

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.6.11>

УДК: 621.391.825

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АСИММЕТРИЧНЫХ МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ КОМБИНАЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ

Е.Б. Черникова

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

Статья поступила в редакцию 8 апреля 2024 г.

Аннотация. Линии передачи являются значимыми элементами и играют важную роль в определении производительности, надежности и функциональности радиоэлектроники. Ряд факторов, возникающих при использовании линий передачи, может привести к проблемам в области электромагнитной совместимости. Одним из них является возникновение асимметрии в следствие появления неоднородностей, погрешностей при изготовлении печатных плат, плотной трассировки, рассогласования и др. В работе рассматривается влияние асимметрии на характеристики линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением. Выявлено, что асимметрия поперечного сечения и/или граничных условий приводит к появлению комбинационных импульсов. Комбинационные импульсы представляют интерес, так как время их прихода не соответствуют погонным задержкам мод, распространяющихся в линиях передачи, а состоят из их комбинаций. Их уровень может быть сопоставимым с уровнем информационных сигналов, что в результате может привести к искажению или потере полезной информации. Между тем асимметрия и, возникающие из-за нее комбинационные импульсы, представляют из себя новый ресурс для улучшения характеристик

устройств на основе линий передачи, которые могут использоваться для защиты радиоэлектроники от электромагнитных помех пико- и наносекундной длительности. Впервые выполнена оптимизация параметров с учетом комбинационных импульсов на примере трех схем симметричных многопроводных линий передачи с асимметрией конечных нагрузок: с опорным проводником в виде боковых полигонов и зеркально-симметричной. С помощью генетического алгоритма получены оптимальные параметры, которые позволяют уменьшить значение максимальной амплитуды в 1,5 раза, а также параметры, позволяющие увеличить в 2 раза минимальное значение временного интервала между импульсами разложения, от которого зависит возможность полного разложения помехового импульса, по сравнению со значениями, полученными в исходной схеме, где нет комбинационных импульсов при тех же габаритах устройств. Результаты оптимизации демонстрируют эффективность использования ресурса комбинационных импульсов для совершенствования защитных структур на основе линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением.

Ключевые слова: радиоэлектроника, электромагнитная совместимость, линии передачи, временной отклик, комбинационные импульсы, оптимизация.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00187, <https://rscf.ru/project/22-79-00187/> в ТУСУРе и при поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2024-0005.

Автор для переписки: Черникова Евгения Борисовна, chiernikova96@mail.ru

Введение

Задача обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС) является актуальной из-за высокой значимости корректного функционирования РЭС практически во всех отраслях жизнедеятельности человека [1]. Одной из задач ЭМС является обеспечение целостности сигнала и питания, а также устойчивость РЭС к электромагнитным помехам. Значительное влияние на удовлетворительное функционирование радиоэлектроники оказывают линии передачи (ЛП), которые широко используются для передачи сигналов и могут быть представлены в виде межсоединений печатных плат (ПП) и интегральных схем, антенных и соединительных кабелей и других направляющих систем [2]. К проблемам ЭМС, связанными с ЛП, относят перекрестные помехи, помехи отражения, сдвиг сигнала по фазе, задержки времени прохождения сигнала и др. [3-5]. Кроме того, стоит отметить, что на основе ЛП разрабатывается ряд СВЧ-устройств, например, фильтры, ответвители, линии задержки, резонаторы и др. [6]. Одним из таких устройств является модальный фильтр (МФ), который представляет из себя N -проводную связанную систему ЛП с неоднородным диэлектрическим заполнением в поперечном сечении и служит для защиты РЭС от электромагнитных помех пико- и наносекундной длительности, распространяющихся кондуктивным путем [7]. Ослабление помехи происходит за счет ее уменьшения в результате модального разложения на импульсы меньшей амплитуды из-за разности погонных задержек мод [8]. При разработке таких МФ важно контролировать максимальную амплитуду на выходе (U_{max}), так как этим параметром определяется ослабление помехи. Также важным параметром является максимальная длительность (t_{Σ}) помехового импульса, которая зависит от минимального значения временных интервалов между импульсами разложения (Δt).

При решении данных задач ЭМС возникает необходимость в оценке распространяющегося сигнала для того, чтобы учитывать и корректировать

возникающие проблемы в ЛП еще на начальных стадиях разработки систем, а также с целью проектирования и разработки устройств, основанных на ЛП. Для анализа ЛП используют компьютерное моделирование численными методами. Однако оно является достаточно затратным по вычислительным и временным показателям, особенно для выполнения первоначальной оценки ЛП. В таких случаях более предпочтительным способом может являться аналитический подход [9]. Он позволяет выполнить предварительный анализ с меньшими затратами, а также способствует лучшему пониманию физических процессов, происходящих в ЛП. Аналитический подход основан на теории линий передачи [10]. Он позволяет детально исследовать характеристики самой ЛП, находя причины искажения сигналов. Однако стоит отметить, что в теории линий передачи симметричные ЛП представлены довольно обстоятельно, тогда как асимметричным ЛП уделено недостаточно внимания [11]. При этом для решения прикладных задач ЭМС исследование влияния асимметрии имеет важную роль, так как она может появляться даже в исходно симметричных структурах из-за погрешностей при изготовлении ЛП, плотной трассировки, неплотного контакта в местах соединения жил кабеля и др. Так, при анализе воздействия импульсной помехи короткой длительности на асимметричные ЛП с неоднородным диэлектрическим заполнением обнаружено среди основных импульсов разложения, задержки которых соответствуют погонным задержкам мод, наличие комбинационных импульсы, задержки которых не кратны погонным задержкам мод, а состоят из их комбинаций [12].

В [13] на примере пары связанных полосковых линий без дисперсии и потерь рассмотрено прохождение импульсов сигналов и показано, что комбинационные импульсы появляются в результате отражений от концов отрезка линии, а условие согласования служит критерием их отсутствия. Исследования комбинационных импульсов во временных откликах МПЛП выполнялось на примере зеркально-симметричного МФ, проводники которого соединены на концах перемычкой, так что в результате образуется меандровая линия (МЛ). Ранее, при моделировании исходной схемы зеркально-

симметричного МФ, таких импульсов замечено не было [14], так как на всех концах проводников располагались резистивные окончания на землю с одинаковым номинальным значением, улучшающие согласование всех мод. Выявлено, что комбинационные импульсы наблюдаются на выходе даже симметричных в поперечном сечении структур с наличием асимметрии нагрузок на проводниках [15]. В связи с этим, исследование комбинационных импульсов, причина появления которых во временных откликах ЛП обусловлена асимметрией, является важной и актуальной задачей, так как они могут возникнуть в следствии неоднородностей межсоединений, нарушения симметрии или граничных условий. Комбинационные импульсы могут привести к искажению или потере полезной информации, т.к. уровень комбинационных импульсов может быть сопоставимым с уровнем информационных сигналов.

Между тем комбинационные импульсы могут быть полезны в части их применения при разработке МФ и защитных МЛ. Посредством эффективного использования комбинационных импульсов возможно повысить их характеристики, а именно путем добавления асимметрии в существующие структуры МФ для отделения части энергии от основной последовательности импульсов мод. Это может привести не только к дополнительному распределению энергии по времени, но и минимизации максимальной из амплитуд импульсов мод. Также стоит отметить, что в МФ возможно значительное увеличение значения U_{max} из-за того, что задержки комбинационных импульсов могут совпадать как между собой, так и с основными импульсами, или оно может определяться именно амплитудой комбинационных импульсов, что в результате приведет к ухудшению ослабления. Вместе с тем, из-за того, что в некоторых случаях комбинационные импульсы возникают между импульсами основных мод, уменьшается минимальное значение Δt , которым определяется возможность полного разложения помехового импульса [15]. Фактически это означает, что комбинационные импульсы являются новым ресурсом для оптимизации, и как

следствие, улучшения характеристик защитных устройств на основе ЛП с неоднородным диэлектрическим заполнением.

