

УДК 5.53.083

## МЕТОДИКИ ОЦЕНОК ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ И ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

И. В. Скворцов, Р. Р. Латыпов, О. Н. Шерстюков  
Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2019 г.

**Аннотация.** Представлены методики оценок и погрешностей, возникающих при проведении измерений излучения от печатной платы в ближней зоне. Измерения осуществляются с помощью экспериментальной установки, реализованной на основе международного стандарта IEC-61967-3. Особенность установки заключается в использовании системы пробников, позволяющей сканировать все компоненты излучения одновременно. Учет погрешностей и оценок влияния на исходное излучение приводится именно для экспериментальных систем, позволяющих сканировать полный вектор излучения.

**Ключевые слова:** экспериментальная установка, печатная плата, ближняя зона.

**Abstract.** An experimental setup based on the international standard IEC-61967-3 has been implemented. This setup implements a planar method of scanning from a radiating structure. A printed circuit board is investigated as a radiating structure. The main feature of the installation is a system of 3 mutually perpendicular probes. This system allows us to scan radiation from all components simultaneously. However, when conducting measurements, it is necessary to take into account various kinds of factors affecting the initial radiation. This paper provides methods for assessing the influence of various factors affecting the initial radiation from a printed circuit board. The obtained radiation results after preliminary processing are used in the problem of localization of radiation sources. This task is especially relevant in EMC.

**Key words:** experimental setup, printed circuit board, near field.

## Введение

В последние годы заметно возрос интерес к экспериментальным замерам электромагнитного излучения от излучающих объектов, особенно от печатных плат [1-3]. Связано это с тем, что современные печатные платы представляют собой сложные радиотехнические цепи, состоящие из аналоговых и цифровых каскадов. Геометрические размеры компонент платы и микросхем производители также стараются минимизировать. В таких случаях визуально определить наиболее активные области бывает затруднительно. Существуют различные системы автоматизированного проектирования, использующие численные методы моделирования излучения [4]. Однако подобные системы не учитывают реальную топологию изготовленной конструкции, а лишь используют готовые модели компонент из стандартных библиотек системы. Также в моделях бывает сложно смоделировать реальный окружающий фон при проведении эксперимента. По этим причинам особенно актуальны экспериментальные установки, реализующие измерение электромагнитного излучения в ближней зоне [5-7]. Группой исследователей на основе международного стандарта IEC-61967-3 [8] также реализована экспериментальная установка [9], осуществляющая планарный способ сканирования излучения от печатной платы в ближней зоне. Основными преимуществами измерения в ближней зоне являются: отсутствие использования безэховой камеры, точность измерения. Особенностью данной измерительной установки является возможность сканирования полного вектора излучения благодаря использованию системы из 3-х взаимно-перпендикулярных пробников. Таким образом, каждый пробник сканирует только одну компоненту. Полученные результаты измерения являются исходными для решения задачи локализации источников излучения на печатной плате. Данная задача стала особенно актуальной в последнее время в области электромагнитной совместимости [10,11]. Однако, для того, чтобы использовать полученные результаты в задаче локализации, необходимо провести предварительную обработку полученных результатов. В работах

[12,13] даются методики и оценки влияния основных факторов, влияющих на исходное излучение. Однако эти методики пригодны лишь в случае измерения одной компоненты излучения. В данной статье приводятся методики и оценки влияния различного рода факторов на исходное излучение от излучающего объекта в случае измерения полного вектора излучения.

## 1. Описание экспериментальной установки для измерения излучения

Основной целью реализованной экспериментальной установки являлось устранение существующих недостатков современных систем. Эти недостатки включают в себя следующие особенности: отсутствие системы позиционирования, отсутствие возможности варьировать количество точек измерения, для измерения каждой компоненты необходимо повторить эксперимент. Реализованная установка устраняет перечисленные ранее недостатки существующих систем.

Схема реализованной экспериментальной установки изображена на рис. 1.

