quad (7)$$

Для измерительной головки допускового контроля при контактно-бесконтактном контроле (рис. 4е):

$$U_{вых3}(r_H, r_{nc}) \sim 1(r-r_H) - 1(r-r_{nc}), \quad (8)$$

где r_H, r_{nc} — координата (радиус) поверхности рубинового наконечника 4 и пространственно-чувствительной полусферы соответственно.

Для исключения негативного воздействия на зрение человека длина волны лазерного излучения, используемого гибридной 3D головкой, должна быть

в области ИК-излучения, т.е. невидимого человеческим глазом. Для удобства дальнейших расчетов выбрано значение $\lambda = 1,0$ мкм. Для такого значения λ можно пренебречь поглощением его рубиновым наконечником и появлением внешнего паразитного излучения такой же длины волны тепловой природы, т.к. для его формирования изделие должно быть нагрето почти до 1000°C , что в реальности при проведении координатных измерений исключено.

2.1. Диаметр пространственно-чувствительной полусферы d_{nc} .

Этот параметр используется при работе гибридной 3D измерительной головки подобно головке касания с формированием триггерного выходного сигнала (рис. 4а). Для расчета реально достижимых значений d_{nc} следует принять, что уровень выходного оптического сигнала $I_{вых}$, поступающий в бесконтактный измеритель 2, пропорционален отношению площади локального луча света S_A , отраженного от поверхности изделия, к площади всей освещенной полусферы S_{nc} :

$$I_{вых} = \frac{\rho_\lambda \cdot k_{pac} S_A}{S_{nc}} I_{вх}, \quad (9)$$

где ρ_λ — коэффициент отражения разных материалов для выбранной длины волн $\lambda = 1$ мкм, k_{pac} — коэффициент рассеяния оптического излучения, зависящий от угла падения β и шероховатости поверхности R_z изделия, $I_{вх}$ — уровень входного оптического сигнала (мощность излучателя).

Если принять, что минимальный диаметр отраженного от изделия луча $d_A \leq 0,5$ мм с площадью $S_A = \pi/16$ мм², а площадь освещаемой 3D головкой полусферы $S_{nc} = \frac{\pi \cdot d_{nc}^2}{2}$, где d_{nc} — диаметр, формируемой 3D пространственно-чувствительной координатой полусферы, то выражение (9) для $I_{вх}$ примет вид:

$$I_{вх} = \frac{8d_{nc}^2}{\rho_\lambda \cdot k_{pac}} I_{вых}. \quad (10)$$

Дальнейшие расчеты проделаны для двух случаев, когда контролируемые изделия изготовлены из наиболее распространенных металлов с индивидуальным значением ρ_λ : полированная чистая медь ($\rho_\lambda = 0,9$), никель ($\rho_\lambda = 0,73$), полированный алюминий ($\rho_\lambda = 0,75$), хром ($\rho_\lambda = 0,73$), сталь ($\rho_\lambda = 0,73$), бронза ($\rho_\lambda = 0,7$).

Значение $I_{вых}$ можно взять из описания устройства [6], использующим подобный низкокогерентный интерферометр. В нем источником света является суперлюминесцентный диод ЛМ2-850 мощностью 0,7 мВт производства НИИ «Волга» (Саратов), работающий в паре с фотоприемником ФД-24К. Так как при контроле параметров оптических изделий в этом устройстве в измерительную схему возвращается не более 15% исходного оптического потока, то для дальнейших расчетов можно принять: $I_{вых} \approx 0,1$ мВт. С учетом этого для медных изделий с $\rho_\lambda = 0,9$ с полированной поверхностью, т.е. без диффузного рассеяния света при выполнении условия $R_z \leq \lambda/6$ и $k_{pac} = 1$, выражение (9) преобразуется к следующему виду:

$$I_{вх \min} = \frac{8d_{nc}^2}{\rho_\lambda \cdot k_{pac}} I_{вых} = \frac{8 \cdot 0,1 d_{nc}^2}{0,9} \approx 0,89 d_{nc}^2. \quad (11)$$

Подобно можно определить значение $I_{вх \max}$ для стального изделия ($\rho_\lambda = 0,63$) с шероховатой поверхностью с максимумом диффузного рассеяния света при условии $R_z \approx \lambda \approx 1$ мкм. Значение k_{pac} может быть определено с учетом с известного закона Ламберта, вносящего поправочный коэффициент, пропорциональный $\cos\beta$ в зависимости от угла β между направлением света и нормалью к поверхности изделия. Но т.к. измеряется отраженный оптический поток с углом $\beta = 0$, то этот поправочный коэффициент стремится к 1. Если принять, что абсолютное значение при диффузном рассеянии k_{pac} не превысит 0,4, то выражение (9) примет вид:

$$I_{вх \min} = \frac{8d_{nc}^2}{\rho_\lambda \cdot k_{pac}} I_{вых} = \frac{8 \cdot 0,1 d_{nc}^2}{0,63 \cdot 0,4} \approx 3,17 d_{nc}^2, \quad (12)$$

Тогда из уравнений (12) и (13) можно сформировать граничные условия для расчета $I_{вх \min}$ и $I_{вх \max}$ (в мВт):

$$I_{вх \min} \leq I_{вх} \leq I_{вх \max}, \quad (13)$$

которые при расчетах для минимального и максимального допустимых значений диаметров $d_{nc \min}$ и $d_{nc \max}$ равных 3 мм и 7 мм соответственно, формируют четыре комбинации: $(d_{nc \min}; I_{вх \min})$, $(d_{nc \min}; I_{вх \max})$, $(d_{nc \max}; I_{вх \min})$ и $(d_{nc \max}; I_{вх \max})$. В соответствии с этим были проведены расчеты, построены две зависимости $I_{вх \min}(d_{nc})$ и $I_{вх \max}(d_{nc})$ и для выбранных выше значений $d_{nc \min} = 3$ мм и $d_{nc \max} = 7$ мм получены четыре координаты: (3 мм; 8,0 мВт); (3 мм; 28,5 мВт); (7 мм; 43,6 мВт) и (7 мм; 155,3 мВт), образующие зону допустимых значений для диаметров $d_{nc \min}$ и $d_{nc \max}$ и двух уровней источника излучения $I_{вх \min}$ и $I_{вх \max}$ (рис. 5).

Как видно из этих расчетов, мощность источника излучения $I_{вх}$ достигает значений 100–150 мВт. Современные источники излучения позволяют формировать такие потоки, преимущественно в импульсном режиме, например, при скважности импульсов $Q = t_{имп}/t_n \gg 5$ (где $t_{имп}$ — длительность импульса, t_n — длительность паузы). Однако все-таки такие решения пока являются экзотическими и дальнейшее развитие подобных устройств обуславливает поиск решений с излучателями меньшей мощности, например, за счет перехода от одноканальных к многоканальным измерительным головкам, работающих с меньшими мощностями света в более узком пространственном секторе.

2.2. Разрешающая способность

Как следует из работ [4–6], разрешающая способность низкокогерентного интерферометра, составляющего оптическую схему разработанной гибридной 3D измерительной головки, определяется для двух режимов измерений: «по огибающей» и «по фазе». При измерения «по огибающей» разрешающая способность I_o , как правило, не превышает единиц микрометров. В случае измерений «по фазе» разрешающая способность I_ϕ существенно выше и определяется разрешающей способностью фазовых измерений, значение которой может быть не более десятка нанометров.

2.3. Массогабаритные параметры

Максимальный вес световодного элемента с торцевыми микролинзами не превышает 10–50 г, а низкокогерентный интерферометр может быть вынесен за пределы головки. Поэтому влиянием веса волоконной измерительной головки на динамику движений гибридной 3D измерительной головки можно пренебречь.

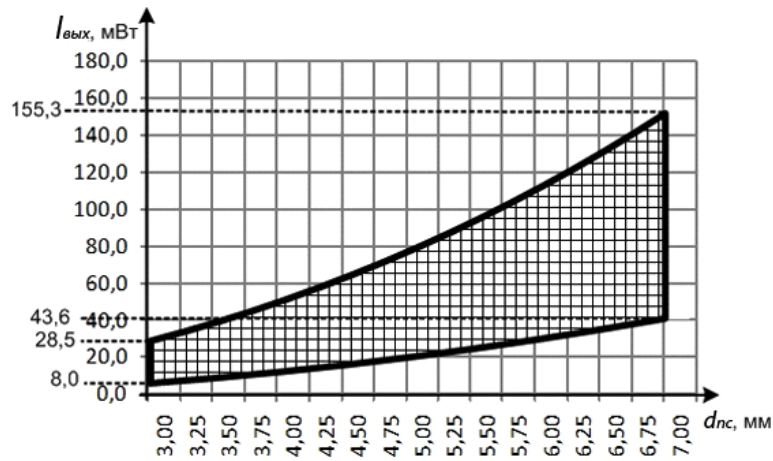
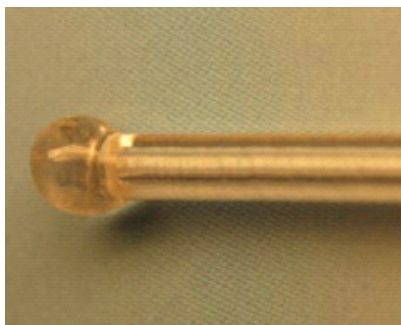
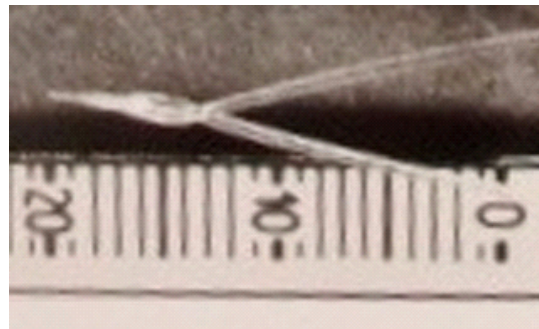


Рис. 5. Зона допустимых значений для двух значений диаметра полусферической поверхности $d_{исmin}$ и $d_{исmax}$ и мощности источника излучения $I_{вхmin}$ и $I_{вхmax}$



а



б

Рис. 6. Горцевой сапфировый сферический наконечник с капиллярной трубкой диаметром 1,2 мм (а), изготовление световодного элемента (б)

3. Практическая реализация. В разработанной гибридной 3D измерительной головке используются выполненные на основе современных оптических технологий элементы, а именно: рубиновый полый наконечник с капилляром, световодный элемент, микрооптические элементы в виде наконечников и микролинз, созданных на торцах одно- и многомодовых волокон.

3.1 Рубиновый полый наконечник с капилляром

Рубин является ближайшим родственником сапфира (Al_2O_3) и, несмотря на наличие примеси хрома (Cr), к нему применим почти весь современный задел по технологиям выращивания сапфировых элементов нужной формы и размеров. Так, в последнее время разработана технология получения профилированных кристаллов сапфира различного поперечного сечения с капиллярными каналами с минимальными диаметрами до 1,2 мм [7], что позволило получить сферические наконечники (рис. 6а) малых размеров с внутренними каналами.