Таким образом, целью работы является выполнение параметрической оптимизации с учетом комбинационных импульсов, для их дальнейшего эффективного использования при решении задач по совершенствованию устройств защиты на основе ЛП с неоднородным диэлектрическим заполнением. На основе анализа влияния и появления комбинационных импульсов получено, что целесообразно выполнить оптимизацию по критериям выравнивания временных интервалов между всеми импульсами разложения, в том числе между комбинационными, и минимизации максимальной амплитуды на выходе.

1. Структуры, схемы и методы

Оптимизация параметров рассматривается на примере МПЛП с опорным проводником в виде боковых полигонов и зеркально-симметричной МПЛП. Их поперечные сечения представлены на рисунке 1, где w – ширина сигнальных проводников, s – расстояние между проводниками, t – толщина проводников, h – толщина диэлектрика, w_1 – ширина опорных проводников, d – расстояние между опорным проводником до ближайшего сигнального, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки. Обе МПЛП представляют из себя 4-проводную ЛП, у которой два проводника на дальнем конце соединены перемычкой тремя вариантами (рисунок 2). Это обеспечивает распространение 4 основных мод A , B , C и D , каждой из которых соответствует свой вектор-столбец из нормированной матрицы модальных напряжений Sv . Наличие асимметрии нагрузок (перемычка на дальнем конце схемы) обеспечивает появление комбинационных импульсов во временном отклике МПЛП. Их задержки равны среднему арифметическому значению удвоенных погонных задержек или просто сумме погонных задержек мод [15]. Длина МПЛП 1 м. Значение резисторов на схемах $R = 50$ Ом.

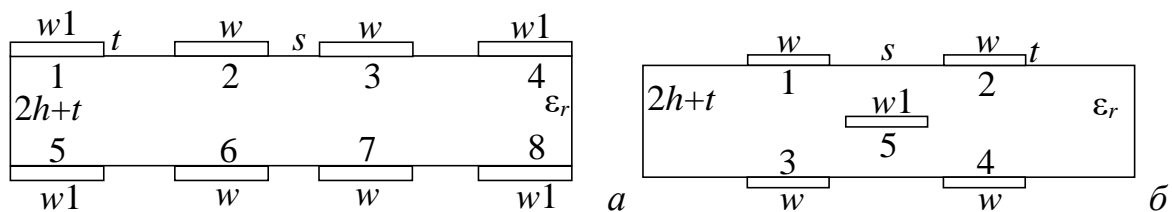


Рис. 1. Поперечные сечения МПЛП с боковыми полигонами (а) и зеркально-симметричной МПЛП (б).

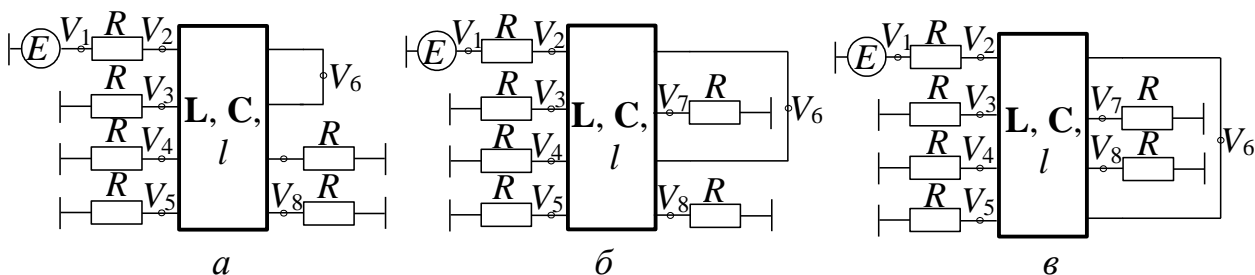


Рис. 2. Схемы электрических соединений МПЛП: 1 (а), 2 (б) и 3 (в).

Для оптимизации использовался простой генетический алгоритм (ГА), реализованный в ПО TALGAT [16]. Набор параметров ГА: число особей (n) – 50; количество поколений (m) – 100; коэффициент мутации – 0,1; коэффициент кроссовера – 0,5; число бит для кодирования каждого параметра – 16. При оптимизации выполнялось по 5 запусков ГА. В качестве тестового воздействия выбран источник ЭДС с амплитудой 5 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс. Диапазоны изменения параметров выбирались исходя из результатов оценки влияния каждого из них на характеристики структур. Для МПЛП с боковыми полигонами диапазоны параметров для всех 3 схем равны: для s – от 100 до 1000 мкм, для w – от 300 до 1000 мкм, для h – от 200 до 600 мкм, для w_1 – от 1000 до 3000 мкм, d – от 2000 до 5000 мкм, а t оставался неизменным и равным 105 мкм. Для зеркально-симметричной МПЛП диапазоны для всех 3 схем также одинаковы: s изменялся от 200 до 2000 мкм, $w = w_1$ и h – в диапазонах от 500 до 2000 мкм, а t равен 105 мкм.

Перед выполнением оптимизации необходимо отметить, что ранее предполагалось, что комбинационные импульсы состоят из комбинаций задержек основных мод с определенным временем прихода, например, всегда

самой быстрой моды и самой медленной, вне зависимости от ее режима распространения [15]. Однако в процессе исследования выявлено, что комбинационные импульсы состоят из комбинаций именно режимов распространения мод, которым соответствуют векторы-столбцы Sv . Между тем из-за того, что погонные задержки зависят от геометрических параметров и, как следствие, от изменения связи (усиления или ослабления боковой или лицевой), один и тот же комбинационный импульс при одних параметрах поперечного сечения, может состоять из задержек мод, которые пришли первой и третьей, а при других параметрах – из задержек мод, которые пришли первой и второй. При этом режим распространения моды остается неизменным, то есть и в том и другом случае в комбинации участвует мода B и мода C . Таким образом, задержки комбинационных импульсов зависят от задержек мод конкретного режима распространения и не зависят от порядка прихода импульсов. Этот факт важен для дальнейшей оптимизации по критерию выравнивания временных интервалов, где время прихода импульса имеет принципиальное значение. Исходя из этого возникает необходимость в фиксировании каждой моды на определенном месте в матрице. То есть перед определением из каких импульсов состоит Δt необходимо [17]:

1) Определить 4 режима мод. В симметричной МПЛП существует 4 режима. Этим режимам соответствует матрица Sv :

$$Sv = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

2) Присвоить каждому режиму название. Первый вектор-столбец (все знаки одинаковые) описывает моду A , второй вектор-столбец (знаки чередуются) – моду B , третий вектор-столбец (знаки попарно одинаковые в середине вектора и на краях) – моду C , четвертый вектор-столбец (знаки попарно чередуются) – моду D .

3) Создать новую матрицу Sv , в которой столбцы из исходной матрицы Sv будут находиться всегда в строгом порядке: моды A, B, C, D соответствуют первому, второму, третьему и четвертому столбцам.

4) Создать новую матрицу погонных задержек τ , в которой значения будут находиться в соответствии со своим вектором-столбцом $(\tau_a, \tau_b, \tau_c, \tau_d)$.

5) Вычислить комбинационный импульс исходя из известного предположения о его комбинации.

6) Создать матрицу, в которой будут содержаться все 6 задержек (основные и комбинационные).

7) Выполнить сортировку всех задержек в порядке возрастания, что будет соответствовать порядку времени прихода импульсов, наблюдаемом во временном отклике.

8) Определить временные интервалы, путем вычисления разности соседних задержек из новой сортированной матрицы.

Таким образом, данный алгоритм позволяет получить достоверные сведения о значениях временных интервалов вне зависимости от изменения задержек мод.

