

УДК 621.371.32

**С.П. Куксенко, Р.Р. Хажibeков, Т.Т. Газизов**

## **Оценка уровня излучаемой электромагнитной эмиссии семикаскадного модального фильтра для сети Ethernet 100Base-T**

*Рост быстродействия, плотности монтажа и размещения радиоэлектронной аппаратуры делают её все более восприимчивой к воздействию как внешних, так и внутренних электромагнитных помех. В частности, актуальна её защита от воздействия мощных сверхкоротких импульсов (СКИ), непреднамеренных (вторичные эффекты от молниевых и электростатических разрядов) и преднамеренных (электромагнитный терроризм). Традиционные устройства защиты обладают рядом недостатков (малая мощность, недостаточное быстродействие, паразитные параметры), затрудняющих защиту от мощных СКИ. Поэтому актуальна разработка новых устройств защиты. Так, предложены модальные фильтры (МФ), в которых не используются радиоэлектронные компоненты, а применяются особые структуры, способствующие разложению помеховых СКИ. В данной работе представлены результаты оценки уровня излучаемой электромагнитной эмиссии семикаскадного МФ, используемого для защиты оборудования сети Ethernet 100Base-T. Кратко пояснен принцип его работы. Приведены результаты прохождения через фильтр стандартного сигнала Ethernet и помехового сигнала трапецевидной формы длительностью 35 пс. Для оценки эмиссии использованы электродинамическое моделирование и натурный эксперимент с помощью анализатора электромагнитного излучения. Показано, что уровень эмиссии модально фильтра не превышает требований стандарта MIL-STD-461G в диапазоне до 10 ГГц.*

**Ключевые слова:** модальный фильтр, излучаемая электромагнитная эмиссия, сверхкороткий импульс, Fast Ethernet

### **Введение**

В настоящее время для передачи данных широко используется технология Ethernet 100Base-T (Fast Ethernet) для организации небольших локальных сетей и сетей крупных предприятий. Основную угрозу для таких сетей до недавнего времени представляли хакерские атаки и внедрение компьютерных вирусов, которые осуществляются программным путем. Однако создание компактных генераторов мощных электромагнитных излучений, способных негативно воздействовать на электронное оборудование, существенно поменяло приоритеты в области безопасности информации. Сегодня в разряд важных выдвигается проблема защиты от преднамеренного электромагнитного воздействия [1]. Поэтому актуальна разработка устройств защиты оборудования сетей от электромагнитных помех. Для защиты аппаратуры от кондуктивных помех широко применяют разрядники, варисторы, TVS-диоды или гальваническую трансформаторную развязку. Предложены также модальные фильтры (МФ), в которых не используются радиоэлектронные компоненты, а применяются особые структуры, способствующие разложению опасных помеховых сверхкоротких импульсов (СКИ) высокого напряжения и длительностью до нескольких сотен пикосекунд на импульсы меньшей амплитуды [2]. МФ обладает высоким ресурсом, использует дешевый материал, является более стойким к воздействию радиации.

Принцип работы МФ заключается в использовании модальных искажений, т.е. изменения сигнала за счет разности задержек мод его поперечных волн в многопроводной линии передачи. При поступлении импульса на один из  $N$  проводников отрезка многопроводной линии с неоднородным ди-

электрическим заполнением, он подвергается модальным искажениям вплоть до разложения на  $N$  импульсов меньшей амплитуды из-за различия погонных задержек мод в линии. Для полного разложения импульса необходимо, чтобы его общая длительность  $t_{\Sigma}$  была меньше минимального модуля разности задержек распространения мод в линии, т.е. выполнялось условие  $t_{\Sigma} < l \cdot \min|\tau_{i+1} - \tau_i|$  при  $i = 1, \dots, N-1$ , где  $l$  – длина отрезка;  $\tau_i$  – погонная задержка  $i$ -й моды отрезка. В частном случае при  $N = 2$  это условие примет вид  $t_{\Sigma} < l |\tau_e - \tau_o|$ , где  $\tau_e$  и  $\tau_o$  – погонные задержки четной и нечетной мод соответственно [2].