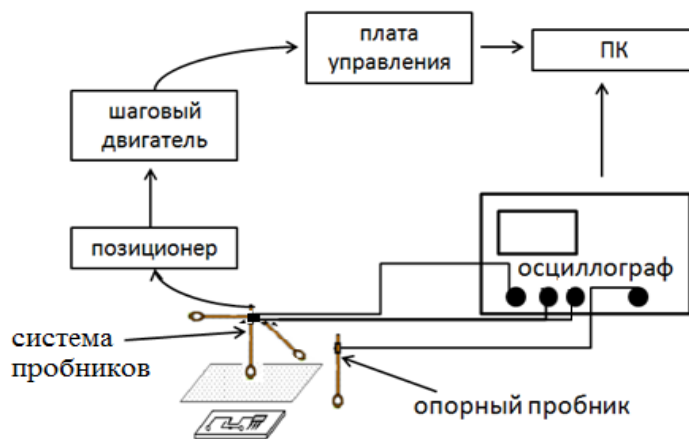


Рис. 1. Схема реализации экспериментальной установки.

В данной установке используется сканирующая система взаимно-ортогональных пробников, позволяющая измерять все компоненты излучения одновременно. Вид системы пробников изображен на рис.2.

Система пробников состоит из 3-х взаимно-ортогональных магнитных петлевых антенн, изготовленных на основе симметричной полосковой линии. Система перемещается вдоль плоскости, параллельной плоскости исследуемой печатной платы. Опорный пробник зафиксирован, и относительно него

определяется фаза излучения. Сканирующие пробники измеряют амплитуду излучения. Смещение системы пробников осуществляется путем подачи команды на шаговые двигатели, которые приводят в движение позиционер с пробниками. Позиционер и шаговые двигатели соединены натяжными ремнями между собой. Команда на шаговые двигателя поступает с ПК через плату управления. Результаты измерения записываются с 4-х канального осциллографа на ПК.



Рис. 2. Система 3-х взаимно перпендикулярных пробников.

## 2. Основные факторы, влияющие на исходное излучение

В ходе проведения эксперимента на исходное излучение воздействуют следующие основные факторы:

1. влияние системы из 3-х взаимно-перпендикулярных пробников на исходное излучение,
2. влияние металлических конструкций, из которых изготовлена экспериментальная установка.

Помимо определения факторов влияния на исходное излучение, также необходимо:

1. оценить ошибку, связанную с неточностью измерения излучения,
2. определить коэффициент пересчета из значений напряжения на выходе пробников в значения напряженности поля,
3. оценить разрешающую способность экспериментальной установки.

### 3. Методики и оценки влияния основных факторов на исходное излучение

#### 3.1. Методика оценки влияния системы пробников на исходное излучение

В идеальном случае каждый пробник должен измерять только одну компоненту излучения и не оказывать влияния на исходное излучение. В реальных условиях возможна ситуация, при которой каждый пробник становится источником излучения вторичных волн, и это необходимо учитывать при проведении эксперимента. С этой целью была реализована модель, которая моделирует возможное влияние системы пробников на излучающий объект. В качестве излучающего объекта исследуется микрополосковая линия. Частота излучения - 100 МГц, расстояние от линии до пробников  $h=1$  см. Вид модели изображен на рис.3.

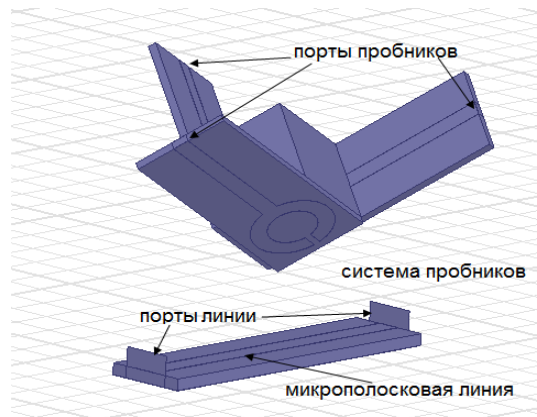


Рис. 3. Модель расчета влияния системы пробников на исходное излучение.

В модели, изображенной на рис. 3, исследуется излучение от микрополосковой линии с помощью системы пробников, которая позволяет сканировать все компоненты излучения одновременно. Система пробников в созданной модели эксперимента перемещается вдоль плоскости, параллельной плоскости излучающего объекта. Порты, расположенные на входе и выходе линии, являются эквивалентом входного сигнала и нагрузки соответственно. С портов, расположенных на выходе каждого магнитного пробника, считывается сигнал, измеренный пробником.

Результаты излучения линии без влияния системы пробников и с влиянием для компоненты  $H_x$  в случае расположения системы пробников в координатах (15,40) изображены на рис.4.

