

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ В АВТОМАТИЧЕСКИХ И РУЧНЫХ РЕЖИМАХ ПОЛЕТОВ

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОРПУСА СОЕДИНИТЕЛЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

М.Е. Комнатнов, студент

E-mail: maxmek@mail.ru

Т.Р. Газизов, доктор техн. наук, профессор

E-mail: talgat@tu.tusur.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Томск, Российская Федерация

Вычислены значения эффективности экранирования на различных расстояниях в глубине корпуса соединителя типа СНП 339 при полном и уменьшенных раскрытиях щели со стороны кабеля, при падении плоской электромагнитной волны на корпус со стороны щели. Приведены результаты вычислений эффективности экранирования в начале и середине корпуса СНП 339 в диапазоне частот 10 кГц...20 ГГц для раскрытия щели 2...8 мм с шагом 1 мм. Показано, что на частотах до 1 ГГц при раскрытии щели 2 мм значение эффективности экранирования увеличивается, по сравнению с полным раскрытием, примерно на 20 дБ, а в промежутках между резонансными частотами – на 10 дБ, тогда как на частотах резонанса корпуса экранирование может ухудшиться.

Ключевые слова: эффективность экранирования, соединитель, бортовая радиоэлектронная аппаратура, моделирование, TALGAT.

ESTIMATION OF SHIELDING EFFECTIVENESS FOR THE CONNECTOR ENCLOSURE OF AIRBORNE RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT OF SPACE VEHICLE

M.E. Komnatnov, Student

E-mail: maxmek@mail.ru

T.R. Gazizov, Doctor of Techn. Sciences, Professor

E-mail: talgat@tu.tusur.ru

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
Tomsk, Russian Federation

The shielding effectiveness at different distances inside the enclosure of the SNP 339 connector for the opened and reduced aperture on the cable side when exciting a plane electromagnetic wave on the aperture side is calculated. Simulation results of the shielding effectiveness at the beginning and the end of SNP 339 enclosure in the frequency band 10 kHz – 20 GHz for the aperture value 2...8 mm and the step 1 mm are given. It is shown that the shielding effectiveness for frequencies up to 1 GHz with aperture value 2 mm increases as compared with the opened aperture by approximately 20 dB, and between the resonance frequencies – by 10 dB, while at the resonance frequencies the shielding may undergo degradation.

Key words: shielding effectiveness, connector, airborne electronic equipment, simulation, TALGAT.

Экранирование бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) актуально в связи с ростом частот и жесткости электромагнитной

обстановки космического аппарата (КА) [1]. Соединитель типа СНП 339 используется в бортовой РЭА КА для электрических связей

между узлами, блоками и модулями посредством кабелей. Важно экранировать не только кабель, но и сам соединитель, для чего часто используют металлический корпус. Строгий подход к решению этой задачи требует точного геометрического моделирования формы реального корпуса для электродинамического анализа в диапазоне параметров с последующей оптимизацией. Существуют решения подобных задач, основанные на численных методах, например методе моментов [2]. Известны и аналитические подходы к вычислению эффективности экранирования (ЭЭ), например корпуса с уменьшенным [3] и увеличенным [4] раскрытиями щели, смещенной относительно центра корпуса. Исследовано падение плоской электромагнитной волны под некоторым углом на группу щелей [5] со сквозным перфорированием параллельных стенок корпуса [6]. Однако подобные вычисления довольно сложны и затратны. Между тем, для простых частных структур, например прямоугольного корпуса со щелью, существуют апробированные аналитические модели [7], позволяющие сделать быстрые и полезные предварительные оценки резонансных частот и ЭЭ [8], после которых, при необходимости, возможен электродинамический анализ на критических частотах.

Геометрическая модель реального корпуса СНП 339 с внутренними размерами $a \times b \times d = 29,5 \times 8 \times 21,5$ мм имеет раскрыв, соответствующий размерам узкой и широкой стенок корпуса (рис. 1а). Оценка значений резонансных частот

и эффективности экранирования такого корпуса при полном раскрыве представлена в [9]. Эта оценка выявила резкое ухудшение экранирования в области резонансов корпуса. Таким образом, актуальна разработка мер повышения ЭЭ корпуса соединителя. Один из наиболее простых вариантов повышения ЭЭ корпуса – перекрытие раскрыва корпуса стенкой со щелью, поэтому целесообразна оценка его эффективности.

