

УДК 621.371.32

Р.Р. Хажибеков

Исследование амплитудно-частотных характеристик модальных фильтров с пассивным проводником в виде последовательности отрезков линий передачи

Рассматривается возможность увеличения крутизны спада амплитудно-частотной характеристики модального фильтра путем увеличения количества отрезков линий передачи, составляющих пассивный проводник. С помощью электродинамического анализа выполнено исследование амплитудно-частотных характеристик модальных фильтров на основе полосковых линий с лицевой связью и модального фильтра со встречно-штыревой структурой проводников. Возможность увеличения крутизны спада амплитудно-частотной характеристики и ширины полосы пропускания также подтверждается натурным экспериментом. Показано, что кроме улучшения частотных характеристик последовательное соединение двух модальных фильтров улучшает подавление сверхкороткого импульса.

Ключевые слова: модальный фильтр, амплитудно-частотная характеристика, печатная плата, элементы с распределенными параметрами.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-31-36

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) весьма актуальна, поскольку РЭА восприимчива к влиянию электромагнитных помех (ЭМП). Кроме того, чтобы вывести из строя РЭА или ухудшить её функционирование, используются преднамеренные ЭМП. Одним из наиболее опасных преднамеренных воздействий является сверхкороткий импульс (СКИ) [1–4]. Исследования отечественных и зарубежных ученых показали уязвимость РЭА к СКИ. Он имеет широкий спектр, перекрывающий большую часть диапазонов работы РЭА, а из-за малой длительности импульса основная энергия генератора расходуется на увеличение амплитуды СКИ, что приводит к значительному повышению напряженности электрического поля.

Для защиты аппаратуры от кондуктивных ЭМП широко применяют разрядники, варисторы, TVS-диоды или гальваническую трансформаторную развязку. Для защиты от СКИ предложены модальные фильтры (МФ), в которых не используются радиоэлектронные компоненты, а применяются особые структуры, способствующие разложению СКИ на импульсы меньшей амплитуды.

Многочисленные исследования показали способность МФ эффективно подавлять СКИ [5–10]. Однако для применения МФ в системах передачи информации необходимо улучшать частотные характеристики устройства, такие как ширина полосы пропускания и величина затухания в полосе пропускания. Одновременное улучшение этих характеристик возможно путем обеспечения более крутого спада на частотной зависимости $|S_{21}|$. Кроме того, решение данной задачи позволит улучшить подавление СКИ [11].

Известно, что одним из возможных решений по увеличению крутизны спада частотной зависимости $|S_{21}|$ фильтров является добавление дополнительных звеньев [12, 13]. Применительно к МФ предлагается разделить пассивный проводник на последователь-

ность отрезков линий передачи (ОЛП) [14]. Управление величиной емкости или индуктивности таких ОЛП возможно при включении их концов в короткозамкнутом или разомкнутом режимах [15]. Так, для ОЛП, включенного в начале в режиме короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ) в конце, при его длине $l \ll \lambda/4$ происходит сильное возрастание последовательной индуктивности, а при увеличении длины ОЛП от $\lambda/4$ возрастает последовательная емкость.

Поэтому целью работы является исследование возможности увеличения крутизны спада АЧХ МФ путем разделения пассивного проводника на ОЛП.

Модальный фильтр на основе полосковых линий с лицевой связью

Рассматривается структура МФ на основе полосковых линий с лицевой связью [16], в которой среднее геометрическое волновых сопротивлений четной и нечетной мод равно 50 Ом. Поперечное сечение структуры представлено на рис. 1. МФ содержит 3 проводника – активный (А), пассивный (П) и опорный (О). Значения геометрических параметров следующие: ширина проводника $w = 5,5$ мм, расстояние между проводниками $s = 2$ мм, толщина проводника $t = 0,105$ мм, толщина подложки из стеклотекстолита $h = 0,79$ мм. Относительная диэлектрическая проницаемость стеклотекстолита (ϵ_r) равна 5, а тангенс угла диэлектрических потерь – 0,035 на частоте 1 МГц.