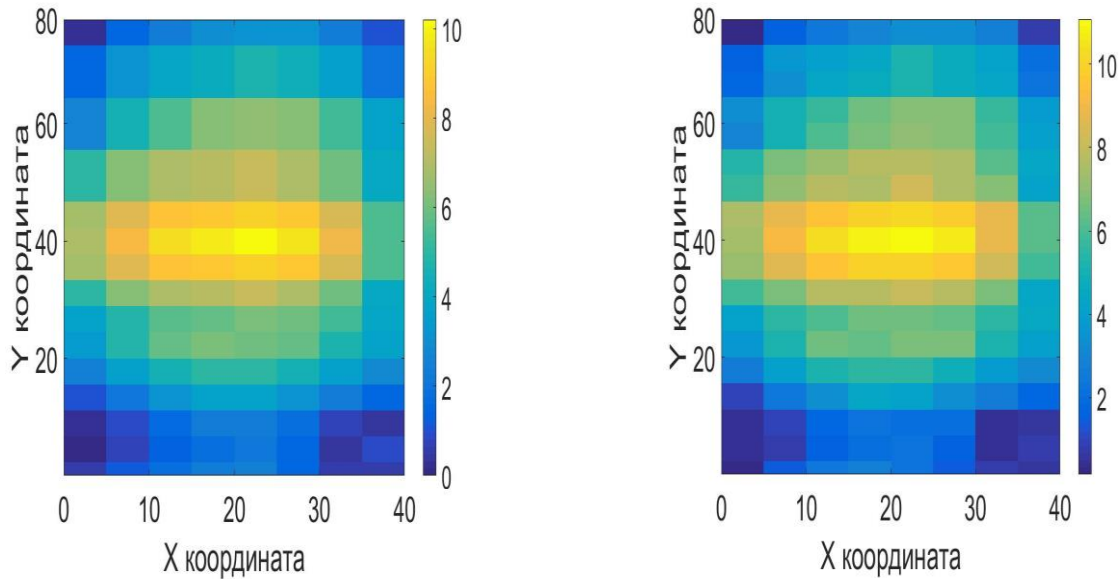


Рис.4. Моделирование  $H_x$  компоненты поля от микрополосковой линии А) без влияния системы пробников Б) с влиянием системы пробников.

Из рис. 4 видно, что влияние системы пробников незначительно. Для более наглядного восприятия результатов моделирования произведен срез вдоль координаты  $X=15$ , и результаты представлены на рис. 5.

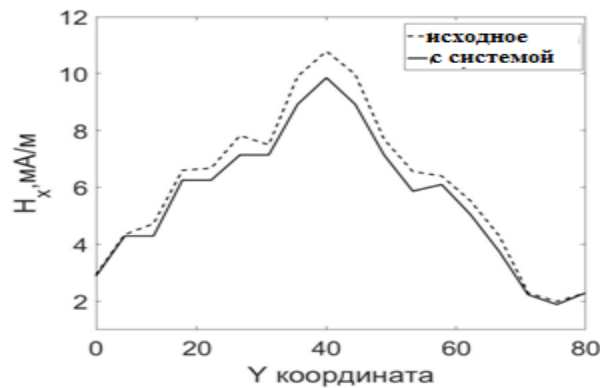


Рис. 5. Компонента  $H_x$  магнитного поля вдоль линии среза  $X=15$ .

Из рис.5 видно, что влияние системы пробников максимально в той точке, где и расположена система пробников, и это влияние убывает по мере увеличения расстояния от системы пробников. В присутствии системы модуль

напряженности излучения уменьшается, что согласуется с правилом Ленца. Влияние пробников на исходное излучение составляет в среднем 9.2 %.

### ***3.2. Влияние металлических составляющих конструкций на исходное излучение***

В экспериментальной установке основной металлической конструкцией является алюминиевый каркас, на который крепится система пробников, и система позиционирования с шаговыми двигателями. Данный каркас способен оказывать влияние на исходное излучение. Реализована модель, имеющая геометрические размеры реального каркаса. Каркас представляет собой куб размером  $1.5\text{ м} \times 1.5\text{ м} \times 1.5\text{ м}$ . Вид модели изображен на рис. 6.