Цель данной работы – оценить влияние перекрытия щели корпуса СНП 339 на ЭЭ, в диапазоне частот 10 кГц...20 ГГц, при падении плоской электромагнитной волны на корпус со стороны щели.

Геометрическая модель корпуса СНП 339 со щелью показана на рисунке 1б. При оценке ЭЭ корпуса полагалось, что снизу корпуса (со стороны соединителя) имеется сплошная стенка. Вычисление ЭЭ корпуса СНП 339 со щелью проводилось с помощью системы TALGAT [10], в которой реализована модель из [7], в трех диапазонах частот $f_1=1 \cdot 10^4$, $20 \cdot 10^4$, ..., $1 \cdot 10^6$ Гц; $f_2=1 \cdot 10^6$, $1,1 \cdot 10^6$, ..., $1 \cdot 10^9$ Гц; $f_3=1 \cdot 10^9$, $1,001 \cdot 10^9$, ..., $20 \cdot 10^9$ Гц. Раскрыв щели w варьировался от 2 мм до 8 мм с шагом 1 мм. Результаты вычисления значений ЭЭ для расстояний p равных 1 мм (возле щели) и 10 мм (в середине корпуса) от центра раскрыва до точки наблюдения поля приведены на рисунках 2, 3 соответственно.

Для вычисления резонансных частот корпуса соединителя применена формула [2]

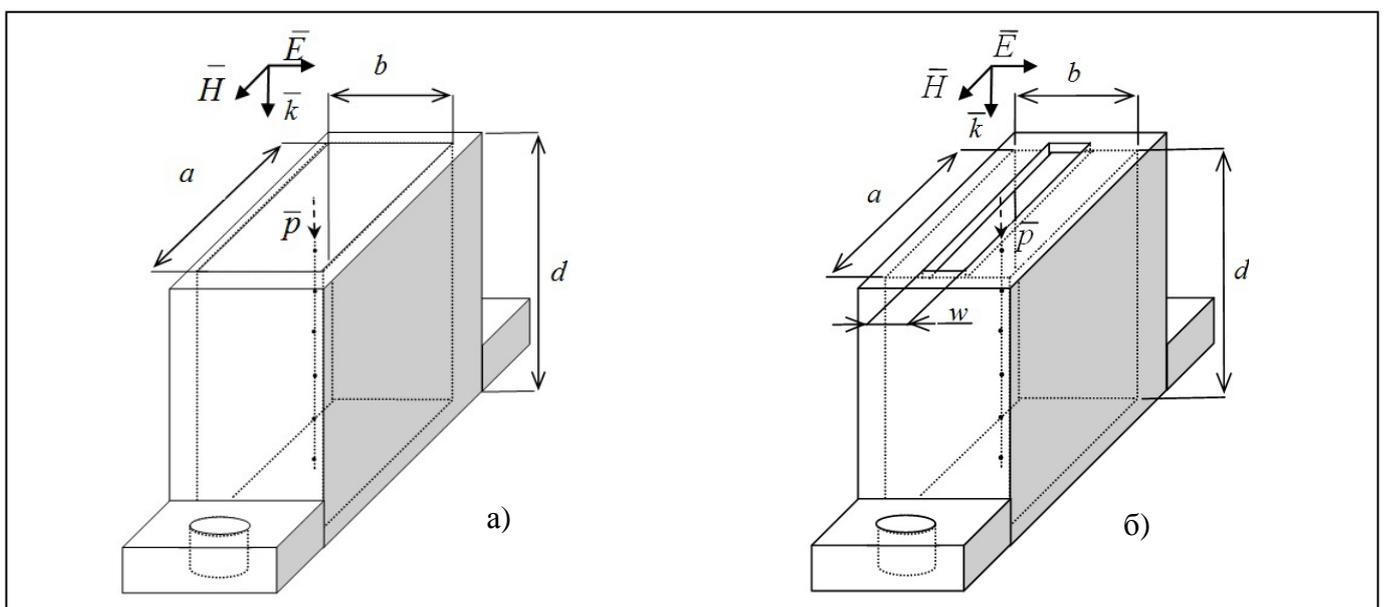


Рис. 1. Геометрическая модель корпуса соединителя с полным (а) и уменьшенным (б) раскрытиями щели.

