

Дополнительные импульсы при разложении сверхкороткого импульса в модальном фильтре с лицевой и торцевой связями на двухсторонней печатной плате

М.А. Самойличенко, Т.Р. Газизов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,
1993mary2011@mail.ru

Аннотация — Рассмотрено появление дополнительных импульсов на выходе модального фильтра (МФ) на двухсторонней плате с лицевой и торцевой связями, а также в трех структурах, полученных из него удалением одного пассивного проводника. Рассматривается случай, когда на концах каждого из пассивных проводников установлены резисторы сопротивлением 50 Ом. Выявлено, что дополнительные импульсы присутствуют во всех исследуемых структурах МФ. Показано, что амплитуда дополнительных импульсов не превышает амплитуды основных импульсов мод. Однако в каждой из структур МФ есть дополнительные импульсы с большей амплитудой, чем импульсов мод с тройным проходом по линии. В МФ без правого нижнего пассивного проводника наблюдается минимальная амплитуда дополнительных импульсов, а без левого верхнего – максимальная. Продемонстрировано, что в МФ со всеми пассивными проводниками дополнительных импульсов меньше всего.

Ключевые слова — модальный фильтр, сверхкороткий импульс, печатная плата, устройство защиты.

I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости становится все более острой из-за непрерывного развития электронных устройств в направлении снижения их массогабаритных показателей и повышения частот их работы. Массовое использование различных электронных средств приводит к созданию непреднамеренных взаимных помех, которые затрудняют и нередко исключают возможность нормальной совместной работы [1].

Особую опасность представляют сверхкороткие импульсы (СКИ) [2]. Основными особенностями такого воздействия являются: большая крутизна фронта, за счет чего формируется помеха с шириной спектра до нескольких ГГц, высокая проникающая способность, вследствие непрерывного заполнения спектра, энергия, которая локализуется в одной точке, что приводит к увеличению вероятности отказов в чувствительных областях, и большая амплитуда [3, 4]. Для защиты от СКИ в РЭА устанавливают те или иные компоненты защиты, например, газовые разрядники, варисторы, TVS-диоды, LC- и RC-фильтры, ЕМИ-фильтры. Однако они имеют недостатки, например, нестойкость

полупроводниковых компонентов к радиации, пробой при высоких напряжениях, позднее срабатывание газоразрядных устройств, паразитные параметры элементов LC- и RC-фильтров, высокая стоимость [5–7]. Для защиты от СКИ разработаны модальные фильтры (МФ), которые лишены недостатков вышеперечисленных устройств защиты. Исследование МФ показало, что в таких устройствах защиты возможно ослабление СКИ (по отношению к половине э.д.с.) в 3–5 раз [8–12].

Выявлено, что в структурах с модальным разложением могут быть дополнительные импульсы. Они позволяют отделить часть энергии от основной последовательности импульсов мод. За счет этого можно дополнительно распределить энергию по времени, а также, в некоторых случаях, достичь минимизации максимальной из амплитуд импульсов мод. Так, в работе [13] детально анализируется появление дополнительных импульсов: в меандровой линии (МЛ) с лицевой связью, структуре с модальным резервированием, зеркально-симметричных МЛ и МФ с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости. В работе показано, что максимальная амплитуда, в некоторых случаях, может определяться именно амплитудой дополнительных импульсов мод. На примере структуры МФ с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости, наличие дополнительных импульсов доказано экспериментально. Показано, что основной причиной возникновения дополнительных импульсов в защитных структурах с модальным разложением является введение асимметрии (поперечного сечения, граничных условий и воздействия). Задержки таких импульсов определяются различными линейными комбинациями погонных задержек мод линии. Однако не исследованы дополнительные импульсы (в отличие от импульсов мод [14]) в МФ с лицевой и торцевой связями на двухсторонней плате, в том числе при удалении одного пассивного проводника. Цель работы – выполнить такое исследование.

