

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.12.10>

УДК: 621.391.825

ВЛИЯНИЕ СОЕДИНЕНИЯ ОПОРНЫХ ПРОВОДНИКОВ НА РАЗЛОЖЕНИЕ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА В МОДАЛЬНОМ ФИЛЬТРЕ НА ДВУХСТОРОННЕЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

М. А. Самойличенко, Т. Р. Газизов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 40

Статья поступила в редакцию 30 декабря 2021 г.

Аннотация. В работе рассматривается влияние двух способов соединения опорных проводников (на концах МФ и вдоль всей длины) на разложение сверхкороткого импульса (СКИ) в модальном фильтре (МФ) на двухсторонней печатной плате (ДПП). Также, выполнено исследование влияния параметров поперечного сечения на разложение СКИ. Так, показано, что для двух способов соединения опорных проводников разность погонных задержек мод возрастает с уменьшением h и увеличением w и s , за счет чего возрастает ослабление МФ. Выявлено, что разность погонных задержек мод незначительно больше в случае соединения опорных проводников на конце при всех значениях параметров. Показано, что в случае соединения опорных проводников только на концах, к выходу МФ приходят 3 импульса (несмотря на 5 распространяющихся мод в линии) а вдоль всей длины – 2 импульса. При этом, разложение входного воздействия на 3 импульса позволяет достичь большего ослабления СКИ (3,2 раза по отношению к половине э.д.с.).

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, защита, сверхкороткий импульс, модальный фильтр, двухсторонняя печатная плата, опорный проводник.

Abstract. The location of the reference conductor in a modal filter (MF) on a double-sided printed circuit board (PCB) could affect the decomposition of an acting ultrashort pulse (USP) in the MF. The paper considers two ways of connecting the reference conductors: at the ends

of the MF and along the entire MF length. The effect of the filter cross-sectional parameters on the decomposition of USPs is also discussed. The results showed that for two ways of connecting the reference conductors, the difference in per-unit-length mode delays increases with decreasing h and increasing w and s . This, in turn, leads to the increase in the MF attenuation factor. It was revealed that the difference in per-unit-length mode delays is slightly larger in the case of connecting the reference conductors at the end for all values of the parameters. It was also found that if the reference conductors are connected only at the ends, 3 pulses arrive at the MF output (despite the 5 propagating modes in the line). And when the conductors are located along the entire length there are 2 pulses. Accordingly, the decomposition of the input action into 3 pulses allows achieving a larger attenuation of the USP (3.2 times relative to half of the e.m.f.).

Key words: electromagnetic compatibility, protection, ultrashort pulse, modal filters, double-sided printed circuit board, reference conductor.

Введение.

В связи с активным расширением используемого диапазона частот, уменьшением минимальных топологических размеров проектируемых интегральных схем и расширением функциональных возможностей технических средств различного назначения неизбежно возрастание актуальности обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) [1]. Электронная аппаратура, как правило, очень чувствительна к помехам, источниками которых являются разряды молний, токи короткого замыкания, коммутационные переходные процессы, рабочие токи в распределительных устройствах [2].

Особо опасными являются широкополосные помехи, которые обычно проявляются в виде отдельных импульсов или их последовательности. Частным случаем таких помех являются сверхкороткие импульсы (СКИ) [3]. Сбои, возникающие при импульсных помехах в электронных устройствах, вызывают повреждение, рассеивание мощности и разрушение устройств. Эффекты повреждения обычно возникают, когда импульсная помеха попадает в оборудование по линиям питания или передачи данных. После этого электронные компоненты пытаются обработать импульсную помеху как

действительную логическую команду. В результате происходит блокирование системы, возникают сбои, выдаются ошибочные данные на выходе, теряются или повреждаются файлы, а также возникают другие нежелательные эффекты. Материалы, используемые для изготовления электронных компонентов, могут выдержать определенное число повторяющихся энергетических всплесков, но не долго. Происходящий замедленный распад в конечном итоге приведет к выходу компонентов из строя. Эффекты разрушения обобщают все случаи, когда импульсные помехи с высокими уровнями энергии вызывают немедленный отказ оборудования. Часто это видимые физические повреждения, например, сгоревшие или треснувшие платы и компоненты персонального компьютера, оплавленные электронные компоненты и др. [4-9]. Поэтому защита от электромагнитных помех актуальна.