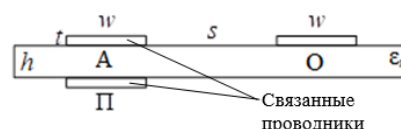


Рис. 1. Поперечное сечение МФ на основе полосковых линий с лицевой связью

Рассмотрены структуры с числом ОЛП пассивного проводника $N = 1, 3, 5, 7$. Длина каждого ОЛП выбиралась одинаковой (l/N), где $l = 1$ м. Поэтому

при изменении значения N изменялось значение l . Пассивный проводник включался в режиме КЗ–ХХ. Активный проводник включался в режиме 50 Ом ($R_1 = R_2 = 50$ Ом). Схема включения МФ представлена на рис. 2.

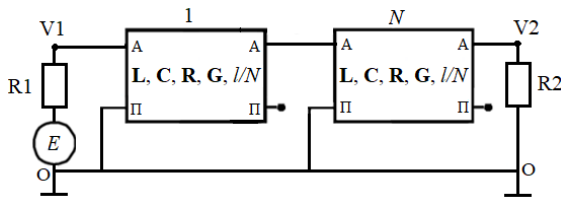


Рис. 2. Схема включения МФ на основе полосковых линий с лицевой связью с различным числом ОЛП пассивного проводника

Вычислены частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ с помощью электродинамического анализа. Результаты моделирования представлены на рис. 3. Как видно из графиков, с увеличением N увеличиваются крутизна частотной зависимости $|S_{21}|$ и ширина полосы пропускания. Кроме того, увеличиваются ширина полосы подавления и величина вносимого затухания в полосе подавления. В табл. 1 представлены значения первой частоты среза для $N = 1, 3, 5, 7$. Из полученных значений можно сделать вывод, что при увеличении числа N и сохранении общей длины проводников МФ частота среза увеличивается приблизительно в N раз

$$f_{cpN} \approx N \cdot f_{cp1}, \quad (1)$$

где f_{cpN} – частота среза МФ с количеством ОЛП пассивного проводника N , f_{cp1} – частота среза МФ с пассивным проводником в виде одного отрезка ОЛП.

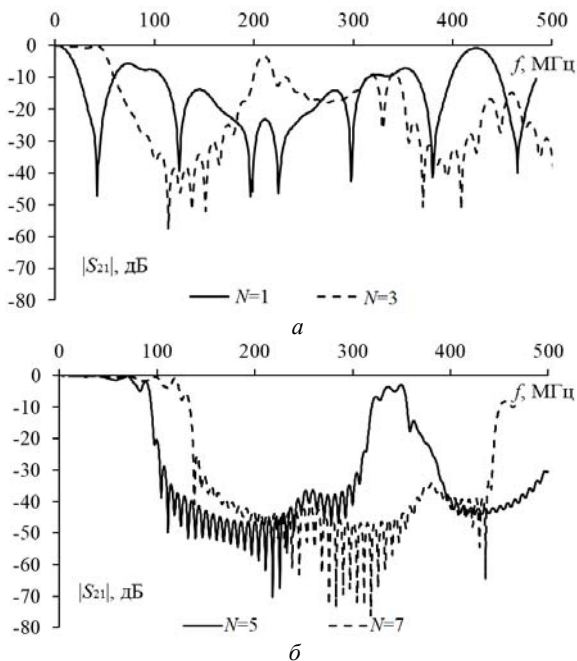


Рис. 3. Вычисленные частотные зависимости МФ на основе полосковых линий с лицевой связью с различным числом N

Выражение (1) не может принять вид равенства из-за пульсаций и искажений в полосе пропускания,

которые отчасти вызваны неоднородностями структуры. К ним можно отнести разрывы и КЗ пассивного проводника (учитываются в трехмерном электродинамическом моделировании).