3.2 Световодный элемент

Оригинальным решением у световодного элемента является использование спиральной закрутки одного из многомодовых световодов (рис. 6б). Этот прием был применен при создании волоконных датчиков уровня жидкости [8]. Технология создания спиральных световодных элементов различных конструкций при использовании различных волокон, в т.ч. многомодового кварц-полимерного волокна КП-200 с диаметром сердцевины 200 ± 2 мкм с нанесенным металлизированным покрытием на основе алюминия (Al) толщиной 15–50 мкм была обрабо-

тана и исследована еще в середине 80-х годов XX века. Температура нагрева и сплавления обычно составляла для полимерных световодов от 70 до 90 °С, для кварцевых от 1100 до 1200 °С при силе натяга от 50 до 500 г. Экспериментально отработанная технология позволяет создать закрутку световодов с числом витков, начиная от 1, с минимальным шагом скрутки, равным диаметру световода.

3.3 Микрооптические элементы на торцах одно- и многомодовых волокон

К настоящему времени существует достаточно много разных технологий изготовления наконечников на торцах одно- и многомодовых волокон для рассеивания или фокусировки излучения. В [9] представлен несимметричный полимерный наконечник (рис. 6а), изготовленный на основе полимерной технологии, с диаграммой направленности излучения и приема оптического потока более $\pm \pi/2$ ср (рис. 6б). При создании шероховатой поверхности на его поверхности с $R_z \approx \lambda \approx 1$ мкм, например, за счет травления или при добавлении рассеивающих частиц в состав наконечника при его создании, обеспечивающих дополнительное диффузное рассеяние, неравномерности диаграммы направленности могут быть существенно снижены.

Фокусирующие микролинзы (рис. 6 в, г) могут быть созданы под действием сил поверхностного натяжения при плавлении торца волокна, либо нанесенного на него фоторезиста, либо также с применением полимерных технологий [9–11].

Заключение. 1. Гибридная 3D измерительная головка представляет собой контактную головку

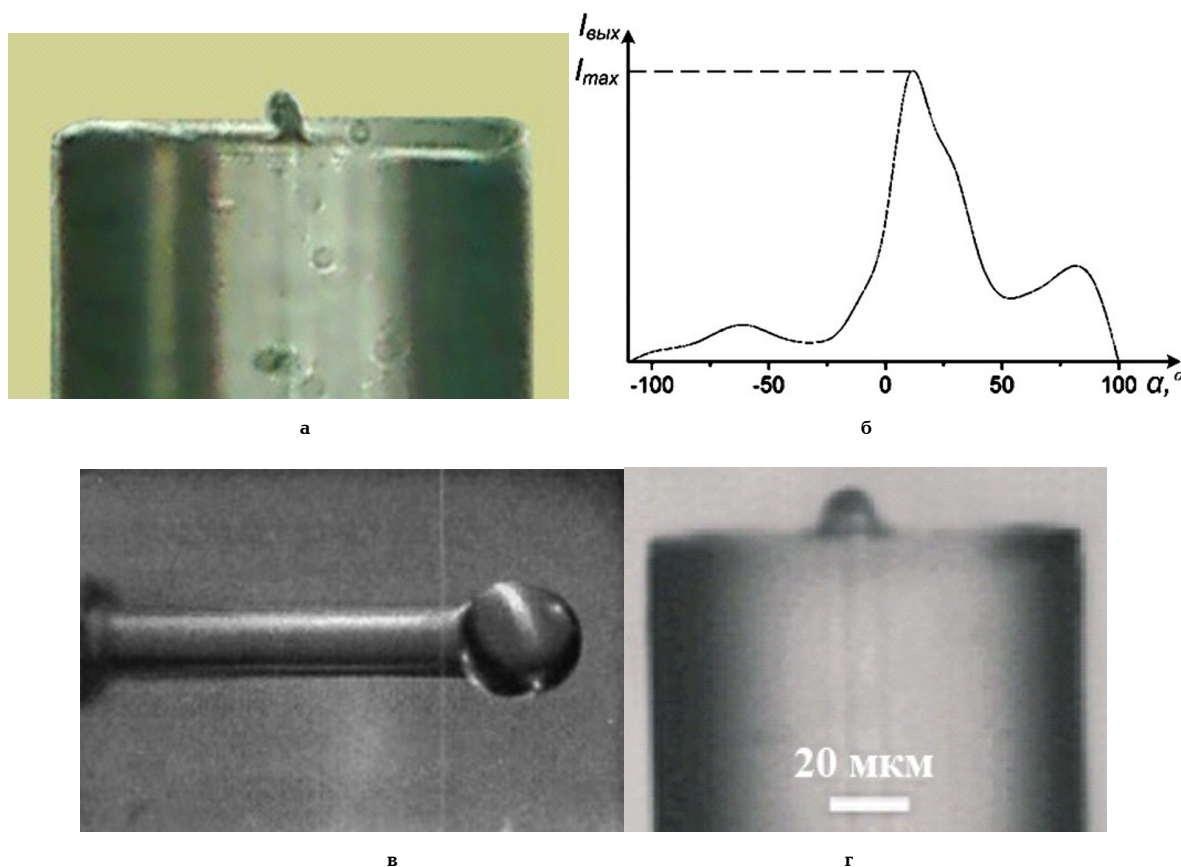


Рис. 7. Несимметричный полимерный наконечник на торце световода (а) и его диаграмма направленности излучения и приема (б), микролинзы у многомодового (в) и одномодовых (г) световодов

касания с полым рубиновым наконечником с введенной внутрь нее беконтактной волоконно-оптической головкой и формированием у нее новых функциональных возможностей для проведения беконтактных координатных измерений:

а) с линейным изменением выходного сигнала как у головки отклонения;

б) со вторым триггерным выходным сигналом $U_{\text{вых}2} \sim 1(r - r_{\text{nc}})$, где r_{nc} — радиус полусферической пространственно-чувствительной координаты r_{nc} при условии $r_{\text{nc}} > r_n$ подобное головке касания;

в) гибридным контактно-бесконтактным способом с двумя перепадами триггерного сигнала $U_{\text{вых}3} (r_n, r_{\text{nc}}) \sim 1(r - r_n) - 1(r - r_{\text{nc}})$ для допускового контроля и управления шириной допуска $\Delta r_g = r_{\text{nc}} - r_n$.

2. Рассчитаны граничные условия для двух значений мощности источника излучения $I_{\text{вх}min}$ и $I_{\text{вх}max}$ и двух значений диаметров полусферической пространственно-чувствительной поверхности $d_{\text{nc}min}$ и $d_{\text{nc}max}$, равных 3 мм и 7 мм соответственно, формируют четыре координаты, комбинации значений d_{nc} и $I_{\text{вх}}$: (3 мм; 8,0 мВт); (3 мм; 28,5 мВт); (7 мм; 43,6 мВт) и (7 мм; 155,3 мВт). Эти четыре координаты образуют зону допустимых значений для диаметров $d_{\text{nc}min}$ и $d_{\text{nc}max}$ и двух уровней источника излучения $I_{\text{вх}min}$ и $I_{\text{вх}max}$.

Необходимая для работы мощность источника излучения $I_{\text{вх}}$ достигает 100–150 мВт вполне реализуема современными источниками излучения, преимущественно в импульсном режиме. Однако дальнейшее развитие подобных устройств обуславливает поиск возможностей перехода от одноканальных к многоканальным измерительным головкам, работающим в более узком пространственном секторе

и с более эффективным использованием мощности излучаемого оптического потока.

3. Реализация диаграммы направленности излучения и приема оптического потока в пределах $\pm \pi/2$ ср возможна за счет использования световодного элемента, состоящего из оптически соединенных прямого и спирального многомодовых световодов с торцевой полусферической микролинзой.

Библиографический список

1. Гапшис А. А., Каспарайтис А. Ю., Модестов М. Б. [и др.]. Координатные измерительные машины и их применение. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
2. Пат. 2235972 Российская Федерация, МПК G01B9/02. Способ оптического контроля геометрических параметров изделий / Леун Е. В. № 2000121726; заявл. 14.08.00; опубл. 10.09.04.
3. Пат. 157867 Российская Федерация, МПК G01B9/02. Бесконтактная оптическая головка для контроля геометрических параметров изделий / Леун А. Е., Юдин А. Д., Дмитриев А. О., Привезенцева И. В., Леун Е. В., Пчелкин С. Е. № 2015104149; заявл. 09.02.15; опубл. 20.12.15, Бюл. № 15.
4. Ахсахалян А. А., Ахсахалян А. Д., Волков П. В. [и др.]. Перспективы применения метода тандемной низкокогерентной интерферометрии для измерения формы асферических поверхностей // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 8. С. 16–20. DOI: 10.7868/S020735281508003X.
5. Волков П. В., Горюнов А. В., Лукьянов А. Ю. [и др.]. Измерение профиля поверхности протяженных асферических объектов // Нанозлектроника и наноэлектроника: материалы XXI Междунар. симпозиума. 2017. Т. 1. С. 379–380.

6. Пат. 2141621 Российская Федерация, МПК G01B11/06, G01N21/45. Интерферометрическое устройство для измерения физических параметров прозрачных слоев (варианты) / Иванов В. В., Катин Е. В., Маркелов В. А. [и др.]. № 98102684, заявл. 04.02.1998, опубл. 20.11.1999.

7. Шикунова И. А., Курлов В. Н., Стрюков Д. О., Лощенов В. Б. Новые медицинские лазерно-волоконные приборы и инструменты на основе профилированных кристаллов сапфира // Актуальные проблемы физики конденсированного состояния. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2015. С. 31 – 46.

8. Пат. 2573661 Российская Федерация, МПК G01F 23/22, G01F 23/292. Способ измерения уровня жидкости и устройство с нерегулярной биспирально-конической световодной структурой для его реализации (варианты) / Коренев М. С. № 2014111062; заявл. 24.03.14; опубл. 27.01.16, Бюл. № 3.

9. Плеханов А. И., Шелковников В. В. Оптические волокна с концевыми фотополимерными микролинзами // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1, № 1–2. С. 240–244.

10. Петров А. А. Лазерное формирование микролинз на базе оптических волокон: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.03. СПб., 2005. 112 с.

11. Фокина М. И. Формирования микрооптических поверхностей на основе фотоотверждения мономерных композиций в ближнем поле световой волны: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.05. СПб., 2012. 128 с.

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер.

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.09.2017 г.

© Е. В. Леун

УДК 621.391.8

Г. М. СИДЕЛЬНИКОВ

Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ДЕМОДУЛЯТОРОВ СИГНАЛОВ С ФАЗОВОЙ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В КАНАЛАХ С МНОГОЛУЧЕВОСТЬЮ

Рассматривается помехоустойчивость демодуляторов сигналов с фазовой, относительной фазовой и фазоразностной модуляцией в каналах со слабой многолучевостью при действии аддитивной гауссовской помехой. В основу анализа помехоустойчивости положено рассмотрение изменений сигнальных расстояний из-за многолучевости, где второй луч представлял совокупность многих других лучей. Подробный анализ необходим для анализа тонкой структуры многолучевого канала, что позволит в дальнейшем сравнивать современные системы с разнесением. Полученные вероятностные характеристики позволяют определить эффективность сигналов с PSK и DPSK в каналах со слабой многолучевостью при действии аддитивной гауссовской помехи.

Ключевые слова: сигнальное расстояние, линия принятия решения, вероятность ошибок, интегральная функция распределения вероятностей, слабая многолучевость.