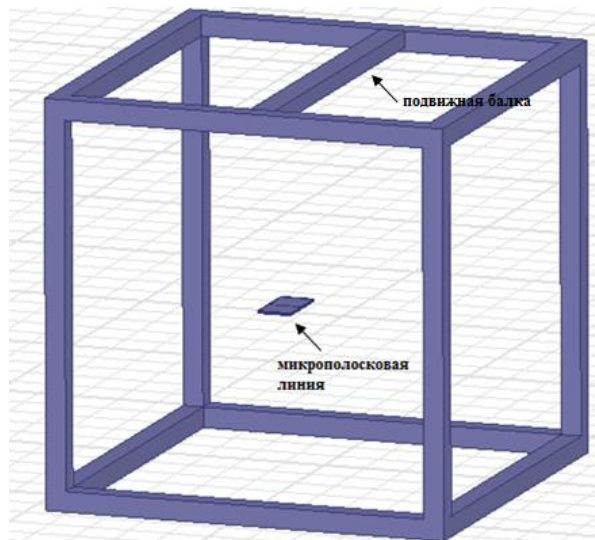


Рис. 6. Вид модели каркаса.

Излучающая структура, помещенная внутрь каркаса, находится в центре. Микророскопическая линия расположена на диэлектрическом столике и поэтому в моделировании не учитывается. Подвижная балка, расположенная наверху каркаса, является подвижной и перемещается вдоль координатных осей. На эту балку крепится система пробников, изображенная на рис.2.

Моделирование проводилось без учета влияния каркаса и с учетом влияния. Влияние каркаса на исходное излучение составляет в среднем 2.3 %.

### ***3.3. Ошибка при неточности измерения излучения***

Система пробников перемещается по типу «змейка», как показано на рис.7.

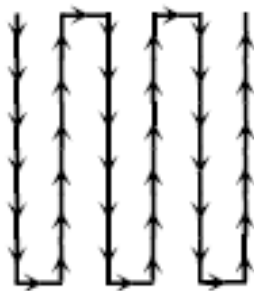


Рис.7. Траектория движения системы пробников.

В ходе проведения эксперимента возможны ситуации, при которых некоторые значения следует отнести к выбросам. Эти выбросы являются результатом влияния непреднамеренных шумов. Для уменьшения влияния случайной ошибки используется критерий Смирнова-Граббса [14]. Данный критерий оценивает сомнительные значения выборки. Согласно критерию Смирнова-Граббса, в независимо измеренном наборе данных  $x_i$  ложный, если он удовлетворяет:

$$t_{\text{расч}} = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma}, \quad (3.1)$$

где  $\bar{x}$  – среднее значение набора данных,  $\sigma$  – стандартное отклонение набора данных, заданное формулой:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (3.2)$$

Расчётное значение сравнивают с табличным  $t_\alpha$ , приведённым в [15]. При  $t_{\text{расч}} > t_\alpha$  результат  $x_i$  считают грубой ошибкой и отбрасывают.

### **3.4. Расчет коэффициента пересчета из значений напряжения на выходе пробников в значения напряженности поля**

При замерах излучения следует отметить, что пробником измеряется напряженность поля в точке, а с выхода осциллографа регистрируются значения напряжения. По этой причине необходимо ввести коэффициент, позволяющий преобразовать значения напряжения на входе приёмника в значения напряженности поля. Выражение принимает вид:

$$V_{i0} = C_i \cdot H_{i0}, \quad (3.3)$$



где  $V_{i0}$  – значение напряжения на выходе пробника в  $i$ -ой точке измерения,  $H_{i0}$  – значение напряженности магнитного поля в  $i$ -ой точке измерения,  $C_i$  – значение коэффициента преобразования в  $i$ -ой точке измерения.

Наиболее простым способом определить значения коэффициента  $C_i$  является создание модели. Вид модели изображен на рис. 8.