2. Критерий минимизации максимальной амплитуды помехового импульса

При оптимизации необходимо задать целевую функцию (ЦФ), которая будет подвергаться, в данном случае, минимизации. ЦФ для достижения амплитудного критерия является значение U_{max} на выходе структуры [18]:

$$F_1 = \max(U(t)), \quad (1)$$

где $U(t)$ – напряжение на выходе активного проводника МПЛП.

В результате оптимизации параметров МПЛП с боковыми полигонами и зеркально-симметричной по амплитудному критерию для каждой схемы получено по 5 наборов параметров. Среднее время вычислений на один запуск ГА для МПЛП с боковыми полигонами составило 10900 секунд, а для зеркально-симметричной – 11800 секунд. Наилучшие наборы параметров, где значение U_{max} оказалось минимально, для всех схем представлены в таблице 1.

На рисунках 3-5 показаны формы напряжения на выходе при моделировании с наилучшим набором параметров МПЛП с боковыми полигонами, а на рисунках 6-8 – зеркально-симметричной. Импульс с нулевой задержкой τ_0 является перекрестной наводкой на ближнем конце линии.

Таблица 1. Результаты оптимизации по амплитудному критерию.

Структуры	МПЛП с боковыми полигонами			Зеркально-симметричная МПЛП		
	1	2	3	1	2	3
Схемы	1	2	3	1	2	3
s , мм	0,925	0,777	0,982	1,993	0,221	0,200
w , мм	0,303	0,302	0,300	0,524	1,094	1,559
h , мм	0,532	0,597	0,578	0,506	1,806	1,976
w_1 , мм	1,572	1,078	1,055	-	-	-
d , мм	4,847	4,929	3,553	-	-	-
U_{max} , В	0,428	0,423	0,456	0,539	0,488	0,485
Время, с	9624	9176	11065	12673	12393,9	12137

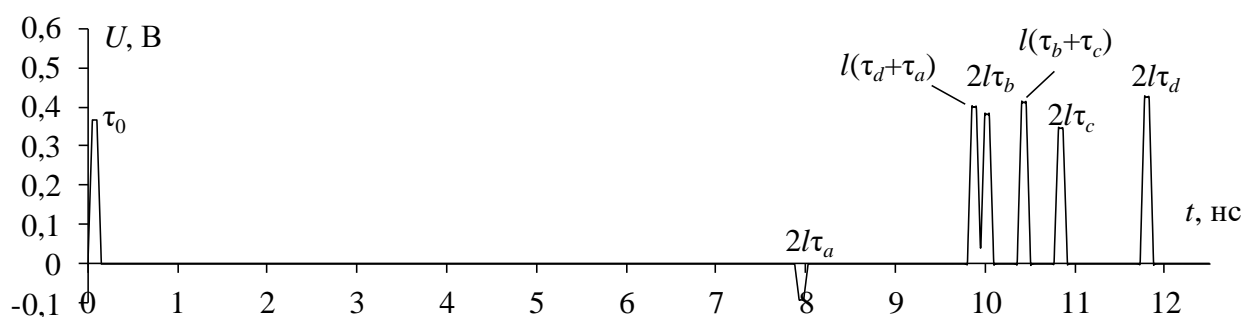


Рис. 3. Формы напряжения на выходе схемы 1 МПЛП с боковыми полигонами с оптимизированными параметрами по критерию минимизации значения U_{max} .

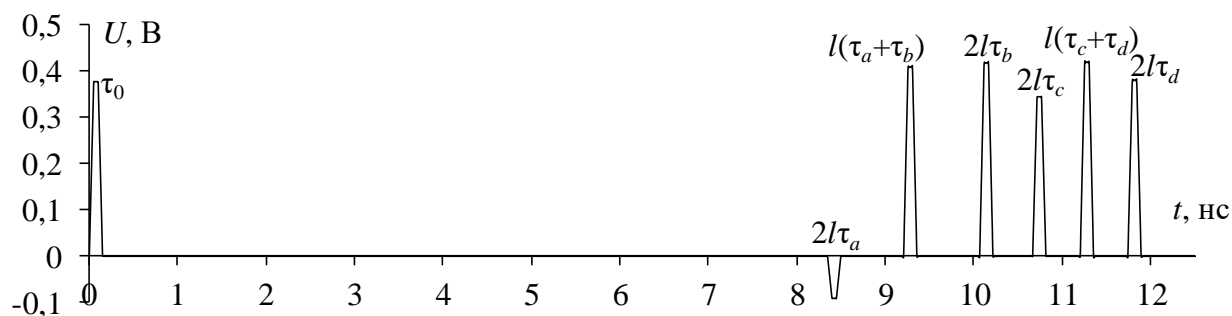


Рис. 4. Формы напряжения на выходе схемы 2 МПЛП с боковыми полигонами с оптимизированными параметрами по критерию минимизации значения U_{max} .

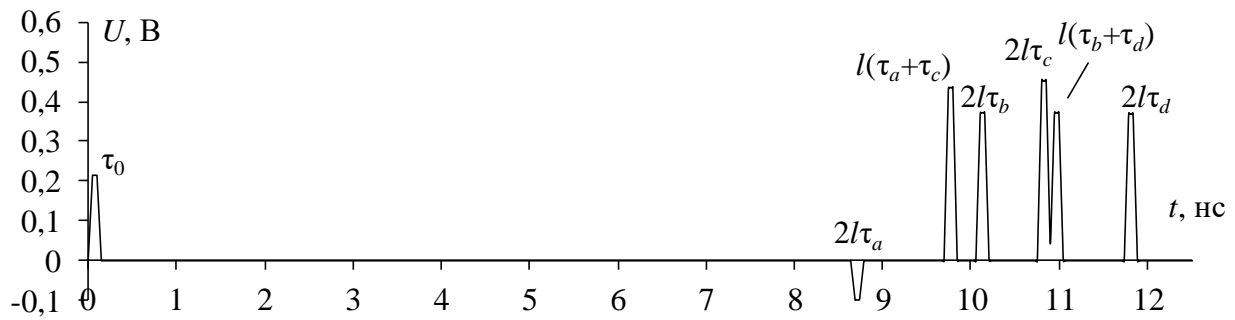


Рис. 5. Формы напряжения на выходе схемы 3 МПЛП с боковыми полигонами с оптимизированными параметрами по критерию минимизации значения U_{max} .

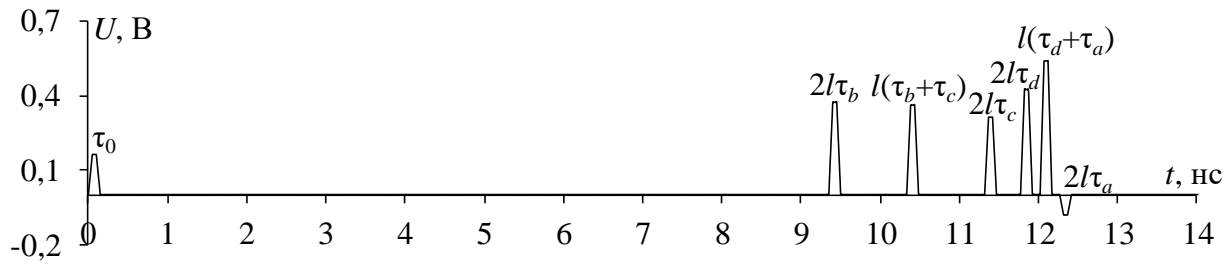


Рис. 6. Формы напряжения на выходе схемы 1 зеркально-симметричной МПЛП с оптимизированными параметрами по критерию минимизации значения U_{max} .