II. ОПИСАНИЕ МФ

На рис. 1 и 2 приведены поперечные сечения и схемы исследуемых МФ. Моделирование выполнялось с типовыми параметрами фольгированного

стеклотекстолита: $t=70$ мкм, $h=500$ мкм, $w=1000$ мкм, $w_1=500$ мкм, $s=300$ мкм при длине МФ $l=5$ м. (Большая длина взята, чтобы исключить наложения дополнительных импульсов друг на друга, из-за чего сложно определить их задержки и возможные комбинации). Входное воздействие представляет собой трапециевидный импульс с амплитудой ЭДС 2 В и общей длительностью 150 пс (время нарастания, вершины и спада по 50 пс). Вычисление матриц погонных параметров и форм сигнала выполнено с помощью квазистатического подхода в системе TALGAT [15]. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

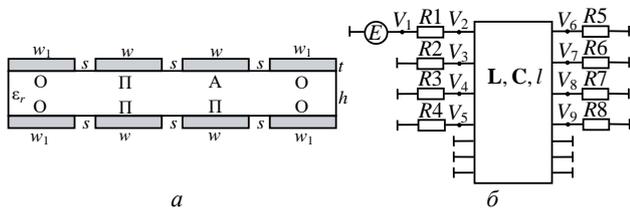


Рис. 1. Поперечное сечение (а), схема включения МФ (б). Проводники: А – активный, П – пассивный, О – опорный

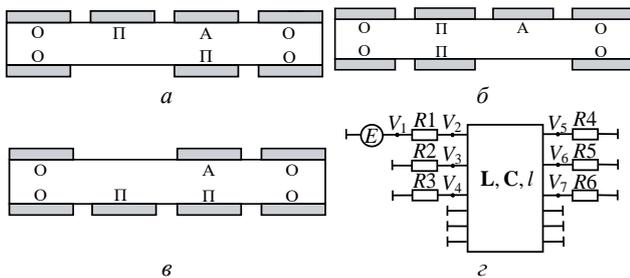


Рис. 2. Поперечное сечение МФ без левого нижнего (а), правого нижнего (б), левого верхнего (в) пассивных проводников и схема включения МФ (г)

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В табл. 1 сведены задержки импульсов мод, а в табл. 2 – комбинации и задержки дополнительных импульсов

импульсов со всеми проводниками. На рис. 3 показаны формы напряжения на выходе МФ. Из рис. 3а видно, что дополнительных импульсов с одним проходом по линии нет, что объясняется отсутствием отражений от начала линии. Однако, они уже есть после тройного прохода. (На рисунках дополнительные импульсы обозначены как 1, 2, 3 и т.д.). Из рис. 3б видно, что дополнительные импульсы имеют как положительную, так и отрицательную полярности. Амплитуда некоторых больше импульсов мод с тройным проходом по линии. Так, например, дополнительные импульсы 6 и 8 имеют отрицательную полярность и амплитуды 0,056 В и 0,054 В соответственно. Импульс 7 имеет положительную полярность и амплитуду 0,054 В, тогда как максимальная из амплитуд импульсов мод с тройным проходом по линии ($3l\tau_2$) составляет 0,049 В. Некоторые дополнительные импульсы (например 1, 4 и 5) имеют столь малую амплитуду, что их не видно.

Таблица 1

Задержки (нс) импульсов мод в МФ со всеми пассивными проводниками

$l\tau_1$	$l\tau_2$	$l\tau_3$	$l\tau_4$	$l\tau_5$	$l\tau_6$	$l\tau_7$
21,411	23,339	23,993	27,359	27,503	29,951	32,701
$3l\tau_1$	$3l\tau_2$	$3l\tau_3$	$3l\tau_4$	$3l\tau_5$	$3l\tau_6$	$3l\tau_7$
64,234	70,017	71,980	82,077	82,508	89,855	98,104

Таблица 2

Комбинации и задержки (нс) дополнительных импульсов 1-8 в МФ со всеми пассивными проводниками

1	2	3	4
$l(2\tau_1+\tau_2)$	$l(2\tau_1+\tau_3)$	$l(\tau_1+2\tau_3)$	$l(2\tau_2+\tau_3)$
66,161	66,815	69,397	70,671
5	6	7	8
$l(2\tau_3+\tau_2)$	$l(2\tau_4+\tau_6)$	$l(2\tau_6+\tau_4)$	$l(2\tau_5+\tau_7)$
71,325	84,670	87,262	87,707