1. Введение. Современные системы передачи информации позволяют обеспечить высокую помехоустойчивость в каналах с селективными замираниями, используя разнесенный прием как на передаче, так и на приеме, но при этом четко регламентируя структуру многолучевого поля [1]. Анализ помехоустойчивости сигналов с дискретной модуляцией в каналах с селективными замираниями основывался на использовании системных функций, которые были пригодны для получения средней вероятности ошибки, что не позволяло получить интегральные функции распределения [2–4].

Анализ помехоустойчивости сигналов с фазовой модуляцией приведен в [5], где в двухлучевом канале с постоянными параметрами рассчитывается вероятность ошибки на бит. Полученные результаты основывались на усредненных отношениях сигнал шум.

Расчет межсимвольной интерференции (МСИ) в двухлучевом канале с дискретной многолучевостью

представлен в [6–8], где анализ проводился для задержек отраженного сигнала как меньше длительности посылки, так и значительно превышающего её. Представлены особенности образования МСИ для фазовой и фазоразностной модуляции. Как следует из [8], основное отличие достигается при задержках сопоставимых с длительностью посылки, поэтому при малых задержках необходимо рассматривать изменение сигнальных расстояний, вызванных многолучевостью, что дает точную и полную картину поведения сигналов с фазовой модуляцией. Возможен расчет помехоустойчивости, не разделяя замирания на общие и частотно-селективные. Кроме того, возможно на основе линейной алгебры сравнить помехоустойчивость фазовой, относительной фазовой и фазоразностной модуляции.

Целью данной работы является сравнительный анализ помехоустойчивости демодуляторов сигналов с фазовой модуляцией с различной структурой на

основе рассмотрения изменения сигнальных расстояний для каналов с многолучевостью.

2. Помехоустойчивость сигналов однократной фазовой, относительной фазовой и дифференциальной фазовой модуляции в каналах с многолучевостью. Для анализа помехоустойчивости демодуляторов сигналов с фазовой модуляцией, рассмотрим алгоритмы принятия решения о передаваемом символе.

Для фазовой модуляции решение о передаваемом символе при обработке на n -посылке определяется как [9]:

$$\text{sign}I = \text{sign}(Z_n f_0), \quad (1)$$

где $Z_n(t) = S_n(t) + n(t)$ — представляет собой сумму переданного сигнала и помехи, f_0 — сигнала опорного генератора, при этом вероятность ошибки при воздействии аддитивной гауссовской помехи

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \left(1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{2E}{N}} \right) \right). \quad (2)$$

Для относительной фазовой модуляции (ОФМ), которую можно представить как фазовую с перекодированием символов, где информация определяется при обработке двух соседних посылок, решение о переданном символе определяется как [9]:

$$\text{sign}I = \text{sign}(Z_n f_0) \text{sign}(Z_{n-1} f_0), \quad (3)$$

вероятность ошибки

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \left(1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{2E}{N}} \right) \right) \Phi \left(\sqrt{\frac{2E}{N}} \right). \quad (4)$$

Дифференциальную фазовую модуляцию [1] определим как фазоразностную модуляцию (ФРМ), решение о передаваемом символе определяется как [9]:

$$\text{sign}I = \text{sign}(Z_n Z_{n-1}), \quad (5)$$

вероятность ошибки $P_{\text{ош}} = \frac{1}{2} e^{-h^2}$.

Рассмотрим изменение сигнального расстояния для случая двухлучевого канала, где вектор второго луча рассчитывается на основе выражений, полученных в [6].

Для фазовой модуляции (рис. 1) сигнальное расстояние, определенное как расстояние от конца суммарного вектора до границы принятия решения, равно:

$$\Delta S_n = A_n^\Sigma \cos(\Delta Q_n), \quad (6)$$

где A_n^Σ и ΔQ рассчитываются на основе выражений [6]:

$$A_n^\Sigma = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2}, \quad \Delta Q_n = \arctg \frac{X_n}{Y_n}, \quad (7)$$

$$X_n = \sin \varphi_n + \frac{A_3}{A_0} \left(1 - \frac{\tau_3}{T} \right) \sin(\varphi_n + \varphi_0) + \frac{A_3}{A_0} \left(\frac{\tau_3}{T} \right) \sin(\varphi_{n-1} + \varphi_0), \quad (8)$$

$$Y_n = \cos \varphi_n + \frac{A_3}{A_0} \left(1 - \frac{\tau_3}{T} \right) \cos(\varphi_n + \varphi_0) + \frac{A_3}{A_0} \left(\frac{\tau_3}{T} \right) \cos(\varphi_{n-1} + \varphi_0). \quad (9)$$



Рис. 1. Формирование относительного сигнального расстояния при фазовой модуляции



Рис. 2. Формирование относительного сигнального расстояния при относительной фазовой модуляции

Как видно из формул (7) – (9), сигнальное расстояние (6) определено как относительное сигнальное расстояние, то есть по отношению к однолучевому каналу: $\Delta S_n = \frac{\Delta S_n^\Sigma}{\Delta S_n^0}$, где ΔS_n^Σ — сигнальное расстояние для двухлучевого канала, а ΔS_n^0 — для однолучевого канала.

Для относительно фазовой модуляции (ОФМ) (рис. 2) сигнальным расстоянием является наименьшее расстояние на соседних посылках, так как вероятность ошибки на этом расстоянии максимальна:

$$\min(\Delta S_n, \Delta S_{n-1}). \quad (10)$$

Для фазоразностной модуляции определение сигнального расстояния должно основываться на том факте, что величина помехи за такт не изменится и для соседних посылок она должна быть одинаковой. На рис. 3 показано формирование векторов для определения сигнального расстояния, где граница пространственной области правильного решения представляет, раскрыв две линии с углом 90 градусов.

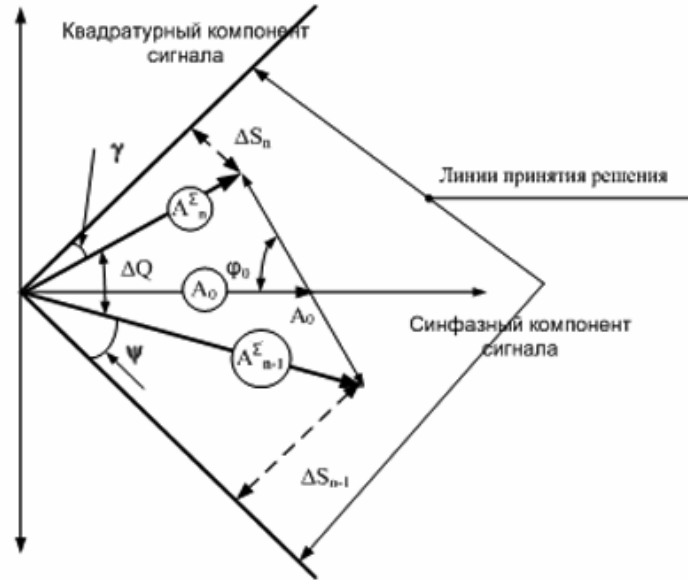


Рис. 3. Формирование относительного сигнального расстояния при фазоразностной модуляции

Для определения сигнального расстояния необходимо выполнить следующие преобразования.

Ошибка произойдёт, если выполнится неравенство:

$$\gamma + \psi + \Delta Q > 90^\circ, \quad (11)$$

где

$$\gamma = \arcsin \frac{\Delta S_n}{A_n^\Sigma}, \quad \psi = \arcsin \frac{\Delta S_{n-1}}{A_{n-1}^\Sigma}. \quad (12)$$

Воспользуемся выражением для суммы арксинусов [10]:

$$\arcsin x + \arcsin y = \arccos(\sqrt{1-x^2}\sqrt{1-y^2} - xy). \quad (13)$$

Решая совместно (11), (12) и (13) и учитывая, что $\Delta S_n = \Delta S_{n-1} = \Delta S$

$$\sqrt{1 - \frac{\Delta S^2}{A_n^{\Sigma 2}}} \sqrt{1 - \frac{\Delta S^2}{A_{n-1}^{\Sigma 2}}} - \frac{\Delta S^2}{A_n^\Sigma A_{n-1}^\Sigma} = \sin \Delta Q. \quad (14)$$

Преобразовывая выражения (14), получаем:

$$\Delta S = \sqrt{\frac{(A_n^\Sigma)^2 (A_{n-1}^\Sigma)^2 - (A_n^\Sigma)^2 (A_{n-1}^\Sigma)^2 \sin^2 \Delta Q}{(A_n^\Sigma)^2 + (A_{n-1}^\Sigma)^2 + 2A_n^\Sigma A_{n-1}^\Sigma \sin \Delta Q}}, \quad (15)$$

Дальнейшее упрощение приводит к выражению

$$\Delta S = \frac{A_n^\Sigma A_{n-1}^\Sigma \cos \Delta Q}{\sqrt{(A_n^\Sigma)^2 + (A_{n-1}^\Sigma)^2 + 2A_n^\Sigma A_{n-1}^\Sigma \sin \Delta Q}}. \quad (16)$$

На рис. 4 представлены плотности распределения вероятностей сигнального расстояния для фазовой и относительной фазовой модуляции, усредненных для различных интерферирующих посылок с различными информационными фазами. Для фазовой модуляции это (0, π), (0, 0), (π, 0), (π, π), для относительной фазовой модуляции и фазоразностной модуляции — (0, 0, 0), (0, 0, π), (0, π, 0), (0, π, π) и (π, 0, 0), (π, 0, π), (π, π, 0), (π, π, π) [6]. Как показано в [6], механизм образования векторов смещения, представленных на рис. 1–3, идентичен для всех комбинаций символов.

Анализ показывает, что увеличение задержки сигнала уменьшает сигнальные расстояния при относительной фазовой модуляции и фазоразностной модуляции, в то время как для фазовой модуляции для комбинаций (0, 0), (π, π) зависимость от задержки пропадает, а для комбинации интерферирующих информационных символов (0, 0, 0), (0, 0, π), (0, π, 0), (0, π, π), (0, π), (π, 0) происходит увеличение сигнального расстояния при определенных фазах второго луча.

На рис. 5 представлены кривые для фазоразностной модуляции при различных задержках второго луча, при этом характер зависимости не меняется от комбинации интерферирующих посылок.

Как показали результаты математического моделирования на ЭВМ, бинарные системы с фазовой, относительно фазовой модуляцией в каналах с малой задержкой имеют практически одинаковую вероятность ошибки при когерентном приеме. При вероятности ошибки, равной 0,001, выигрыш фазовой модуляции относительно относительной фазовой составляет 1,5 дБ.

3. Сравнительный анализ помехоустойчивости двукратной фазовой и относительной фазовой модуляции в каналах с малыми задержками второго луча. При переходе от однократной к двукратной модуляции область принятия решений уменьшается, но при этом энергия сигнала сохраняется неизменной за счет увеличения длительности посылки, поэтому помехоустойчивость при действии аддитивной гауссовской помехи не меняется.

На рис. 6 представлен пример формирования сигнальных расстояний для фазовой и относительной фазовой модуляции для комбинации (0, 0, π), где линии принятия решений привязаны к координатной плоскости в отличие от рис. 3, где раскрыв линий принятия решений не меняется при вращении вокруг оси. Характер зависимости сигнальных расстояний не меняется для других комбинаций интерферирующих посылок, например, для комбинации $(\pi, \frac{\pi}{2}, 0)$, меняется характер дополнительного сдвига фаз ΔQ [6], да и то при больших задержках второго луча. Всего таких комбинаций 64.

