

ГПа, позволяет рекомендовать четырехпроходное роликовое ППД для улучшения свойств деталей трибологического назначения.

Таблица 1 – Свойства поверхности вала после ППД, полученные методом АСМ.

Кол-во проходов	R _a (АСМ), nm	Модуль упругости на глубине 20 нм (АСМ), ГПа	Сила адгезии между поверхностью и АСМ-зондом, мкН
1	26	-	9.0
2	31	4.1	8.8
3	66	4.3	5.2
4	79	4.6	7.3

1. Chomiene, V., Valiorgue, F., Rech, J., Verdu, C., Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 13, 2016, pp. 90 – 96.

2. Hua, W., Man, B., Liu, B., Contact force studies of a burnishing slider, Tribology International, 41, 2008, pp.60 – 66.

3. Ahmed, R., Sutcliffe, M.P.F. Indentation of surface features on cold-rolled stainless steel strip, Wear, Vol. 244, 2000, pp. 60 – 70.

4. Balland, P., Tabourot, L., Degre, F., Moreau, V., Mechanics of the burnishing process, Precision Engineering, Vol.37, 2013, pp. 129 – 134.

5. Labuda, W., Charchalis, A., The influence of finish tooling on friction properties of steel applied to sea water pump shafts, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 21 No. 2, 2014, pp. 185 – 192.

6. Labuda, W., Charchalis, A., The analysis of finish tooling influence on wear intensity of marine pump shaft, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 20, No. 1, 2013, pp. 163 – 170.

УДК 621.317

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО МЕТАМАТЕРИАЛА С ВАРАКТОРНЫМИ ДИОДАМИ

Курило В.С., Рудницкий А.С.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Метаматериальные поглотители (metamaterial absorber - ММА) со своеобразными электромагнитными свойствами вызвали большой интерес в течение последнего десятилетия [1]. Элементарные единицы метаматериала чаще всего располагаются периодически, имеют размер много меньше длины волны и удовлетворяют модели Лоренца–Друде, так же как нормальный материал [2]. Взаимосвязь между свойствами этих единиц и макроскопическими свойствами метаматериала устанавливается на основании теории эффективного усреднения [3].

Рабочая частота традиционных метаматериалов фиксирована и не может изменяться после изготовления. Поэтому все больше внимание уделяется разработке перестраиваемых ММА. В работе [4] исследована поверхность с высоким импедансом и с расположенными на ней резисторами и варакторными диодами. В статье [5] продемонстрирован переключаемый отражатель-поглотитель с диодами в структурных ячейках метаматериала. Реализуются два возможных состояния диодов: «Включен», «Выключен» и возможность переключения состояний. При их оптимизации могут быть полезными исследования электромагнитных свойств ячейки метаматериала в зависимости от параметров, которые можно изменять электрическим или другим способом.

В данной работе представлены результаты исследования метаматериалов из периодически расположенных на подложке ячеек, образованных микрополосковыми элементами, включенными между ними конденсаторами и резистивными пленками.

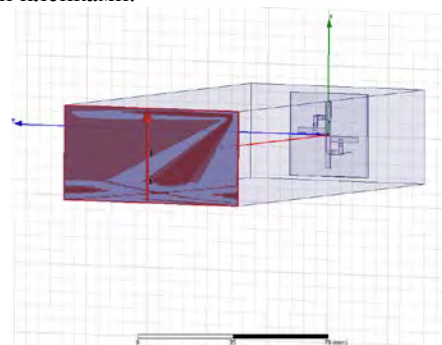


Рисунок 1. Вычислительная модель с ячейкой метаматериала

Предположим, что требуется обеспечить перестройку частоты минимального коэффициента отражения электромагнитной волны от метаматериального покрытия металлической поверхности при ограничении уровня отражения вне резонансной частоты. Этому условию частично удовлетворяет модель, показанная на рисунке 1. Она исследована методом компьютерного моде-

лирования и выполнена экспериментальная проверка результатов моделирования.

На рисунке 2 показан вид сверху печатной платы ячейки метаматериала. Ячейка содержит четыре диода, резистор и цепь смещения. Местоположение элементов указано на этом рисунке. Катоды SMD корпуса диодов отмечены чертой. На точку 0 подается общий потенциал, на точку 1 подается управляющее напряжение смещения.