На рынке предлагается множество приборов, обеспечивающих хорошую защиту от перенапряжения, например, LC- и RC-фильтры, широко используются газовые разрядники, металлооксидные варисторы и TVS-диоды, также называемые супрессорами, защитными диодами и полупроводниковыми ограничителями напряжения. Однако, каждый из перечисленных защитных элементов имеет свои недостатки.

При использовании варисторов надо учитывать два фактора – старение варисторов и их относительно высокую емкость. Со временем, в зависимости от частоты срабатывания, начинают происходить утечки тока из-за ухудшения характеристик отдельных резистивных элементов. Это может приводить к повышению температуры и даже полному разрушению варисторов. Большая емкость варисторов вызывает проблемы в цепях с высокими частотами, а на частотах выше 100 кГц может происходить ослабление сигнала. Поэтому варисторы не рекомендуются для применения в системах передачи данных [10]. TVS диоды очень быстро становятся проводящими при определенном уровне пробивного напряжения. Тем самым, они устраняют перенапряжение. Тем не менее, допустимая нагрузка по току у ограничительных диодов невысока, несколько сотен ампер. С другой стороны, эти диоды имеют исключительно

малое время реакции, порядка нескольких пикосекунд. К сожалению, TVS диоды имеют значительную собственную емкость. Поэтому, как и в случае с варисторами, необходимо учитывать возможное ослабление сигнала на высоких частотах. Еще одним недостатком является их относительно высокая стоимость [10]. К недостаткам газоразрядников можно отнести проблематичность гашения зажженного искрового разрядника. Дуга имеет очень низкое напряжение, и ее гашение происходит только после того, как напряжение упадет ниже этого уровня. Поэтому при проектировании геометрии искрового разрядника особое внимание уделяется тому, чтобы напряжение дуги оставалось как можно более высоким, и гашение дуги происходило относительно быстро. Тем не менее, при этом может дольше сохраняться сопровождающий (остаточный) ток, и, кроме того, может потребляться энергия из линии питания защищаемой схемы [10]. Поэтому актуально совершенствование устройств защиты от СКИ.

Иначе подавляют СКИ новые защитные устройства, называемые модальными фильтрами (МФ) [11]. Подавление достигается за счет разложения на моды, каждая из которых распространяется со своей задержкой. Количество мод на выходе МФ определяется количеством проводников в линии. Технология модальной фильтрации исследуется в разных направлениях: МФ на печатных платах, меандровые линии, модальное резервирование, МФ в виде кабелей [12-18]. Также исследуются МФ на двухсторонних печатных платах (ДПП). Такие МФ имеют ряд достоинств, например, простота реализации (обычная ДПП), небольшая длина линии (разложение СКИ показывалось при длине 1 м и при длине 0,19 м), хорошее подавление СКИ вне зависимости от количества проводников [19-21]. Выявлено, что на разложение СКИ влияют не только параметры поперечного сечения, но и соединение опорных проводников. Так, их можно соединить только на концах или вдоль всей длины (например, за счет металлизированных отверстий). При этом изменение параметров поперечного сечения МФ может влиять по-разному. Цель работы – оценить влияние двух способов соединения опорных проводников (только на концах МФ и вдоль всей длины) и параметров поперечного сечения на разложение СКИ в МФ на ДПП.

1. Структуры исследуемых МФ на ДПП.

Поперечное сечение и эквивалентные схемы включения исследуемого МФ приведены на рис. 1. Параметры поперечного сечения: s – расстояние между проводниками, w – ширина проводников, h – толщина диэлектрика, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость, t – толщина проводников. В качестве диэлектрика выбран стеклотекстолит.