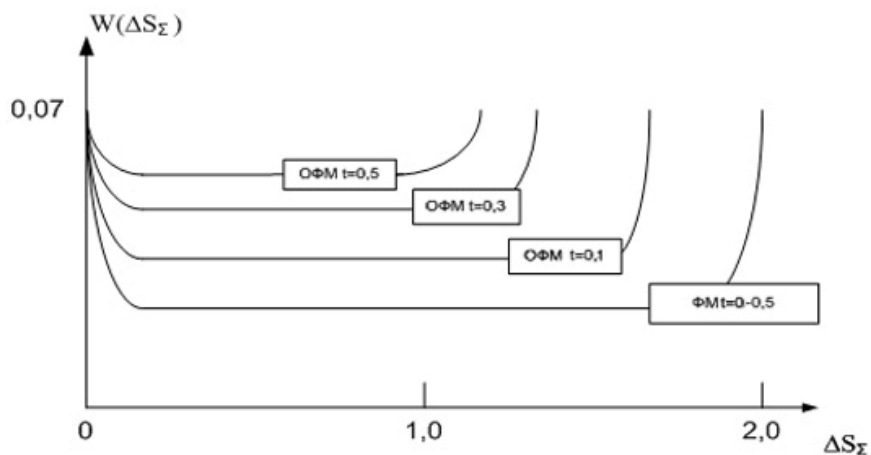


Рис. 4. Плотность распределения вероятностей относительных сигнальных расстояний от величины задержки второго луча для относительной фазовой модуляции (ОФМ) и фазовой модуляции (ФМ) при $A_3=0,9A_0$

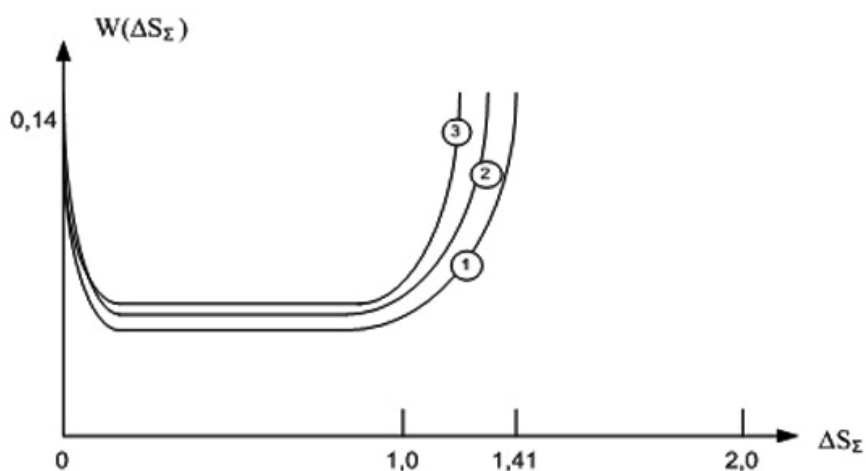


Рис. 5. Плотность распределения вероятностей относительного сигнального расстояния для фазоразностной модуляции (ФРМ) для $A_3=0,9A_0$ при различных задержках: 1 — $t_3 = 0,1$, 2 — $t_3 = 0,3$, 3 — $t_3 = 0,5$

На рис. 7 представлены результаты математического моделирования на ЭВМ плотности распределения вероятностей сигнальных расстояний для фазовой и относительной фазовой модуляции. Как показал анализ расчетов, при малых задержках $t_3 < 0,5T$, второй луч может быть представлен в виде суммы нескольких задержанных лучей с различными фазами, задержками и амплитудами. Анализ показывает, что деформации сигнального расстояния подвержена относительная фазовая модуляция из-за задержки второго луча, в то время как при фазовой модуляции деформации не происходит.

На рис. 8 и 9 представлены зависимость сигнального расстояния от фазы второго луча (в радианах) для определяющих комбинаций сигналов фазовой и относительной фазовой модуляции.

На рис. 10 показано, что существенной разницы между фазовой и относительной фазовой модуляциями нет при малых задержках, так как основную роль играют замирания сигнала.

На рис. 11 результаты математического моделирования помехоустойчивости сигналов фазовой и относительной фазовой модуляции при когерентном приеме. Как показывает анализ, разница между фазовой и относительной фазовой составляет 1,5 дБ.

4. Заключение. Проведенный анализ деформации сигнальных расстояний на основе математического моделирования на ЭВМ показал:

— расчет дополнительного сдвига для фазовой, относительной фазовой и фазоразностной модуляции [7] неэффективен при слабой многолучевости (малые задержки второго луча) для анализа помехоустойчивости при действии аддитивной гауссовской помехи;

— при увеличении задержки второго луча сигнальные расстояния для относительной фазовой модуляции уменьшаются по сравнению с фазовой, и эти уменьшения увеличиваются с увеличением кратности модуляции;

— область принятия решения уменьшается при переходе от фазовой к относительной фазовой и далее к фазоразностной модуляции;

— помехоустойчивость фазовой модуляции по сравнению с относительной фазовой модуляцией выше за счет того факта, что решение о передаваемом символе принимается после обработки сигнала на одном тактовом интервале;

— небольшая разница в помехоустойчивости в 1,5 дБ между фазовой и относительной фазовой модуляциями в канале с многолучевостью при действии аддитивных помех объясняется тем, что основной вклад вносят области с малым сигнальным расстоянием, а они у них мало отличаются;

— полученные результаты полезны для сравнительного анализа помехоустойчивости систем с рассмотрением как на передаче, так и на приеме, использующих различные методы сложения сигналов.



Рис. 6. Формирование относительных сигнальных расстояний для двукратной фазовой и относительной фазовой модуляции для комбинации $(0, 0, \pi)$

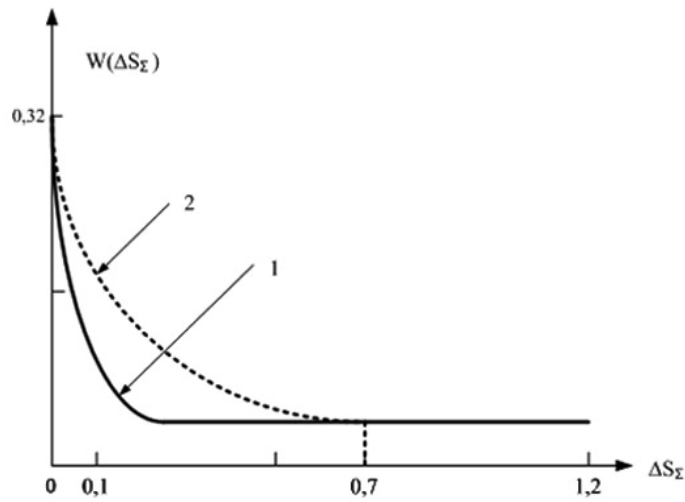


Рис. 7. Плотность распределения вероятностей относительного сигнального расстояния для двукратной фазовой (1) и относительной фазовой модуляции (2) при $A_3 = 0,6A_0$, при задержке $t_3 = 0,5T$

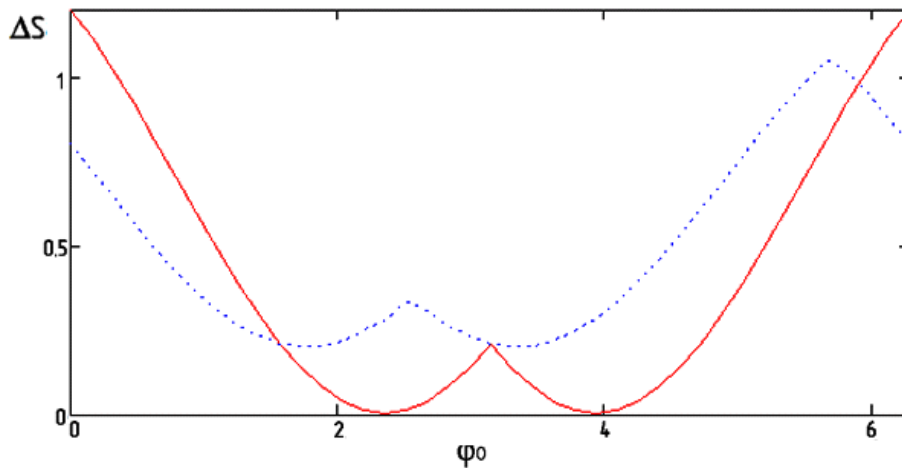


Рис. 8. Зависимость относительного сигнального расстояния для комбинации $(0, 0, \pi/2)$ от фазы отраженного сигнала, сплошная линия — фазовая модуляция, прерывистая линия — относительная фазовая модуляция

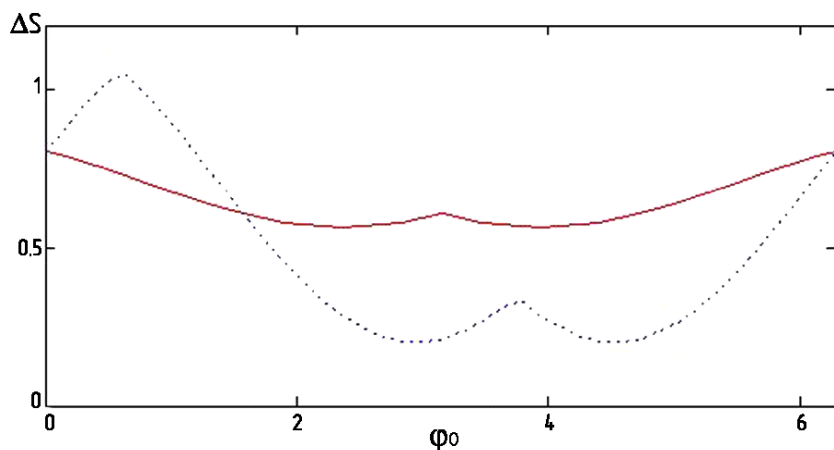


Рис. 9. Зависимость относительного сигнала расстояния для комбинации $(0, \pi, \pi/2)$ от фазы отраженного сигнала, сплошная линия — фазовая модуляция, прерывистая линия — относительная фазовая модуляция

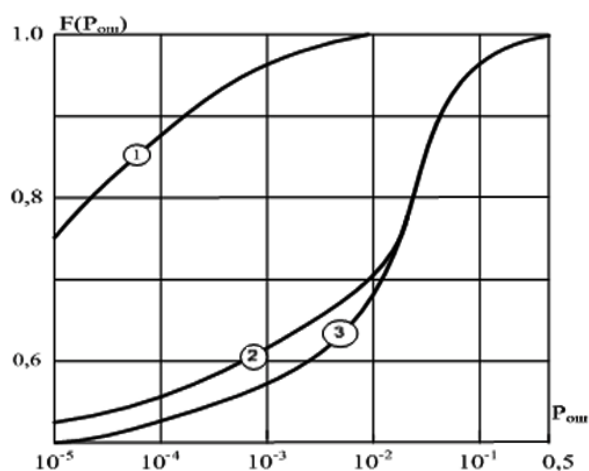


Рис. 10. Интегральная функция вероятности ошибки в двухлучевом канале при $h = 10\text{дБ}$ и $A_3 = 0,7A_0$ для фазовой модуляции — 2, для относительной фазовой модуляции — 3, для фазовой модуляции — 1 при $A_3 = 0,6A_0$