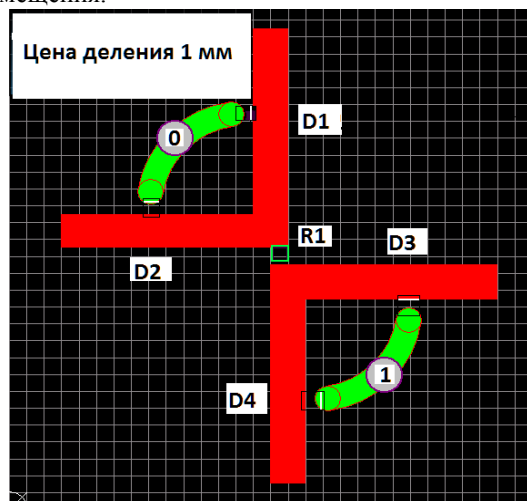


Рисунок 2. Вид сверху печатной платы ячейки метаматериала

Ячейка реализована на диэлектрической пластине FR4 с относительной диэлектрической проницаемостью $4.4(1 - j0.03)$ толщиной 1 мм. Длина одной стороны микрополосковой линии 13 мм, ширина 2 мм. Сопротивление резистора равно 50 Ом. Напряжение смещения диодов подается в точки 0 и 1 через проходные конденсаторы емкостью 3.3 нФ длиной 8 мм. Таким образом, эти конденсаторы удерживают пластину на расстоянии 8 мм от металлической поверхности.

Омические потери учитываются путем выбора конечного импеданса микрополосковых линий в области диодов и цепи подачи напряжения смещения. Импедансы равны 2 и 10 Ом/квадрат. Конфигурационная модель, которая используется для вычисления частотной зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны от ячейки метаматериала, соответствует схеме экспериментальных измерений, выполненным в отрезке волновода сечением $32 \times 74 \text{ мм}^2$.

В модели варикапы представлены конденсаторами C_x (диоды D2 и D3) и C_y (диоды D1 и D4). Результаты вычислений показаны на рисунке 3 для трех комбинаций емкостных параметров диодов.

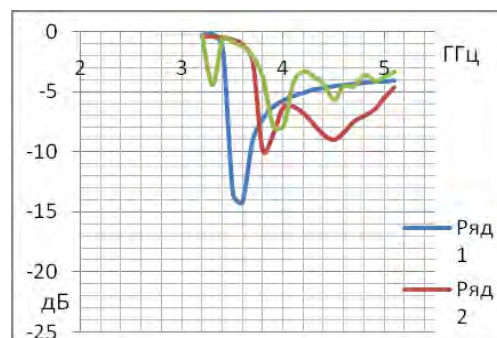


Рисунок 3. Зависимость коэффициента отражения от частоты при 1: $C_x=0.18 \text{ пФ}$, $C_y=0.18 \text{ пФ}$, 2: $C_x=0.33 \text{ пФ}$, $C_y=0.1 \text{ пФ}$, 3: $C_x=0.1 \text{ пФ}$, $C_y=0.33 \text{ пФ}$

Проведены экспериментальные измерения коэффициента отражения от ячейки метаматериала, установленной на короткозамкнутой стороне волновода сечением $32 \times 74 \text{ мм}^2$. Измерения проводились для четырех типов диодов: BAS321 (сокращенное обозначение (SMD - ///A7), BAV70 (SMD - A4t), BAV99 (SMD - A7), BAS70-04 (SMD - 74) в диапазоне частот от 2 ГГц до 6 ГГц. Использовался векторный анализатор цепей Agilent 8722ET. Измерительный тракт калибровался в состоянии разомкнутого конца коаксиальной линии и в состоянии подключенной согласованной нагрузки. Нагрузка подключается к волноводу в сечении, относительно которого в дальнейшем устанавливается исследуемая ячейка метаматериала. При измерениях согласованная нагрузка заменяется медной пластиной, выполняющей роль короткозамыкателя волновода. Исследуемая ячейка крепится на этой пластине на расстоянии 8 мм с использованием двух проходных конденсаторов емкостью 3.3 нФ. Через эти конденсаторы подается напряжение смещения на четыре полупроводниковых диода от источника питания TEC88 в пределах от -2 В до +2 В.

Наблюдается качественное соответствие результатов эксперимента и моделирования. Расхождение обусловлено упрощенной моделью варикапов, которая может быть уточнена по результатам эксперимента.

Лучшие результаты получены с диодами BAS321. Они показаны на рисунке 4.

Минимальная частота резонансного поглощения на 3.4 ГГц, максимальная – 5.9 ГГц. Минимальное значение коэффициента отражения – 20 дБ. Максимальная ширина полосы поглощения по уровню -6дБ – 800 МГц.