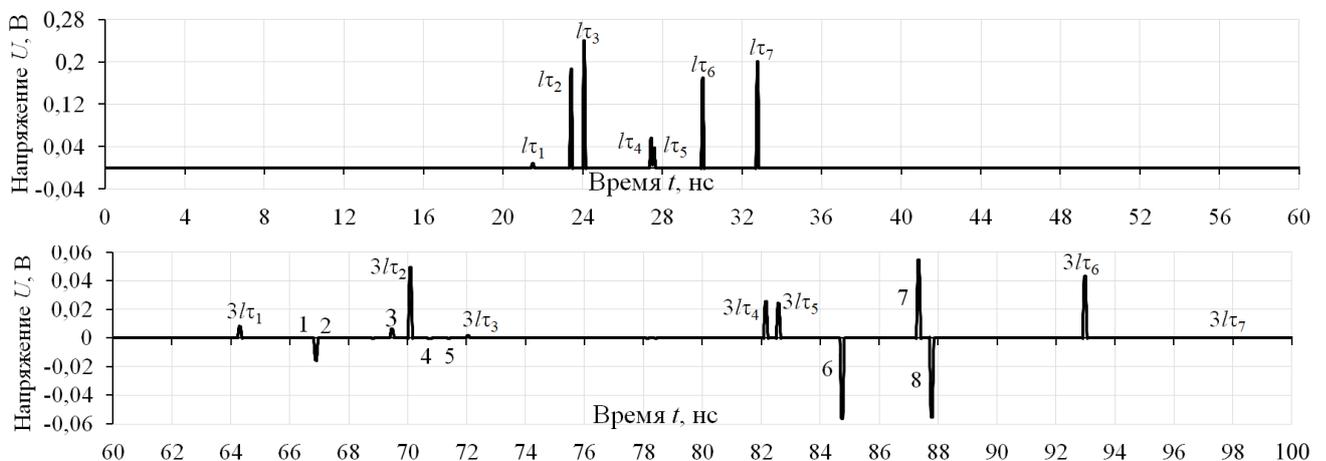


Рис. 3. Формы напряжения на выходе МФ со всеми пассивными проводниками с одним (а) и тройным (б) проходами по линии

В табл. 3 сведены задержки импульсов мод, а в табл. 4 – получившиеся комбинации и задержки дополнительных импульсов в МФ без одного пассивного проводника. На рис. 4 показаны формы напряжения на выходе МФ.

При удалении одного пассивного проводника дополнительных импульсов стало больше. Так, в МФ без левого нижнего пассивного проводника их 44, правого нижнего – 41, а левого верхнего – 46. Однако дополнительных импульсов с большей амплитудой, чем у импульсов мод с тройным проходом по линии, стало меньше. Во всех трех МФ их по 2. В МФ без правого нижнего пассивного проводника амплитуда дополнительных импульсов минимальна, а левого верхнего – максимальна.

Анализ рис. 4 показывает, что в МФ без левого нижнего пассивного проводника (рис. 4б) наибольшие амплитуды у импульсов 43 и 39, правого нижнего (рис. 4з) – 23 и 29, а левого верхнего (рис. 4е) – 42 и 45. Из рис. 4б, видно, что импульсы 39 и 43 имеют отрицательную и положительную полярности соответственно. Амплитуды импульсов равны 0,099 В и 0,078 В, тогда как амплитуда второго импульса с тройным проходом по линии ($3l\tau_2$) равна 0,069 В. Рис. 4з показывает, что импульс 23 с положительной полярностью и амплитудой 0,028 В, а импульс 29 с отрицательной полярностью и амплитудой 0,055 В, тогда как амплитуда пятого импульса с тройным проходом по линии ($3l\tau_5$) равна 0,026 В. Из рис. 4е видно, что импульс 42 имеет отрицательную полярность и амплитуду 0,128 В, а импульс 45 имеет положительную полярность и амплитуду 0,105 В, тогда как амплитуда второго импульса с тройным проходом по линии ($3l\tau_2$) равна 0,079 В.

Таблица 3

Задержки (нс) импульсов мод в МФ без пассивного проводника

τ	Левый нижний	Правый нижний	Левый верхний
$l\tau_1$	21,209	21,174	21,209
$l\tau_2$	23,428	23,430	23,428
$l\tau_3$	25,056	25,056	25,056
$l\tau_4$	27,459	27,459	27,460
$l\tau_5$	28,314	28,315	28,314
$l\tau_6$	31,614	31,613	31,613
$3l\tau_1$	63,628	63,523	63,628
$3l\tau_2$	70,285	70,291	70,285
$3l\tau_3$	75,167	75,170	75,167
$3l\tau_4$	82,377	82,378	82,379
$3l\tau_5$	84,943	84,944	84,934
$3l\tau_6$	94,842	94,841	94,840

Из табл. 4 видно, что задержка дополнительных импульсов определяются линейной комбинацией

погонных задержек мод линии, умноженных на длину линии.