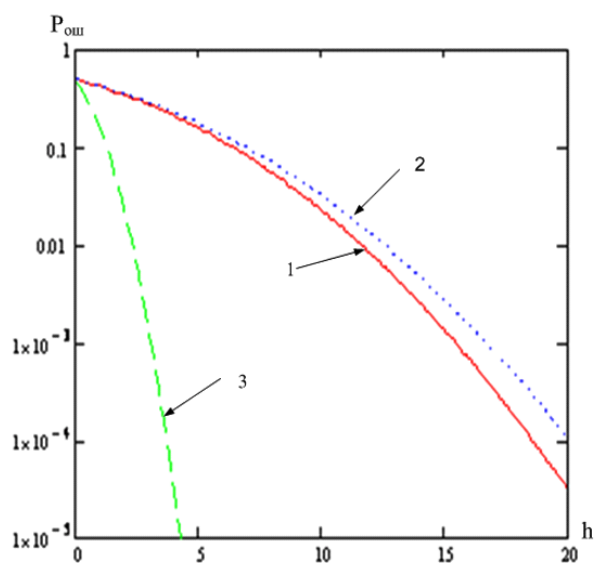


Рис. 11. Зависимость средней вероятности ошибки от отношения сигнал-шум $h = \sqrt{\frac{2E_s}{N}}_s$, для фазовой (1) и относительной фазовой модуляции (2) при $t_3 = 0-0,5T$, $A_3 = 0,7A_0$ и фазовой модуляции (3) при $A_3 = 0$

Библиографический список

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. Изд. 2-е, испр. М.: Издат. дом «Вильямс», 2004. 1104 с.
2. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Советское радио, 1970. 727 с.
3. Кириллов Н. Е. Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами: моногр. М.: Связь, 1971. 256 с.
4. Уильям К. Ли. Техника подвижных систем связи / пер. с англ. В. Н. Талызина; под ред. и предисл. И. М. Пышкина. М.: Радио и связь, 1985. 292 с.
5. Белов А. С., Елесин М. Е. Расчет вероятности ошибки на бит в системах с многочастотными сигналами в двухлучевом канале с постоянными параметрами // Телекоммуникации. 2011. № 3. С. 22–32.
6. Сидельников Г. М., Синявская А. С. Межсимвольная интерференция сигналов с ФРМ и ФМ в каналах с дискретной многолучевостью // Омский научный вестник. 2014. № 1 (127). С. 205–211.
7. Сидельников Г. М., Синявская А. С. Сравнительный анализ межсимвольной интерференции сигналов с ФРМ и ФМ

в каналах с дискретной многолучевостью // Вестник СибГУТИ. 2013. № 4. С. 55–56.

8. Сидельников Г. М., Морозов С. А., Сластухина В. И. Сравнительный анализ помехоустойчивости сигналов с ФРМ и ФМ в каналах с различной структурой // Омский научный вестник. 2017 г. № 2 (152). С. 81–85.

9. Окунев Ю. Б. Теория фазоразностной модуляции. М., 1979. 279 с.

10. Потапов М. К., Александров П. И., Пасиченко П. И. Алгебра, тригонометрия и элементарные функции. М.: Высшая школа, 2001. 737 с.

СИДЕЛЬНИКОВ Геннадий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические системы».

Адрес для переписки: sid53@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2017 г.

© Г. М. Сидельников

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ШИРОКОПОЛОСНОЙ МАЛОГАБАРИТНОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Рассматривается электродинамическое моделирование и оптимизация компактной спиральной антенны миллиметрового диапазона. Основная цель моделирования — проверить возможность минимизации габаритов антенны при сохранении ей основных радиотехнических характеристик (РТХ). Также проведена оптимизация отдельных конструктивных элементов с целью улучшения некоторых РТХ антенны. Приведенные в статье результаты моделирования и оптимизации показывают, что примененные конструктивные решения позволяют минимизировать габариты антенны, при этом сохраняя ее РТХ на приемлемом уровне.

Ключевые слова: широкополосная антенна, спиральная излучающая структура, широкополосный трансформатор, миллиметровый диапазон, малогабаритная, моделирование.

Введение. В статье рассматривается широкополосная антенна миллиметрового диапазона длин волн. Данная антенна может быть использована в составе блока фазового пеленгатора с предполагаемым самолетным размещением.

Постановка задачи. Моделирование проводилось с целью выяснения возможности максимального сокращения габаритов антенны при сохранении ею основных радиотехнических характеристик (РТХ).

Также ставилась задача оптимизации некоторых конструктивных элементов антенны.

Теория. Излучающая структура антенны выполнена в виде плоской двухзаходной арифметической спирали, изготовленной методом негативного фотохимического травления на плате из диэлектрического материала (рис. 1, поз. 5).

Такой излучатель позволяет достичь требуемой широкополосности [1] (коэффициент перекрытия 2,2) и принимать электромагнитные волны практически с любой поляризацией [2]. В центре платы со спиралью предполагается выполнить сквозное отверстие прямоугольной формы, через которое проходит выход согласующего и симметрирующего устройства (далее в тексте — трансформатор).

Широкополосное симметрирование и согласование излучающей структуры с входной частью антенны осуществляется с помощью широкополосного клинообразного трансформатора [3] в микрополосковом исполнении. Конструктивно трансформатор является трапециевидной платой из фольгированного диэлектрика. На ее поверхностях вытравлены проводники, образующие в месте соединения с питающим разъемом антенны несимметричную микрополосковую линию, плавно переходящую

в двухпроводную линию. Край трансформатора, оканчивающийся двухпроводной линией [4], проходит через отверстие в плате излучателя и каждый из проводников двухпроводной линии гальванически соединяется с соответствующей ветвью двухзаходной спирали.

Система излучатель — трансформатор размещена в цилиндрическом металлическом корпусе (рис. 1, поз. 8), внутренний диаметр которого соответствует диаметру платы излучателя. Плата излучателя установлена таким образом, что находится в одной плоскости с верхним краем корпуса. Внутри корпуса непосредственно за платой размещена шайба из диэлектрического материала с малой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon \approx 1,3$) (рис. 1, поз. 2), являющаяся основанием, на которое устанавливается излучатель. В центре этой шайбы выполнено сквозное отверстие для платы трансформатора, а также проточка цилиндрической формы глубиной 0,2 мм. Проточка необходима для того, чтобы в месте соединения плат трансформатора и излучателя плата излучателя могла бы свободно перемещаться в небольших пределах, что позволит предотвратить разрушение пайки при температурных воздействиях. За шайбой из диэлектрического материала размещена шайба из поглотителя электромагнитных волн (рис. 1, поз. 3), в центре которой также выполнено сквозное отверстие для платы трансформатора. Шайба из поглотителя находится на поверхности металлического экрана (рис. 1, поз. 4), размещенного в верхней трети корпуса антенны вблизи излучателя. В центре металлического экрана также выполнено сквозное отверстие для платы трансформатора. Поглотитель вместе с металлическим экраном [5] обеспечивают однонаправленное излучение антенны.

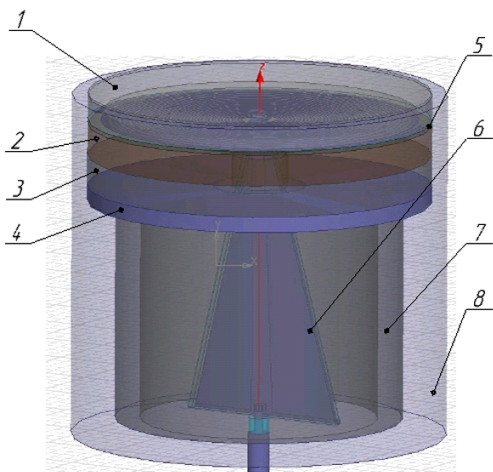


Рис. 1. Трехмерная модель антенны:

- 1 — фторопластовая крышка,
 2 — шайба из диэлектрического материала,
 3 — шайба из поглощающего материала,
 4 — металлический экран,
 5 — плата с излучающей структурой,
 6 — плата трансформатора,
 7 — поглощающий материал, 8 — металлический корпус

Экран, шайбы из поглощающего и диэлектрического материала размещены вплотную друг к другу, зазоры между ними отсутствуют.

Во внутреннем пространстве корпуса, не занятом экраном и шайбами из поглощающего и диэлектрического материала, размещается трапециевидная плата трансформатора (рис. 1, поз. 6), широким своим основанием стоящая на дне цилиндрического корпуса антенны. Внутренняя поверхность стенок корпуса закрыта поглощающим материалом [6], (рис. 1, поз.7), это необходимо для предотвращения переотражений, которые возникают при излучении трансформатором части электромагнитной энергии,

проходящей по нему от питающего разъема к проводникам излучателя.

Для защиты от механических повреждений плата излучателя закрыта фторопластовой крышкой (рис 1, поз. 1).

Перед построением и расчетом трехмерной модели антенны необходимо было задать некоторые начальные значения размеров излучающей структуры и трансформатора, используемого для согласования излучателя и питающего разъема.

Рассматриваемая антенна должна работать в K и K_a диапазонах, что соответствует длинам волн порядка 10–20 миллиметров. Диаметр наибольшего витка спирали и диаметр платы излучателя следует выбрать из соотношения [2]:

$$d = \frac{\lambda_{\max}}{\pi}, \quad (1)$$

где d — диаметр витка спирали; λ_{\max} — максимальное значение длины волны.

Для уверенного формирования области излучения и уменьшения отражений от концов спирали на нижней частоте диапазона диаметр наибольшего витка спирали был выбран больше, чем следует из соотношения 1.

Добиться сокращения габаритных размеров позволили две конструктивные особенности данной антенны:

1. Из конструкции были исключены линии передачи, обеспечивающие гальваническую связь проводников трансформатора и проводников излучающей структуры, как, например, в согласующем симметрирующем устройстве, описанном в патенте [7]. Контакт трансформатора и излучающей структуры обеспечивается непосредственным соединением проводников трансформатора и излучателя. В результате моделирования предстояло выяснить, как повлияет такое решение на возбуждение излучателя и насколько сильно будут отклоняться максимумы

