

Двухкаскадный экранированный модальный фильтр для работы в дифференциальном и синфазном режимах

В.П. Костелецкий, А.М. Заболоцкий, А.М. Лакоза

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск
kosteletskiy.vp@gmail.com

Аннотация — В статье представлены результаты исследования временных и частотных характеристик экранированного модального фильтра (МФ) для защиты от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах. Показано влияние каскадирования МФ. Приведены матрицы коэффициентов электростатической и электромагнитной индукций, характеристического импеданса и вектор погонных задержек. Использовано тестовое воздействие с амплитудой 250 мВ и длительностью 300 пс по уровню 0,5. В ходе моделирования однокаскадного экранированного МФ амплитуда импульсов на выходе МФ составила 82 мВ в дифференциальном и 74 мВ в синфазном режимах, что соответствует вносимым потерям 9,7 дБ и 10,6 дБ соответственно. Частота среза 190 МГц в дифференциальном и 181 МГц в синфазном режимах. При моделировании двухкаскадного экранированного МФ амплитуда импульсов на выходе МФ составила 31 мВ в дифференциальном и 23 мВ в синфазном режимах, что соответствует вносимым потерям 18,1 дБ и 20,7 дБ соответственно. Частота среза 130 МГц в дифференциальном и 121 МГц в синфазном режимах. В ходе экспериментального исследования двухкаскадного экранированного МФ амплитуда импульсов на выходе МФ составила 32 мВ в дифференциальном и 16 мВ в синфазном режимах, что соответствует вносимым потерям 17,8 дБ и 23,9 дБ соответственно. Частота среза 98 МГц в дифференциальном и 127 МГц в синфазном режимах.

Ключевые слова — электромагнитная совместимость, сверхкороткий импульс, синфазный режим, дифференциальный режим, модальный фильтр, кондуктивные помехи.

I. ВВЕДЕНИЕ

В наше время наблюдается интенсивное распространение радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) [1], [2] во всех отраслях жизнедеятельности человека. Эксплуатация РЭА сопряжена с риском нарушений ее работы или отказами [3]. Часто от правильного функционирования РЭА зависит успех проекта, что накладывает дополнительные требования к надежности и обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС). Увеличение плотности монтажа, рабочих частот и количества межсоединений проводников приводит к ухудшению ЭМС [4]. РЭА, по мере увеличения быстродействия, становится чувствительнее к импульсным помехам, ранее не

оказывающим значительного влияния на ее работу, но теперь способны приводить к ложным срабатываниям и сбоям. Важным направлением ЭМС является защита РЭА от помех, проникающих в электронику по проводникам цепей питания и интерфейсов [5]. Наиболее опасным помеховым воздействием является сверхкороткий импульс (СКИ), который характеризуется малой длительностью воздействия. Такой импульс обладает спектром, перекрывающим широкий диапазон частот, в результате традиционные средства ограничения импульсных помех оказываются неэффективными [6]. Распространяясь по проводникам СКИ приводит к пробоем диэлектриков и полупроводников повреждая оборудование. Для защиты от сверхкоротких импульсов (СКИ) существуют устройства, в основе работы которых лежат модальные искажения, возникающие в линиях передачи из-за разности задержек мод [7]. К таким устройствам относят модальные фильтры (МФ) и защитные меандровые линии [8], [9]. Ослабление СКИ требуется, как в дифференциальном, так и в синфазном режимах [10], что достигается при использовании устройства [11]. МФ просты в изготовлении, обладают высокими механическими показателями и стабильностью электрических параметров. Однако экранированные МФ для защиты в дифференциальном и синфазном режимах, а также влияние каскадирования на его характеристики недостаточно исследованы. Существуют исследования такого МФ, однако в них отсутствует экспериментальное подтверждение результатов. Между тем, важно провести такое исследование, для расширения номенклатуры устройств, применяемых для обеспечения ЭМС, поскольку в технических требованиях по защите критичной аппаратуры задаются ослабления к обеим модам. Цель работы – исследовать временные и частотные характеристики экранированного модального фильтра (МФ), для защиты в дифференциальном и синфазном режимах.