Если в начало отрезка линии со слабой связью между каким-либо одним и общим проводниками подается импульс длительностью меньшей, чем разность задержек мод этого отрезка, то к концу отрезка (между теми же проводниками) придут 2 импульса (импульс 1 и импульс 2), причем с амплитудой, в 2 раза меньшей, чем амплитуда импульса в начале отрезка. Режим холостого хода (ХХ) на концах пассивного проводника не влияет на форму импульсов разложения, а только незначительно изменяет их амплитуду (рис. 1). Разложение импульса происходит в каждом отрезке. Так, пройдя 7 каскадов модального фильтра, СКИ разложится на импульсы в 128 раз меньшей амплитуды.

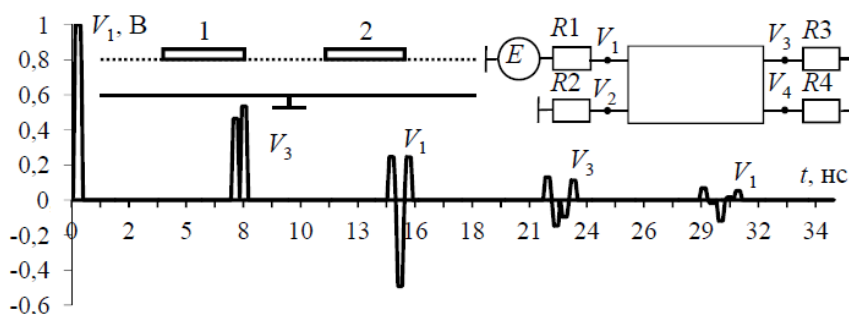


Рис. 1. Формы напряжения в активном проводнике для режима холостого хода на концах пассивного проводника

Для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) МФ должен функционировать с заданным качеством при воздействии на него электромагнитных помех, в то же время помехоэмиссия от него не должна мешать корректной работе других устройств. Уровни излучаемой и кондуктивной электромагнитных эмиссий МФ должны удовлетворять требованиям соответствующих стандартов по ЭМС. Большая часть изделий государственных и коммерческих предприятий производится для военных применений. Поскольку помеха может повлиять на выполнение боевой задачи, то очевидно, что контроль эмиссий от изделия, а также его восприимчивости к ним, гораздо критичнее для военных применений, чем для коммерческих [3]. По этой причине военные стандарты, как правило, гораздо жёстче гражданских. Поэтому для проверки на удовлетворение требованиям по уровню излучаемой электромагнитной эмиссии выбран американский военный стандарт MIL-STD-461 [4], в частности его последняя редакция MIL-STD-461G от 02.03.2015 [5].

Цель работы – оценка уровня излучаемой электромагнитной эмиссии семикаскадного МФ для сети Ethernet 100Base-T на соответствие стандарту MIL-STD-461G.

### Электродинамическое моделирование МФ

Для исследования взята модель МФ, построенная в САПР Altium Designer и представляющая собой двухстороннюю печатную плату. Её слои Top и Bottom показаны на рис 2. Проводники МФ имеют следующие размеры: ширина – 0,3 мм, высота – 0,105 мм, длина – 2500 мм. Размеры подложки – 140×80×0,18 мм. Пассивный и опорный проводники соединяются между собой через отверстия, проходящие сквозь диэлектрическую подложку. Материал проводников – медь, подложки – FR-4.

Для оценки эмиссии использовано электродинамическое моделирование в среде CST MWS [6]. Для проверки корректности построенной модели сначала выполнена оценка коэффициента передачи. Полоса пропускания в сети Fast Ethernet составляет 100 МГц. При этом коэффициент передачи должен быть равен 1 на нулевой частоте и быть не ниже уровня 0,707 до частоты 100 МГц. На рис. 3 приведена полученная зависимость коэффициента передачи в диапазоне частот от 0 до 200 МГц. Видно, что на нулевой частоте коэффициент передачи равен 0,93, а на частоте 100 МГц он равен 0,59. Данное отличие можно объяснить потерями в проводниках МФ.