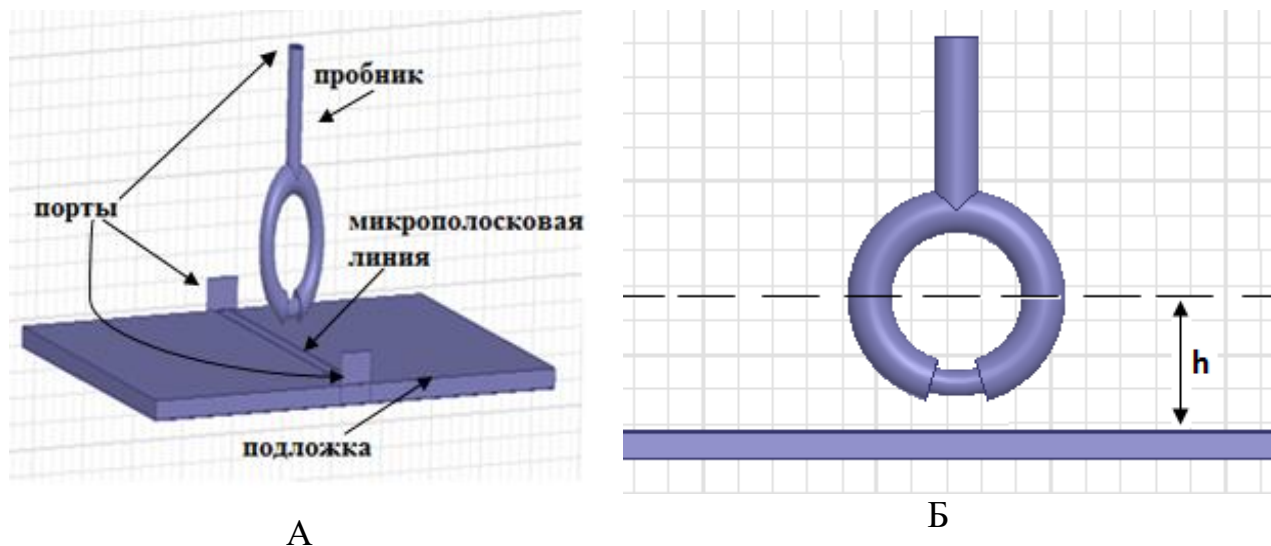


Рис. 8. Модель калибровки измерительной системы.

Для определения коэффициента  $C_i$  необходимо знать значения напряженности поля в каждой точке наблюдения  $H_{0i}$ , а также значения напряжения с выхода пробника  $V_{0i}$ . Значение напряженности  $H_{0i}$  можно получить с помощью численных методов моделирования электромагнитных полей, реализованных в любом пакете моделирования. Значение  $V_{0i}$  снимаются с порта, расположенного на выходе пробника.

### 3.5. Оценка разрешающей способности

Важным критерием является разрешающая способность системы, то есть способность системы различать источники излучения на минимально возможном расстоянии. Существует критерий [16], позволяющий теоретически оценить предельное расстояние между источниками, при котором еще возможно получить достаточную информацию при сканировании излучения:

$$\Delta s = \frac{\lambda}{2\sqrt{1+(\lambda/d)^2}}, \quad (3.4)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $d$  – расстояние от излучающего объекта до пробника.

Например, если проводить измерение на частоте 100 МГц при расстоянии от излучающего объекта до пробника 1 см, то  $\Delta s=5$  мм. Таким образом, теоретически подходит любое расстояние, не больше  $\Delta s$ . Для этого была изготовлена тестовая плата с двумя микрополосковыми линиями, разнесенными на расстоянии 4 мм. Сигнал на обе линии подается синхронно. Пробник перемещался вдоль линии перпендикулярно микрополосковым линиям. Иллюстрация эксперимента изображена на рис. 9.

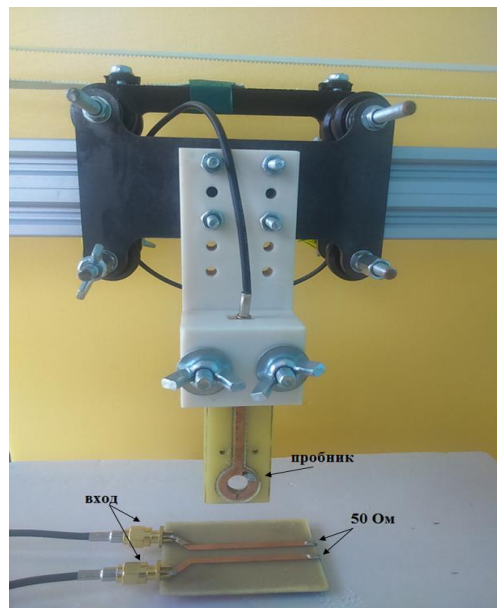


Рис. 9. Иллюстрация эксперимента для оценки разрешающей способности.