II. ПАРАМЕТРЫ МФ И ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ

Устройство для защиты от СКИ в дифференциальном и синфазном режимах, представляет собой экранированную полосковую структуру. Такой МФ состоит из электрического экрана и шести проводников одинаковой длины, расположенных в неоднородном диэлектрическом

заполнении. Для уменьшения амплитуды импульсов разложения применено каскадирование МФ, как в [12]. Электрические параметры материалов, поперечное сечение и длина МФ выбраны по критериям допустимой токовой нагрузки, уменьшения амплитуды импульсов на выходе МФ, а также доступности материалов для изготовления макета. Так, активные проводники рассчитаны на номинальный ток 1,9 А, при условии, что протекание тока увеличит температуру проводника на 1°С. Значение тока вычислено в соответствии с международным стандартом по производству печатных плат IPC-2221 [13]. Согласно ему ток, на который рассчитан проводник, определяется как

$$I = k \cdot \Delta T^{0,44} \cdot A^{0,725},$$

где k – коэффициент для внешних слоев, который равен 0,048, ΔT – изменение температуры проводника в градусах Цельсия, A – площадь поперечного сечения проводника в милах.

На рис. 1 приведено поперечное сечение МФ со следующими параметрами: w – ширина пассивных и активных проводников, w_1 – ширина опорных проводников, s – расстояние между активным и опорным проводниками, t – толщина проводников, h_1 – расстояние от проводников до экрана в верхней и нижней частях поперечного сечения МФ, h_2 – толщина диэлектрических слоев из стеклотекстолита, h_3 – расстояние между листами стеклотекстолита. Для реализации условий, при которых появляются необходимые модальные явления, взяты следующие значения параметров: $w = 3$ мм, $w_1 = 6$ мм, $g = 4,2$ мм, $s = 0,5$ мм, $t = 35$ мкм, $h_1 = 6$ мм, $h_2 = 430$ мкм, $h_3 = 3$ мм, $\epsilon_{r1} = 1$, $\epsilon_{r2} = 4,7$.

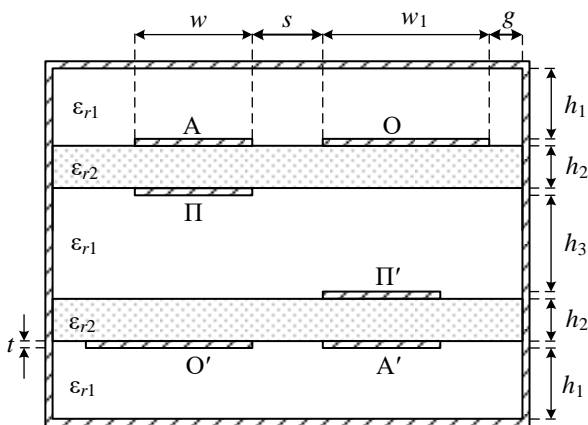


Рис. 1. Поперечное сечение МФ

Компьютерное моделирование выполнено без учета потерь в диэлектриках и проводниках. Вычисления погонных задержек, матрицы характеристического импеданса, коэффициентов электромагнитной (L) и электростатической (C) индукций выполнено с использованием программного продукта TALGAT [14], при длине сегмента 11 мкм. Моделирование временных откликов и частотных характеристик выполнено в PathWave Advanced Design System [15].

При моделировании временных откликов в качестве тестового воздействия использован оцифрованный сигнал с осциллографа вычислительного комбинированного С9-11, с длительностью 300 пс по уровню 0,5. Форма половины его э.д.с. изображена на рис. 2.

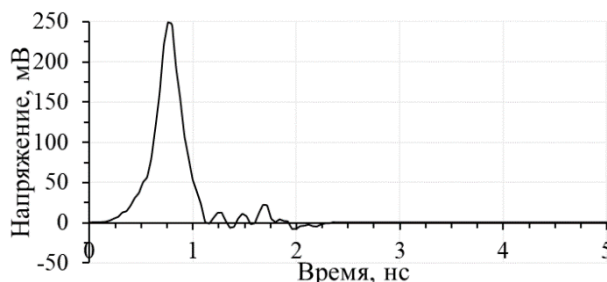
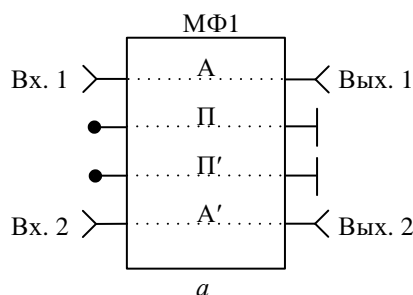
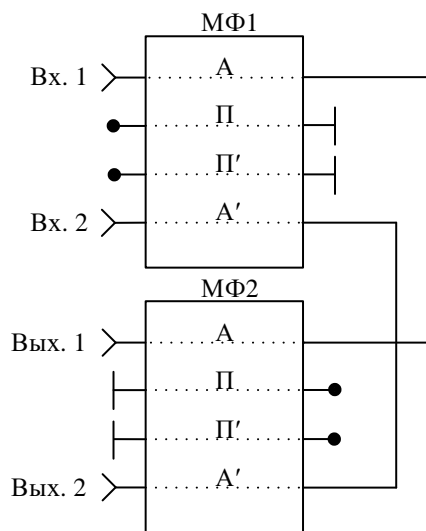