Таблица 4

Комбинации и задержки (нс) дополнительных импульсов в МФ без пассивного проводника

№	Левый нижний		Правый нижний		Левый верхний	
	Комбинация	Время	Комбинация	Время	Комбинация	Время
1	$l(2\tau_1+\tau_2)$	65,84	$l(\tau_1+\tau_2)$	65,78	$l(2\tau_1+\tau_2)$	65,85
2	$l(2\tau_1+\tau_3)$	67,47	$l(2\tau_1+\tau_3)$	67,40	$l(2\tau_1+\tau_3)$	67,47
3	$l(2\tau_2+\tau_1)$	68,06	$l(2\tau_2+\tau_1)$	68,03	$l(2\tau_2+\tau_1)$	68,06
4	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_3)$	69,69	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_3)$	69,66	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_3)$	69,69
5	$l(2\tau_1+\tau_4)$	69,88	$l(2\tau_1+\tau_5)$	70,66	$l(2\tau_1+\tau_4)$	69,88
6	$l(2\tau_1+\tau_5)$	70,73	$l(2\tau_3+\tau_1)$	71,28	$l(2\tau_1+\tau_5)$	70,73
7	$l(2\tau_3+\tau_1)$	71,32	$l(2\tau_2+\tau_3)$	71,92	$l(2\tau_3+\tau_1)$	71,32
8	$l(2\tau_2+\tau_3)$	71,91	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_5)$	72,92	$l(2\tau_2+\tau_3)$	71,91
9	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_4)$	72,10	$l(2\tau_3+\tau_2)$	73,54	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_4)$	72,10
10	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_5)$	72,95	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_4)$	73,69	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_5)$	72,95
11	$l(2\tau_3+\tau_2)$	73,54	$l(2\tau_1+\tau_6)$	73,96	$l(2\tau_3+\tau_2)$	73,54
12	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_4)$	73,72	$l(2\tau_2+\tau_4)$	74,32	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_4)$	73,72
13	$l(2\tau_1+\tau_6)$	74,03	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_5)$	74,54	$l(2\tau_1+\tau_6)$	74,03
14	$l(2\tau_2+\tau_4)$	74,31	$l(2\tau_2+\tau_5)$	75,17	$l(2\tau_2+\tau_4)$	74,31
15	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_5)$	74,58	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_4)$	75,94	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_5)$	74,58
16	$l(2\tau_3+\tau_4)$	75,94	$l(2\tau_4+\tau_1)$	76,09	$l(2\tau_2+\tau_5)$	75,17
17	$l(2\tau_4+\tau_1)$	76,13	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_6)$	76,22	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_4)$	75,94
18	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_6)$	76,25	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_5)$	76,80	$l(2\tau_4+\tau_1)$	76,13