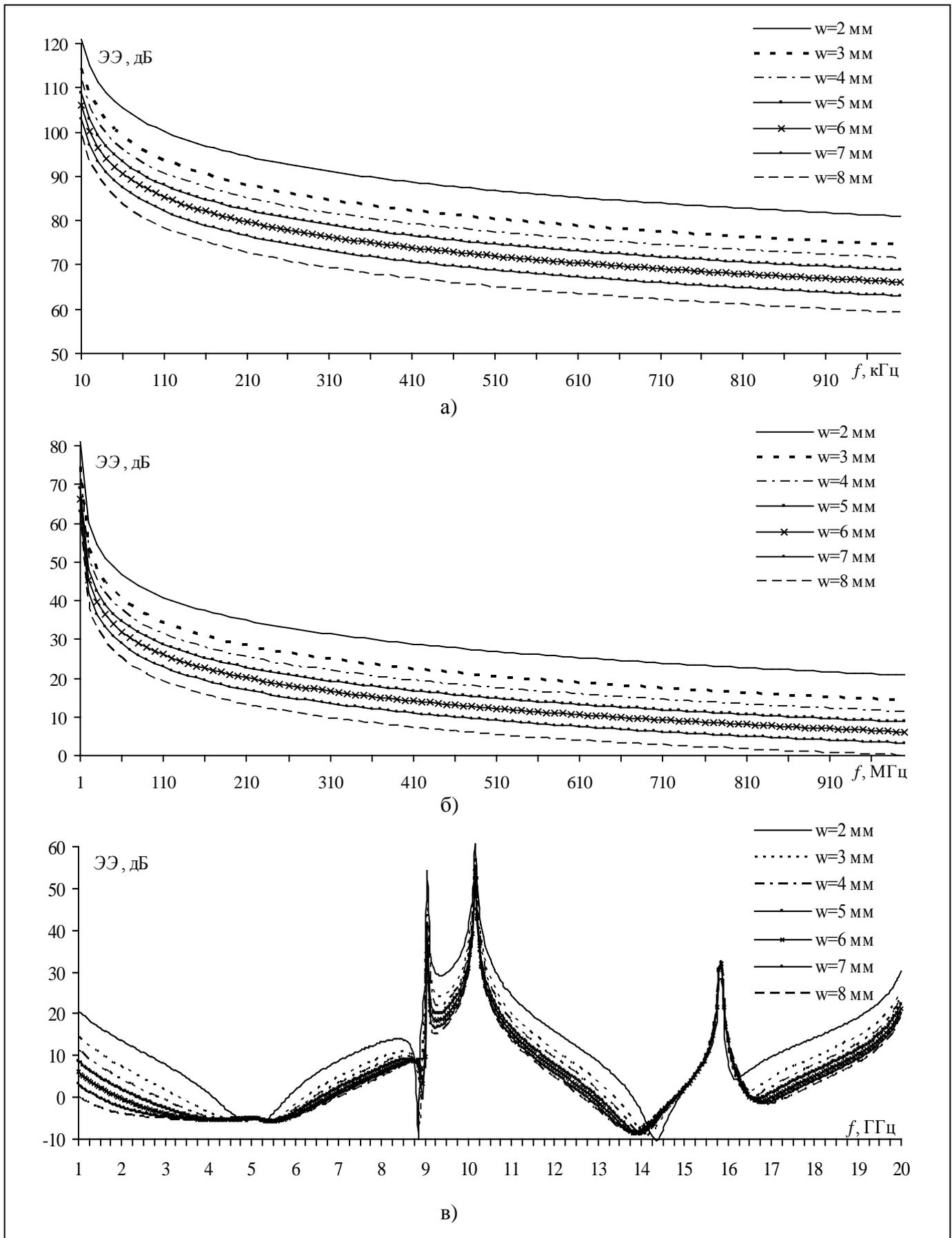


Рис. 2. Частотные зависимости ЭЭ корпуса соединителя в диапазонах частот f_1 (а), f_2 (б), f_3 (в), для $w=2, 3, \dots, 8$ мм, при $p=1$ мм.