Рис. 2. Слой Top (а) и Bottom (б) платы МФ

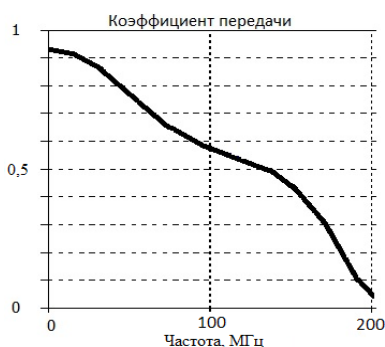


Рис. 3. Коэффициент передачи МФ

Сигнал в сети Fast Ethernet представляет собой последовательность трапецидальных импульсов амплитудой  $\pm 1$  В и минимальной длительностью 8 нс при минимальном интервале между импульсами 1,4 нс [7]. Формы полезного сигнала (signal), на входе (Uzn) и в выходе (Uzg) МФ показаны на рис. 4, из которого можно судить о корректности моделирования. Для доказательства подавления кондуктивных помех на вход МФ подан помеховый сигнал в форме трапеции с длительностью нарастания и спада по 10 пс, плоской вершины – 15 пс и амплитудой 10 В (Input). На рис. 5 показаны его форма и форма напряжения в активном проводнике на выходе МФ (Out). Видно, что сигнал разложился на импульсы малой амплитуды, не превышающей 0,12 В (ослабление порядка 40 раз). Таким образом, можно считать построенную модель корректной.

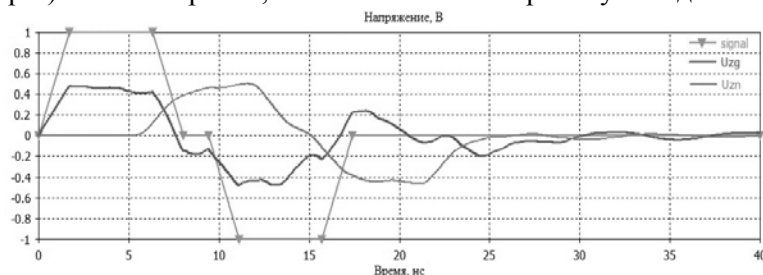


Рис. 4. Прохождение полезного сигнала через МФ

Для соответствия реальным условиям измерений электрического поля симитирован монитор поля в виде рамочной антенны на расстоянии 10 мм от МФ (рис. 6а) над областью А (рис. 6б). Диаметр рамки 20,8 мм, зазор – 3,14 мм, диаметр проводника – 1,8 мм, нагрузка 50 Ом. Полученные частотные зависимости напряжения на нагрузке при воздействии в диапазоне 50–200 МГц приведены на рис. 7. Видно, что уровень напряжения не превышает 56 дБмкВ.

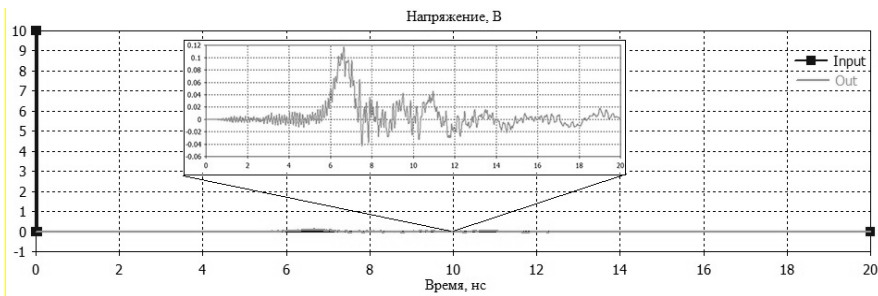


Рис. 5. Форма напряжения в активном проводнике на выходе МФ (Out) при подаче на его вход помехового сигнала (Input)

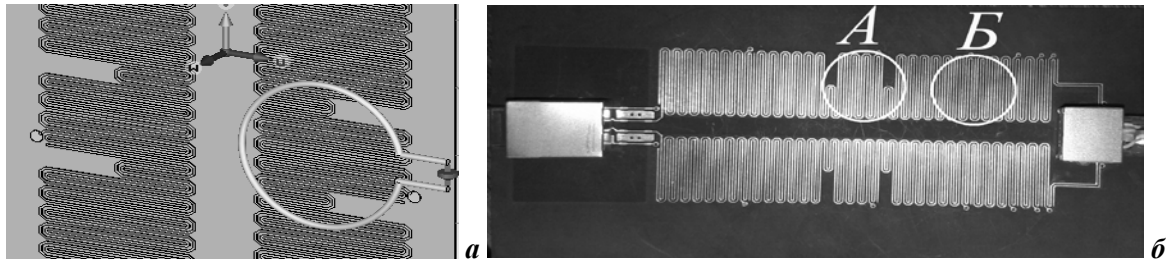


Рис. 6. Монитор поля в виде рамочной антенны (а) и области измерений (б)