19	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_5)$	76,80	$l(2\tau_3+\tau_4)$	77,57	$l(\tau_1+\tau_2+\tau_6)$	76,25
20	$l(\tau_1+\tau_4+\tau_5)$	76,98	$l(2\tau_5+\tau_1)$	77,80	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_5)$	76,80
21	$l(2\tau_3+\tau_4)$	77,57	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_6)$	78,84	$l(2\tau_3+\tau_4)$	77,57
22	$l(2\tau_5+\tau_1)$	77,84	$l(2\tau_4+\tau_2)$	78,35	$l(2\tau_5+\tau_1)$	77,84
23	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_6)$	77,88	$l(2\tau_3+\tau_5)$	78,43	$l(\tau_1+\tau_3+\tau_6)$	77,88
24	$l(2\tau_4+\tau_2)$	78,34	$l(2\tau_4+\tau_3)$	79,97	$l(2\tau_4+\tau_2)$	78,34
25	$l(2\tau_2+\tau_6)$	78,47	$l(2\tau_5+\tau_2)$	80,05	$l(2\tau_3+\tau_5)$	78,42
26	$l(2\tau_4+\tau_3)$	79,97	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_6)$	80,10	$l(2\tau_2+\tau_6)$	78,47
27	$l(2\tau_5+\tau_2)$	80,06	$l(\tau_1+\tau_4+\tau_6)$	80,25	$l(\tau_2+\tau_4+\tau_5)$	79,20
28	$l(\tau_1+\tau_4+\tau_6)$	80,28	$l(\tau_3+\tau_4+\tau_5)$	80,83	$l(2\tau_4+\tau_3)$	79,97
29	$l(\tau_3+\tau_4+\tau_5)$	80,83	$l(2\tau_5+\tau_3)$	81,68	$l(2\tau_5+\tau_2)$	80,06
30	$l(\tau_1+\tau_5+\tau_6)$	81,14	$l(2\tau_3+\tau_6)$	81,73	$l(\tau_2+\tau_3+\tau_6)$	80,10
31	$l(2\tau_5+\tau_3)$	81,68	$l(\tau_2+\tau_5+\tau_6)$	82,50	$l(\tau_1+\tau_4+\tau_6)$	80,28
32	$l(2\tau_3+\tau_6)$	81,72	$l(2\tau_4+\tau_5)$	83,23	$l(\tau_3+\tau_4+\tau_5)$	80,83
33	$l(\tau_2+\tau_4+\tau_6)$	82,50	$l(\tau_2+\tau_5+\tau_6)$	83,36	$l(\tau_1+\tau_5+\tau_6)$	81,14
34	$l(2\tau_4+\tau_5)$	83,23	$l(2\tau_5+\tau_4)$	84,10	$l(2\tau_5+\tau_3)$	81,68
35	$l(\tau_2+\tau_5+\tau_6)$	83,37	$l(\tau_3+\tau_4+\tau_6)$	84,13	$l(2\tau_3+\tau_6)$	81,72
36	$l(2\tau_5+\tau_4)$	84,09	$l(\tau_3+\tau_5+\tau_6)$	84,98	$l(\tau_2+\tau_4+\tau_6)$	82,50
37	$l(\tau_3+\tau_4+\tau_6)$	84,13	$l(2\tau_4+\tau_6)$	86,53	$l(2\tau_4+\tau_5)$	83,23
38	$l(\tau_3+\tau_5+\tau_6)$	84,98	$l(\tau_4+\tau_5+\tau_6)$	87,39	$l(\tau_2+\tau_5+\tau_6)$	83,35
39	$l(2\tau_4+\tau_6)$	86,53	$l(2\tau_5+\tau_6)$	88,24	$l(2\tau_5+\tau_4)$	84,09
40	$l(\tau_4+\tau_5+\tau_6)$	87,38	$l(2\tau_6+\tau_3)$	88,28	$l(\tau_3+\tau_4+\tau_6)$	84,13
41	$l(2\tau_5+\tau_6)$	88,24	$l(2\tau_6+\tau_4)$	90,69	$l(\tau_3+\tau_5+\tau_6)$	84,98
42	$l(2\tau_6+\tau_3)$	88,28	-	-	$l(2\tau_4+\tau_6)$	86,53
43	$l(2\tau_6+\tau_4)$	90,69	-	-	$l(\tau_4+\tau_5+\tau_6)$	87,38
44	$l(2\tau_6+\tau_5)$	91,54	-	-	$l(2\tau_5+\tau_6)$	88,24
45	-	-	-	-	$l(2\tau_6+\tau_4)$	90,68
46	-	-	-	-	$l(2\tau_6+\tau_5)$	91,54