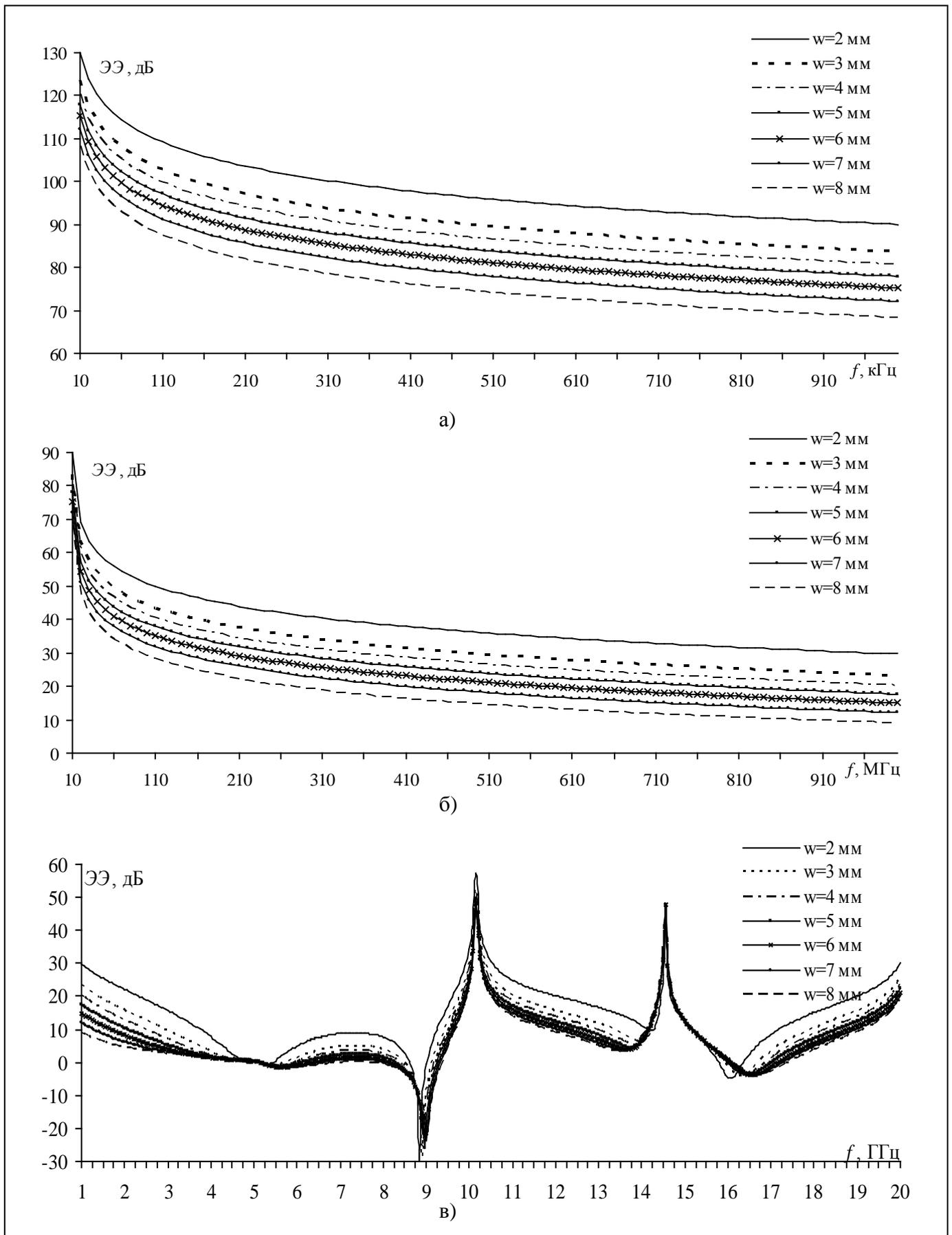


Рис. 3. Частотные зависимости ЭЭ корпуса соединителя в диапазонах частот f_1 (а), f_2 (б), f_3 (в), для $w=2, 3, \dots, 8$ мм, при $r=10$ мм.