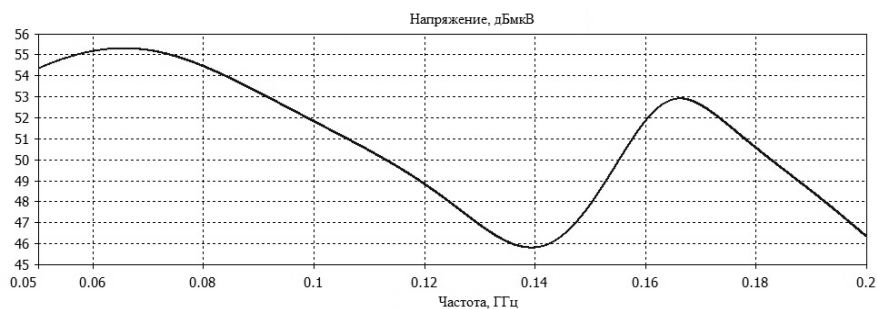


Рис. 7. Частотная зависимость напряжения на выходе рамочной антенны (дБмкВ)

### Результаты натурального эксперимента

Для натурального эксперимента использовался анализатор электромагнитного излучения ESR производства компании Rohde&Schwarz. При измерениях использовался лабораторный макет медной рамочной антенны (датчик 1), размеры которой аналогичны размерам монитора, описанного выше, и датчик RS N 400-1 (датчик 2), показанные на рис. 8. Второй является очень чувствительным и работает на расстоянии до 10 см от излучающего технического средства [8]. МФ был включен в разрыв между персональным компьютером и розеткой сети Fast Ethernet, после чего эмулировалась передача данных (аудио, видео, ICMP). Измерения выполнялись в двух областях МФ (рис. 6б) на расстоянии 10 мм от МФ. Полученные зависимости с учетом включенного аттенюатора (10 дБ) при использовании обоих датчиков приведены на рис. 9.

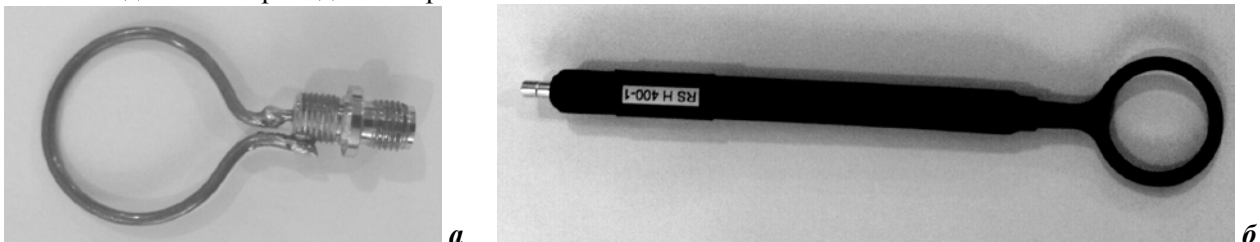


Рис. 8. Датчики: 1 – лабораторный макет (а); 2 – RS N 400-1 (б)