Для оценки разрешающей способности были изготовлены 4 пробника на основе симметричной полосковой линии с разными диаметрами, вид которых изображен на рис. 10.

Из теории петлевых антенн известно, что длина петли  $L \approx \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны на которой производятся замеры. Если проводить измерения в пределах 50-200 МГц, то геометрические размеры пробника будут слишком велики и у такого пробника будет низкая разрешающая способность. Поэтому целесообразней изготовить пробник с геометрическими размерами меньшими, чем размеры исследуемого объекта. Приемная способность такого пробника будет ощутимо хуже, чем пробника, рассчитанного строго на заданную частоту,

например 100 МГц. В этом случае, зная S-параметры каждого пробника (например,  $S_{11}$  – коэффициент отражения пробника), можно учитывать потери при измерениях.

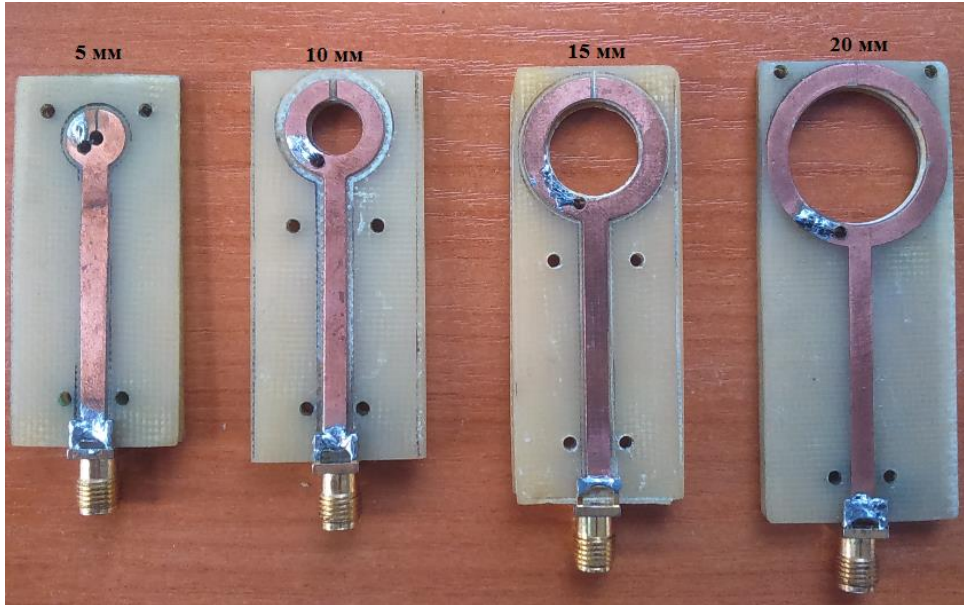


Рис. 10. Вид пробников с разными диаметрами.

Критерием оценки разрешающей способности является поиск оптимума, то есть минимальной разницы между исходным излучением и измерениями с пробника. Полученные результаты представлены на рис. 11.

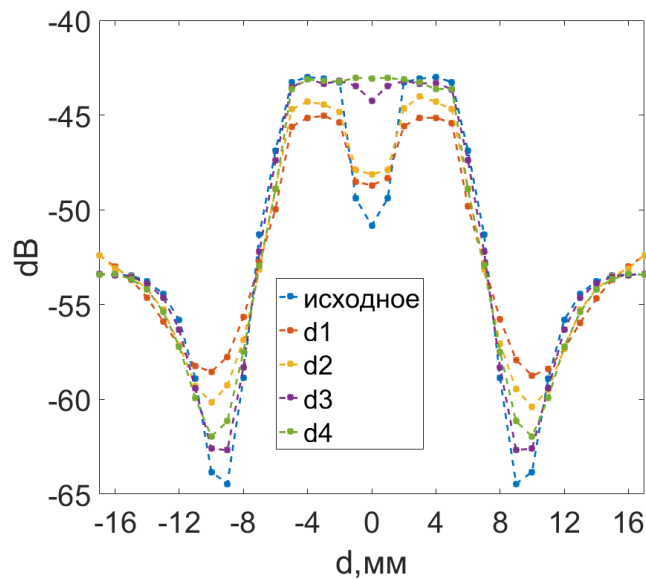


Рис. 11. Результаты замеров излучения от линий пробниками с разными диаметрами кольца.