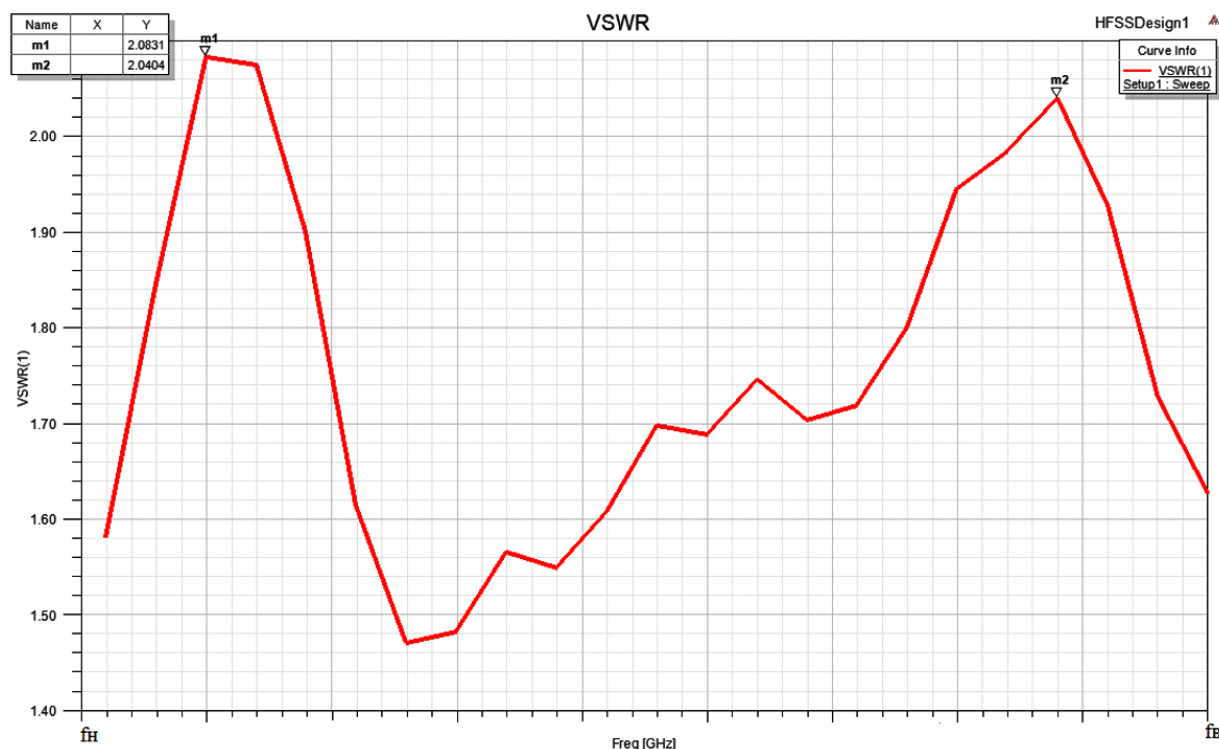


Рис. 2. Зависимость КСВН модели от частоты

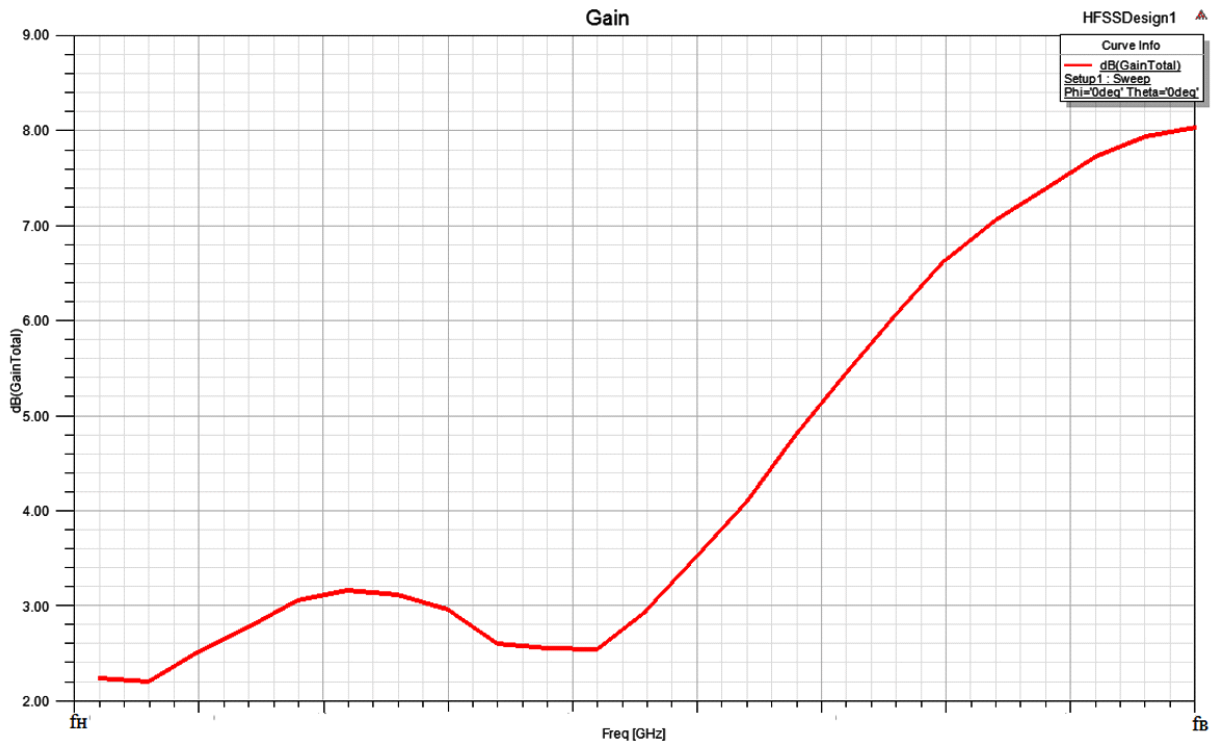


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления от частоты

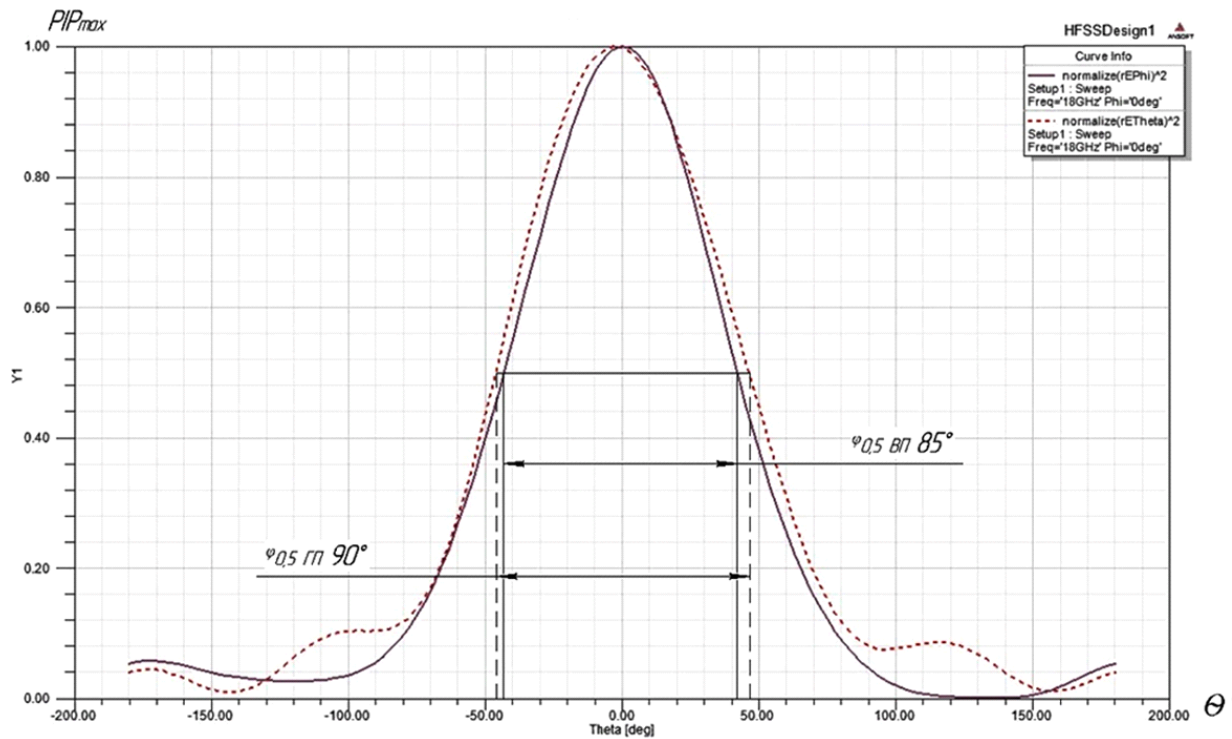


Рис. 4. Диаграммы направленности для вертикальной (сплошным) и горизонтальной (пунктиром) поляризаций, на нижней частоте ($f_{н}$)

диаграмм направленности от продольной оси антенны.

2. Перед моделированием был проведен предварительный расчет размеров микрополосковых линий трансформатора. При расчете использовались следующие соотношения:

для несимметричной линии [8]

$$Z = \frac{300}{\left(1 + \frac{b}{d}\right)\sqrt{\epsilon}}, \quad (2)$$

где Z — волновое сопротивление линии; b — ширина проводника микрополосковой линии; d — толщина подложки; ϵ — диэлектрическая проницаемость подложки:

для двухпроводной линии [8]

$$Z = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \frac{a}{a+b}, \quad (3)$$

где Z — волновое сопротивление; a — ширина проводника двухпроводной линии; b — толщина подложки; ϵ — диэлектрическая проницаемость подложки.

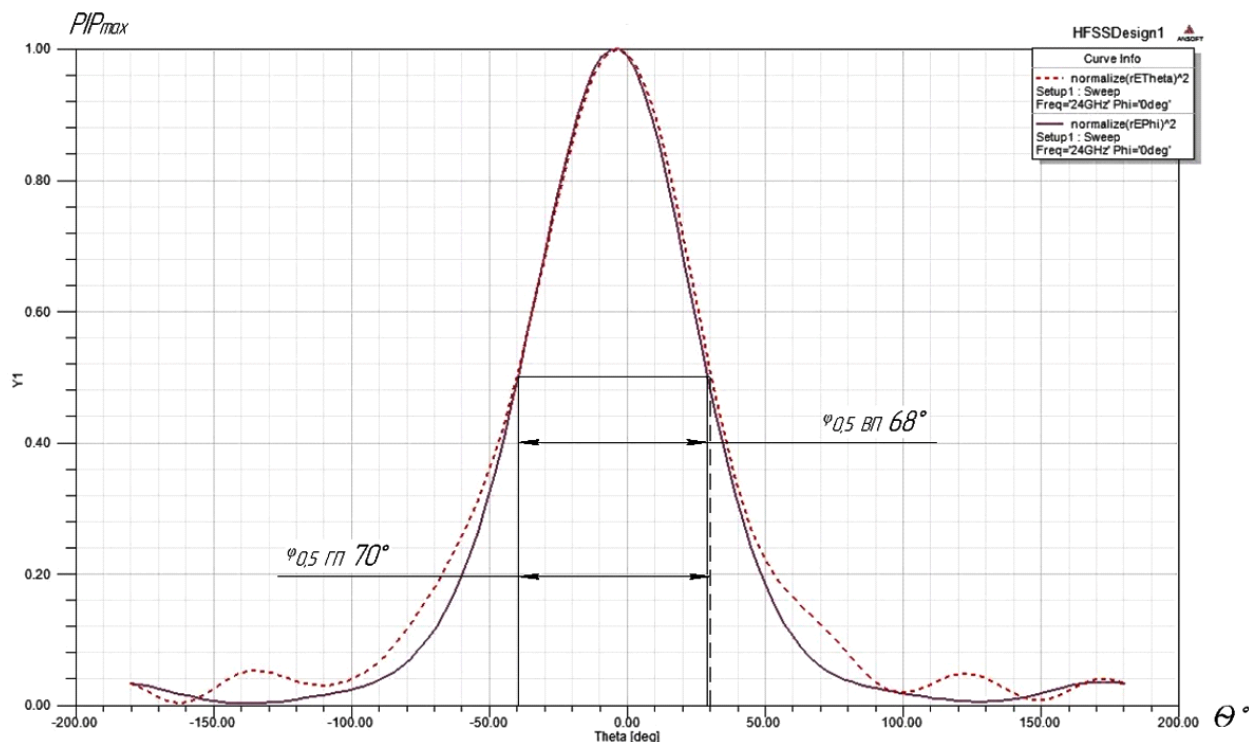


Рис. 5. Диаграммы направленности для вертикальной (сплошным) и горизонтальной (пунктиром) поляризаций, на частоте $0,5(f_n + f_{cp})$