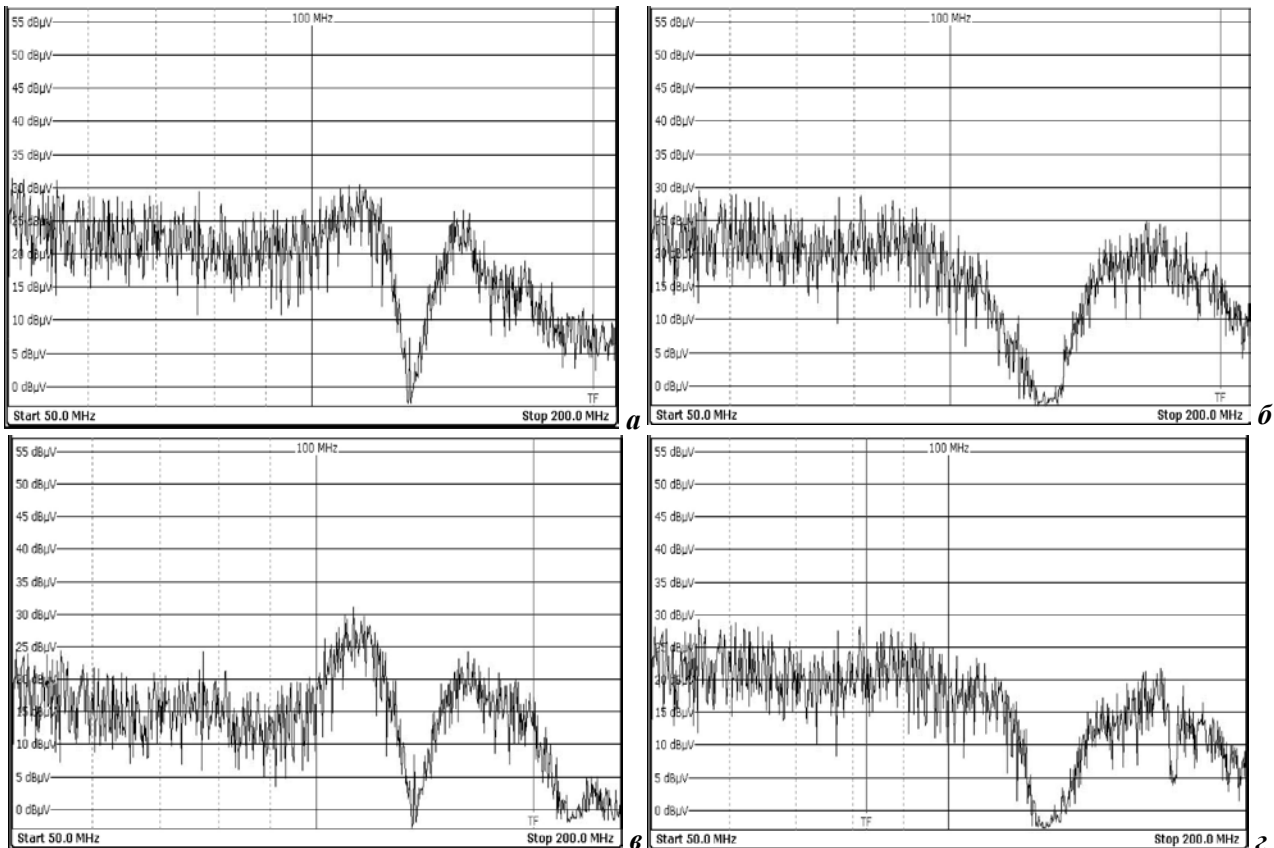


Рис. 9. Измеренная частотная зависимость напряжения на выходе рамочной антенны (дБмкВ) при использовании датчиков 1 и 2 в областях А (а и в) и Б (б и г) на расстоянии 10 мм от МФ

Видно, что зависимости в областях А и Б имеют схожий характер для обоих датчиков, различие в уровнях составляет менее 10 дБ. Также виден ярко выраженный резонанс на частоте 135 МГц (порядка  $-5$  дБмкВ). Стоит отметить, что резонансная частота 135 МГц практически совпадает с полученной моделированием (см. рис. 7).

### Оценка уровня излучаемой эмиссии на соответствие стандарту MIL-STD-461G

Известно, что требования раздела RE102 стандарта MIL-STD-461G (рис. 10) применимы к излучениям от корпусов оборудования и подсистем, соединительных кабелей и антенн оборудования в авиационной и космической отраслях (являющиеся наиболее жесткими). Расстояние до точки измерения уровня излучаемой эмиссии технического средства для электрического поля равно 1 м. На рис. 11 приведены результаты моделирования уровня излучаемой эмиссии от МФ на расстоянии 1 м (абсолютное значение) и максимальный предел RE102 стандарта MIL-STD-461G в частотном диапазоне 0–10 ГГц. Можно сделать вывод, что уровень не превышает требований стандарта MIL-STD-461G. Максимальный уровень эмиссии составляет 27,1 дБмкВ/м на частоте 290 МГц.

