

УДК 621.317.1

*Р. Гартянски, кандидат технических наук, доцент;**Л. Маршалка, аспирант;**Э. Кочнер, аспирант;**Словацкий технический университет, г. Братислава, Словакия**В.В. Хворенков, доктор технических наук, профессор;**Ю.Л. Караваев, старший преподаватель**Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Россия***ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ПРОВОДНИКА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ***

Представлен метод теоретического расчета входного сопротивления линейного электрического вибратора в зависимости от размеров проводника, находящегося в его окрестности. Получена теоретическая зависимость длины проводника от входного сопротивления методом наведенных ЭДС. Проведены численное моделирование (методом моментов) и эксперимент, подтверждающие достоверность теоретического расчета.

Ключевые слова: входное сопротивление вибратора, бесконтактное измерение расстояния, метод наведенных ЭДС, метод моментов

В различных отраслях техники при использовании микроэлектромеханических систем (МЭМС) существует необходимость измерения расстояния или размеров механических деталей в диапазоне микро- и нанометров, например, измерение размеров губок микросхвата. При использовании стандартных методов измерений возрастают погрешности, связанные с размещением измерительного прибора (датчика) на элементах МЭМС. Идеальным является использование такого метода измерения, при котором не требуется установки дополнительных элементов измерительной системы, способных оказать влияние на функциональность МЭМС. В этом случае эффективнее проводить измерения параметров окружающей среды, изменяющихся, например, при изменении положения губок схвата МЭМС. К подобным методам относятся бесконтактные методы измерения, основанные на изменении оптических или электромагнитных характеристик в непосредственной близости от МЭМС в зависимости от геометрических размеров исследуемых объектов или их взаимного положения. В данной статье рассмотрена зависимость изменения параметров электромагнитного поля от расстояния и длины электрически проводимых структур.

Теория взаимного сопротивления вибраторов

Рассмотрим входное сопротивление излучателя электромагнитного поля – полуволнового вибратора [1]:

$$Z_m = -\frac{1}{I_m^2} \int_{-h}^h I_z(\rho = \varphi, z = z') E_z(\rho = \varphi, z = z') dz'. \quad (1)$$

Для тонкого вибратора распределение тока I_z по его поверхности можно рассчитать по плотности тока J_z . Для полуволнового вибратора:

$$I_z = 2\pi\phi J_z = I_m \sin[k(h - |z|)], \quad (2)$$

где ϕ – длина периметра поперечного сечения проводника вибратора; k – волновое число; h – половина физической длины вибратора; E_z – напряженность

электрического поля, созданного вибратором. Для расчета этого поля используем формулу:

$$E_z = -j \frac{\eta I_0}{4\pi} \left[\frac{e^{-jkR_1}}{R_1} + \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} - 2 \cos(kh) \frac{e^{-jkr}}{r} \right], \quad (3)$$

где η – импеданс свободного пространства. Выражение (3) получено на основе эквивалентного замещения линейного проводника вибратора двумя точечными зарядами. Вектора R_1 , R_2 определяют расстояния между данными точечными зарядами и точкой, для которой проводится расчет напряженности E_z .

Уравнение (1) можно преобразовать, используя уравнения (2) и (3), представив вид распределения тока на плечах вибратора:

$$Z_m = \frac{j30}{\sin^2(kh)} \times \int_{-h}^h \sin[k(h - |z'|)] \left[\frac{e^{-jkR_1}}{R_1} + \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} - 2 \cos(kh) \frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz'. \quad (4)$$

Если вблизи вибратора установить проводник, то между ними будет наблюдаться взаимное влияние друг на друга [1]. Это взаимодействие приведет к изменению входного сопротивления, поскольку возникает взаимное сопротивление, определяемое по формуле:

$$Z_{21} = -\frac{1}{I_{1i} I_{2i}} \int_{-h}^h I_2(z') E_{z21}(z') dz'. \quad (5)$$

Подставляя уравнения (2) и (3) в (5), получаем:

$$Z_{21} = j30 \times \int_{-h}^h \sin[k(h_2 - |z'|)] \left[\frac{e^{-jkR_1}}{R_1} + \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} - 2 \cos(kh_1) \frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz'. \quad (6)$$

Уравнение (6) содержит две величины: h_1 – длина полуволнового вибратора, излучателя электромагнитного поля; h_2 – длина находящегося вблизи проводника.

Предположим, что вибратор и проводник расположены параллельно. Тогда длину векторов определим следующим образом:

$$\begin{aligned} R_1 &= \sqrt{d^2 + (z' - h_1)^2} \\ R_2 &= \sqrt{d^2 + (z' + h_1)^2} \\ r &= \sqrt{d^2 + z'^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $-h_2$ и $+h_2$ – пределы интегрирования; d – расстояние между вибратором и проводником.