Таблица 1

Зависимость частоты среза от значения N (результаты электродинамического анализа)

Количество ОЛП пассивного проводника, N	1	3	5	7
Длина одного ОЛП пассивного проводника, мм	1000	333	200	143
f_{cp} , МГц	15	51	78	106

Модальный фильтр со встречно-штыревой структурой проводников

Вычислены частотные зависимости $|S_{21}|$ встречно-штыревого МФ с числом ОЛП пассивного проводника $N = 1$ и $N = 3$ [17]. Схема включения МФ показана на рис. 4. Пассивный проводник включался в режиме КЗ–ХХ, а активный – в режиме 100 Ом. Длина самого длинного ОЛП пассивного проводника выбиралась как половина длины всего МФ ($l_2 = l/2$), длина первого и третьего ОЛП выбиралась как половина длины второго ОЛП ($l_1 = l_3 = l_2/2$). Однако так как переходные отверстия могут располагаться только на внешней стороне полувитков, длины ОЛП получились равными: $l_1 = 67$ мм, $l_2 = 159$ мм, $l_3 = 74$ мм. Размеры макетов одинаковы. Поперечное сечение структур показано на рис. 5, а, а вид сверху на топологию проводников – на рис. 5, б. Значения геометрических параметров следующие: $w = 0,18$ мм, $s = 0,38$ мм, $t = 0,105$ мм, $h = 0,29$ мм. Длина штырей lp составляет 1,4 мм. Материал подложки – FR-4 ($\epsilon_r = 4,3$).

Внешний вид топологии макетов сверху (Top) и снизу (Bottom) представлен в табл. 2. Вычисленные частотные зависимости $|S_{21}|$ приведены на рис. 6. Из графиков видно, что при $N = 3$ крутизна $|S_{21}|$ значительно выше, чем при $N = 1$. Кроме того, полоса пропускания при $N = 1$ равна 59 МГц, а при $N = 3$ – 161 МГц.

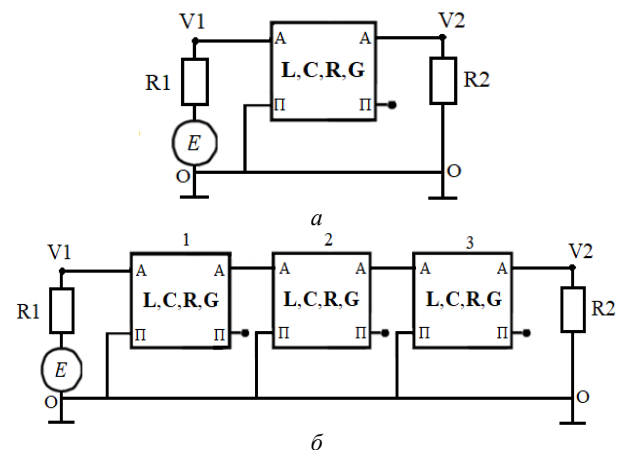


Рис. 4. Схема включения МФ со встречно-штыревой структурой проводников для числа отрезков ОЛП пассивного проводника $N = 1$ (а) и $N = 3$ (б)

Таблица 2

Топология МФ со встречно-штыревой структурой проводников

N=1		N=3	
Top	Bottom	Top	Bottom

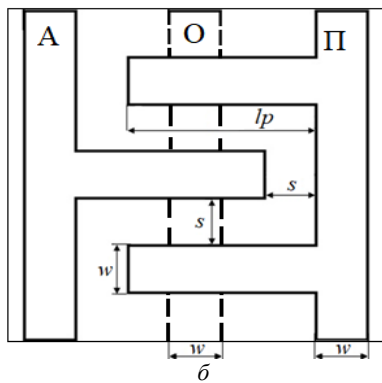
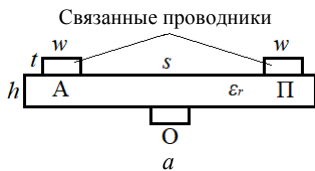


Рис. 5. Поперечное сечение (а) и вид сверху (б) МФ со встречно-штыревой структурой проводников (активный и пассивный проводники на верхнем слое, опорный – на нижнем)

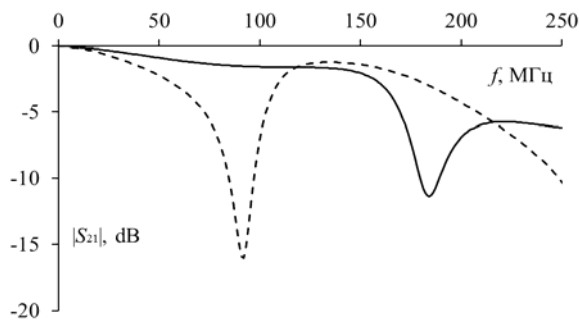


Рис. 6. Вычисленные частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ со встречно-штыревой структурой проводников при $N=1$ (---) и $N=3$ (—)