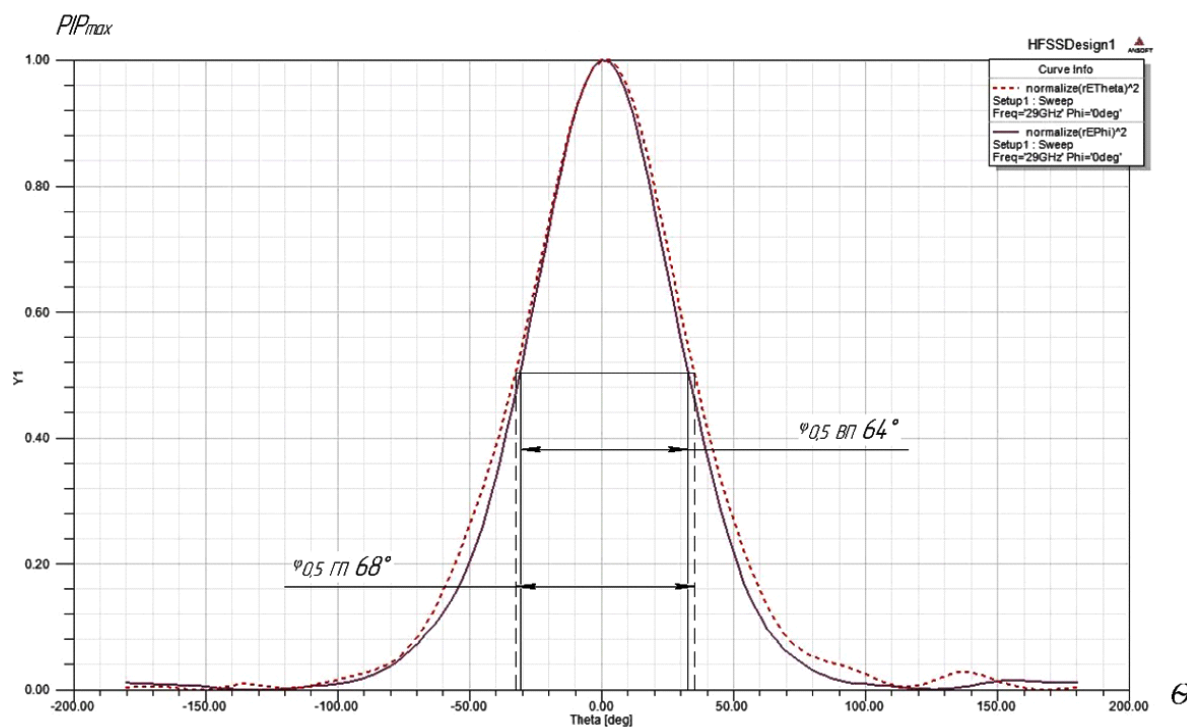


Рис. 6. Диаграммы направленности для вертикальной (сплошным) и горизонтальной (пунктиром) поляризаций, на средней частоте f_{cp}

Для удовлетворительного согласования длина трансформатора должна быть не менее половины наибольшей длины волны рабочего диапазона [1].

Результаты моделирования антенны с таким вариантом трансформатора позволят выяснить, обеспечит ли выбранный трансформатор требуемый уровень согласования.

Результаты экспериментов. Моделирование и электродинамический расчет выполнялись в систе-

ме автоматизированного проектирования HFSS. На рис. 1 представлена 3D модель антенны.

В результате электродинамического расчета были получены основные радиотехнические характеристики модели.

Из графика зависимости КСВН от частоты, представленного на рис. 2, видно, что максимальное значение КСВН в рабочем диапазоне частот не более 2,1, что можно считать хорошим результатом.

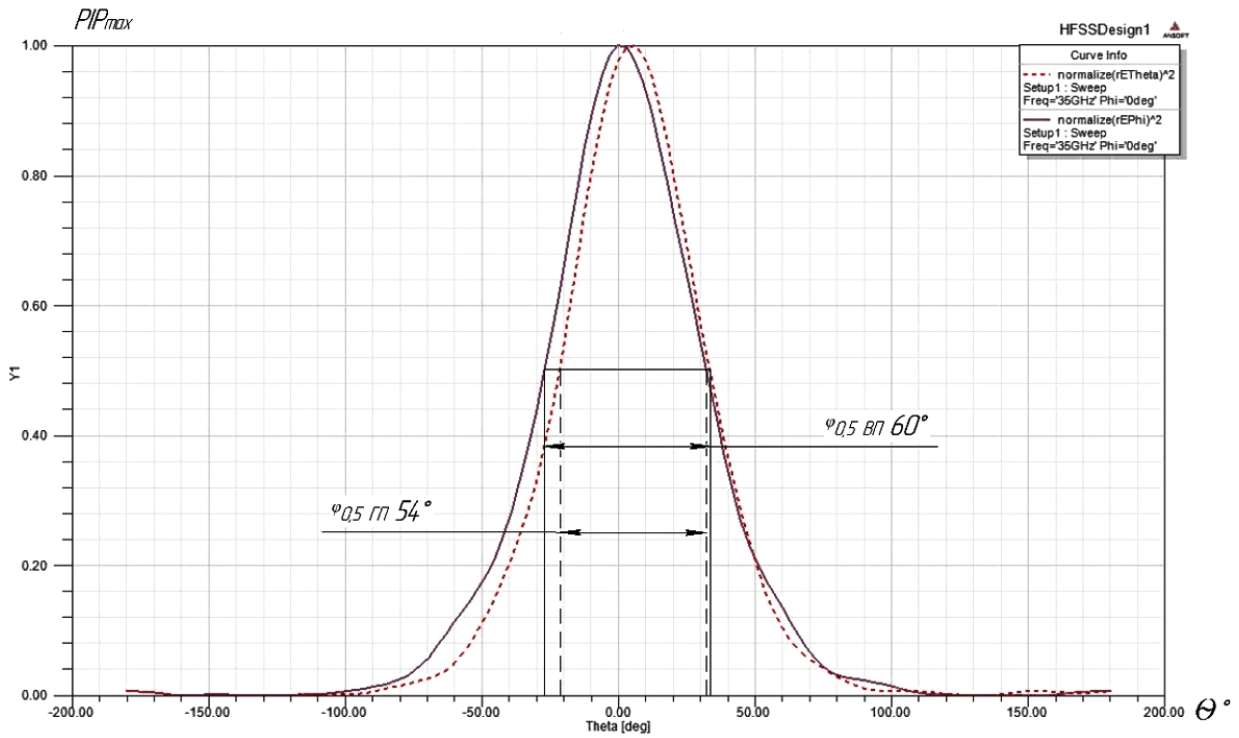


Рис. 7. Диаграммы направленности для вертикальной (сплошным) и горизонтальной (пунктиром) поляризаций, на частоте $0,5(f_{cp} + f_p)$

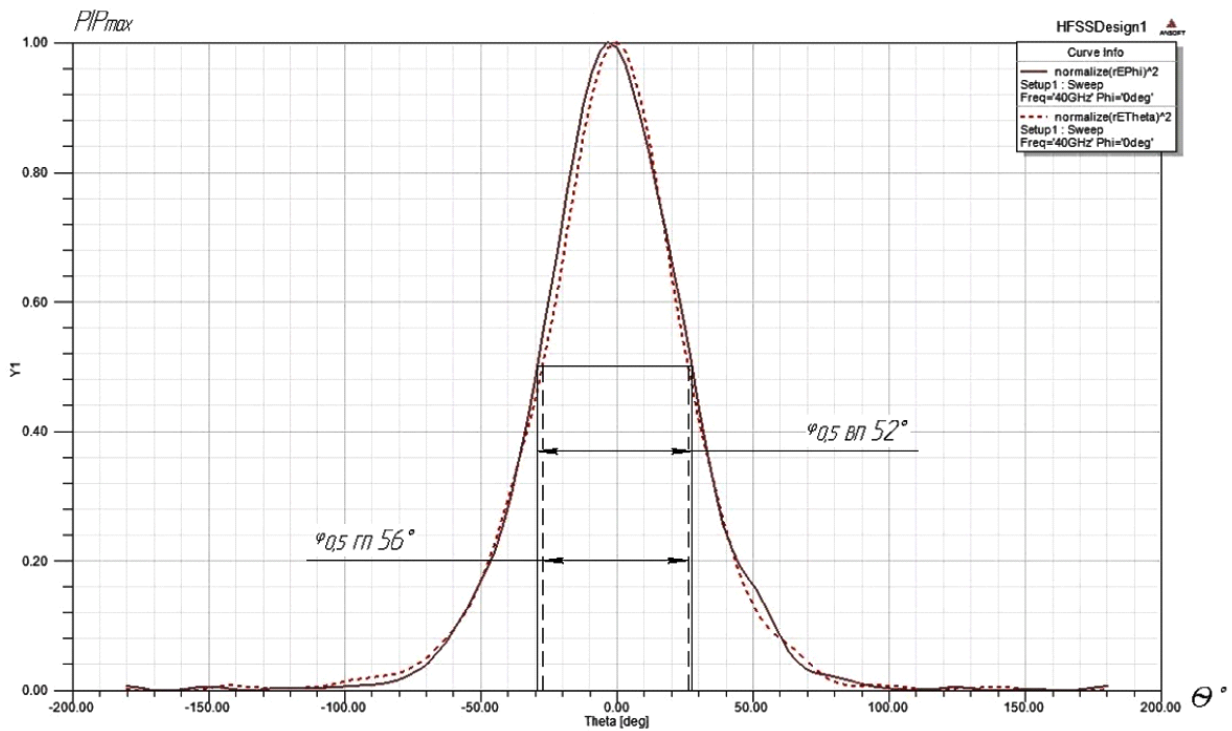


Рис. 8. Диаграммы направленности для вертикальной (сплошным) и горизонтальной (пунктиром) поляризаций, на верхней частоте (f_p)

Как видно из графика, представленного на рис. 3, коэффициент усиления антенны во всем диапазоне частот не хуже 2,2 дБ, наименьшие значения коэффициента усиления соответствуют нижним частотам диапазона.

Учитывая тот факт, что спиральные антенны являются слабонаправленными [2], такой результат можно считать вполне приемлемым.

Далее на рис. 4–8 приведены диаграммы направленности антенны на фиксированных частотных точках рабочего диапазона.

Представленные на рис. 4–8 диаграммы направленности в основном удовлетворительны, осесимметричны, уровень бокового излучения не превышает 6 %.

График зависимости коэффициента эллиптичности от частоты, представленный на рис. 9, показывает, что антенна имеет почти круговую поляризацию в большей части рабочего диапазона (коэффициент эллиптичности не менее 0,7) и может принимать электромагнитные волны с большинством видов поляризаций.