Входное сопротивление вибратора

Проведем расчет входного сопротивления вибратора в соответствии с уравнением (3) – сопротивление вибратора в бесконечном линейном пространстве при отсутствии дополнительных электропроводимых предметов. Это необходимо для проверки правильности применяемого подхода. Входные данные для уравнения (3): длина вибратора $2 \times h_1 = 462$ мм и диаметр вибратора $\Phi = 3,6$ мм.

Для оценки и проверки достоверности полученных значений входного импеданса проведен расчет численным методом с использованием метода моментов в программном продукте FEKO, а также проведены измерения параметра S11 в экранированной безэховой камере для определения входного импеданса.

Резонанс полуволнового вибратора проявляется на частоте приблизительно:

$$f_r = \frac{c}{2 \cdot 2 \cdot h_1} = 324 \text{ МГц.} \quad (8)$$

Согласно [1], входной импеданс полуволнового вибратора при f_r равен $72 + j 42$.

Сравнение значений входного сопротивления полуволнового вибратора при резонансной частоте

	Теоретический расчет	Численный расчет	Эксперимент
$\text{Re}\{Z_m\}$ [Ом]	73	89	107
$\text{Im}\{Z_m\}$ [Ом]	43	41	–27

В таблице представлены значения входного сопротивления полуволнового вибратора. Разница между значениями, представленными в таблице, объясняется разницей условий при проведении численного моделирования и реального эксперимента (диаметр проводника вибратора, расстояние между плечами вибратора и т. д.). Причина полученных различий не является предметом данной статьи.

Взаимное сопротивление вибраторов

Рассмотрим случай, когда на расстоянии $d = 78$ мм от полуволнового вибратора находится проводник конечной длины $2 \times h_2$ и диаметром $\Phi = 3,6$ мм.

Входное сопротивление полуволнового вибратора изменяется с изменением взаимного сопротивления. На рис. 1 крупной пунктирной линией представлена зависимость входного сопротивления одного вибратора от частоты без влияния второго вибратора. Мелкой пунктирной линией представлена частотная зависимость взаимного сопротивления двух вибраторов $\text{Re}\{Z_{21}\}$, сплошной линией – частотная зависимость входного сопротивления первого вибратора с учетом влияния второго вибратора. Графические зависимости, представленные на рис. 1, получены по формулам (4) и (6) при $2 \times h_2 = 71$ см.

При анализе полученных графических зависимостей (рис. 1) очевидно, что форма графика зависимости входного сопротивления вибратора от частоты изменяется при появлении вблизи другого вибратора. График зависимости входного сопротивления от частоты (график $\text{Re}\{Z_m\}$ на рис. 1) – монотонно возрастающая функция на интервале с 0 до 500 МГц. При появлении в окрестности вибратора проводника – второго вибратора – происходит изменение активной части входного сопротивления первого вибратора.

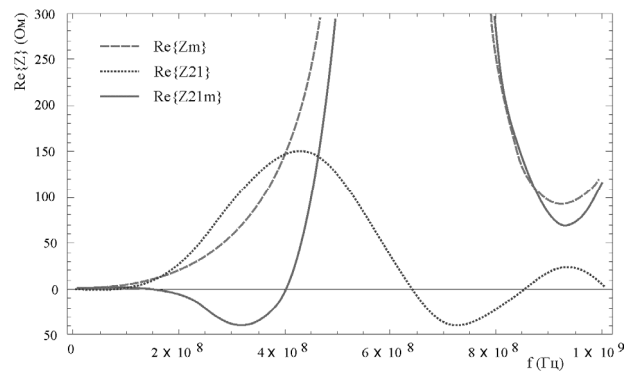


Рис. 1. Активные части взаимного и входного сопротивления

Положение минимума функции входного сопротивления зависит от длины второго вибратора, с увеличением длины положение минимума смещается в сторону уменьшения частоты. Анализируя уравнения (4)–(6), можно сделать вывод, что существует зависимость между длиной линии, находящейся вблизи вибратора, и частотой минимума входного сопротивления вибратора. Максимумы функции по результатам теоретического расчета находятся в пределах от 2×10^9 Ом до 3×10^9 Ом при частотах в диапазоне от 500 до 700 МГц. На данных интервалах зависимости изменения активной части входного сопротивления вибратора от частоты напряжения питания и длины второго вибратора не наблюдаются, поэтому дальнейшие исследования проводились для диапазона частот 0 до 350 МГц, в котором они проявляются в большей степени.