Экспериментальные исследования

Изготовлен прототип печатной платы МФ на основе полосковых линий с лицевой связью с числом ОЛП пассивного проводника $N = 1, 2, 3, 5, 7$. Общая длина МФ составляет 280 мм. Структура выполнена из недорогого материала и имеет значения геометрических параметров: $w = 9$ мм, $s = 2$ мм, $h = 1,5$ мм и $t = 0,018$ мм. Поперечное сечение и схема включения представлены на рис. 7. Измеренные с помощью прибора Р2М-40 частотные зависимости $|S_{21}|$ показаны на рис. 8. Видно, что с увеличением N крутизна частотной зависимости $|S_{21}|$ и значения первой частоты среза увеличиваются. Однако возникают пульсации в полосе пропускания. Кроме того, на результаты измерений могут влиять соединители, пайка, а также неоднородности на стыках. В табл. 3 приведены значения первой частоты среза при разных N .

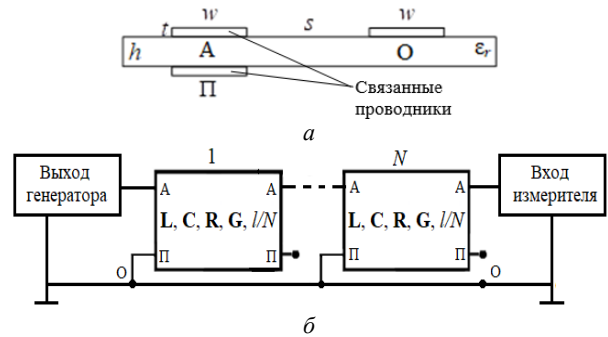


Рис. 7. МФ на основе полосковых линий с лицевой связью: поперечное сечение (а) и схема соединения с измерительной установкой (б)

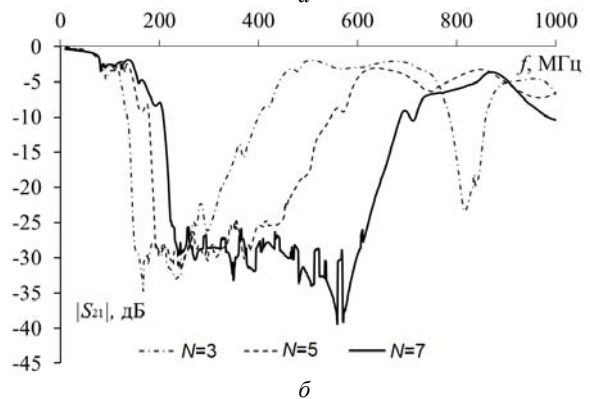
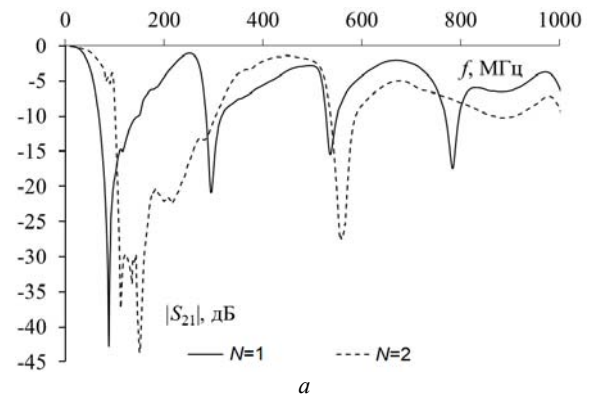


Рис. 8. Измеренные частотные зависимости МФ на основе полосковых линий с лицевой связью

Таблица 3
Зависимость первой частоты среза МФ
на основе полосковых линий с лицевой связью от N
(результаты измерений)

Количество ОЛП, N	1	2	3	5	7
Длина ОЛП, мм	280	140	93,3	56	40
$f_{\text{ср}}$, МГц	49	76	116	139	150