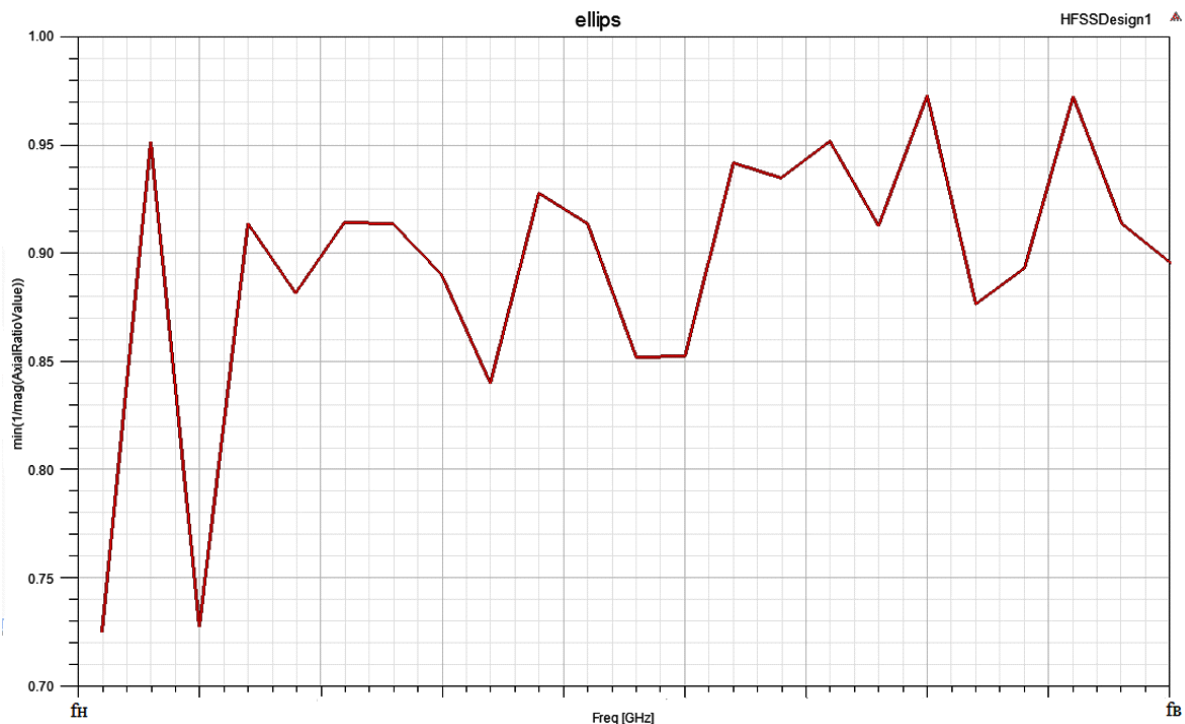


Рис. 9. Зависимость коэффициента эллиптичности от частоты

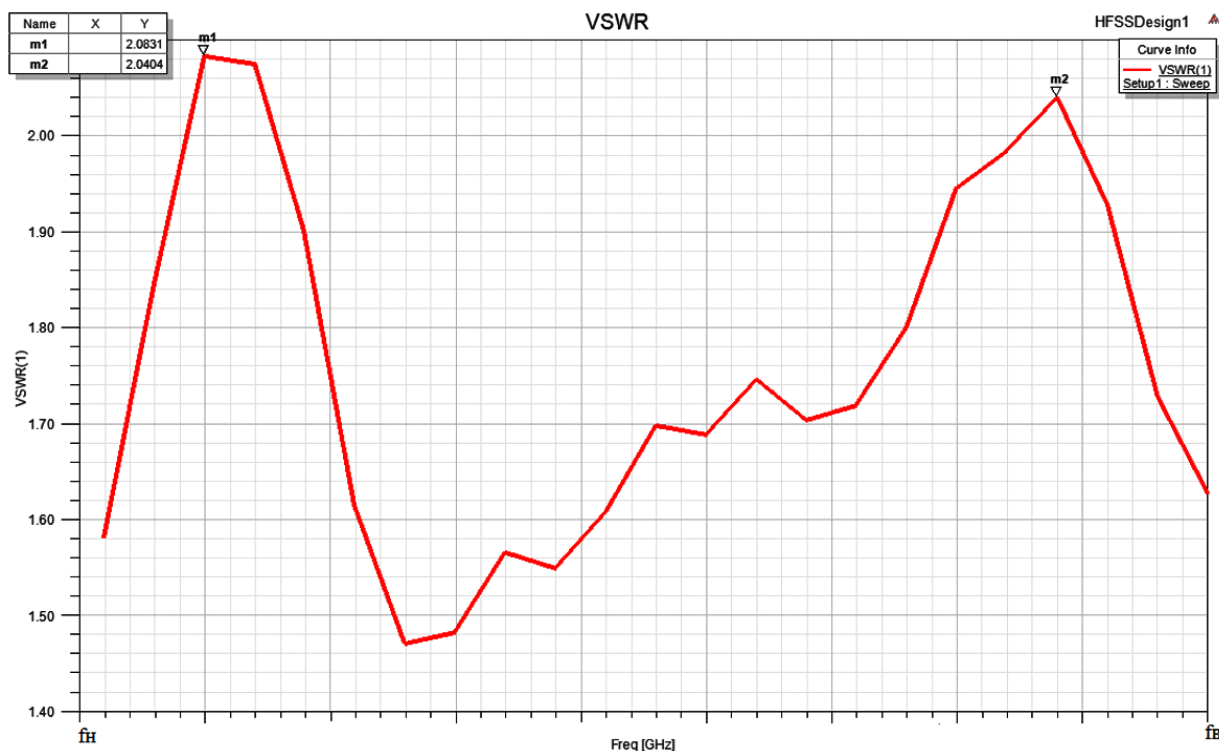


Рис. 10. Зависимость КСВН от частоты до оптимизации размеров отверстий

Обсуждение экспериментов. Вариант 3D модели антенны далее был оптимизирован по размерам центральных сквозных отверстий в шайбе из поглощающего материала и в металлическом экране. Диаметры этих отверстий должны быть оптимальны, чтобы оказывать как можно меньшее влияние на проходящий через них трансформатор и в то же время закрывать как можно большую площадь от обратного излучения.

На рис. 2 и рис. 10 представлены графики зависимости КСВН от частоты до оптимизации размеров отверстий и после соответственно.

Исходя из данных, приведенных на рис. 2 и рис. 10, можно сделать вывод, что процесс оптимизации достиг своей цели, максимальные значения КСВН уменьшились. Уменьшение значения невелико, около 0,1–0,15, но стоит заметить, что вклад в уровень КСВН вносят не только экран и шайба,

поэтому к значительному уменьшению значения уровня КСВН их оптимизация могла и не привести. Но важно то, что даже небольшое улучшение значений КСВН улучшает работоспособность антенны.

Выводы и заключение. Полученные по итогам моделирования и оптимизации результаты можно кратко оценить следующим образом:

1. Диаграммы направленности (ДН) в целом удовлетворительные, осесимметричные, с уровнем боковых лепестков не более 6 % и отклонением максимумов ДН не более 10° .

2. Ширина диаграмм направленности (ШДН) по уровню 0,5 изменяется от 48° до 90° , минимальная ШДН на верхних частотах диапазона.

3. КСВН не более 2,1 во всем диапазоне.

4. КУ изменяется от 2,2 дБ до 8 дБ, возрастая в верхней части диапазона.

5. КЭ по мощности не менее 0,74 во всем диапазоне.

В результате проведенного электродинамического моделирования получены удовлетворительные расчетные РТХ антенны во всем диапазоне частот.

Анализ полученных РТХ позволяет сделать вывод о целесообразности изготовления экспериментального образца антенны. С этой целью было выдано техническое задание на разработку конструкторской документации для антенн.

Библиографический список

1. Рамзей В. Частотно-независимые антенны / под ред. А. Ф. Чаплина. М.: Мир, 1968. 175 с.

2. Сверхширокополосные антенны / Под ред. Л. С. Бененсона. М.: Мир, 1957. 200 с.

3. Ротхаммель К. Энциклопедия антенн / К. Ротхаммель, А. Кришке. 11-е изд. М.: ДМК Пресс, 2016. 811 с. ISBN 978-5-97060-217-1.

4. Фрадин А. З. Антенно-фидерные устройства. М.: Связь, 1977. 440 с.

5. Чернушенко А. М., Меланченко Н. Е., Малорацкий Л. Г. [и др.]. Конструкция СВЧ устройств и экранов / под ред. А. М. Чернушенко. М.: Радио и связь, 1983. 400 с. ISBN 5-256-00697-5.

6. Пат. 2571906 РФ, МПК H01Q. Сверхширокополосное радиопоглощающее покрытие / Лагарьков А. Н., Семенов В. Н., Кибец С. Г., Иванова В. И, Сиберт С. Д., Иванова Л. Н., Коробейников Г. В., Кохнюк Д. Д. 2014129366/05; заявл. 16.07.2014; опубл. 27.12.2015, Бюл. 36.

7. Пат. 2448383 РФ, МПК H01F. Согласующий симметрирующий трансформатор / Коробейников Г. В., Кохнюк Д. Д., Федоров Я. В., Боровик И. А. 2010139778/07; заявл. 27.09.2010; опубл. 20.04.2012, Бюл. 11.

8. Ефимов И. Е., Останькович Г. А. Радиочастотные линии передачи // Радиочастотные кабели. М.: Связь, 1977. 408 с.

ПАВЛОВ Иван Дмитриевич, инженер-конструктор 3-й категории.

Адрес для переписки: ckba@omsknet.ru

Статья поступила в редакцию 14.07.2017 г.

© И. Д. Павлов

Книжная полка

Агарков, А. П. Проектирование и формирование инновационных промышленных кластеров : моногр. / А. П. Агарков, Р. С. Голов. – М. : Дашков и КО, 2017. – 288 с. – ISBN 978-5-394-02548-8.

Монография посвящена научным основам инновационной деятельности промышленных организаций; разработке многоуровневой интеграции инновационных структур и кластеризации в промышленности; теоретическим основам и перспективам развития инновационных промышленных кластеров (ИПК); основам проектирования и формирования региональных кластеров; развитию организационно-экономических систем на инновационной основе и производственно-предпринимательской деятельности на предприятиях машиностроения; вопросам финансирования и оценки эффективности ИПК. Для преподавателей вузов, научных работников, аспирантов, студентов, руководителей машиностроительных предприятий и промышленных организаций, менеджеров и лиц, интересующихся вопросами инновационной деятельности, кластеризации производства, проектирования и формирования инновационных промышленных кластеров.

Дружин, А. М. Модернизация двигателей внутреннего сгорания. Цилиндропоршневая группа нового поколения / А. М. Дружин. – М. : Инфра-Инженерия, 2017. – 150 с. – ISBN 978-5-9729-0158-6.

Приведены исследования ошибок и недостатков в конструкции цилиндропоршневых групп двигателей внутреннего сгорания, а также способы их устранения. Рассмотрены процессы влияния газодинамики на работу уплотнительных поршневых устройств, гидродинамики — на работу маслосъемных поршневых устройств и термодинамики — на тепловые изменения формы и размеров цилиндра и поршня. Обоснован способ применения воды в рабочих процессах ДВС. Представлены конструкции элементов ЦПГ, реализация которых позволит увеличить мощность и ресурс двигателя, уменьшить расход топлива и моторного масла, улучшить его экологию. Книга будет полезна инженерно-техническим работникам моторостроительных предприятий, ученым и специалистам проектно-технологических институтов, студентам высших и средних учебных заведений, а также слушателям факультетов и институтов повышения квалификации, а также автошколам при изучении теории и практики ДВС.