Рис. 2. Форма половины э.д.с. тестового воздействия на МФ

Для оценки влияния каскадирования необходимо моделирование однокаскадного и двухкаскадного МФ. На рис. 3 изображены схемы электрических соединений одного (рис. 3а) и двух (рис. 3б) каскадов МФ. Активные проводники на ближнем и дальнем концах имеют соединители для подключения.



а



б

Рис. 3. Схема электрических соединений одного (а) и двух (б) каскадов МФ

При моделировании полагается, что опорные проводники соединены с электрическим экраном, по

всей длине, а пассивные – только на дальнем конце каждого каскада, тем самым реализуя режим «холостой ход – короткое замыкание», МФ1 – первый каскад, МФ2 – второй каскад. Длина МФ1 110 мм, а второго – 220 мм.

Для моделирования дифференциального режима, между Вх. 1 и Вх. 2 подключают генератор с внутренним сопротивлением 50 Ом. Между Вых. 1 и Вых. 2 подключают сопротивление 50 Ом. Для моделирования синфазного режима Вх. 1 и Вх. 2 закорачивают перемычкой и подключают генератор с внутренним сопротивлением 50 Ом. Вых. 1 и Вых. 2 закорачивают перемычкой и подключают сопротивление 50 Ом.

Поскольку что представленный МФ работает в дифференциальном и синфазном режимах, S -параметры определяются по методике, изложенной в [16], по (1, 2) вычисляют балансные параметры модуля коэффициента передачи для дифференциального S_{dd21} и синфазного S_{cc21} режимов соответственно:

$$S_{dd21} = \frac{S_{21} - S_{41} - S_{23} + S_{43}}{2}, \quad (1)$$

$$S_{cc21} = \frac{S_{21} + S_{41} + S_{23} + S_{43}}{2}. \quad (2)$$

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Однокаскадный и двухкаскадный МФ имеют одинаковые поперечные сечения. Их матрицы C и L :

$$C = \begin{bmatrix} 336,3 & -305,9 & -0,23 & -1,76 \cdot 10^{-2} \\ -305,9 & 337,6 & -2,2 & -0,23 \\ -0,23 & -2,2 & 337,6 & -305,9 \\ -1,76 \cdot 10^{-2} & -0,23 & -305,9 & 336,3 \end{bmatrix} \text{ пФ/м,}$$

$$L = \begin{bmatrix} 315,8 & 243,7 & 21,9 & 17,6 \\ 243,7 & 315,1 & 27,3 & 21,9 \\ 21,9 & 27,3 & 315,1 & 243,7 \\ 17,6 & 21,9 & 243,7 & 315,8 \end{bmatrix} \text{ нГн/м.}$$

Также вычислены матрица характеристического импеданса Z и вектор погонных задержек мод τ МФ:

$$Z = \begin{bmatrix} 72,6 & 61,9 & 4,1 & 3,5 \\ 61,9 & 72,4 & 4,7 & 4,1 \\ 4,1 & 4,7 & 72,4 & 61,9 \\ 3,5 & 4,1 & 61,9 & 72,6 \end{bmatrix} \text{ Ом, } \tau = \begin{bmatrix} 4,23 \\ 6,81 \\ 4,07 \\ 6,77 \end{bmatrix} \text{ нс/м.}$$

На рис. 4 представлены результаты компьютерного моделирования однокаскадного экранированного МФ во временной области.