Активный проводник соединен с источником импульсных сигналов, представленным на схеме идеальным источником э.д.с. E и внутренним сопротивлением $R1$. На другом конце активный проводник соединен с нагрузкой $R3$. Значения сопротивлений $R1 = R2 = R3 = R4 = 50$ Ом. В первом случае опорные проводники соединены лишь на концах и обозначаются как отдельные проводники, закороченные на землю (рис. 1б). Во втором случае все опорные проводники соединены между собой вдоль всей длины, образуя единый опорный проводник, и на схеме не обозначаются (рис. 1в). На вход МФ подавался импульс амплитудой э.д.с. 2 В и общей длительностью 500 пс. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались. Моделирование выполнено с помощью квазистатического подхода, реализованного в системе TALGAT [22]. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

Моделирование выполнялось при одинаковых значениях параметров для двух случаев соединения опорных проводников: $s = 0,5; 1; 1,5$ мм; $w = 0,5; 1; 1,5$ мм; $h = 0,5; 1; 1,5$ мм, $t = 18$ мкм, $\epsilon_r = 4,5$. Длина (l) МФ принята 1 м.

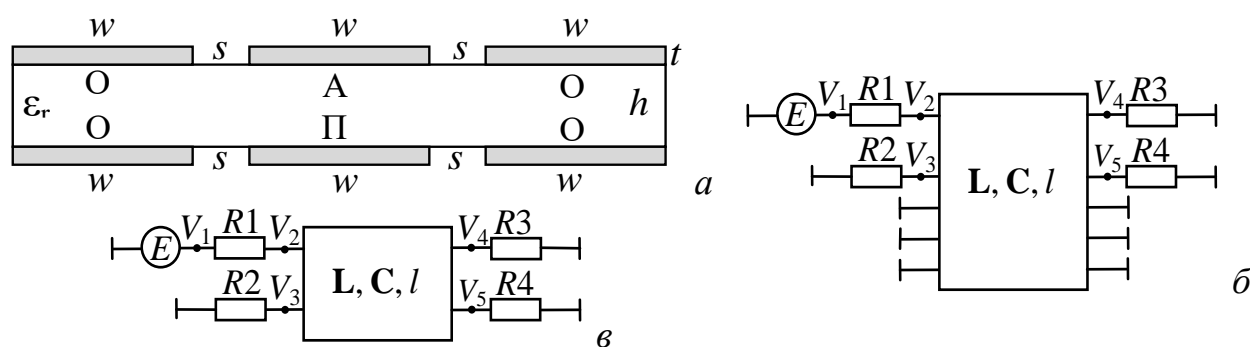


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема МФ с соединенными опорными проводниками на концах (б) и вдоль всей длины (в).

Проводники: А – активный, П – пассивный, О – опорный.

2. Результаты моделирования для соединения опорных проводников на концах.

Соединение опорных проводников на концах позволяет, рассматривать МФ с 5 проводниками в поперечном сечении (не считая одного опорного), а значит, в линии будет распространяться 5 мод.

В табл. 1 сведены значения погонных задержек (τ_i) и амплитуд импульсов на выходе МФ (U_i) при всех значениях параметров. Для наглядного представления влияния параметров на разложение СКИ, на рис. 2 приведены формы сигнала на входе и выходе МФ, при $h = 0,5; 1; 1,5$ мм, $w = 0,5; 1,5$ мм и $s = 0,5; 1,5$ мм. Из рис. 3 видно, что к выходу МФ приходят 3 импульса (несмотря на 5 распространяющихся мод в линии). Это объясняется малой амплитудой импульса 1 и близкими значениями τ_3 и τ_4 , что означает одновременный приход импульсов 3 и 4 к концу проводника, а следовательно, их наложение.

С увеличением h значение τ_2 становится больше, а τ_3 и τ_5 – меньше. За счет этого уменьшается разность погонных задержек мод. Так, например, при $h = 1,5$ мм ($w = 0,5$ мм и $s = 0,5$ мм) $\tau_3 - \tau_2 = 0,06$ нс/м и $\tau_5 - \tau_2 = 0,58$ нс/м. Разность погонных задержек 0,06 нс/м приводит к наложению импульсов, и как следствие, к увеличению амплитуды до 0,59 В (рис. 2д). То же самое видно и при $h = 1$ мм (амплитуда на выходе МФ составляет 0,69 В, рис. 2в). Увеличение значений w и s позволяет увеличить разность погонных задержек мод. Например, разность погонных задержек мод 5 и 2 от 1,2 нс/м до 2,06 нс/м при $h = 0,5$ мм, от 0,71 нс/м до 1,5 нс/м при $h = 1$ мм и от 0,64 нс/м до 1,18 нс/м при $h = 1,5$ мм. За счет увеличения $\Delta\tau$ максимальная из амплитуд импульсов становится меньше: 0,37 В (при $h = 1$ мм, $w = 1,5$ мм и $s = 1,5$ мм) и 0,39 В (при $h = 1,5$ мм, $w = 1,5$ мм и $s = 1,5$ мм). Значения амплитуд разложенных импульсов также зависят от параметров h , s и w .