Выполнено измерение частотной зависимости $|S_{21}|$ двух последовательно включенных МФ на основе полосковых линий с лицевой связью прибором P2M-40 (рис. 9). Этот МФ в другом исполнении и имеет значения геометрических параметров: $w = 5,5$ мм, $s = 2$ мм, $t = 0,105$ мм, $h = 0,79$ мм. Длина одного МФ составляет 0,276 м. Пассивный проводник включался в режиме КЗ–ХХ. Частотные зависимости $|S_{21}|$ для одного МФ и для двух последовательно соединенных МФ приведены на рис. 10. Из графика видно, что при добавлении второго МФ полоса пропускания увеличилась с 60 до 66 МГц, несмотря на общее увеличение длины проводников в 2 раза. В то же время резонансная частота уменьшилась со 145 до 115 МГц.



Рис. 9. Соединение двух МФ

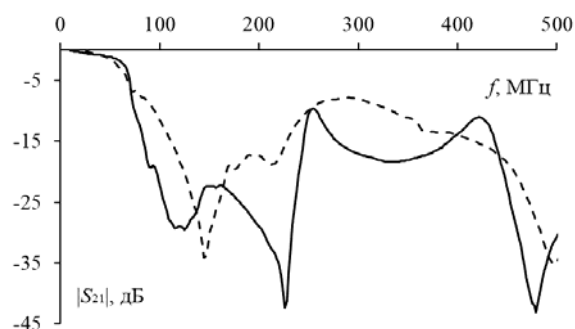


Рис. 10. Измеренные частотные зависимости $|S_{21}|$ одного МФ (---) и двух последовательно соединенных МФ (—)

Последовательное соединение двух МФ может обеспечивать не только лучшую частотную характеристику, чем один МФ, но значительно улучшить подавление СКИ. Это подтверждается измеренными формами напряжения на входе осциллографа С9-11 при воздействии СКИ длительностью 0,45 нс (рис. 11) и их сравнением с результатами измерения для одного МФ. Из результатов измерения получено, что при прохождении одного МФ СКИ ослабляется в 5,7 раза, а двух – в 21 раз.

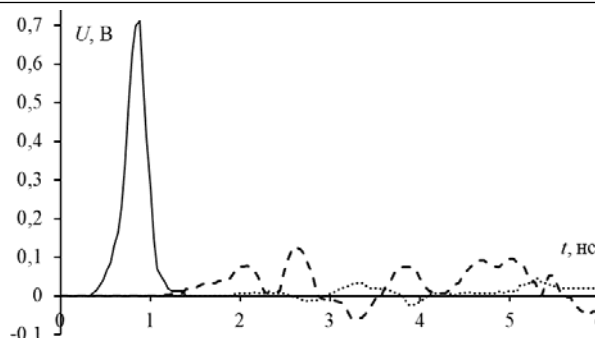


Рис. 11. Формы напряжения на входе осциллографа С9-11 при воздействии СКИ без МФ (—), с одним МФ (- -) и с двумя МФ (···)

Заключение

В работе исследовано влияние изменения количества отрезков ОЛП пассивного проводника МФ на частотную зависимость $|S_{21}|$. С помощью электродинамического анализа вычислены частотные зависимости $|S_{21}|$ МФ на основе полосковых линий с лицевой связью с числом ОЛП пассивного проводника $N = 1, 2, 3, 5, 7$. Результаты моделирования показали, что с увеличением N увеличиваются крутизна спада частотной зависимости $|S_{21}|$ и ширина полосы пропускания. Кроме того, увеличивается величина вносимого затухания вне полосы пропускания. Выполнено измерение частотной зависимости $|S_{21}|$ одного МФ и двух последовательно включенных МФ на основе полосковых линий с лицевой связью. Результаты измерения показали, что при добавлении второго МФ полоса пропускания увеличилась с 60 до 66 МГц, несмотря на общее увеличение длины проводников в 2 раза. В то же время частота резонанса уменьшилась с 145 до 115 МГц. Также экспериментально показано, что при подключении второго МФ можно значительно улучшить подавление СКИ. Так, при прохождении одного МФ СКИ ослабляется в 5,7 раза, а двух – в 21 раз. Изготовлен прототип печатной платы МФ на основе полосковых линий с лицевой связью с числом ОЛП пассивного проводника $N = 1, 2, 3, 5, 7$. Измерены частотные зависимости $|S_{21}|$ с помощью P2M-40. Показано, что с увеличением N крутизна спада частотной $|S_{21}|$ и частота среза увеличиваются. Однако возникают пульсации в полосе пропускания.