Проведение численного моделирования

Для подтверждения результатов теоретических расчетов, представленных выше, в программном продукте FEKO проведено численное моделирование взаимодействия двух проводников. FEKO позволяет

проводить расчеты высокочастотных (ВЧ) полей, токов, напряжений в различных структурах проводников, кабелей, длинных линий, плоскостей при разных видах питания и достаточно полно удовлетворяет требованиям расчетов в электромагнетизме [2]. В численной модели учитываются длины параллельных линии (вибраторов), расстояния между ними, а также их диаметры, в отличие от теоретического расчета, где диаметр второго вибратора учесть невозможно.

На рис. 2 представлена частотная зависимость входного сопротивления от длины проводника, полученная в результате численного моделирования. Проведены расчеты для значений длин $2 \times h_2$ от 47 до 72 см. Минимум частотной характеристики изменяется в зависимости от значения длины $2 \times h_2$.

При длине 72 см минимум функции находится на частоте приблизительно 200 МГц, если $2 \times h_2 = 47$ см, то минимум функции проявляется на частоте 300 МГц. Для данного диапазона минимум функции изменяется с шагом 4 МГц/см. Таким образом, используя данный метод, можно достичь высокой точности бесконтактного измерения длины.

Экспериментальные исследования

Теоретический и численный расчеты проведены для бесконечного линейного пространства – вакуума. На практике нет возможности проведения эксперимента в подобном пространстве. В окрестности измеряемого объекта всегда находятся полупроводящая земля, электронные приборы и т. д. Для минимизации влияния окружающей среды на результаты измерений эксперименты проводились в экранированной безэховой камере Института электротехники Словацкого технологического университета. По измеряемому прибором Agilent E5071C-285 Network Analyser параметру S11 рассчитывались активная и реактивная составляющие входного сопротивления. Частотная зависимость значений реактивной составляющей имеет похожий, но менее выраженный характер.

Сравнение результатов, полученных при численном моделировании (рис. 2) с результатами эксперимента (рис. 3), позволяет сделать вывод о схожести построенных графических характеристик и положений минимумов функции в полосе частот для соответствующих значений длины $2 \times h_2$.

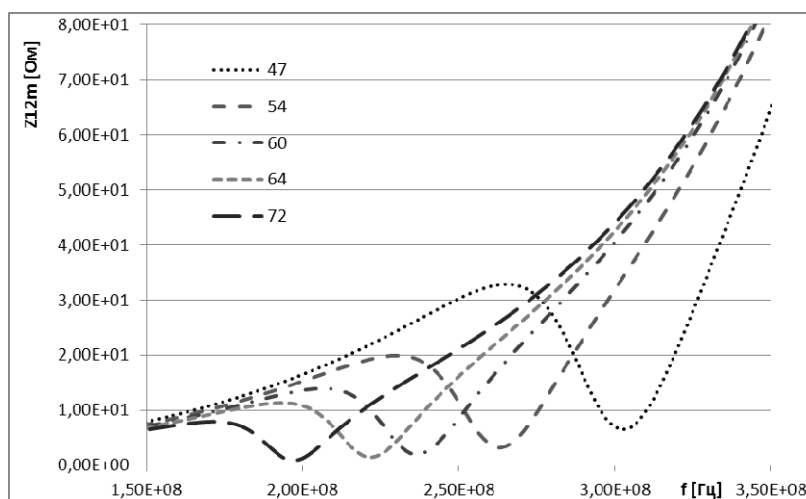


Рис. 2. Зависимости входного сопротивления вибратора от частоты напряжения питания и длины второго вибратора – численный расчет

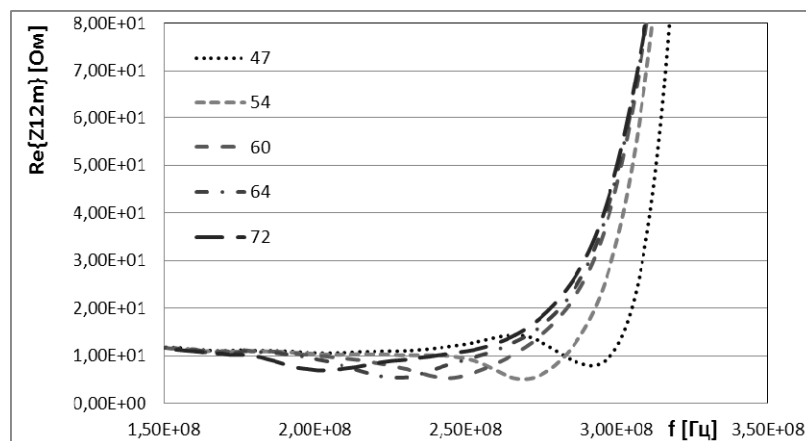


Рис. 3. Зависимости входного сопротивления вибратора от частоты напряжения питания и длины второго вибратора – эксперимент