Таблица 1. Вычисленные значения характеристик МФ с соединенными опорными проводниками на концах.

h , мм	w , мм	s , мм	τ_1 , нс/м	τ_2 , нс/м	τ_3 , нс/м	τ_4 , нс/м	τ_5 , нс/м	U_1 , В	U_2 , В	U_3 , В	U_4 , В	U_5 , В
0,5	0,5	0,5	4,30	4,83	5,49	5,54	6,03	-	0,40	0,15	0,35	
		1	4,09	4,60	5,57	5,57	5,95	-	0,33	0,56	0,43	
		1,5	3,96	4,45	5,58	5,59	5,93	-	0,29	0,03	0,47	
	1	0,5	4,22	4,68	5,78	5,88	6,27	-	0,42	0,18	0,29	
		1	4,01	4,45	5,87	5,91	6,19	-	0,35	0,39		
		1,5	3,89	4,31	5,91	5,91	6,15	-	0,31	0,45		
	1,5	0,5	4,18	4,59	5,95	6,06	6,39	-	0,43	0,178	0,25	
		1	3,97	4,37	6,04	6,08	6,32	-	0,37	0,36		
		1,5	3,86	4,23	6,08	6,09	6,29	-	0,32	0,42		
1	0,5	0,5	4,63	5,13	5,19	5,19	5,84	-	0,60		0,323	
		1	4,42	4,99	5,25	5,25	5,83	-	0,43		0,389	
		1,5	4,28	4,86	5,28	4,28	5,81	-	0,34	0,05	0,43	
	1	0,5	4,52	5,02	5,42	5,51	6,08	-	0,45	0,21	0,28	
		1	4,32	4,86	5,51	5,56	6,05	-	0,40	0,14	0,35	
		1,5	4,19	4,73	5,56	5,59	6,00	-	0,36	0,09	0,40	
	1,5	0,5	4,46	4,93	5,58	5,71	6,23	-	0,46	0,23	0,26	
		1	4,27	4,77	5,68	5,76	6,18	-	0,41	0,17	0,32	
		1,5	4,14	4,64	5,74	5,78	6,14	-	0,37	0,12	0,36	
1,5	0,5	0,5	4,81	5,04	5,10	5,20	5,68	-	0,59		0,32	
		1	4,63	5,09	5,11	5,14	5,75	-	0,50		0,37	
		1,5	4,49	5,05	5,12	5,13	5,75	-	0,43		0,40	
	1	0,5	4,69	5,16	5,27	5,30	5,93	-	0,69		0,27	
		1	4,52	5,06	5,32	5,36	5,95	-	0,512			0,34
		1,5	4,39	4,96	5,37	5,39	5,93	-	0,38	0,11	0,38	
	1,5	0,5	4,62	5,10	5,39	5,49	6,08	-	0,56		0,25	
		1	4,45	4,98	5,47	5,56	6,08	-	0,43	0,18	0,31	
		1,5	4,33	4,87	5,52	5,57	6,05	-	0,39	0,14	0,35	