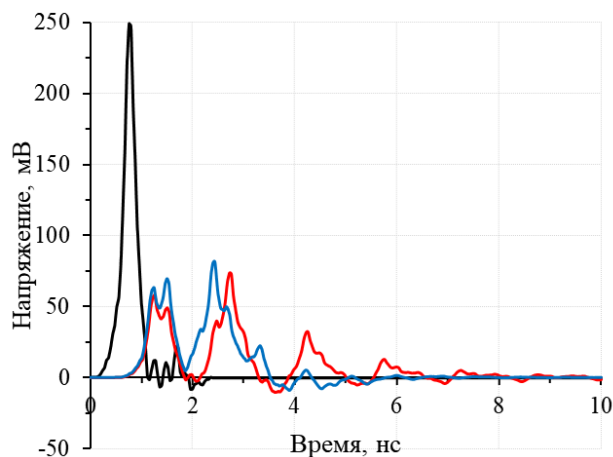


Рис. 4. Формы сигналов: половина э.д.с. тестового воздействия (—), на выходе однокаскадного МФ в дифференциальном (—) и синфазном (—) режимах

При моделировании однокаскадного экранированного МФ получены следующие результаты: в дифференциальном режиме максимальная амплитуда импульсов на выходе МФ составила 82 мВ, а в синфазном – 74 мВ. Вносимые потери составили 9,68 дБ в дифференциальном и 10,57 дБ в синфазном режимах.

На рис. 5 приведены балансные частотные характеристики однокаскадного экранированного МФ в дифференциальном и синфазном режимах, вычисленные по (1, 2). Частота среза однокаскадного МФ, определенная по балансным частотным характеристикам равна, 190 МГц в дифференциальном и 181 МГц в синфазном режимах.

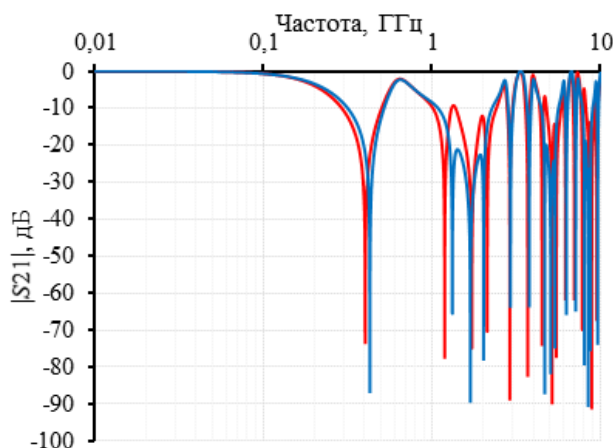


Рис. 5. Модули коэффициента передачи однокаскадного МФ в дифференциальном (—) и синфазном (—) режимах

На рис. 6 представлены результаты вычислительного эксперимента для двухкаскадного МФ во временной области. Видно, что при прохождении через него амплитуда воздействующего сигнала уменьшилась за счет его разложения на импульсы меньшей амплитуды.

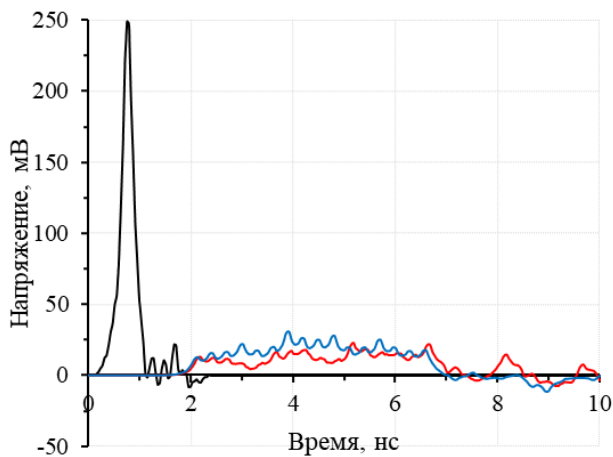


Рис. 6. Формы сигналов: половина э.д.с. тестового воздействия (—), на выходе двухкаскадного МФ в дифференциальном (—) и синфазном (—) режимах

Так, в дифференциальном режиме максимальная амплитуда импульсов на выходе МФ составила 31 мВ, а в синфазном – 23 мВ. Вносимые потери составили 18,13 дБ в дифференциальном и 20,72 дБ в синфазном режимах. На рис. 7 приведены балансные частотные характеристики двухкаскадного МФ в дифференциальном и синфазном режимах, вычисленные по (1, 2). Частота среза в дифференциальном режиме составила 130 МГц, в синфазном – 121 МГц.

