

pananos // IEEE. Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing. – 2000. – Vol. 47, No. 8. – P. 699–713.

7. Voorman J.O. Continuous-time analog integrated filters // Integrated Continuous-Time Filters-Principles, Design, and Applications. – 1993. – P. 15–46.

8. Dill H.G. Designing inductors for thin film applications // Electronic Design. – 1964. – P. 52–59.

9. Bryan H.E. Printed inductors and capacitors // Tele-Tech & Electronic Industries. – 1955. – Vol. 14, No. 12. – P. 68.

10. Ronkainen H. et al. IC compatible planar inductors on silicon // IEEE. Proceedings-Circuits, Devices and Systems. – 1997. – Vol. 144. – P. 29–35.

11. Crols J. et al. An analytical model of planar inductors on lowly doped silicon substrates for high frequency analog design up to 3 GHz // IEEE. 1996 Symposium on VLSI Circuits. Digest of Technical Papers. – 1996. – P. 28–29.

12. Mohan S.S. The Design, Modeling and Optimization of On-Chip Inductor and Transformer Circuits: PhD thesis. Stanford, 1999. – 215 p.

13. Wheeler H.A. Simple inductance formulas for radio coils // Proceedings of the institute of Radio Engineers. – 1928. – Vol. 16, No. 10. – P. 1398–1400.

14. Walker C.S. Capacitance, inductance, and crosstalk analysis. – M.: Artech House, 1999. – 226 p.

15. Mohan S.S. Simple accurate expressions for planar spiral inductances // IEEE Journal of solid-state circuits. – 1999. – Vol. 34, No. 10. – P. 1419–1424.

16. Jenei S. Physics-based closed-form inductance expression for compact modeling of integrated spiral inductors / S. Jenei, B.K.J.C. Nauwelaers, S. Decoutere // IEEE. Journal of solid-state circuits. – 2002. – Vol. 37, No. 1. – P. 77–80.

17. Development of a physically-based planar inductors VHDL-AMS model for integrated power converter design / A. Ammouri et al. // The European physical journal-applied physics. – 2014. – Vol. 66, No. 2. – P. 20901.

18. Erokhin V.V. New Inductance Calculating Formulas of Planar Symmetrical Square Inductors / V.V. Erokhin, S.A. Zavyalov // XVII International scientific and technical conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines» (Dynamics), Russia, Omsk. – 2023. – P. 5.

УДК 621.315

## **АНАЛИЗ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ЭКРАНИРУЮЩИХ КОРПУСОВ НА ОСНОВЕ МОНОСТАТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ**

*А.О. Зайков, магистрант*

*Научный руководитель А.А. Иванов, к.т.н., с.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС»  
г. Томск, ТУСУР, anton.ivn@tu.tusur.ru*

Выполнено моделирование частотных зависимостей эффективности экранирования и моностатической эффективной площади рассеяния для двух типовых корпусов радиоэлектронных средств. Показано, что на резонансных частотах корпуса обратно рассеянное поле зна-

чительно увеличивается. Сделан вывод, что измерения резонансных частот можно проводить по эффективной площади рассеяния без размещения антенны внутри корпуса.

**Ключевые слова:** эффективность экранирования, моностатическая эффективная площадь рассеяния, электромагнитный экран, плоская электромагнитная волна.

Традиционно считается, что экранирующий корпус может обеспечить ослабление воздействующей на него помехи на 60–100 дБ [1]. Однако из-за возникновения объемных резонансов помеха, проникающая в корпус через отверстия, наоборот, может усилиться [2]. Поэтому оценка резонансных частот является одной из главных задач проектирования корпуса. Обычно при такой оценке применяются две антенны, одна из которых помещается внутри корпуса [3]. Однако такой метод плохо подходит для корпусов, имеющих небольшие габариты или внутреннее заполнение [4].

В данной работе предлагается новый подход к оценке резонансных частот корпуса, основанный на анализе обратно рассеиваемого корпусом поля (моностатической эффективной площади рассеяния, ЭПР). Чтобы подтвердить состоятельность подхода, с помощью электродинамического моделирования рассчитаны и проанализированы частотные зависимости эффективности экранирования (ЭЭ) и моностатической ЭПР для двух типовых корпусов радиоэлектронных средств.

**Тестовые структуры.** На рис. 1 представлены исследуемые тестовые структуры в виде прямоугольных корпусов с апертурами разных конструкций. Оба корпуса имеют одинаковую ширину –  $a$  и глубину –  $d$  по 300 мм, высоту –  $b = 120$  мм и толщину стенок по 3 мм. Апертура корпуса 1 имеет длину  $w_1 = 100$  мм, ширину  $l_1 = 100$  мм, а апертура корпуса 2 –  $w_2 = 10$  мм и  $l_2 = 294$  мм. В обоих случаях ЭПР и ЭЭ определялись в диапазоне частот 0–1000 МГц при воздействии на корпус вертикально-поляризованной плоской электромагнитной волны с амплитудой вектора напряженности электрического поля  $E = 1$  В/м.

**Анализ результатов.** Результаты расчета ЭЭ и ЭПР показаны на рис. 2. Видно, что в исследуемом диапазоне частот корпус 1 имеет один резонанс на частоте 690 МГц, при котором ЭЭ уменьшается до минус 31,4 дБ. Это говорит об усилении электромагнитных помех на этой частоте. В том же диапазоне на частотной зависимости ЭЭ корпуса 2 наблюдается два резонанса на 500 и 738 МГц, при которых ЭЭ падает до –11,7 и –23,06 дБ соответственно.