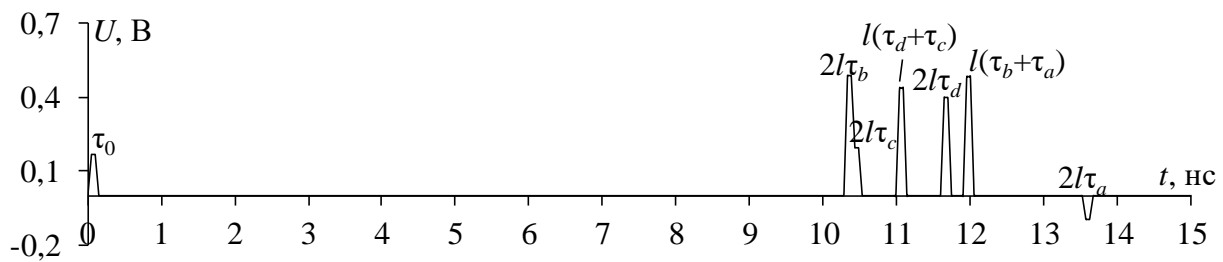


Рис. 7. Формы напряжения на выходе схемы 2 зеркально-симметричной МПЛП с оптимизированными параметрами по критерию минимизации значения U_{max} .

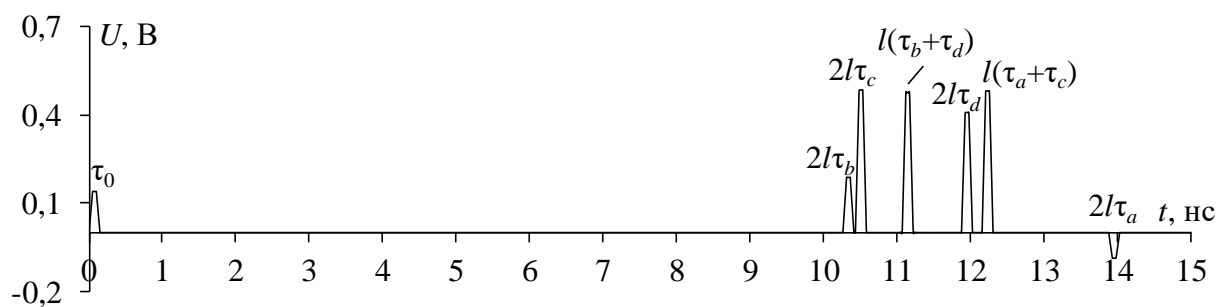


Рис. 8. Формы напряжения на выходе схемы 3 зеркально-симметричной МПЛП с оптимизированными параметрами по критерию минимизации значения U_{max} .

В результате оптимизации по амплитудному критерию получены параметры поперечного сечения, которые обеспечивают минимальное значение U_{max} . Оптимизация МПЛП с боковыми полигонами позволила достигнуть

минимального значения U_{max} для схемы 1 – $U_{max} = 0,428$ В при $s = 0,925882$, $w = 0,302746$, $h = 0,532549$, $w_1 = 1,57255$ и $d = 4,84706$ мм; для схемы 2 – $U_{max} = 0,423$ В при $s = 0,777647$, $w = 0,302745$, $h = 0,596863$, $w_1 = 1,07843$ и $d = 4,92941$ мм и для схемы 3 – $U_{max} = 0,456$ В при $s = 0,982353$, $w = 0,3$, $h = 0,578039$, $w_1 = 1,0549$ и $d = 3,55294$ мм. В таком случае СКИ уменьшится в 5,8, 5,9 и 5,5 раз относительно половины ЭДС (2,5 В), что в 1,5 раза больше, чем на выходе исходной схемы, где нет комбинационных импульсов. Оптимизация зеркально-симметричной МПЛП позволила достигнуть значения U_{max} для схемы 1 – $U_{max} = 0,539$ В при $s = 1,993$ мм; $w = 0,524$ мм; $h = 0,506$ мм; для схемы 2 – $U_{max} = 0,488$ В при $s = 0,221$ мм; $w = 1,094$ мм; $h = 1,806$ мм, для схемы 3 – $U_{max} = 0,485$ В при $s = 0,2$ мм; $w = 1,559$ мм; $h = 1,976$ мм. В таком случае СКИ уменьшится в 4,7, 5,1 и 5,2 раз относительно половины ЭДС (2,5 В), что в среднем в 1,2 раза больше, чем на выходе исходной схемы, где нет комбинационных импульсов.

3. Критерий выравнивания временных интервалов между всеми импульсами разложения, в том числе между комбинационными

Для достижения критерия выравнивания временных интервалов между всеми импульсами, в том числе между комбинационными, в качестве ЦФ необходимо задать условие, при котором бы данный критерий выполнялся (рисунок 9).

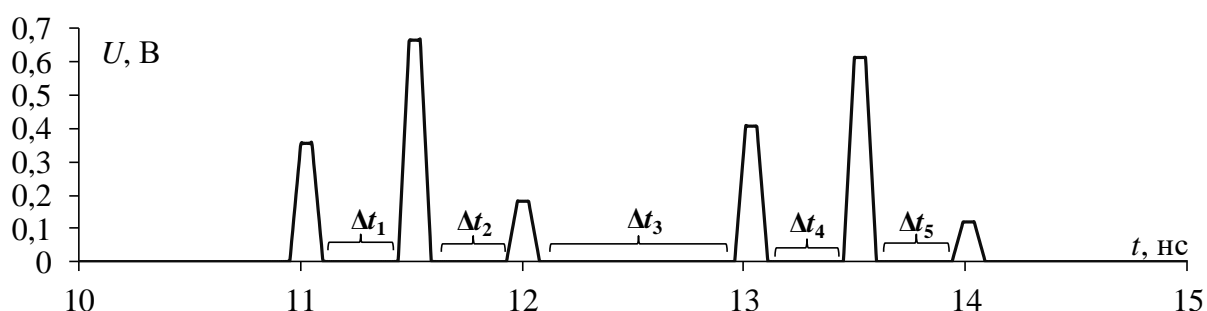


Рис. 9. Формы напряжения на выходе зеркально-симметричной МПЛП с демонстрацией временных интервалов.

Условие равенства временных интервалов выглядит следующим образом:

$$\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = \Delta t_4 = \Delta t_5. \quad (2)$$

Если временные интервалы одинаковы, то разница между ними равна 0:

$$\begin{cases} \Delta t_1 = \Delta t_2, \\ \Delta t_2 = \Delta t_3, \\ \Delta t_3 = \Delta t_4, \\ \Delta t_4 = \Delta t_5. \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \Delta t_1 - \Delta t_2 = 0, \\ \Delta t_2 - \Delta t_3 = 0, \\ \Delta t_3 - \Delta t_4 = 0, \\ \Delta t_4 - \Delta t_5 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta t_2 - \Delta t_1 = \Delta t_3 - \Delta t_2, \\ \Delta t_4 - \Delta t_3 = \Delta t_5 - \Delta t_4. \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \Delta t_2 - \Delta t_1 - \Delta t_3 + \Delta t_2 = 0, \\ \Delta t_4 - \Delta t_3 - \Delta t_5 + \Delta t_4 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta t_2 - \Delta t_1 - \Delta t_3 + \Delta t_2 - \Delta t_4 + \Delta t_3 + \Delta t_5 - \Delta t_4 = 0. \quad (5)$$

Таким образом, в результате преобразований получена первая ЦФ для выравнивания временных интервалов:

$$F_{time1} = 2\Delta t_2 - \Delta t_1 - 2\Delta t_4 + \Delta t_5. \quad (6)$$

Также для достижения равенства временных интервалов, можно использовать ЦФ, которая представляет из себя сумму квадратов отклонений временных интервалов от их среднего значения (Δt_{mean}).

$$F_{time2} = (\Delta t_1 - \Delta t_{mean})^2 + (\Delta t_2 - \Delta t_{mean})^2 + (\Delta t_3 - \Delta t_{mean})^2 + (\Delta t_4 - \Delta t_{mean})^2 + (\Delta t_5 - \Delta t_{mean})^2. \quad (7)$$

Кроме того, для достижения равенства временных интервалов, можно определить максимальное и минимальное значения временных интервалов $\Delta t_1 - \Delta t_5$ для текущих параметров МПЛП и использовать разность между ними в качестве ЦФ, которую необходимо минимизировать. В качестве альтернативы для ускорения оптимизации можно использовать квадрат разности между максимальным и минимальным значениями временных интервалов:

$$F_{time3} = (\max(\Delta t_1 \div \Delta t_5) - \min(\Delta t_1 \div \Delta t_5))^2. \quad (8)$$

Наилучшие наборы параметров по каждой ЦФ для МПЛП с боковыми полигонами, выбранными на основе максимального достижения ЦФ при 5 запусках ($F_{time} \rightarrow 0$) приведены в таблице 2. Среднее время вычислений на один запуск ГА составил 7700 секунд. На рисунках 10-12 представлены формы

напряжения, полученные в результате квазистатического моделирования с наилучшими наборами параметров.