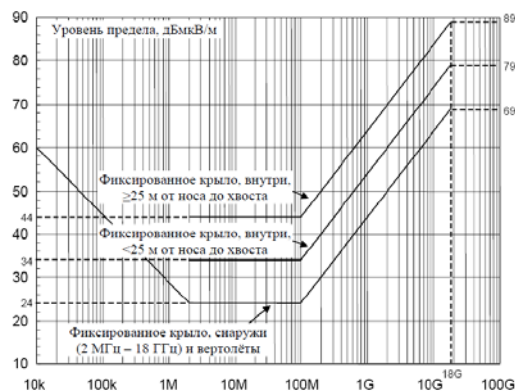
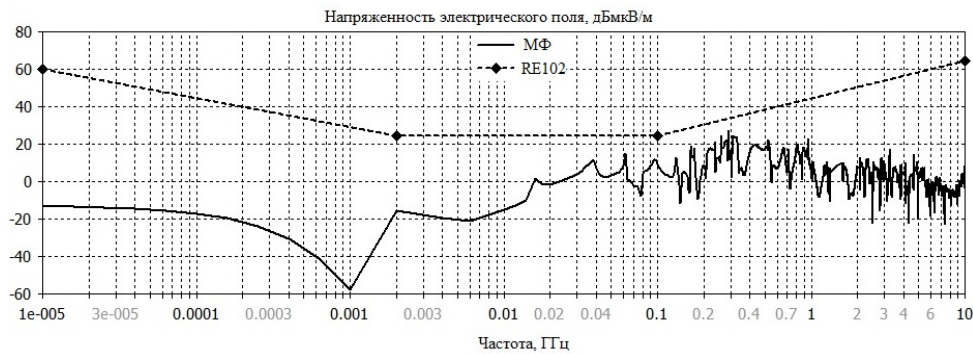


Рис. 10. Предел RE102 для приложений в авиационных и космических системах



**Рис. 11. Частотная зависимость напряженности электрического на расстоянии 1 м от МФ и максимальный предел раздела RE102 стандарта MIL-STD-461G**

Таким образом, в работе приведены результаты оценки уровня излучаемой эмиссии МФ в диапазоне до 10 ГГц. Результаты электродинамического моделирования и натурального эксперимента, хорошо согласуются. Показано, что уровень эмиссии не превышает требований стандарта MIL-STD-461G. Между тем возможна оптимизация для дополнительного уменьшения максимального уровня излучаемой эмиссии.

Работа выполнена за счет средств РНФ (проект 14-19-01232) в ТУСУР.

### Список литературы

1. Петкау О. Защита объектов топливно-энергетического комплекса от угроз электромагнитного воздействия / О. Петкау, А. Тарабцев, А. Дерябин, С. Ларионов, В. Чванов // Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. – 2014. – № 2(6). – С. 78–79.
2. Заболоцкий А.М. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во Томск. Гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 151 с.
3. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. – Томск: «ТМЛ-Пресс», 2007. – 256 с.
4. Кечиев Л.Н., Балюк Н.В. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС - М.: Грифон, 2014 – 450 с.
5. MIL-STD-461G. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.interferencetechnology.com/wp-content/uploads/2015/04/461G.pdf>.
6. CST – Computer Simulation Technology. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cst.com/>.
7. Булаев М. А. Особенности физического уровня стандарта Fast Ethernet 100BASE-TX / М.А. Булаев, К.Ю. Бурлаков, К.В. Демин, В.Г. Капустин, А.В. Овчаров, В.В. Сак // Защита информации. Конфидент. – 2002. – №4(5). – С. 40–43.
8. Probe Set HZ-15 for E and H near-field emission measurements with test receivers and spectrum analyzers. [Электронный ресурс]. URL: [https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/HZ-15\\_en.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/HZ-15_en.pdf).

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), проспект Ленина, 40, 634050 Томск, Российская Федерация  
Статья поступила 20.01.17.

### Авторы

**Куксенко Сергей Петрович**, канд. техн. наук, доцент каф. Телевидения и управления (ТУ), старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» (НИЛ «БЭМС РЭС»), ТУСУР, тел: (3822) 41-34-39, эл. почта: [ksergrp@mail.ru](mailto:ksergrp@mail.ru)

**Хажибеков Роман Русланович**, магистрант каф. ТУ, ТУСУР, инженер НИЛ «БЭМС РЭС», тел: (3822) 41-34-39, эл. почта: r300994@mail.ru,

**Газизов Тимур Тальгатович**, канд. техн. наук, научный сотрудник НИЛ «БЭМС РЭС», тел: (3822) 41-34-39, эл. почта: timurtsk@gmail.com

*Kuksenko S.P., Khazhibekov R.R., Gazizov T.T.*

### **Estimation of radiated electromagnetic emission level from seven-stage modal filter for Ethernet 100Base-T network**