Резонансы корпуса соединителя

i, j, k	$f_{i,j,k}$, ГГц						
1,0,0	5,081	2,0,1	12,33	3,0,1	16,76	0,1,1	19,99
0,0,1	6,972	0,0,2	13,94	2,0,2	17,25	1,1,1	20,06
1,0,1	8,627	1,0,2	14,84	0,1,0	18,74	2,1,0	21,32
2,0,0	10,16	3,0,0	15,24	1,1,0	19,41	2,1,1	22,43

$$f_{i,j,k} = 0,5 \cdot c \cdot \sqrt{(i/a)^2 + (j/b)^2 + (k/d)^2}, \quad (1)$$

$i, j, k = 0, 1, \dots$

Результаты вычислений по (1) в диапазоне частот до 20 ГГц представлены в таблице.

В диапазоне частот f_1 при полном раскрытии щели значение ЭЭ монотонно убывает до 59 дБ в начале (рис. 2а) и 68 дБ в середине (рис. 3а) корпуса, увеличиваясь при максимальном перекрытии на 22 дБ, с приростом 3...6 дБ на миллиметр перекрытия. В диапазоне частот f_2 значение ЭЭ продолжает монотонно убывать, увеличиваясь при максимальном перекрытии, по сравнению с полным раскрытием, на 20 дБ в начале и в середине корпуса. В начале корпуса на частоте 1 ГГц ЭЭ составляет 20 дБ при перекрытии щели и 0 дБ – при полном раскрытии (рис. 2б).

В диапазоне частот f_3 значение ЭЭ продолжает монотонно убывать, но лишь до частоты первого (1, 0, 0) резонанса корпуса 5,081 ГГц (таблица). На этой частоте ЭЭ при полном раскрытии и при перекрытии щели имеет одинаковое значение – минус 6 дБ вблизи раскрытия (рис. 2в) и 0 дБ – в середине корпуса (рис. 3в), т.е. перекрытие щели не меняет значения ЭЭ. На более высоких частотах ЭЭ как положительна, так и отрицательна, при этом на частотах резонанса достигается экстремум значений ЭЭ. В промежутках между резонансными частотами значение ЭЭ при перекрытии щели увеличивается на 8...12 дБ в начале и середине корпуса. На частоте 9 ГГц (близкой к частоте резонанса 8,6 ГГц) в середине корпуса соединителя при $w=2$ мм наблюдается худшее значение ЭЭ – минус 33 дБ. С увеличением раскрытия щели на миллиметр значение ЭЭ возрастает на 3 дБ, при этом частота резонанса сдвигается в область более высоких частот. В области частоты резонанса 16,76 ГГц – значение ЭЭ в начале корпуса при максимальном перекрытии щели составляет 5 дБ и с увеличением раскрытия щели постепенно снижается

до минус 2 дБ. При этом также наблюдается сдвиг резонансной частоты.

Таким образом, на частотах до 1 ГГц при раскрытии щели 2 мм значение эффективности экранирования увеличивается, по сравнению с полным раскрытием, примерно на 20 дБ, а в промежутках между резонансными частотами – на 10 дБ, тогда как на частотах резонанса корпуса экранирование может ухудшиться.

Работа выполнена в рамках реализации постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218, договор от 12.02.2013 г. №02.G25.31.0042.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Schaffar A., Gineste P.N. Application of the power balance method to E field calculation in the ARAINE 5 launcher payloads cavities. 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August, 2011. P. 284...289.
- Araneo R., Lovat G. Fast MoM analysis of the shielding effectiveness of rectangular enclosures with apertures, metal plates, and conducting objects. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 51. № 2. May, 2009. P. 274...283.
- Solin J.R. Formula for the field excited in a rectangular cavity with a small aperture. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 53. № 1. February, 2011. P. 82...90.
- Solin J.R. Formula for the field excited in a rectangular cavity with an electrically large aperture. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 54. № 1. February, 2012. P. 188...192.
- Shim J., Kam D.G., Kwon J.H., Kim J. Circuitual modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 52. № 3. August, 2010. P. 566...577.
- Dehkhoda P., Tavakoli A., Azadifar M. Shielding effectiveness of an enclosure with finite wall thickness and perforated opposing walls at oblique incidence and arbitrary polarization by GMMoM. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 54. № 4. August, 2012. P. 792...805.
- Thomas D.W.P. et al. Model of the electromagnetic fields inside a cuboidal enclosure populated with