Таблица 2. Результаты оптимизации МПЛП с боковыми полигонами по критерию выравнивания временных интервалов.

Структуры	F_{time1}			F_{time2}			F_{time3}		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
s , мм	0,961	0,534	0,389	0,403	0,548	0,438	0,922	0,738	0,587
w , мм	0,401	0,497	0,805	0,766	0,316	0,566	0,9313	0,868	0,865
h , мм	0,449	0,502	0,491	0,410	0,461	0,535	0,457	0,272	0,221
$w1$, мм	2,874	2,035	1,117	2,811	1,117	1,156	1,541	1,384	1,666
d , мм	3,152	4,552	2,694	4,611	2,176	2,435	3,247	3,023	2,388
F_{time}	0	0,001	0,001	0	0	0	0,059	0	0
Δt_1 , нс	0,590	0,411	0,509	0,693	0,608	0,687	0,911	0,834	0,885
Δt_2 , нс	0,305	0,411	0,509	0,693	0,608	0,687	0,448	0,837	0,879
Δt_3 , нс	0,285	0,398	0,488	1,281	0,607	0,69	0,925	0,834	0,886
Δt_4 , нс	0,305	0,438	0,472	0,693	0,605	0,683	0,433	0,837	0,879
Δt_5 , нс	0,590	0,438	0,472	0,693	0,605	0,683	0,94	0,834	0,886
U_{max} , В	0,524	0,53	0,607	0,620	0,497	0,532	0,523	0,536	0,532
Время, с	8151	4935	8776	8297	8146	9888	8498	6652	6626

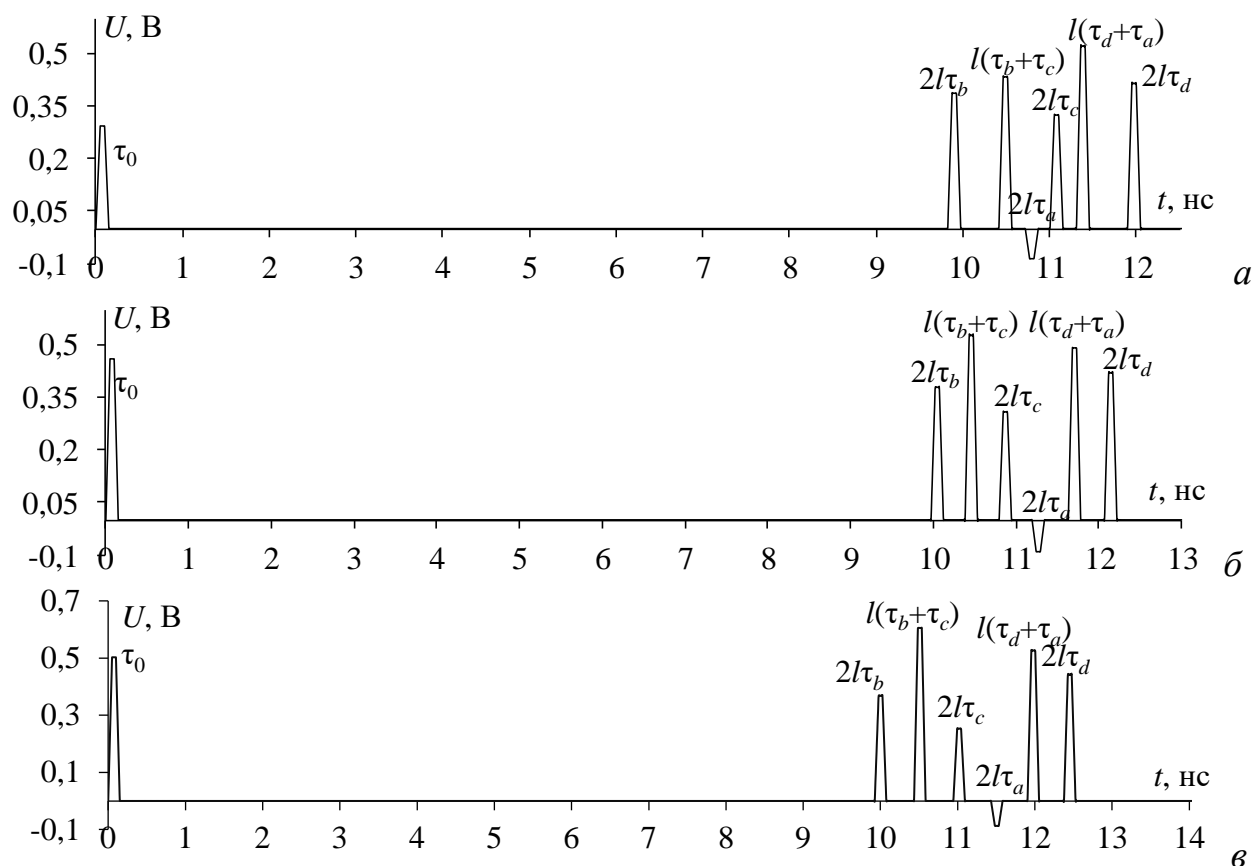


Рис. 10. Формы напряжения на выходе схемы 1 МПЛП с боковыми полигонами при минимизации F_{time1} (а), F_{time2} (б), F_{time3} (в).