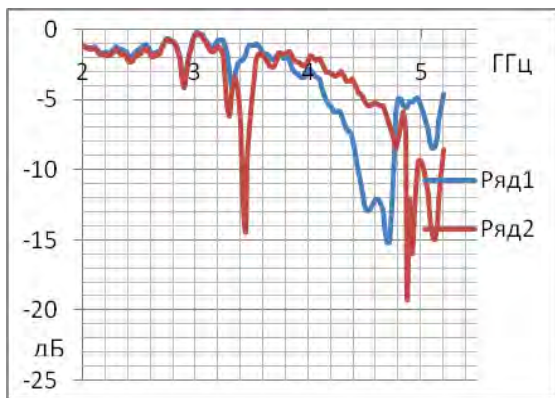


Рисунок 4. Экспериментальные результаты измерения зависимости коэффициента отражения от частоты для ячейки метаматериала с четырьмя диодами BAS321, 1: -2 В, 2: 0 В

1. Cui T.J., Smith D.R. and Liu R.P. *Metamaterials: Theory, Design and Applications* (New York: Springer, 2009).
2. Smith D.R. and Pendry J.B. Homogenization of metamaterials by field averaging (invited paper) // *J. Opt. Soc. Am. B*, Marth 2006. Vol.23, No.3. p. 391.
3. Landy N.I., Sajuyigbe S., Mock J.J., Smith D.R. and Padilla W.J. Perfect Metamaterial Absorber// *Phys. Rev. Lett.* 2008. 100 207402 .
4. Mias C. and Yap J.H. A varactor-tunable high impedance surface with a resistive-lumped-element biasing grid // *IEEE Trans. Antennas Propag.* 55(7), 1955–1962, July 2007.
5. Zhu, Y. J. Feng, J. M. Zhao, C. Huang, and T.A. Jiang. Switchable metamaterial electromagnetic waves//*Appl. Phys. Lett.* 97(5), 051906 (2010).

УДК 621.9.022

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ СТАТИКИ И ДИНАМИКИ ГЛОБУСНОГО СТОЛА 5-КООРДИНАТНОГО МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА С ЧПУ

Луговой В.В., Луговой В.П.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Особую роль в машиностроительной отрасли принадлежит многокоординатным станкам с ЧПУ, неотъемлемым атрибутом которых являются глобусные столы. Проведение последовательных натурных испытаний глобусного стола для оптимизации рациональной конструкции представляет длительную и дорогостоящую задачу. В связи с этим решение данной задачи решается путем виртуальных испытаний с использованием компьютерных программ, позволяя ускорить процесс оптимизации конструкций глобусного стола. Наиболее приемлемым аналитическим методом оценки жесткости и анализа прочностных характеристик машиностроительных конструкций является метод конечных элементов.

Программный комплекс ANSYS позволил и позволил осуществить:

- статический и динамический анализ конструкций;
- определить собственные моды и резонансные спектры вынужденных колебаний, а также смещений и напряжений по известным вибрационным спектрам;
- провести динамический анализ переходных процессов и точный динамический анализ.

Целью настоящих исследований является оптимизация конструкции типового глобусного стола и выявление конструктивных факторов, влияющих на его статическую и динамическую жесткость.

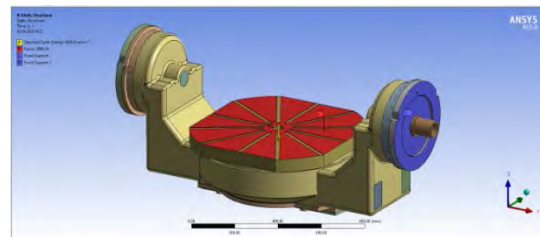


Рисунок 1 – Общий вид модели глобусного стола

Глобусный стол предназначен для поворота закрепленной заготовки вокруг двух осей: вертикальной и продольной горизонтальной. Он содержит поворотный стол, вращающийся вокруг вертикальной оси и корпус, поворачивающийся вокруг продольной оси. Он представляет собой полую конструкцию, жестко сочлененную из центральной круглой части и боковых кронштейнов, имеющих угловую прямоугольную форму. Механизм поворотного стола образует сборный узел, состоящий из поворотного стола, шагового двигателя и опоры качения. В результате конечно-элементного моделирования и экспериментальных исследований частот и форм собственных колебаний несущей системы 5-координатного стола станка с ЧПУ, выявлены 10 резонансных мод в диапазоне частот до 1635 Гц. Установлено, что наибольшее снижение виброустойчивости стола возникает при действии вынужденных колебаний частотой