**Abstract:** Growth of performance, packing density and placement of radio-electronic equipment makes it more susceptible to the effects of both external and internal electromagnetic interference. In particular, its protection against the effects of high-power ultrashort pulse, unintentional (secondary effects of lightning and electrostatic discharge) and intentional (electromagnetic terrorism) is important. Traditional protection devices have a number of drawbacks (low capacity, poor performance, parasitic parameters) that hinder the protection of powerful ultrashort pulse. Therefore, development of new protective devices is actual. Thus, a modal filter (MF) was proposed, which doesn't use radio-electronic components and special structures, but uses special structures that contribute to the decomposition of interference ultrashort pulse. This paper presents the results of evaluation of radiated electromagnetic emission from seven-stage MF used to protect the equipment of Ethernet 100Base-T network. We briefly explain about how it works. Results of propagation through the filter of standard Ethernet signal and the interference trapezoidal signal with duration of 35 ps are shown. To estimate the emission we used full-wave electromagnetic simulation and full-scale experiment, using electromagnetic radiation analyzer. It is shown that the level of modal filter emission does not exceed the requirements of the MIL-STD-461G standard in the range up to 10 GHz.

**Key words:** modal filter, radiated electromagnetic emission, ultrashort impulse, Fast Ethernet

### **References**

1. Petkau O. Zashchita ob"ektov toplivno-energeticheskogo kompleksa ot ugroz elektromagnitnogo vozdeistviia [Protection of the fuel and energy complex from threats of electromagnetic effects], O. Petkau, A. Tarabtsev, A. Deriabin, S. Larionov, V. Chvanov *Bezopasnost' ob"ektov toplivno-energeticheskogo kompleksa* [Safety of the fuel and energy complex]. 2014. №2(6). pp. 78–79. (in Russia).
2. Zabolotskii A.M. Modal'nye fil'try dlia zashchity bortovoi radioelektronnoi apparatury kosmicheskogo apparata [Modal filters for the protection of on-board electronics of the spacecraft]. A.M. Zabolotskii, T.R. Gazizov. Tomsk: Izd-vo Tomsk. Gos. un-ta sistem upr. i radioelektroniki [Publishing of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2013., 151 p. (in Russia).
3. Gazizov T.R. Elektromagnitnaia sovmestimost' i bezopasnost' radioelektronnoi apparatury: Uchebnoe posobie [Electromagnetic compatibility and safety radioelectronics: educational guidance]. Tomsk: «TML-Press», 2007., 256 p. (in Russia).
4. Kechiev L.N., Baluk N.V. Zarubezhnye voennye standarty v oblasti EMS [Foreign military standards in the field of EMC]. – M.: Grifon, 2014, – 450 p. (in Russia).
5. MIL-STD-461G. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. Available at: <http://www.interferencetechnology.com/wp-content/uploads/2015/04/461G.pdf> (accessed 1 September 2016).
6. CST Computer Simulation Technology. Available at: <https://www.cst.com/> (accessed 1 September 2016).
7. Bulaev M. A. Osobennosti fizicheskogo urovnia standarta Fast Ethernet 100BASE-TX [Features of physical layer of Fast Ethernet 100BASE-TX standard], M.A. Bulaev, K.Iu. Burlakov, K.V. Demin, V.G. Kapustin, A.V. Ovcharov, V.V. Sak, *Zashchita informatsii. Konfident.*, 2002., № 4(5), pp. 40–43. (in Russia).
8. Probe Set HZ-15 for E and H near-field emission measurements with test receivers and spectrum analyzers. Available at: [https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/HZ-15\\_en.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/HZ-15_en.pdf) (accessed 1 September 2016).

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Prospekt Lenina, 40, 634050 Tomsk, Russian Federation*

### **Authors**

**Kuksenko Sergei Petrovich**, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Prospekt Lenina, 40, 634050 Tomsk, Russian Federation; PhD, assistant professor of television and control (TU) chair, senior scientist researcher of scientific research laboratory «Security and electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment» (SRL «SEMC REE»), TUSUR, Phone: (3822) 41-34-39, e-mail: ksergp@mail.ru.

**Khazhibekov Roman Ruslanovich**, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Prospekt Lenina, 40, 634050 Tomsk, Russian Federation; candidate for a master's degree of TU chair, engineer of SRL «SEMC REE», TUSUR, Phone: (3822) 41-34-39, e-mail: r300994@mail.ru.

**Gazizov Timur Tal'gatovich**, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Prospekt Lenina, 40, 634050 Tomsk, Russian Federation; PhD, scientist researcher of SRL «SEMC REE», TUSUR, Phone: (3822) 41-34-39, e-mail: timurtsk@gmail.com.