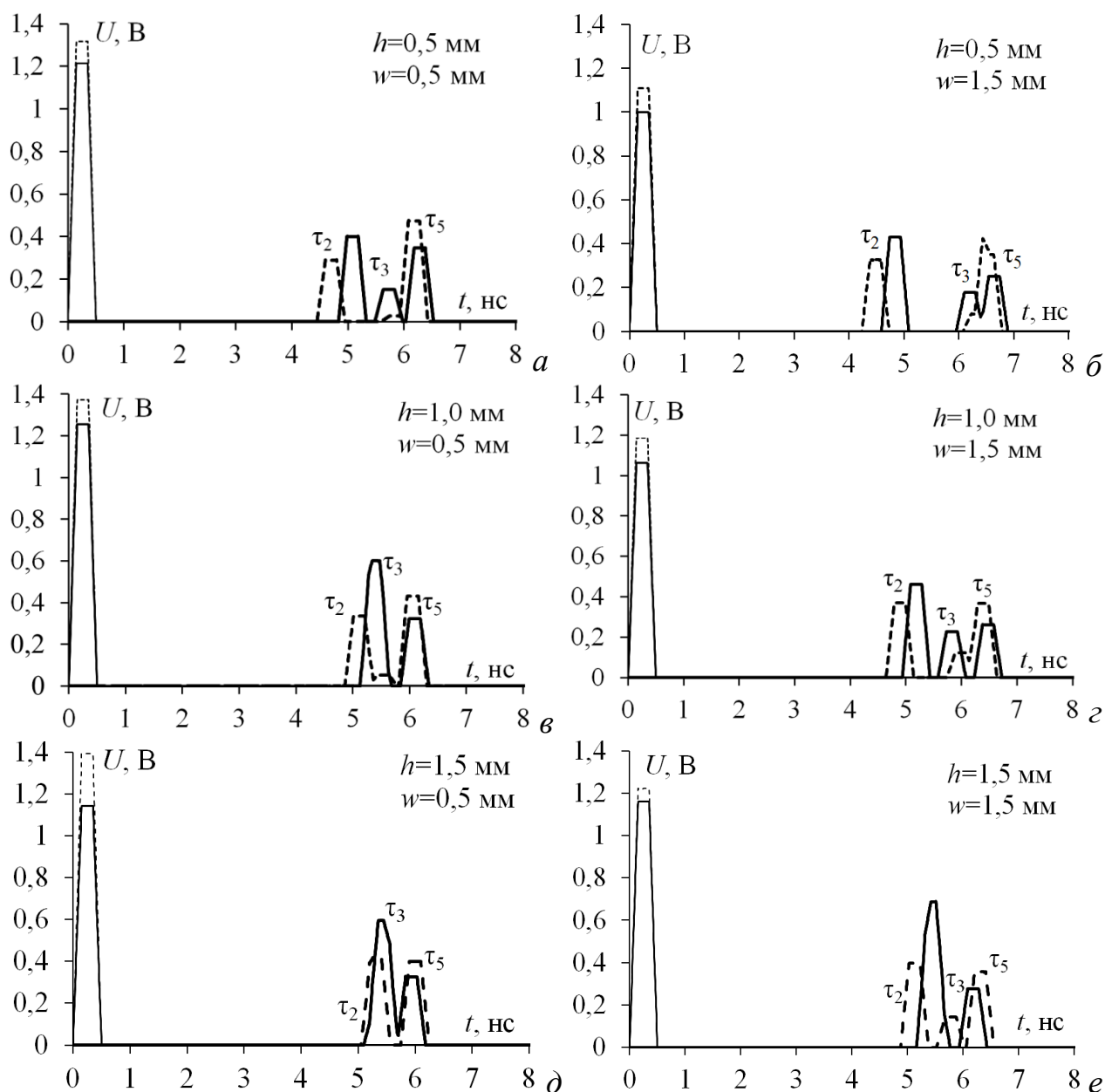


Рис. 2. Формы напряжения на входе МФ при $s = 0,5$ мм (—) и $s = 1$ мм (---) и выходе МФ при $s = 0,5$ мм (—) и $s = 1,5$ мм (---).

3. Результаты моделирования для соединения опорных проводников вдоль всей длины.

Соединение опорных проводников вдоль всей длины позволяет, рассматривать только 2 проводника в поперечном сечении МФ (все остальные образуют единый опорный проводник), а значит, в линии будет распространяться 2 моды.

В табл. 2 сведены значения погонных задержек (τ_i) и амплитуды импульсов на выходе МФ (U_i) для всех значений параметров. На рис. 3 приведены формы

сигнала на входе и выходе МФ, при $h = 0,5; 1; 1,5$ мм, $w = 0,5; 1,5$ мм и $s = 0,5; 1,5$ мм. Из приведенных результатов видно, что к выходу МФ приходят только 2 импульса.