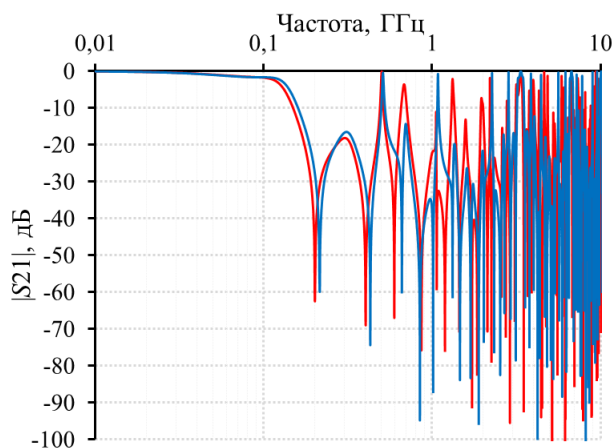


Рис. 7. Модули коэффициента передачи двухкаскадного МФ в дифференциальном (—) и синфазном (—) режимах

Таким образом, из результатов компьютерного моделирования видно что добавление второго каскада уменьшает амплитуду помеховых импульсов на выходе МФ. Так, амплитуда на выходе МФ уменьшилась на 51 мВ в обоих режимах. Частота среза МФ уменьшается на 60 МГц в обоих режимах.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для подтверждения ослабления помехового импульса двухкаскадным МФ выполнено экспериментальное исследование. Печатные платы (ПП), из которых изготовлены каскады МФ,

изображены на рис. 8. При изготовлении ПП использован материал диэлектрика СТФ-2-35 0,5 мм.

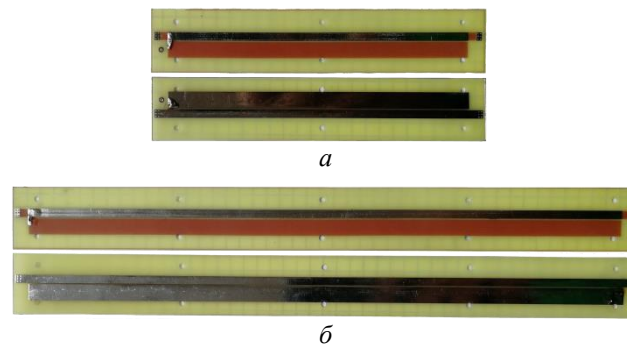


Рис. 8. Макеты ПП первого (а) и второго каскадов (б) МФ

На рис. 9 показан способ размещения ПП МФ в экранирующем корпусе. В макете двухкаскадного МФ опорные проводники через каждые 50 мм соединяются с корпусом.



Рис. 9. Способ размещения ПП МФ в экранирующем корпусе

Макет двухкаскадного МФ, показанный на рис. 10, изготовлен по схеме электрических соединений, изображенной на рис. 3б. При проектировании использованы параметры поперечного сечения МФ, как в моделировании.



Рис. 10. Макет МФ

Макет МФ без учета кабелей для подключения имеет геометрические размеры 335 x 25 x 22 мм. Электрический экран с толщиной стенок 2 мм изготовлен из алюминиевого сплава марки Д16Т.

Для проведения экспериментальных исследований во временной области, использован осциллограф вычислительный комбинированный С9-11. Схема соединений функциональных модулей для измерений во временной области изображена на рис. 11.

На рис. 12 приведены формы напряжения на выходе МФ в дифференциальном (синяя кривая) и синфазном (красная кривая) режимах, а также форма тестового воздействия. Амплитуда тестового воздействия составила 250 мВ. Максимальная амплитуда импульсов

на выходе МФ составила 32 мВ в дифференциальном и 16 мВ в синфазном режимах. Вносимые потери составили 17,84 дБ в дифференциальном и 23,86 дБ в синфазном режимах.



Рис. 11. Схема для измерений во временной области

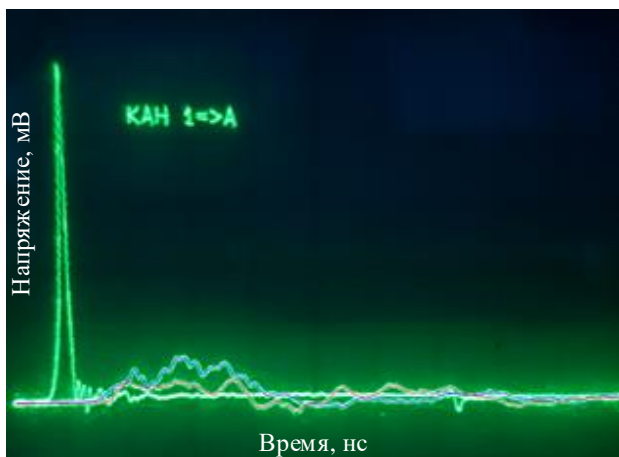


Рис. 12. Формы сигналов: половины э.с. тестового воздействия (—), на выходе МФ в дифференциальном (—) и синфазном (—) режимах