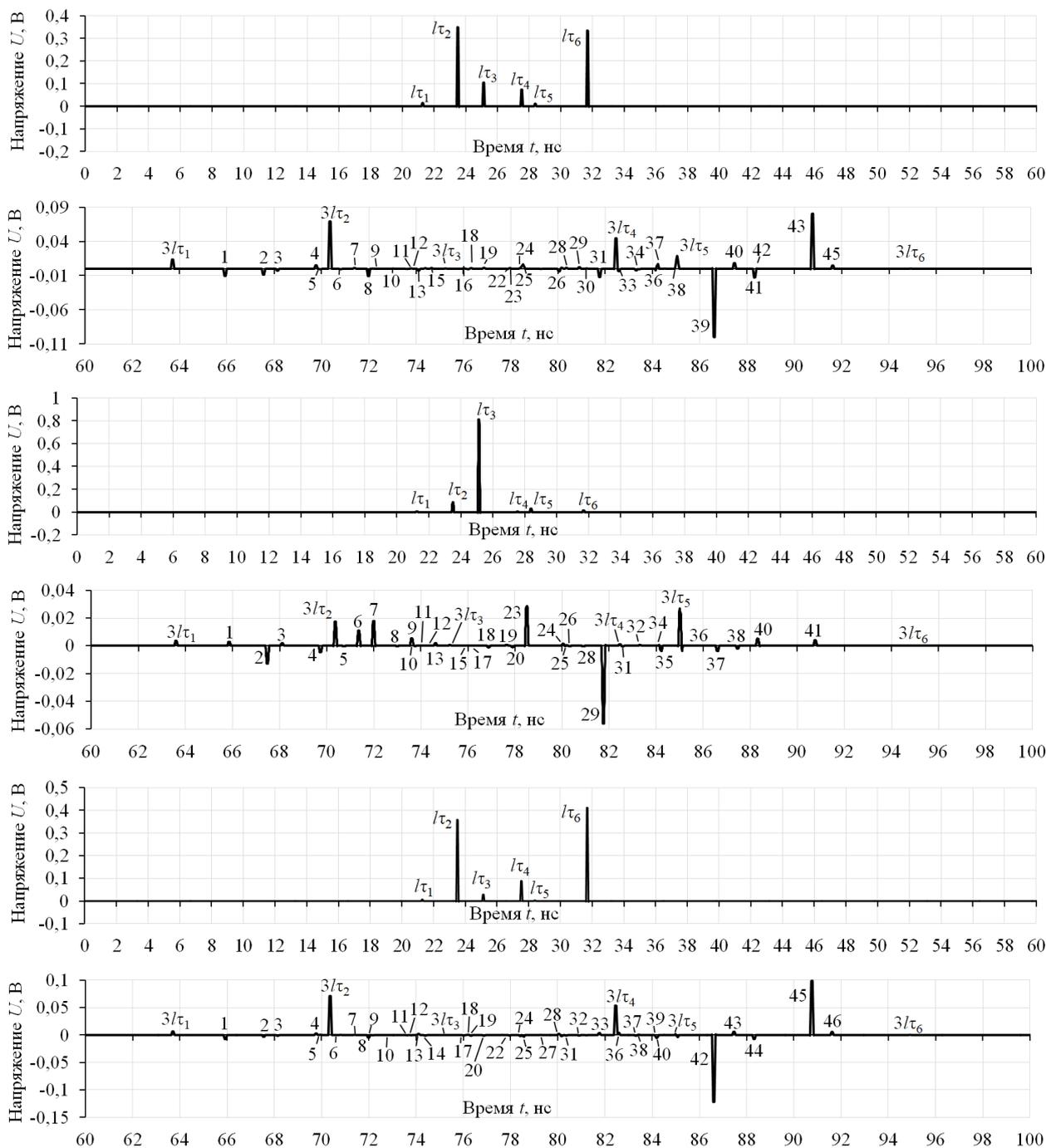


Рис. 4. Формы напряжения на выходе МФ без одного пассивного проводника: левого нижнего с одним (а) и тройным (б) проходами; правого нижнего с одним (в) и тройным (г) проходами; левого верхнего с одним (д) и тройным проходами (е)

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выявлено, что дополнительные импульсы есть во всех исследованных структурах МФ. В зависимости от поперечного сечения МФ, меняется не только общее количество дополнительных импульсов, но и количество дополнительных импульсов с амплитудой больше, чем у импульсов мод с тройным проходом по линии. Так, в МФ со всеми проводниками, дополнительных импульсов меньше

всего. Однако, в МФ без одного пассивного проводника количество дополнительных импульсов с большей амплитудой меньше. Во всех рассмотренных МФ амплитуда дополнительных импульсов не превышает амплитуды основных импульсов мод. Это показывает, что ослабление СКИ во всех рассмотренных МФ (в случае, когда R на концах всех пассивных проводников по 50 Ом) можно оценивать по максимальной из амплитуд именно основных импульсов мод. Минимальная амплитуда дополнительных импульсов

наблюдается в МФ без правого нижнего пассивного проводника, а максимальная – левого верхнего.

В перспективе предполагается исследование дополнительных импульсов с изменением граничных условий на концах пассивных проводников во всех предложенных структурах МФ. Это важно, поскольку в некоторых МФ (например, с пассивным проводником в вырезе опорной плоскости) с изменением граничных условий на концах пассивного проводника амплитуда дополнительных импульсов больше, чем импульсов основных мод.

ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90033.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Юрков Н. К., Андреев П. Г., Жумабаева А. С. Проблема обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2015. Т. 1. С. 1–3.
- [2] Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. 2014. № 41. P. 92.
- [3] Боев, С. Ф., Пименов, П. Н., Пронин, С. А., и Шевырев А. В. Влияние параметров сверхкороткого импульсного электромагнитного излучения на функционирование радиоэлектронных средств // Труды МАИ. 2017. № 93. С. 15.
- [4] Егоров А.Б., Сотников А.М., Рыбалко И.Ф. Воздействие мощного электромагнитного излучения на радиоэлектронные средства // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2012. № 29. С.49–54.
- [5] Капура И.А., Бакуменко Б.В. Анализ методов и средств защиты радиоэлектронной аппаратуры от воздействия мощных электромагнитных излучений // Системы обработки информации. 2010. № 6. С. 87–90.
- [6] Верхулевский К. Защитные TVS-устройства компании Semtech: разнообразие выбора / Компоненты и технологии. 2017. № 3. С. 25–30.
- [7] Han S.M., Huh C.S., Choi J.S. A validation of conventional protection devices in protecting EMP // Progress in Electromagnetic Research. 2011. Vol. 119. P. 253–263.
- [8] Жечев Е.С., Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Газизов Т.Р. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 162–179.
- [9] Хажибекоев Р.Р. Исследование амплитудно-частотных характеристик модальных фильтров с пассивным проводником в виде последовательности отрезков линий передачи // Доклады ТУСУР. 2019. Т. 22, № 2. С. 31–36.
- [10] Черникова Е.Б., Газизов Т.Р. Модальное разложение сверхкороткого импульса в 8-проводных зеркально-симметричных структурах // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 9. С. 1–17.
- [11] Zhechev Y.S., Chernikova E.B., Belousov A.O. Research of the new structure of reflection symmetric modal filter // 20th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM. Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2019. P. 108–112.
- [12] Belousov A.O., Vlasova N.O. Parametric optimization of the cables with the modal filtration effect // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1862. No. 012020. P. 1–5.
- [13] Belousov A.O., Chernikova E.B., Samoylichenko M.A., Medvedev A.V., Nosov A.V., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration // Symmetry. 2020. Vol. 11(7), № 883. P. 1–38.
- [14] Самойличенко М.А. Модальные фильтры для защиты от сверхкоротких импульсов: исследование возможностей эффективного использования в двусторонних печатных платах // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 58–71.
- [15] Квасников А.А., Куксенко С.П., Иванов А.А. Программное обеспечение для проектирования оптимальной сети высоковольтного электропитания космического аппарата // Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем». – г. Москва, 2020 г. Т. 3. С. 100–107.

Research of Additional Pulses Appearing During Ultrashort Pulse Decomposition in a Modal Filter with Edge and Broadside Couplings in Double-Sided Printed Circuit Board

M.A. Samoylichenko, T.R. Gazizov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk
1993mary2011@mail.ru

Abstract — New devices called modal filters (MF) are successfully used for ultrashort pulse (USP) protection. It was revealed that in structures with modal decomposition there appear not only main pulses of the mode but also additional pulses. These pulses could be a new resource for improving the MF efficiency because they allow for the distribution of

USP energy over time. Previous studies have shown that in some MFs the maximum amplitude can be determined by the amplitude of the additional mode pulses rather than by the mode pulses. Therefore, it is relevant to examine additional pulses in detail. The current paper considers the appearance of additional pulses at the output of an MF realized on a

double-sided board with edge and broadside coupling, as well as in three structures obtained from the given MF by removing one passive conductor. In the structures under consideration, there are 50 Ohm resistors at the ends of each of the passive conductors. It was revealed that additional pulses are present in all investigated MF structures. It was shown that the amplitude of the additional pulses does not exceed the amplitude of the main mode pulses. However, in each of the MF structures there are additional pulses with higher amplitudes than pulses of modes with triple line pass. The minimum amplitude of additional pulses is observed in the MF structure without the lower right passive conductor, and the maximum in the structure without the upper left one. It is demonstrated that in the MF with all passive conductors the number of additional pulses is the least.

Keywords — modal filter, ultrashort pulse, printed circuit board, protection device.