Из рис. 2, в, г видно, что на частотных зависимостях моностатической ЭПР имеются флуктуации амплитуды в области резонансных

частот исследуемых корпусов. Так, ЭПР корпуса 1 имеет резкий скачок до  $-1,5$  дБм<sup>2</sup> на частоте 690 МГц. На частотах резонанса корпуса 2 (500 и 738 МГц) наблюдаются скачки до  $-4,24$  и  $-2,21$  дБм<sup>2</sup> соответственно. В результате можно сделать вывод, что оценку резонансных частот можно проводить на основе ЭПР, т.е. без необходимости размещения антенны внутри корпуса.

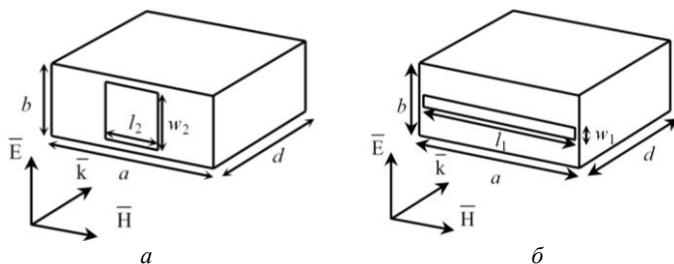


Рис. 1. Тестовые структуры корпусов 1 (а) и 2 (б)

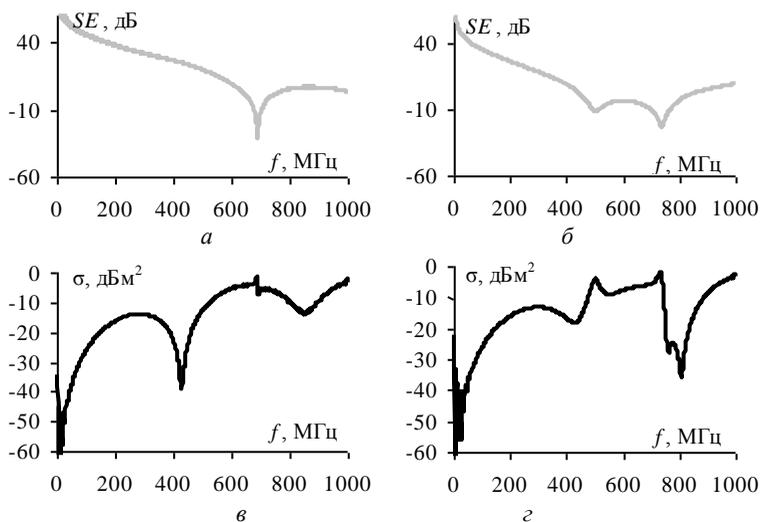


Рис. 2. ЭЭ в центре корпуса 1 (а) и его ЭПР (б);  
ЭЭ в центре корпуса 2 (в) и его ЭПР (г)

**Заключение.** Выполнено сравнение частотных зависимостей ЭЭ и ЭПР для двух экранирующих корпусов. Показано, что на зависимости моностатической ЭПР возникают флуктуации, соответствующие резонансам корпуса (минимумам ЭЭ). Это говорит о возможности

анализа уязвимых частот корпуса с помощью измерения его обратно рассеянного поля.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10165, <https://rscf.ru/project/23-79-10165/>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Electromagnetic shielding: theory and applications / S. Celozzi, R. Araneo, P. Burghignoli, G. Lovat. // Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2022. – P. 560.

2. Internal stirring: an approach to approximate evaluation of shielding effectiveness of small slotted enclosures / A. Rusiecki, K. Aniserowicz, A.P. Duffy, A. Orlandi // IET Sci. Meas. Technol. – 2016. – Vol. 10, No. 6. – P. 659–664.

3. Chunhong G., Shufang L. Shielding effectiveness of an enclosure with apertures // IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. – 2005. – Vol. 1. – P. 614–618.

4. Hussein K.F.A. Effect of internal resonance on the radar cross section and shield effectiveness of open spherical enclosures // Progress In Electromagnetics Research. – 2007. – Vol. 70. – P. 225–246.

УДК 621.391.825

### ОСЛАБЛЕНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ИМПУЛЬСА В ДВУХДИАПАЗОННОМ ПОЛОСНО-ЗАГРАЖДАЮЩЕМ ФИЛЬТРЕ

*Н.Д. Одиванов, В.В. Пичугин, студенты*

*Научный руководитель Е.С. Жечев, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. СВЧиКР, odivanovn@gmail.com*

Выполнена оценка ослабления сверхширокополосного импульса в двухдиапазонном полосно-заграждающем фильтре поглощающего типа. Выявлено, что исследуемый фильтр незначительно ослабляет рассмотренное воздействие с точки зрения  $N$ -норм.

**Ключевые слова:** полосно-заграждающий фильтр, временной отклик, сверхширокополосный импульс,  $N$ -нормы.

Сверхширокополосные (СШП) помехи характеризуются очень широким спектром и могут негативно влиять на работу радиосистем, вызывая искажения в передаваемом сигнале или приводя к потере связи. Такие помехи могут возникать в результате работы других радиоустройств и высоковольтных систем коммутации. Они также могут быть результатом преднамеренного воздействия мощных СШП-генераторов. Полосно-заграждающие фильтры (ПЗФ) активно используются в современных радиотехнических системах связи, радиолокации, радионавигации и т.д. [1]. Одними из основных требований к