Для проведения экспериментальных исследований в частотной области, использованы скалярный анализатор P2M-40, датчик КСВ ДК4-50-05Р-05Р, головка детекторная Д42-50-05. Схема соединений функциональных модулей для измерений в частотной области изображена на рис. 13.

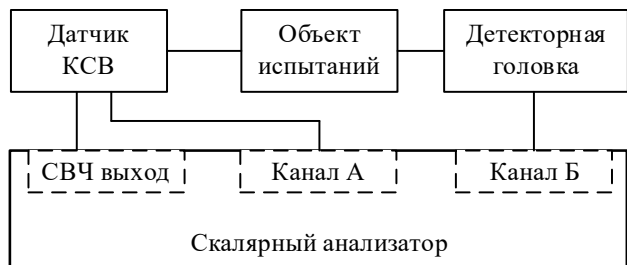


Рис. 13. Схема для измерений в частотной области

На рис. 14 показаны частотные характеристики МФ в дифференциальном и синфазном режимах. Частота среза МФ в дифференциальном режиме составила 98 МГц, а в синфазном – 127 МГц.

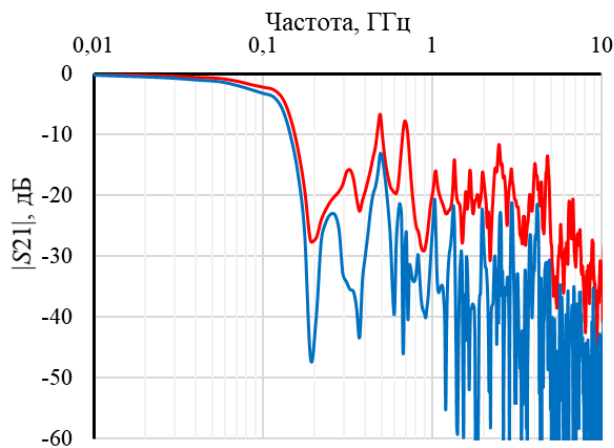


Рис. 14. Измеренные модули коэффициента передачи двухкаскадного МФ в дифференциальном (—) и синфазном (—) режимах

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе данных компьютерного моделирования однокаскадного и двухкаскадного экранированного МФ, приведенных на рис. 4 и рис. 6, а также эксперимента, приведенных на рис. 12, вычислены вносимые потери МФ (табл. 1).

Таблица 1

Вносимые потери МФ, дБ

	DM	CM
1 каскад (моделирование)	9,68	10,57
2 каскада (моделирование)	18,13	20,72
2 каскада (эксперимент)	17,84	23,86

Из результатов исследования (табл. 1) видно, что увеличение числа каскадов МФ приводит к увеличению вносимых потерь. Так, в дифференциальном режиме ослабление увеличилось на 8,45 дБ, а в синфазном на 10,15 дБ. В ходе эксперимента получено подтверждение ослабления помехового импульса двухкаскадным МФ. Абсолютное отклонение результатов эксперимента от моделирования составило 0,29 дБ для дифференциального режима и 3,14 дБ для синфазного.

На основе данных компьютерного моделирования и экспериментальных исследований зависимостей $|S_{dd21}|$ и $|S_{cc21}|$, вычислены частоты среза (табл. 2).

Таблица 2

Частота среза МФ, МГц

	DM	CM
1 каскад (моделирование)	190	181
2 каскада (моделирование)	130	121
2 каскада (эксперимент)	98	127

Из табл. 2 видно, что увеличение числа каскадов МФ привело к уменьшению полосы пропускания полезного сигнала на 60 МГц в обоих режимах. Данные,

полученные в результате эксперимента, подтверждают уменьшение полосы пропускания двухкаскадного МФ. Абсолютное отклонение результатов эксперимента от моделирования составило 32 МГц для дифференциального режима и 6 МГц для синфазного.