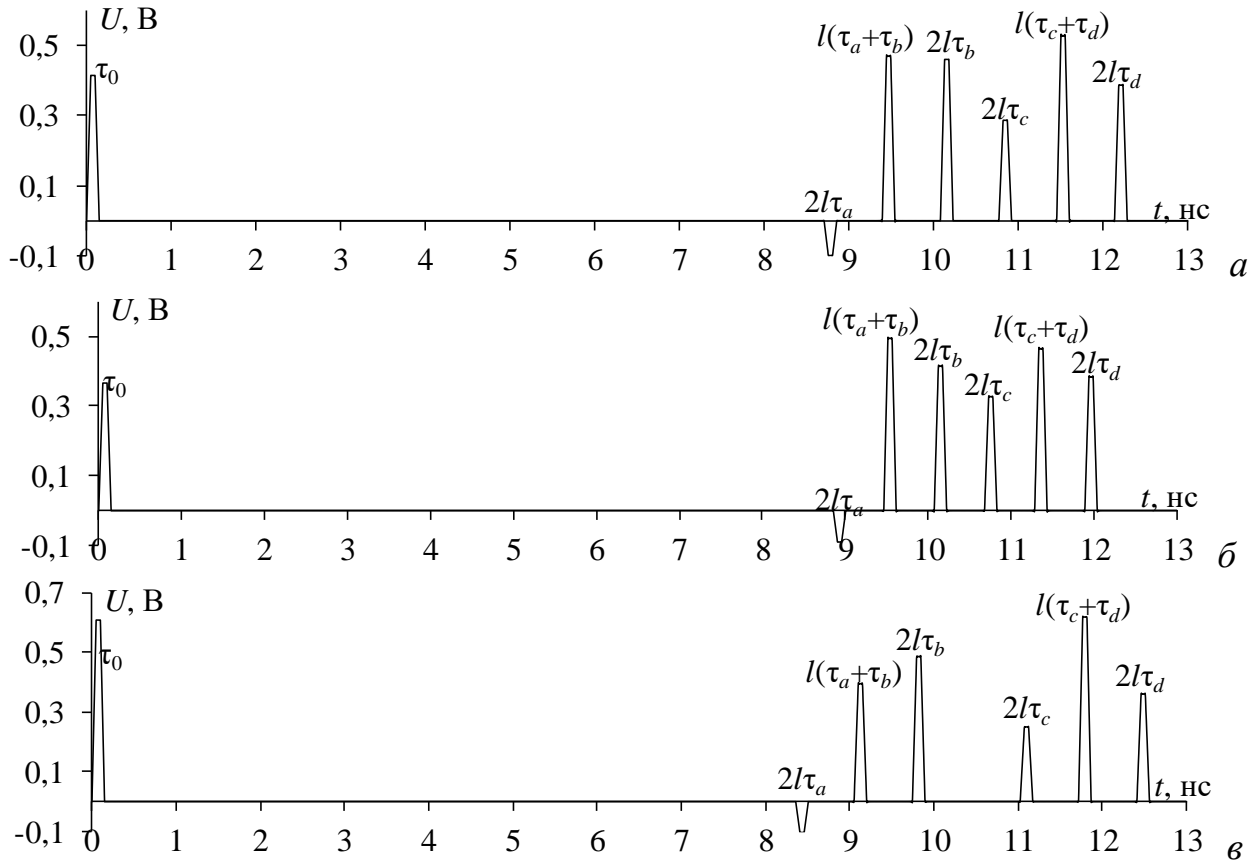


Рис.11. Формы напряжения на выходе схемы 2 для F_{time1} (а), F_{time2} (б), F_{time3} (в).

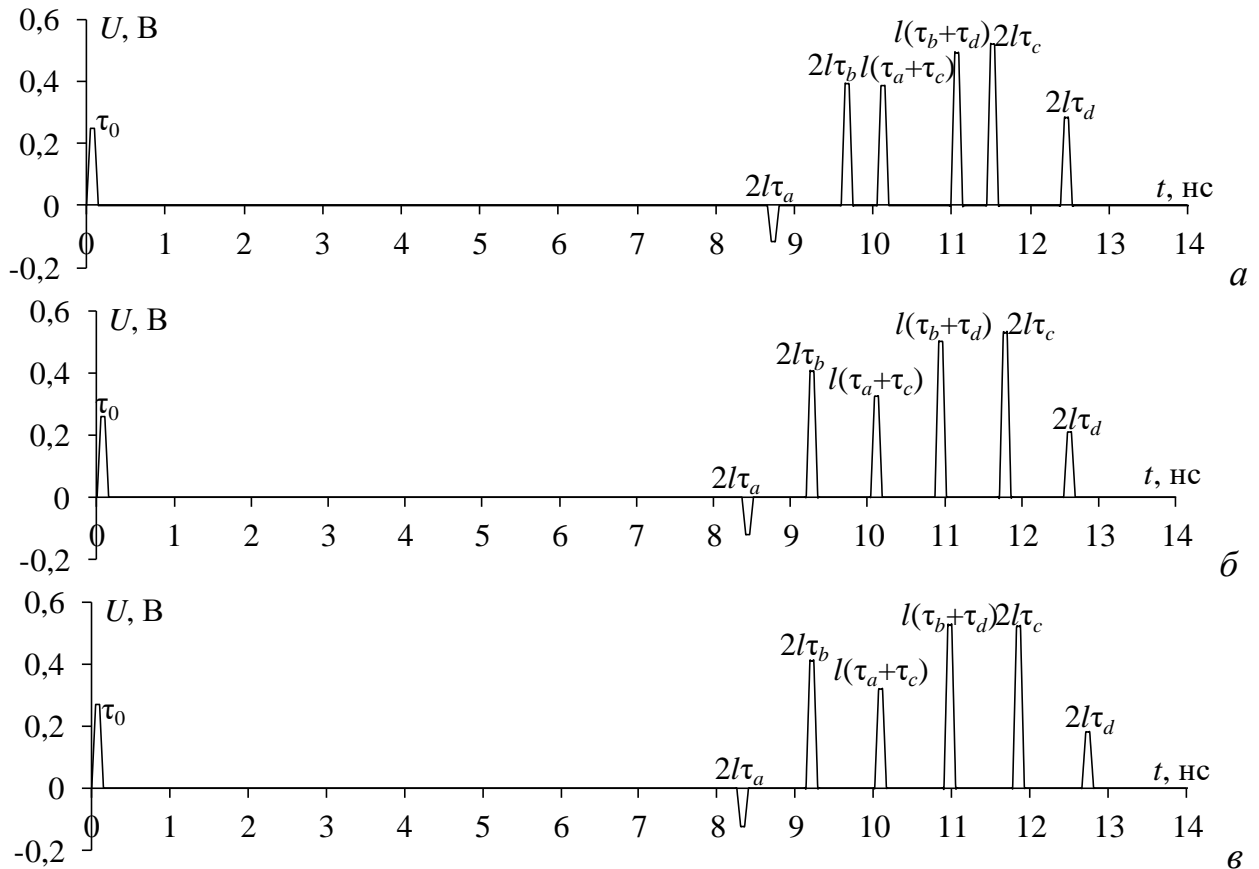


Рис. 12. Формы напряжения на выходе схемы 3 для F_{time1} (а), F_{time2} (б), F_{time3} (в).

В результате оптимизации по критерию выравнивания временных интервалов между всеми импульсами разложения (в том числе между комбинационными) получены параметры поперечного сечения МПЛП с боковыми полигонами, которые обеспечивают равенство Δt . Получено, что ЦФ F_{time1} попарно выравнивает два значения Δt . Наилучшие результаты достигнуты для схемы 1 при $s = 0,961$, $w = 0,401$, $h = 0,449$, $w_1 = 2,874$ и $d = 3,152$ мм (интервалы составляют $\Delta t_1 = 0,59$, $\Delta t_2 = 0,305$, $\Delta t_3 = 0,285$, $\Delta t_4 = 0,305$ и $\Delta t_5 = 0,59$ нс). Наилучшие результаты достигнуты для схемы 2 при $s = 0,403$, $w = 0,766$, $h = 0,410$, $w_1 = 2,811$ и $d = 4,611$ мм (интервалы составляют $\Delta t_1 = 0,693$, $\Delta t_2 = 0,693$, $\Delta t_3 = 1,281$, $\Delta t_4 = 0,693$ и $\Delta t_5 = 0,693$ нс). Наилучшие результаты достигнуты для схемы 3 при $s = 0,922353$, $w = 0,931$, $h = 0,457$, $w_1 = 1,541$ и $d = 3,247$ мм (интервалы составляют $\Delta t_1 = 0,911$, $\Delta t_2 = 0,448$, $\Delta t_3 = 0,925$, $\Delta t_4 = 0,433$ и $\Delta t_5 = 0,94$ нс).