С уменьшением h и увеличением s и w разность погонных задержек мод увеличивается. В большей степени на увеличение $\Delta\tau$ влияет h и w и незначительно – s . Однако увеличение s при $h = 1,5$ мм (рис. 3д) позволило увеличить $\Delta\tau$, тем самым уменьшив максимальную из амплитуд. При $h = 0,5$ мм, $s = 0,5$ мм и $w = 1,5$ мм амплитуды импульсов на выходе МФ выравниваются 0,43 В. Максимальное значение $\Delta\tau$ равная 2,02 нс/м достигнута при $h = 0,5$ мм, $w = 1,5$ мм и $s = 1,5$ мм.

Таблица 2. Вычисленные значения характеристик МФ с соединенными опорными проводниками вдоль всей длины.

h , мм	w , мм	s , мм	τ_1 , нс/м	τ_2 , нс/м	U_1 , В	U_2 , В
0,5	0,5	0,5	4,83	5,86	0,40	0,49
		1	4,60	5,90	0,33	0,50
		1,5	4,44	5,91	0,29	0,49
	1	0,5	4,68	6,08	0,42	0,47
		1	4,68	6,08	0,42	0,47
		1,5	4,31	6,13	0,31	0,47
	1,5	0,5	4,59	6,21	0,43	0,43
		1	4,37	6,24	0,36	0,43
		1,5	4,23	6,25	0,32	0,43
1	0,5	0,5	5,13	5,61	0,43	0,49
		1	4,99	5,71	0,37	0,49
		1,5	4,86	5,75	0,33	0,48
	1	0,5	5,02	5,79	0,45	0,50
		1	4,86	5,89	0,40	0,50
		1,5	4,73	5,92	0,36	0,50
	1,5	0,5	4,94	5,92	0,46	0,49
		1	4,77	6,00	0,41	0,49
		1,5	4,64	6,04	0,37	0,49
1,5	0,5	0,5	5,20	5,49	0,67	
		1	5,14	5,60	0,39	0,47
		1,5	5,05	5,65	0,36	0,47
	1	0,5	5,16	5,62	0,46	0,50
		1	5,06	5,74	0,42	0,49
		1,5	4,96	5,79	0,38	0,49
	1,5	0,5	5,09	5,74	0,47	0,50