При проведении компьютерного моделирования во временной и частотной областях, не учтено влияние проводов, соединителей и крепежа, а также разброса параметров, чем и обусловлены различия результатов моделирования и эксперимента.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследован экранированный МФ, в дифференциальном и синфазном режимах. Выполнено вычисление его матриц характеристического импеданса, погонных задержек, электростатической и электромагнитной индукций. Определены временные отклики на выходе однокаскадного и двухкаскадного вариантов МФ при воздействии длительностью 300 пс по уровню 0,5. Вычислены частотные характеристики в диапазоне частот от 10 МГц до 10 ГГц. Также изготовлен двухкаскадный макет МФ, проведено экспериментальное исследование временных откликов на выходе в обоих режимах и частотных характеристик в диапазоне от 10 МГц до 10 ГГц.

Компьютерное моделирование выявило, что вносимые потери двухкаскадного МФ больше, чем однокаскадного. Впервые продемонстрировано экспериментальное подтверждение ослабления СКИ двухкаскадным экранированным МФ в дифференциальном и синфазном режимах. Получено ослабления 17,8 и 23,9 дБ для дифференциального и синфазного режимов соответственно, при полосе пропускания полезного сигнала от 0 до 98 МГц в дифференциальном и до 127 МГц в синфазном режимах. Простота конструкции минимизирует вероятность выхода из строя компонентов МФ и позволяет производить его в рамках типового технологического процесса, используемого производителями печатных плат. Это обуславливает актуальность применения такого фильтра в сферах деятельности человека от бытовой до космической, ввиду малой массы, радиационной стойкости, стабильности электрических параметров и высоких характеристик.

ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-70020.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Shieh M., Shieh Y. The increasing role of portable electronics in the emergency department // 2013 IEEE Third

- International Conference on Consumer Electronics; Berlin (ICCE-Berlin). 2013. P. 156-157.
- [2] Hermanns K., Peng Y., Mantooth A. The increasing role of design automation in power electronics: Gathering what is needed // IEEE Power Electronics Magazine. 2020. №. 1. P. 46-50.
- [3] Shao J. et al. Environmental worthiness prediction method for electronic product based on physics-of-failure // 2016 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu). 2016. P. 1-4.
- [4] Williams T., Armstrong K. EMC for Systems and Installations. – Newnes, 1999.
- [5] Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and Classification of Potential IEMI Sources. System and Assessment Notes, 2014, note 41.
- [6] Charles A. L., Atwood K. W., Electronic Engineering. 3rd Ed. John Wiley & Sons. 1973. 199 p.
- [7] Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. New approach to EMC protection // 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2007. P. 273-276.
- [8] Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 4. P. 1136–1142.
- [9] Газизов Т.Р. Сравнительный анализ двух видов новых устройств для защиты от электромагнитного терроризма // Материалы VII Региональной научно-практической конференции «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения». 2018. С. 623-625.
- [10] Miloudi M., Bendaoud A., Miloudi H., Nemlich S., Slimani H. Analysis and reduction of common-mode and differential-mode EMI noise in a Flyback switch-mode power supply (SMPS) // 20th Telecommunications Forum (TELFOR). 2012. P. 1080-1083.
- [11] Костелецкий В. П., Заболоцкий А. М. Полосковая структура, защищающая от сверхкоротких импульсов в дифференциальном и синфазном режимах. Заявка №2020126543. Патент РФ на изобретение №2748423. Опубликовано: 25.05.2021. Бюл. №15.
- [12] Заболоцкий А. М., Газизов Т. Р., Калимулин И. Ф. Новые решения для обеспечения электромагнитной совместимости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. Издательство ТУСУРа, 2016. 288 с.
- [13] Adam J. New correlations between electrical current and temperature rise in PCB traces // Twentieth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. 2004. P. 292-299.
- [14] Kuksenko S. P., Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 560, №. 012110, P. 1–7.
- [15] <https://www.keysight.com/ru/ru/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html> (дата обращения: 10.08.2021)
- [16] Dunsmore J. P. Handbook of microwave component measurements: with advanced VNA techniques. John Wiley & Sons. 2020.