При использовании ЦФ F_{time2} наилучшие результаты достигнуты для схемы 1 при $s = 0,534$, $w = 0,497$, $h = 0,502$, $w_1 = 2,035$ и $d = 4,552$ мм (интервалы составляют $\Delta t_1 = 0,411$, $\Delta t_2 = 0,411$, $\Delta t_3 = 0,398$, $\Delta t_4 = 0,438$ и $\Delta t_5 = 0,438$ нс). Наилучшие результаты достигнуты для схемы 2 при $s = 0,548$, $w = 0,316$, $h = 0,461$, $w_1 = 1,117$ и $d = 2,176$ мм (интервалы составляют $\Delta t_1 = 0,608$, $\Delta t_2 = 0,608$, $\Delta t_3 = 0,607$, $\Delta t_4 = 0,605$ и $\Delta t_5 = 0,605$ нс). Наилучшие результаты достигнуты для схемы 3 при $s = 0,738$, $w = 0,868$, $h = 0,272$, $w_1 = 1,384$ и $d = 3,023$ мм (интервалы составляют $\Delta t_1 = 0,834$, $\Delta t_2 = 0,837$, $\Delta t_3 = 0,834$, $\Delta t_4 = 0,837$ и $\Delta t_5 = 0,834$ нс).

При использовании ЦФ F_{time3} наилучшие результаты достигнуты для схемы 1 при $s = 0,389$, $w = 0,805$, $h = 0,491$, $w_1 = 1,117$ и $d = 2,694$ мм (интервалы составляют $\Delta t_1 = 0,509$, $\Delta t_2 = 0,509$, $\Delta t_3 = 0,488$, $\Delta t_4 = 0,472$ и $\Delta t_5 = 0,472$ нс). Наилучшие результаты достигнуты для схемы 2 при $s = 0,438$, $w = 0,566$, $h = 0,535$, $w_1 = 1,156$ и $d = 2,435$ мм (интервалы составляют $\Delta t_1 = 0,687$, $\Delta t_2 = 0,687$, $\Delta t_3 = 0,69$, $\Delta t_4 = 0,683$ и $\Delta t_5 = 0,683$ нс). Наилучшие результаты достигнуты для схемы 3 при $s = 0,587059$, $w = 0,865$, $h = 0,221$, $w_1 = 1,666$

и $d = 2,388$ мм (интервалы составляют $\Delta t_1 = 0,885$, $\Delta t_2 = 0,879$, $\Delta t_3 = 0,886$, $\Delta t_4 = 0,879$ и $\Delta t_5 = 0,886$ нс).

Таким образом, и ЦФ F_{time2} , и ЦФ F_{time3} могут быть полезны для достижения равенства временных интервалов, в зависимости от конкретной ситуации и требований к оптимизации. Если необходимо обеспечить равномерное распределение погонных задержек, то ЦФ F_{time2} является более подходящей. Кроме того, при оптимизации с использованием ГА, ЦФ F_{time2} может быть более эффективной, так как она имеет более простую структуру и может быть легче оптимизирована за счет меньшего числа параметров. Исходя из этого для оптимизации зеркально-симметричной МПЛП выбрана ЦФ F_{time2} .

Наилучшие наборы параметров, полученные в результате оптимизации зеркально-симметричной МПЛП по критерию выравнивания временных интервалов с использованием ЦФ F_{time2} для 3 схем приведены в таблице 3. Среднее время на один запуск ГА составило 12300 секунд. На рисунке 13 представлены формы напряжения, полученные при моделировании с этими параметрами.

Таблица 16. Результаты минимизации F_{time2} для схемы 1 зеркально-симметричной МПЛП.

Значения	Схема 1	Схема 2	Схема 3
s , мм	1,845	0,468	0,104
w , мм	0,518	1,229	1,246
h , мм	0,724	1,706	0,4
F_{time2}	0	0,186	0,108
Δt_1 , нс	0,642	0,223	0,564
Δt_2 , нс	0,642	0,590	0,760
Δt_3 , нс	0,641	0,241	0,760
Δt_4 , нс	0,637	0,350	0,564
Δt_5 , нс	0,637	0,704	0,956
U_{max} , В	0,577	0,536	0,702
Время, с	12496,9	10934,8	13559

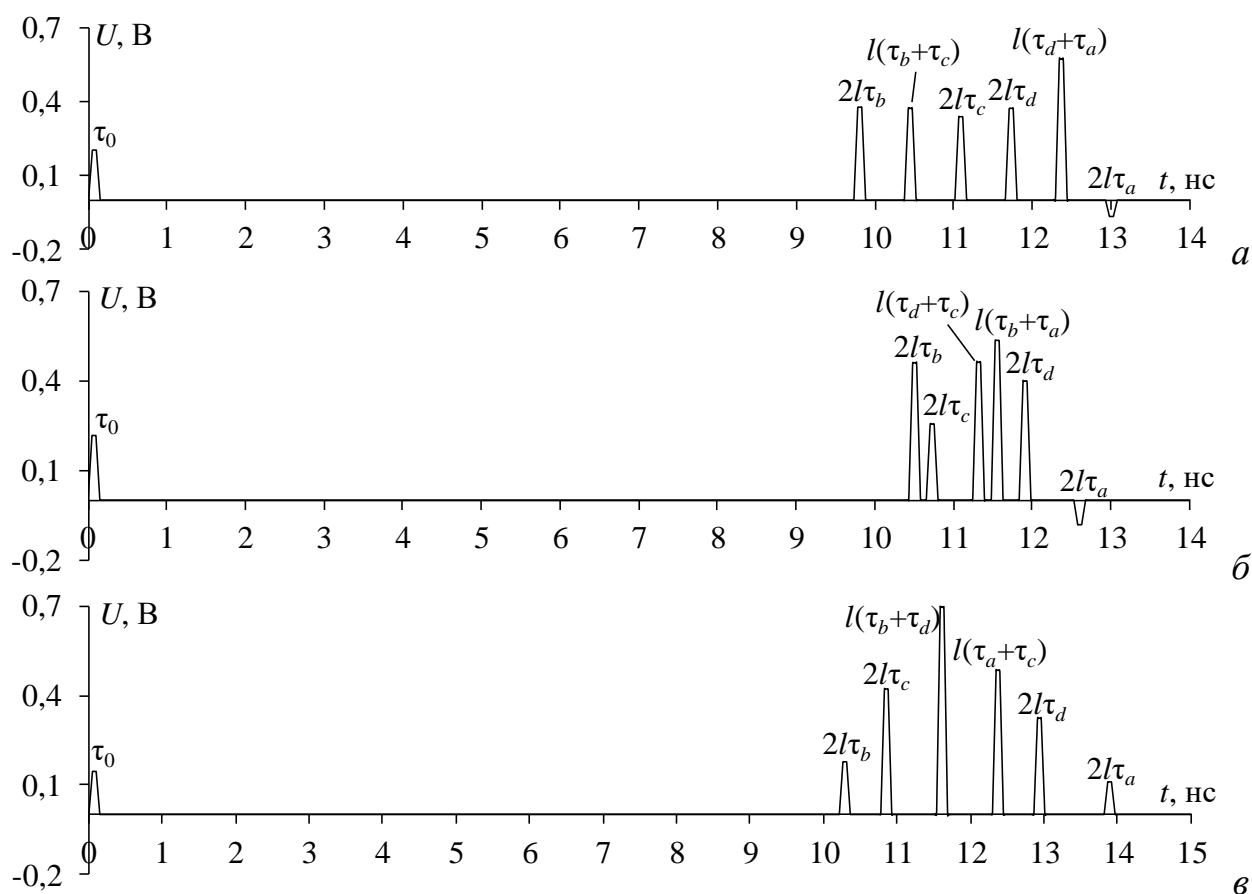


Рис. 13. Формы напряжения на выходе схемы 1 (а), 2 (б) и 3 (в) зеркально-симметричной МПЛП при минимизации F_{time2} .