REFERENCES

- [1] Yurkov N.K., Andreyev P.G., Zhumabayeva A.S. Problema obespecheniya elektromagnitnoy sovmestimosti radioelektronnykh sredstv (The problem of ensuring the electromagnetic compatibility of radioelectronic equipment) // Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo». 2015. T. 1. S. 1–3.
- [2] Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. 2014. № 41. P. 92.
- [3] Boyev S.F., Pimenov P.N., Pronin S.A., Shevryev A.V. Vliyaniye parametrov sverkhkorotkogo impul'snogo elektromagnitnogo izlucheniya na funktsionirovaniye radioelektronnykh sredstv (Influence of the parameters of ultrashort pulsed electromagnetic radiation on the functioning of radioelectronic facilities) // Trudy MAI. 2017. № 93. S. 15.
- [4] Yegorov A.B., Sotnikov A.M., Rybalko I.F. Vozdeystviye moshchnogo elektromagnitnogo izlucheniya na radioelektronnyye sredstva (The impact of powerful electromagnetic radiation on radio electronic means) // Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. 2012. № 29. S.49–54.
- [5] Kapura I.A., Bakumenko B.V. Analiz metodov i sredstv zashchity radioelektronnoy apparatury ot vozdeystviya moshchnykh elektromagnitnykh izlucheniy (analysis of methods and means of protection of radio-electronic equipment from the impact of powerful electromagnetic radiation) // Sistemi obrobki informatsii. 2010. № 6. S. 87–90.
- [6] Verhulevsky K. Protective TVS-devices from Semtech: a variety of choices (Protective TVS-devices from Semtech: a variety of choices) // Components and technologies. 2017. No. 3. P. 25–30.
- [7] Han S.M., Huh C.S., Choi J.S. A validation of conventional protection devices in protecting EMP // Progress in Electromagnetic Research. 2011. Vol. 119. P. 253–263.
- [8] Zhechev E.S., Chernikova E.B., Belousov A.O., Gazizov T.R. Experimental studies of the mirror-symmetric modal filter in the time and frequency domains (Experimental studies of the mirror-symmetric modal filter in the time and frequency domains) // Control systems, communications and security. 2019. No. 2. P. 162–179.
- [9] Khazhibekov R.R. Issledovaniye amplitudno-chastotnykh kharakteristik modal'nykh fil'trov s passivnym provodnikom v vide posledovatel'nosti otrezkov liniy peredachi (Investigation of the amplitude-frequency characteristics of modal filters with a passive conductor in the form of a sequence of transmission line segments) // Doklady TUSUR. 2019. T. 22, № 2. S. 31–36.
- [10] Chernikova Ye.B., Gazizov T.R. Modal'noye razlozheniye sverkhkorotkogo impul'sa v 8-provodnykh zerkal'no-simmetrichnykh strukturakh (Modal expansion of an ultrashort pulse in 8-wire mirror-symmetric structures) // Zhurnal radioelektroniki. 2020. № 9. S. 1–17.
- [11] Zhechev Y.S., Chernikova E.B., Belousov A.O. Research of the new structure of reflection symmetric modal filter // 20th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM. Erlagol, Altai, June 29 – July 3, 2019. P. 108–112.
- [12] Belousov A.O., Vlasova N.O. Parametric optimization of the cables with the modal filtration effect // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1862. No. 012020. P. 1–5.
- [13] Belousov A.O., Chernikova E.B., Samoylichenko M.A., Medvedev A.V., Nosov A.V., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. From symmetry to asymmetry: the use of additional pulses to improve protection against ultrashort pulses based on modal filtration // Symmetry. 2020. Vol. 11(7), № 883. P. 1–38.
- [14] Samoylichenko M.A. Modal'nyye fil'try dlya zashchity ot sverkhkorotkikh impul'sov: issledovaniye vozmozhnostey effektivnogo ispol'zovaniya v dvustoronnikh pechatnykh platakh (Modal filters for protection against ultra-short pulses: a study of the possibilities of effective use in double-sided printed circuit boards) // Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. 2021. № 4. S. 58–71.
- [15] Kvasnikov A.A., Kuksenko S.P., Ivanov A.A. Software for designing an optimal high-voltage power supply network of a spacecraft // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2020. Issue 3. P. 100-107. doi:10.31114/2078-7707-2020-3-100-107 .