Таким образом, рекомендуется использовать МФ с делением пассивного проводника на ОЛП для улучшения подавления высокочастотных помех и уменьшения искажений полезного сигнала, что может быть наиболее полезно для защиты оборудования вычислительных сетей.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-365.2018.8.

Литература

1. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. – 2014. – No. 41 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ece-research.unm.edu/summa/notes/SDAN/0041.pdf>, свободный (дата обращения: 24.03.2019).

2. Zabolotsky A.M. Dangerous pulse excitation of coupled lines / A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov, A.G. Bova, W.A. Radasky // Proc. of the 17-th Int. Zurich Symp. on EMC. Singapore, February 27 – March 3, 2006. – P. 164–167.

3. Vass S. Defense against electromagnetic pulse weapons // *Aarms*. – 2004. – Vol. 3, No. 3. – P. 443–457.

4. Gaynutdinov R. Immunity research of the electronic systems elements at the influence of intentional ultrashort electromagnetic pulses / R. Gaynutdinov, S. Chermoshentsev // 17th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2016. – P. 214–218.

5. Gazizov A.T. UWB pulse decomposition in simple printed structures / A.T. Gazizov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – P. 1136–1142.

6. Zabolotsky A.M. Simulation of ultrawide band pulse propagation in asymmetrical modal filter for power network protection / A.M. Zabolotsky, A.T. Gazizov // *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. – 2015. – Vol. 9. – P. 68–74.

7. Газизов А.Т. Сравнение результатов измерения и моделирования временного отклика модального фильтра на воздействие сверхкороткого импульса // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 4(38). – С. 149–152.

8. Заболоцкий А.М. Использование зеркальной симметрии для совершенствования модальной фильтрации // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2(36). – С. 41–44.

9. Gazizov T.R. Design of printed modal filters for computer network protection / T.R. Gazizov, I.E. Samotin, A.O. Melkozerov, A.M. Zabolotsky // Proc. of 30-th Int. conf. on lightning protection. Italy, Cagliari, 13–17 September 2010. – P. 1246-1–1246-3.

10. Хажибеков Р.Р. Моделирование модального фильтра с учетом потерь / Р.Р. Хажибеков, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Сибирский журнал науки и технологий. – 2018. – № 1. – С. 44–48.

11. Заболоцкий А.М. Электромагнитная совместимость: модальные технологии: учеб. пособие / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2018. – 132 с.

12. Horowitz P. The Art of Electronics, 3rd edition / P. Horowitz, W. Hill. – Cambridge University Press, 2015. – 1219 p.

13. Matthaei G. Microwave Filters, Impedance Matching Networks, And Coupling Structures / G. Matthaei, E. Jones, L. Young. – BookMart Press, NJ, USA. – 1985. – 1095 p.

14. Соломоник И.Ш. Малогабаритная печатная длинная линия с равномерно распределенными параметрами // Тр. ТИРиЭТА. – 1972. – Вып. 7.

15. Изюмов Н.М. Основы радиотехники. / Н.М. Изюмов, Д.П. Линде. – М.: Энергия, 1965. – 544 с.

16. Gazizov A. UWB pulse decomposition in asymmetrical modal filter with different boundary conditions / A. Gazizov, A. Zabolotsky // 2015 Int. Sib. Conf. Control Commun. – Omsk (Russia), May 21–23, 2015. – P. 1–3.

17. Khazhibekov R.R. Modal filter with interdigital structure of conductors for 100 Mbit/s Ethernet equipment protection / R.R. Khazhibekov, A.M. Zabolotsky // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 18–20 April 2019. – P. 1–4.