Из полученных результатов следует, что чем больше диаметр кольца пробника, тем лучше прием сигнала, но тем хуже разрешающая способность. Например, разница значений в максимуме излучения между пробниками  $d3$  и  $d4$  и исходным излучением невелика, но разрешающая способность близка к нулю. Пробники  $d1$  и  $d2$  имеют лучшую разрешающую способность, но хуже принимают сигнал в максимуме излучения. Исходя из результатов, наименьшая разница между исходным излучением и излучением, измеренным пробником, соответствует пробнику  $d2$  с диаметром кольца равным 10 мм. Таким образом, для детектирования источников излучения, разнесенных на расстояние 4 мм друг от друга, необходимо использовать систему пробников, в которой каждый пробник имеет диаметр  $d2$ .

### **Заключение**

В работе приведены методики оценок влияния и погрешностей, возникающих при измерениях электромагнитного излучения от излучающего объекта. Для проведения эксперимента по измерению электромагнитного излучения изготовлена экспериментальная установка, реализующая планарный способ сканирования на основе международного стандарта IEC-61967-3. Данные методики пригодны для использования в случае сканирования полного вектора излучения.

### **Литература**

1. Rinas D., Ahl P., Frei S. PCB current identification based on near-field measurements using preconditioning and regularization. *Advances in radio science*. 2016. Vol. 14. P. 121-127.
2. Nishikata A., Wada Y., Tawada M., Takabe Y. Threedimensional dipole source identification using two fixed receiving antennas and its new algorithm, *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2014. P. 33-36.
3. Zhenwei Y., Jayong K., Mix J., Slattery K., Jun F. Extracting physical IC models using near-field scanning. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2010. P. 317-320.

4. Sumithra P., Thiripurasundari D. A review on computational electrotromagnetics methods. *Advanced electromagnetic*. 2017. Vol. 6. P. 42-55.
5. Tian G., Li J. Study on magnetic probe calibration in near field measurement system for emi application. *Journal of Electronic Testing*. 2017. P.741-750.
6. Yan Z., Wang J. A miniature ultrawideband electric field probe based on coax-thru-hole via array for near field measurement. *IEEE Transcations on instrumentation and measurement*. 2017. P.1-7.
7. EMxpert от 20 MHz - 1 GHz [Электронный ресурс] URL: [http://dev.ccontrols.pl/cms/upload/content/news/EMxpert\\_Datasheet.pdf](http://dev.ccontrols.pl/cms/upload/content/news/EMxpert_Datasheet.pdf) (дата обращения: 21.11.2019).
8. *Integrated circuits - Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz - Part 3: Measurement of radiated emissions - Surface scan method*, IEC 61967-3:2005, 2005.
9. Скворцов И.В., Латыпов Р.Р., Шерстюков О.Н., Бабаев Р.Ф. Экспериментальная установка для измерения электромагнитного излучения от излучающей структуры в ближней зоне. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2019. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/13/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.13
10. Gorbunova A., Baev A., Konovalyuk A., Kuznetsov M. Localization of cyclostationary EMI sources based on near-field measurements. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*. 2015. P.45-455.
11. Tong X. *Simplified equivalent modelling of electromagnetic emissions from printed circuit boards*. University of Nottingham, PhD thesis. 2010.
12. Joseph W., Martens L. The influence of the measurement probe on the evaluation of electromagnetic fields. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2003. Vol. 43. No. 2. P. 339-349.
13. Newell A. Error analysis techniques for planar near-field measurements. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*1988. Vol. AP-36. No. 6. P. 754-768.

14. Frank E. Grubbs. Sample Criteria for Testing Outlying observations. *Ann. Math. Statist.* 1950. Vol. 21. No. 1. P.27-58.
15. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. *Таблицы математической статистики*. Наука. 1983.
16. Joy E.B., Paris D.T. Spatial sampling and filtering in near-field measurements. *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 1972. Vol. AP-20. P. 253-261.

**Для цитирования:**

Скворцов И.В., Латыпов Р.Р., Шерстюков О.Н. Методики оценок влияния основных факторов и погрешностей на измерение электромагнитного излучения от печатной платы в ближней зоне. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec19/2/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.12.2