		1	4,98	5,85	0,43	0,50
		1,5	4,87	5,90	0,39	0,50

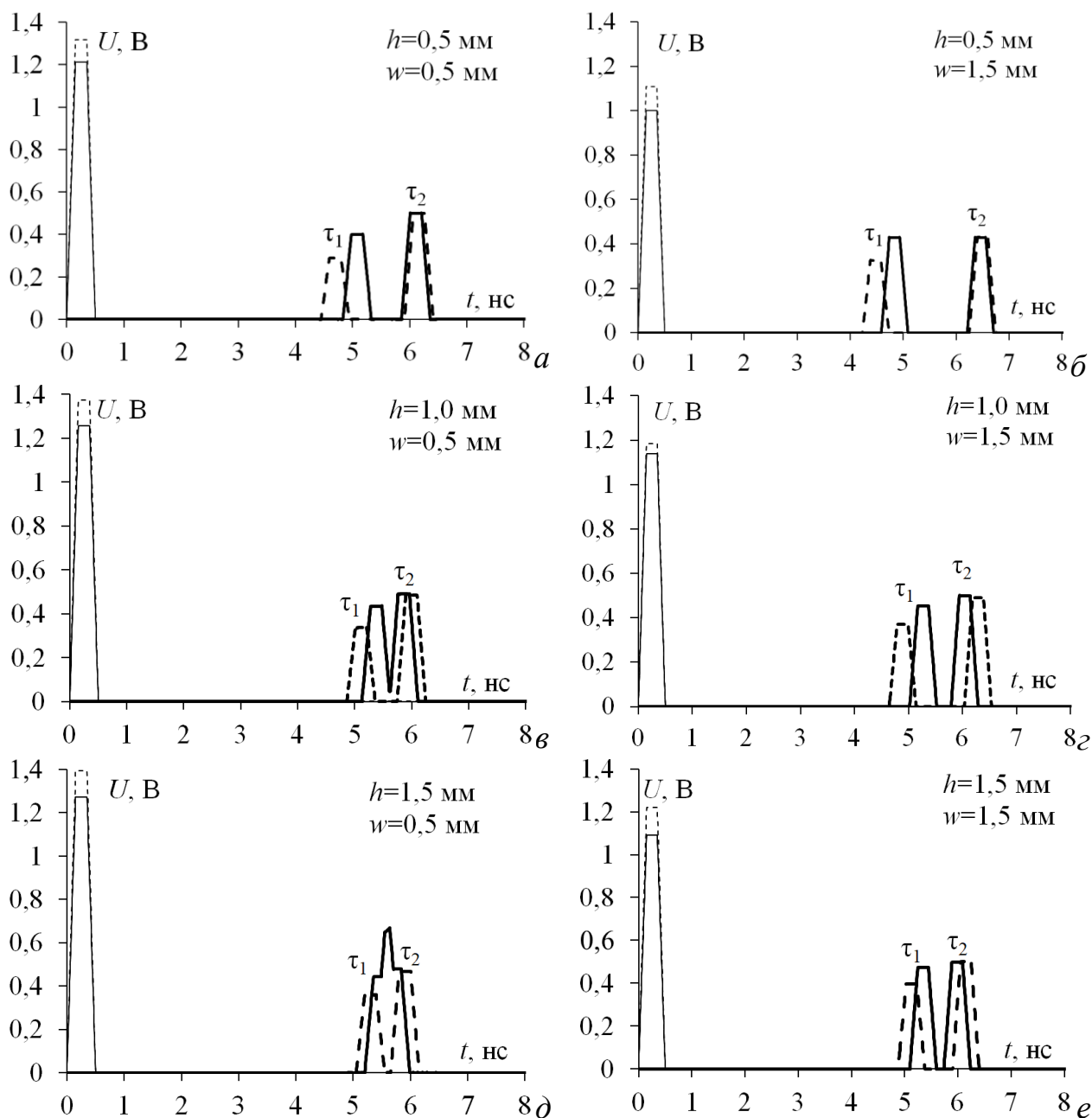


Рис. 3. Формы напряжения на входе МФ при $s = 0,5$ мм (—) и $s = 1$ мм (---) и выходе МФ при $s = 0,5$ мм (—) и $s = 1$ мм (---).

Сравнение результатов соединения опорных проводников двумя способами показало, что Δt незначительно больше в случае соединения опорных проводников на конце, при всех значениях параметров. Так, например, при $h = 0,5$ мм, $s = 0,5$ мм и $w = 0,5$ мм это 1,2 и 1,03 нс/м. Разложение входного воздействия на 3 импульса, позволяет достичь большего подавления СКИ. Так,

из табл. 1 следует, что минимальное значение максимального напряжения импульсов достигается при $h = 1$ мм, $w = 1,5$ мм и $s = 1,5$ мм и составляет 0,37 В, а ослабление по отношению к половине э.д.с. равно 3,2 раза. По табл. 2 данное значение достигается при $h = 0,5$ мм, $w = 1,5$ мм и $s = 1,5$ мм и составляет 0,43 В, а ослабление по отношению к половине э.д.с. равно 2,3 раза.

Заключение.

Таким образом, показано влияние соединения опорных проводников и параметров поперечного сечения на разложение СКИ в МФ на ДПП. Для двух способов соединения опорных проводников Δt возрастает с уменьшением h и увеличением w и s , за счет чего возрастает ослабление МФ. Выявлено, что разность погонных задержек мод, незначительно больше в случае соединения опорных проводников на конце при всех значениях параметров. Показано что, в случае соединения опорных проводников на конце, к выходу МФ приходят 3 импульса (несмотря на 5 распространяющихся мод в линии) и 2 импульса в случае соединения опорных проводников вдоль всей длины. Разложение входного воздействия на 3 импульса, позволяет достичь большего подавления СКИ. Так, максимальное ослабление составляет 3,2 раза по отношению к половине э.д.с. В случае соединения опорных проводников вдоль всей длины, максимальное ослабление составляет 2,3 раза по отношению к половине э.д.с.

В заключении отметим достоинства каждого из способов соединения опорных проводников. Соединение опорных проводников только на концах, за счет большего количества мод на выходе МФ, позволяет достичь большего подавления и распределения энергии СКИ по времени. Соединение опорных проводников вдоль всей длины МФ позволит их реализовывать не только как отдельные защитные устройства, но и интегрировать их в ДПП. Это дает дополнительные преимущества от полигонов земли, не занимая дополнительную площадь устройствами защиты.