В результате оптимизации по критерию выравнивания временных интервалов между всеми импульсами разложения (в том числе между комбинационными) с использованием ЦФ F_{time2} получены параметры поперечного сечения зеркально-симметричной МПЛП, которые обеспечивают равенство Δt . Наилучшие результаты достигнуты для схемы 1 при $s = 1,845$ мм, $w = 0,518$ мм, $h = 0,724$ мм (интервалы составляют $\Delta t_1 = 0,642$, $\Delta t_2 = 0,642$, $\Delta t_3 = 0,641$, $\Delta t_4 = 0,637$ и $\Delta t_5 = 0,637$ нс). Наилучшие результаты достигнуты для схемы 2 при $s = 0,468$ мм, $w = 1,229$ мм, $h = 1,706$ мм (интервалы составляют $\Delta t_1 = 0,223$, $\Delta t_2 = 0,590$, $\Delta t_3 = 0,241$, $\Delta t_4 = 0,350$ и $\Delta t_5 = 0,704$ нс). Наилучшие результаты достигнуты для схемы 3 при $s = 0,104$ мм, $w = 1,246$ мм, $h = 0,4$ мм (интервалы составляют $\Delta t_1 = 0,564$, $\Delta t_2 = 0,760$, $\Delta t_3 = 0,760$, $\Delta t_4 = 0,564$ и $\Delta t_5 = 0,956$ нс).

Таким образом, получены оптимальные параметры асимметричных структур по критериям выравнивания временных интервалов между всеми

импульсами разложения (в том числе между комбинационными) и минимизации максимальной амплитуды на выходе.

Заключение

Таким образом, выполнена параметрическая оптимизация трех схем многопроводных линий передачи с боковыми полигонами и зеркально-симметричной с использованием ресурса комбинационных импульсов. Оптимизация выполнялась по критериям выравнивания временных интервалов между всеми импульсами разложения (в том числе между комбинационными) и минимизации максимальной амплитуды на выходе. В процессе оптимизации выявлено, что задержки комбинационных импульсов зависят от мод конкретного режима распространения и не зависят от порядка прихода импульсов. В следствие чего, разработан алгоритм, позволяющий получить достоверные сведения о значениях временных интервалов вне зависимости от изменения задержек мод.

Результаты оптимизации по критерию минимизации максимальной амплитуды на выходе позволили для МПЛП с боковыми полигонами уменьшить значение U_{max} в 1,5 раза для всех схем по сравнению с исходной схемой, где нет комбинационных импульсов, а для зеркально-симметричной – в 1,2 раза. Из анализа форм напряжения на выходе получено, что в первую очередь этого удалось достичь из-за приравнивания амплитуд импульсов основных и комбинационных мод. При оптимизации по критерию выравнивания временных интервалов между всеми импульсами разложения, в том числе между комбинационными, сформулированы 3 целевые функции. Первая целевая функция получена путем преобразования системы, содержащей в себе приравненные соседние временные интервалы. Вторая целевая функция представляет из себя сумму квадратов отклонений временных интервалов от их среднего значения. Третья целевая функция представляет из себя квадрат разности между максимальным и минимальным значениями временных интервалов. Все три целевые функции апробированы при оптимизации 3 схем

соединения МПЛП с боковыми полигонами. Стоит отметить, что в зеркально-симметричной МПЛП не удалось достичь таких же высоких результатов, как при оптимизации МПЛП с боковыми полигонами. Это объясняется меньшим числом варьируемых параметров, спецификой структуры и выбранным диапазоном параметров. Также выявлено, что для схем, где комбинационные импульсы состоят из мод, которые приходят с первой и четвертой задержкой и второй и третьей задержкой, выравненные временные интервалы приводят к наложению этих комбинационных импульсов. Исходя из этого, получение равенства Δt невозможно достичь физически в таких схемах.

Важным результатом оптимизации стала возможность увеличения минимального значения временного интервала ($\min(\Delta t)$), от которого зависит возможность полного разложения входного сигнала в МПЛП ($t_{\Sigma} < l \cdot \min(\Delta t)$). Из-за появления комбинационных импульсов между импульсами основных мод значение $\min(\Delta t)$ уменьшается в 2 раза. После оптимизации это значение для некоторых схем стало больше даже по сравнению со значением $\min(\Delta t)$, полученным в исходной схеме с оптимизированными параметрами, где нет комбинационных импульсов. Таким образом, в совокупности результаты оптимизации демонстрируют эффективность использования ресурса комбинационных импульсов для совершенствования защитных структур на основе линий передачи с неоднородным диэлектрическим заполнением.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00187, <https://rscf.ru/project/22-79-00187/> в ТУСУРе и при поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2024-0005.

Литература

1. Li E. P. et al. Progress review of electromagnetic compatibility analysis technologies for packages, printed circuit boards, and novel interconnects // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2010. – Vol. 52. – №2. – P. 248-265. <https://www.doi.org/10.1109/ТЕМС.2010.2048755>
2. Maini A.K. Digital electronics: principles, devices and applications. – John Wiley & Sons, 2007. – 752 p.
3. Тай Н.В., Кириллов В.Ю. Перекрестные помехи во внутреннем пространстве бортового приборного модуля // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – №. 2. – С. 563-568.
4. Verma A.K., Kumar R., Sadr G.H. Pulse distortion on multilayer microstrip line // 1993 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – Atlanta, GA, USA, 1993. – P. 861-864. <https://www.doi.org/10.1109/MWSYM.1993.277022>
5. Ling F., Cai K., Sen B. Fast full board crosstalk scan for signal integrity sign-off for high-speed PCB designs // 2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI & PI). – Piscataway, NJ, 2018. – P. 122-125. <https://www.doi.org/10.1109/EMCSI.2018.8495173>
6. Сычѐв А.Н. Управляемые СВЧ устройства на многомодовых полосковых структурах / Под. ред. Н.Д. Малютина. – Томск: НИ ТГУ, 2001. – 318 с.
7. 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. <https://www.doi.org/10.1109/ТЕМС.2016.2548783>
8. Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. New approach to EMC protection // 2007 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Munich, Germany, 2007. – P. 273-276. <https://www.doi.org/10.1109/EMCZUR.2007.4388248>
9. Paul C.R. On uniform multimode transmission lines // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1973. – №8. – P. 556-558. <https://www.doi.org/10.1109/TMTT.1973.1128059>

10. Hall S.H., Heck H.L. Advanced signal integrity for high-speed digital designs. – Wiley-IEEE Press. – 2009. – 680 p.
11. Сычев А.Н., Рудый Н.Ю. Параметры несимметричных связанных линий с неоднородным диэлектриком // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21. – №4–1. С. 7-15. <https://www.doi.org/10.21293/1818-0442-2018-21-4-1-7-15>
12. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.T. Time-domain response of asymmetrical modal filter without resistors to ultrashort pulse excitation // 2016 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Altai, Russia, 2016. – P. 85-88. <https://www.doi.org/10.1109/EDM.2016.7538699>
13. Красноперкин В.М., Самохин Г.С., Силин Р.А. Импульсные сигналы в связанных линиях передачи // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1983. – Т. 7. – № 355. – С. 3-8.
14. Chernikova E.B., Belousov A.O., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Using reflection symmetry to improve the protection of radio-electronic equipment from ultrashort pulses // Symmetry. – Vol. 11(7). – №883. – 2019. – P. 1–25. <https://doi.org/10.3390/sym11070883>
15. 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. 12(7). – №1117. – P. 1–38. <https://doi.org/10.3390/sym12071117>
16. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 560. – №012110. – P. 1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012110>

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024616984. Вычисление временных интервалов между основными и комбинационными импульсами во временном отклике четырехпроводной симметричной линии передачи / Е.Б. Черникова, Г.Ю. Ким. Заявка №2024615445. Дата поступления 19.03.2024. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27.03.2024.
18. Belousov A.O., Gazizov T.R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters // Complexity. – 2018. – № 2018. – P. 1-15. <https://doi.org/10.1155/2018/5676504>

Для цитирования:

Черникова Е.Б. Параметрическая оптимизация асимметричных многопроводных линий передачи с учетом комбинационных импульсов // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.6.11>