- conducting planes or printed circuit boards. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 43. № 2. May, 2001. P. 161...169.
8. Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р., Дементьев А.С. Эффективность экранирования унифицированных электронных модулей // *Известия вузов. Физика*. 2012. Том 55. №9/2. С. 89...92.
 9. Комнатнов М.Е. Эффективность экранирования корпуса соединителя типа СНП // *Электронные средства и системы управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции*. В 2 ч. Ч. 2. Томск: В-Спектр, 2012. С. 154...157.
 10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012660373. TALGAT 2011. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболотский А.М., Аширбакиев Р.И., Лежнин Ег.В., Салов В.К., Лежнин Ев.В., Орлов П.Е., Калимулин И.Ф., Суровцев Р.С., Комнатнов М.Е. Заявка №2012618426. Дата поступления 5 октября 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16 ноября 2012 г.
- ## REFERENCES
1. Schaffar A., Gineste P.N. Application of the power balance method to E field calculation in the ARAINE 5 launcher payloads cavities. 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August, 2011. P. 284...289.
 2. Araneo R., Lovat G. Fast MoM analysis of the shielding effectiveness of rectangular enclosures with apertures, metal plates, and conducting objects. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 51. № 2. May, 2009. P. 274...283.
 3. Solin J.R. Formula for the field excited in a rectangular cavity with a small aperture. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 53. № 1. February, 2011. P. 82...90.
 4. Solin J.R. Formula for the field excited in a rectangular cavity with an electrically large aperture. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 54. № 1. February, 2012. P. 188...192.
 5. Shim J., Kam D.G., Kwon J.H., Kim J. Circuitual modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 52. № 3. August, 2010. P. 566...577.
 6. Dehkhoda P., Tavakoli A., Azadifar M. Shielding effectiveness of an enclosure with finite wall thickness and perforated opposing walls at oblique incidence and arbitrary polarization by GMMoM. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 54. № 4. August, 2012. P. 792...805.
 7. Thomas D.W.P. et al. Model of the electromagnetic fields inside a cuboidal enclosure populated with conducting planes or printed circuit boards. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 43. № 2. May, 2001. P. 161...169.
 8. Komnatnov M.E., Gazizov T.R., Dementev A.C. Effektivnost ekranirovaniya unifitsirovanykh elektronnykh moduley [Shielding effectiveness of unified electronic] *Izvestiya vuzov. Fizika*. [Sci. physics]. 2012. Vol. 55. №9/2. Pp. 89...92.
 9. Komnatnov M.E. Effektivnost ekranirovaniya korpusa soedenitelya tipa SNP [Shielding effectiveness of SNP type connector shell]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya: Materialy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferenci* [Electronic instrumentation and control systems: Proceedings of the International Scientific Conference]. Pt. 2. Tomsk: V-Spekt, 2012. Pp. 154...157.
 10. Svidetelstvo o gosudarstvenoy registraci programmy dlya EVM № 2012660373. TALGAT 2011. Avtory: Gazizov T.R., Melkozerov A.O., Gazizov T.T., Kuksenko S.P., Zabolotski A.M., Ashirbakiev R.I., Lezhnin Eg.V., Salov V.K., Lezhnin Ev.V., Orlov P.E., Kalimulin I.F., Surovtsev R.S., Komnatnov M.E. Zayavka №2012618426. Data postupleniya 5 oktyabrya 2012 g. Zaregistrovano v Reestre program dlya EVM 16 noyabrya 2012 g. [The certificate of state registration of the computer program №2012660373. TALGAT 2011. Gazizov T.R., Melkozerov A.O., Gazizov T.T. et al. M.: Rospatent, 16.11.2012].

Сведения об авторах

Комнатнов Максим Евгеньевич, студент

E-mail: maxmek@mail.ru

Газизов Тальгат Рашитович, доктор техн. наук, профессор

E-mail: talgat@tu.tusur.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, Томск, Российская Федерация, пр. Ленина, 40

Information about authors

Komnatnov Maxim Evgenevich, Student

E-mail: maxmek@mail.ru

Gazizov Talgat Rashitovich, Doctor of Techn. Sciences, Professor

E-mail: talgat@tu.tusur.ru

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
634050, Tomsk, Russian Federation, Lenina pr., 40