Бесконтактное измерение длины

В результате теоретического расчета, численного моделирования и эксперимента определена зависимость положения минимума функции входного сопротивления в полосе частот от длины проводника, находящейся в окрестности вибратора. Данная зависимость может быть положена в основу бесконтактного измерения длины проводника вблизи вибратора или расстояния между проводниками на основе измерения частоты минимума входного сопротивления. Зависимости минимума функции входного сопротивления в полосе частот от длины проводника, полученные разными методами, имеют одинаковую форму и представлены на рис. 4. Погрешности теоретического расчета (относительная погрешность 39–48 %) объясняются тем, что при расчете не учитывались форма и площадь сечения проводника. Относительная погрешность численного расчета и экспериментальных исследований находится в интервале от 0,2 до 10 %.

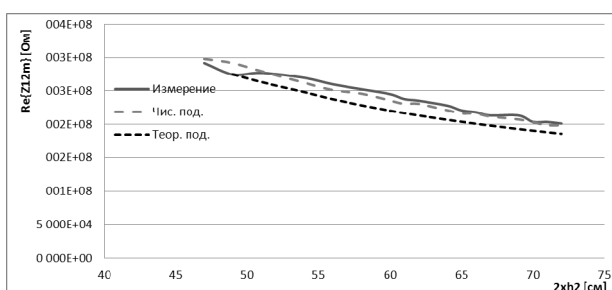


Рис. 4. Зависимости минимума функции активной части входного сопротивления от длины проводника

Несмотря на данные отклонения, как при численном моделировании, так и при теоретическом расчете и экспериментальных исследованиях, получены характеристики обратно пропорциональной зависимости минимума функции активного входного сопротивления от длины проводника. Данные зависимости подтверждают гипотезу возможности ис-

пользования рассматриваемого метода для бесконтактного измерения длины проводимых материалов или расстояния между ними.

Заключение

В статье представлен теоретический подход к определению входного сопротивления вибратора в зависимости от длины проводника, который находится в его окрестности. Представлена зависимость между длиной проводника и минимумом характеристики активной части входного сопротивления. Проведено сравнение результатов теоретических исследований с результатами численного моделирования и эксперимента. Разработанный метод определения длины или расстояния между вибраторами по входному сопротивлению может использоваться в качестве бесконтактного метода измерения длины или расстояния.

Благодарность

Данная статья профинансирована в рамках проекта № 2010-218-02-259 за счет субсидий Минобрнауки России по договору № 13.G25.31.0094 от 22.10.2010 г., и работа выполнена при финансовой поддержке проекта VEGA 1/0963/12 и VEGA 2/0006/10.

Библиографические ссылки

1. Balanis A. C. Antenna Theory Analysis and Design. – New York : Harper & Row, 1982. – 941 p. – ISBN 0-471-59268-4.
2. Bittera M., Smiesko V., Kovac K., Hallon J. Directional Properties of the Bilog Antenna as a Source of Radiated Electromagnetic Interference Measurement Uncertainty // IET Microwaves Antennas & Propagation. – 2010. – Vol. 4, Iss. 10. – Pp. 1469-1474.
3. Maršalka L., Hartánský R. Analysis of Possible Short Length Measurement Using Energy Sucking of Electromagnetic Field // MEASUREMENT 2011 : Proceedings of the 8th International Conference on Measurement. Editori J. Maňka, V. Witkovský, M. Tyšler, I. Frollo. – Bratislava : Institute of Measurement Science SAS, 2011. – Pp. 241-244.

* * *

R. Hartánský, PhD in Engineering, Associate Professor

L. Maršalka, Post-graduate, Slovak Technical University in Bratislava, Slovakia

E. Kocner, Post-graduate, Slovak Technical University in Bratislava, Slovakia

V. V. Khvorenkov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Yu. L. Karavayev, Assistant Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Length wire measurement in electromagnetic field

The paper deals with a method for calculating the theoretical input dipole impedance, depending on the wire size located in its vicinity. The theoretical wire length dependence of the input dipole impedance by the induced EMF was obtained. The numerical simulation (moment method) and the experiment confirm the validity of the theoretical calculation.

Keywords: dipole input impedance, non-contact length measurement method, method of induced EMF, moment method

Получено: 01.11.12