Khazhibekov R.R.

Study of the amplitude-frequency characteristics of modal filters with a passive conductor in the form of a series of transmission line segments

The possibility of increasing the gain slope of the modal filter by increasing the number of segments of transmission lines that make up the passive conductor is considered. An electrodynamic analysis was used to study the gain of modal filters based on strip lines with a broadside coupling and a modal filter with an interdigital structure of conductors. The possibility of increasing the gain slope and bandwidth is also confirmed by the field experiment. It is shown that in addition to improving the frequency characteristics, the successive combination of two modal filters improves the suppression of an ultrashort pulse.

Keywords: modal filter, amplitude-frequency response, printed circuit board, elements with distributed parameters.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-31-36

References

1. Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources. *System and assessment notes*, 2014, Note 41. Available at: <http://ece-research.unm.edu/summa/notes/SDAN/0041.pdf> (Accessed: March 22, 2019).

2. Zabolotsky A.M., Gazizov T.R., Bova A.G., Radasky W.A. Dangerous pulse excitation of coupled lines. *Proc. of the 17-th Int. Zurich Symp. on EMC, Systems and Signal Processing*, February 27–March 3, 2006, P. 164–167.

3. Vass S. Defense against electromagnetic pulse weapons. *Aarms*, 2004, vol. 3, no. 3, pp. 443–457.

4. Gaynutdinov R, Chermoshentsev S. Immunity research of the electronic systems elements at the influence of intentional ultrashort electromagnetic pulses. *17th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2016*, pp. 214–218.

5. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 1136–1142.

6. Zabolotsky A.M., Gazizov A.T. Simulation of ultrawide band pulse propagation in asymmetrical modal filter for power network protection. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2015, vol. 9, pp. 68–74.

7. Gazizov A.T. [Comparison of measurement results and simulation of the temporal response of the modal filter to the excitation of an ultrashort pulse]. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, no. 4(38), pp. 149–152 (in Russ.).

8. Zabolotsky A.M. [Using reflection symmetry to improve modal filtering]. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, no 2 (36), pp. 41–44 (in Russ.).

9. Gazizov T.R. Samotin I.E., Melkozerov A.O., Zabolotsky A.M. Design of printed modal filters for computer network protection. *Proc. of 30-th Int. conf. on lightning protection*, Italy, Cagliari, 13–17 September 2010, P. 1246-1–1246-3.

10. Khazhibekov R.R., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. [Modal filter simulation with losses]. *Sibirskii zhurnal nauki i tekhnologii*, 2018, No 1, P. 44–48 (in Russ.).

11. Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. *Elektromagnitnaya sovместimost': modal'nye tekhnologii: ucheb. posobie [Electromagnetic compatibility: modal technology: stud. tutorial]*. Tomsk, TUSUR publ., 2018, 132 p.

12. Horowitz P., Hill W. *The Art of Electronics, 3rd edition*, Cambridge University Press, 2015, 1219 p.

Хажибеков Роман Русланович

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 43-14-39

Эл. почта: r300994@mail.ru

13. Matthaei G., Jones E., Young L. Microwave Filters, Impedance Matching Networks, And Coupling Structures, BookMart Press, NJ, USA, 1985, 1095 p.

14. Solomonik I.Sh. [Compact print line with uniformly distributed parameters]. *Tr. TIRiETA*, 1972, Vol 7 (in Russ.).

15. Izyumov N.M., Linde D.P. Osnovy radiotekhniki [Radio engineering basics], Moscow, Energy publ., 1965, 544 p.

16. Gazizov A., Zabolotsky A. UWB pulse decomposition in asymmetrical modal filter with different boundary conditions. *2015 Int. Sib. Conf. Control Commun*, Omsk (Russia), May 21–23, 2015, pp. 1–3.

17. Khazhibekov R.R., Zabolotsky A.M. Modal filter with interdigital structure of conductors for 100 Mbit/s

Ethernet equipment protection. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 18–20 April 2019, pp. 1–4.

Roman R. Khazhibekov

Post-graduate student, Department of Television and Control
Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics
(TUSUR)

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Phone: +7 (382-2) 43-14-39

Email: r300994@mail.ru