Two-Cascade Shielded Modal Filter for Differential and Common Mode Operations

V.P. Kosteletskii, A.M. Zabolotsky, A.M. Lakoza

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk
kosteletskiy.vp@gmail.com

Abstract — This paper presents the results of the study of time and frequency characteristics of the shielded modal filter (MF) employed for protecting electronic equipment against ultrashort pulses in differential and common modes. In particular, the paper considers how cascading the structure of the MF affects the pulse amplitudes at its output. The matrices of electrostatic and electromagnetic induction coefficients are presented, as well as the characteristic impedance and the vector of the per-unit length delays. A test excitation used had an amplitude of 250 mV and a duration of 300 ps at the 0.5 level. During the simulation of a one-cascade shielded MF, the pulse amplitudes at the MF output were 82 mV in the differential mode and 74 mV in the common mode, which corresponds to the insertion losses of 9.7 dB and 10.6 dB, respectively. The cutoff frequency was 190 MHz in the differential mode and 181 MHz in the common mode. When simulating a two-cascade shielded MF, the pulse amplitudes at the MF output were 31 mV in the differential mode and 23 mV in the common mode, which corresponds to the insertion losses of 18.1 dB and 20.7 dB, respectively. The cutoff frequency was 130 MHz in the differential mode and 121 MHz in the common mode. In the experimental study of a two-cascade shielded MF, the pulse amplitudes at the MF output were 32 mV in the differential mode and 16 mV in the common mode, which corresponds to the insertion losses of 17.8 dB and 23.9 dB, respectively. The cut-off frequency was 98 MHz in differential mode and 127 MHz in common mode.

Keywords — electromagnetic compatibility, ultrashort pulse, common mode, differential mode, modal filter, conducted interference.

REFERENCES

- [1] Shieh M., Shieh Y. The increasing role of portable electronics in the emergency department // 2013 IEEE Third International Conference on Consumer Electronics, Berlin (ICCE-Berlin). 2013. P. 156-157.
- [2] Hermanns K., Peng Y., Mantooth A. The increasing role of design automation in power electronics: Gathering what is needed // IEEE Power Electronics Magazine. 2020. №. 1. P. 46-50.
- [3] Shao J. et al. Environmental worthiness prediction method for electronic product based on physics-of-failure // 2016 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu). 2016. P. 1-4.
- [3] Williams T., Armstrong K. EMC for Systems and Installations. – Newnes, 1999.
- [5] Mora N., Vega F., Lugin G., Rachidi F, Rubinstein M. Study and Classification of Potential IEMI Sources. System and Assessment Notes, 2014, note 41.
- [6] Charles A. L., Atwood K. W., Electronic Engineering. 3rd Ed. John Wiley & Sons. 1973. 199 p.
- [7] Gazizov T. R., Zabolotsky A. M. New approach to EMC protection // 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2007. P. 273-276.
- [8] Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 58. № 4. P. 1136-1142.
- [9] Gazizov T.R. Sravnitelnyy analiz dvukh vidov novykh ustroystv dlya zashchity ot elektromagnitnogo terrorizma [Comparative analysis of two types of new devices for protection against electromagnetic terrorism] // Materials of the VII Regional Scientific and Practical Conference "Science and Practice: project activity - from idea to implementation". 2018. P. 623-625.
- [10] Miloudi M., Bendaoud A., Miloudi H., Nemnich S., Slimani H. Analysis and reduction of common-mode and differential-mode EMI noise in a Flyback switch-mode power supply (SMPS) // 20th Telecommunications Forum (TELFOR). 2012. P. 1080-1083.
- [11] Kosteletskii V.P., Zabolotskiy A.M. Poloskovaya struktura, zashchishchayushchaya ot sverkhkorotkikh impul'sov v differentsial'nom i sinfaznom rezhimakh. [Stripe structure protecting against ultrashort pulses in differential and common modes]. Application №2020126543. Patent of the Russian Federation for the invention No.2748423. Publish:25.05.2021. Newsletter no.15.
- [12] Zabolotsky A.M., Gazizov T.R., Kalimulin I. F. Novyye resheniya dlya obespecheniya elektromagnitnoy sovmestimosti bortovoy radioelektronnoy apparatury kosmicheskogo apparata [New Solutions for Ensuring Electromagnetic Compatibility of On-Board Radio-Electronic Equipment of Spacecraft]. TUSUR Publishers, 2016. 288 c.
- [13] Adam J. New correlations between electrical current and temperature rise in PCB traces // Twentieth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. 2004. P. 292-299.
- [14] Kuksenko S.P., Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 560, №. 012110, P. 1-7.
- [15] <https://www.keysight.com/ru/ru/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html> (access date: 10.08.2021)
- [16] Dunsmore J. P. Handbook of microwave component measurements: with advanced VNA techniques. John Wiley & Sons. 2020.