Финансирование.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-37-90033 и Министерства науки и высшего образования (проект FEWM-2020-0041).

Литература

1. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от которой не уйти. *Компоненты и технологии*. 2017. №7. С.124-125.
2. Безменова Н.В., Ксения С.А. Обеспечение электромагнитной совместимости по магнитным полям промышленной частоты технических средств комплектных распределительных устройств систем электроснабжения. *Самарская научно-педагогическая школа электромеханики в год 100-летия САМГТУ*. 2012. С.8.
3. Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016. №5. P.546-550. <https://doi.org/10.1134/S1064226916050053>
4. Васильев К.Б., Ключник А.В., Солодов А.В. Статистика отказов цифровых ИМС, вызванных импульсным радиоизлучением. *Тезисы докладов на 9-й Междунар. Крымской конфер. “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”*. 1999. С.329-330.
5. Бригидин А.М., Титович Н.А., Кириллов В.М. и др. Влияние электромагнитных помех на работоспособность полупроводниковых приборов и интегральных схем. *Электронная техника. Сер. Упр. качеством, стандартизация, метрология, испытания*. 1992. №1(148). С.3-12.
6. Грибский М.П., Старостенко В.В., Григорьев Е.В. и др. Прогнозирование стойкости микросхем при их работе в напряженных токовых режимах. *Вісник СумДУ. Серія “Фізика, математика, механіка”*. 2008. №2. С.185-190.

7. Старостенко В.В., Грибский М.П., Полетаев Д.А. и др. Динамика электротепловых процессов в диэлектрических структурах микросхем при воздействии электромагнитных полей. *Радиоэлектроника и информатика*. 2007. №4. С.45-49.
8. Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В., Тюльпаков В.Н. Влияние радиоимпульсов высокого уровня мощности на работу смесителей. *Радиотехника и электроника*. 2011. Т.56. №3. С.375-378.
9. Ключник А.В., Солодов А.В. Статистическая модель повреждения цифровых интегральных микросхем импульсным радиоизлучением. *Радиотехника*. 2010. №2. С.37-41.
10. *Защита электронных устройств от импульсных помех большой энергии*. [электронный ресурс]. Дата обращения: 13.11.2021. URL: <https://power-e.ru/wp-content/uploads/4116.pdf>
11. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizova O.A. New printed structures for protection against UWB pulses. *Trudy 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. 2015. P.120-122. <https://doi.org/10.1109/EDM.2015.7184504>
12. Жечев Е.С., Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Газизов Т.Р. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра. *Системы управления, связи и безопасности*. 2019. №2. С.162-179. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10208>
13. Хажибеков 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. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2019-22-2-31-36>
14. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2016. V.58. №4. P.1136-1142. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2548783>

15. Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Experimental results on UWB pulse propagation in low-voltage power cables with different cross sections. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2012. V.54. №1. P.229-231. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2011.2171971>
16. Belousov A.O., Vlasova N.O. Parametric optimization of the cables with the modal filtration effect. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V.1862. №012020. P.1-5. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1862/1/012004>
17. Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. Possibility of protection against UWB pulses based on a turn of a meander microstrip line. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2017. V.59. №6. P.1864-1871. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2678019>
18. Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации. *Системы управления, связи и безопасности*. 2019. №3. С.117-144. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10307>
19. Samoylichenko M.A., Zhechev Y.S., Kosteletskii V.P., Gazizov T.R. Electrical characteristics of a modal filter with a passive conductor in the reference plane cutout. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2021. V.63. №2. P.435-442. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.3011407>
20. Samoylichenko M.A., Gazizov T.R. Parametric and structural optimization of the modal filter on a double-sided printed circuit board. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V.1862. №012020. P.1-7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1862/1/012006>
21. 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. <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2021-4-58-71>
22. Gazizov T.R., Sagiyeva I.Ye., Kuksenko S.P. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations. *Complexity*. 2019. V.2019. P.1-11. <https://doi.org/10.1155/2019/6301326>

Для цитирования:

Самойличенко М.А., Газизов Т.Р. Влияние соединения опорных проводников на разложение сверхкороткого импульса в модальном фильтре на двухсторонней печатной плате. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.12.10>