

УДК 621.391.825

Квазистатистический анализ и оптимизация многослойной печатной платы с модальным резервированием и двусторонней трассировкой

Морозов С. Р., Медведев А. В.

Постановка задачи: для создания радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) необходимо уделять внимание обеспечению функциональной безопасности и электромагнитной совместимости. Данный процесс должен затрагивать все этапы производства аппаратуры. Опасным видом помех для РЭА являются кондуктивные сверхширокополосные помехи (СШП). С целью предотвращения влияния СШП и увеличения функциональной безопасности РЭА используется модальное резервирование (МР). Существует ряд способов компоновки печатных плат (ПП) с МР, но их недостатком является сложность трассировки при большом количестве элементов электронной схемы. Однако есть способ, позволяющий осуществить трассировку проводников электронных схем с большим количеством компонентов за счет расположения проводников на внешнем и внутреннем слоях ПП и их ортогональной трассировки. В то же время, анализ и оптимизация структур ПП, разработанных по данному способу, не проводились. Между тем при попытке оптимизации параметров структур с проводниками на внутреннем и внешнем слоях ПП (геометрические и электрофизические параметры у них общие), изменение исходного набора параметров поперечного сечения структур приводило к изменению модуля разности погонных задержек средних геометрических импедансов четной и нечетной мод по-разному. Например, если при увеличении одного общего параметра для одной структуры модуль разности погонных задержек увеличивался, то для другой она могла уменьшаться. Это приводит к трудностям в процессе оптимизации этих структур на одной ПП, так как без информации о характере зависимостей характеристик от параметров поперечного сечения данных структур невозможно корректно определить оптимальный общий набор параметров. Поэтому, при определении максимальных значений модуля разности погонных задержек, с учетом согласования и без, для данных структур необходимо провести комплексное исследование, включающее анализ и оптимизацию структур. **Целью работы** является проведение такого исследования. **Используемые методы:** Для анализа зависимостей рассматриваемых структур использовались одновариантный и многовариантный анализы, а для оптимизации использовались эвристический поиск и генетический алгоритм. **Новизна:** Впервые анализируются зависимости параметров структур с МР проводников на внешнем и внутреннем слоях, и проводится их оптимизация. **Результат:** Получена информация о характере зависимостей параметров каждой из исследуемых структур, а также определены оптимальные наборы параметров. Выявлены возможности получения нулевой чувствительности характеристик структур к изменению отдельных параметров. **Практическая значимость:** Полученные данные могут быть использованы для разработки ПП с МР.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, печатная плата, модальная фильтрация, модальное резервирование, одновариантный анализ, многовариантный анализ, эвристический поиск, генетический алгоритм.

Библиографическая ссылка на статью:

Морозов С. Р., Медведев А. В. Квазистатистический анализ и оптимизация многослойной печатной платы с модальным резервированием и двусторонней трассировкой // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 3. С. 91-106. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-91-106

Reference for citation:

Morozov S. R., Medvedev A. V. Quasi-static analysis and optimization of a multilayer PCB with modal reservation and a two-sided routing. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 3, pp. 91-106 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-91-106

Актуальность

При создании печатных плат (ПП) критичной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) необходимо уделять большое внимание обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) и функциональной безопасности электронных схем [1]. Данный процесс должен затрагивать все этапы производства аппаратуры. Большую опасность для РЭА представляют сверхширокополосные помехи (СШП), несущие большую энергию при малой длительности. Для существенного повышения функциональной безопасности устройства, а также уменьшения влияния СШП, за счет модального разложения, используется метод компоновки и трассировки, называемый модальным резервированием (МР) [2]. Он реализует резервирование [3], являющееся подвидом холодного резервирования, при котором осуществляется модальная фильтрация за счет электромагнитной связи между активным (резервируемым) и пассивным (резервным) проводниками. Часто используют однократное, двукратное и трехкратное МР, различающееся количеством резервных линий.

Существуют различные способы компоновки ПП с МР, но их недостатком является сложность трассировки проводников электронной схемы с большим количеством цепей [4-6]. Разработан способ трассировки, отличающийся тем, что ПП образована двумя слоями диэлектрика, представленными на рис. 1а (препрег и основание 1), на обеих сторонах внешнего из которых трассируются пары отрезков резервируемого и резервного проводников, образуя структуры связанных линий [7] (рис. 1б).

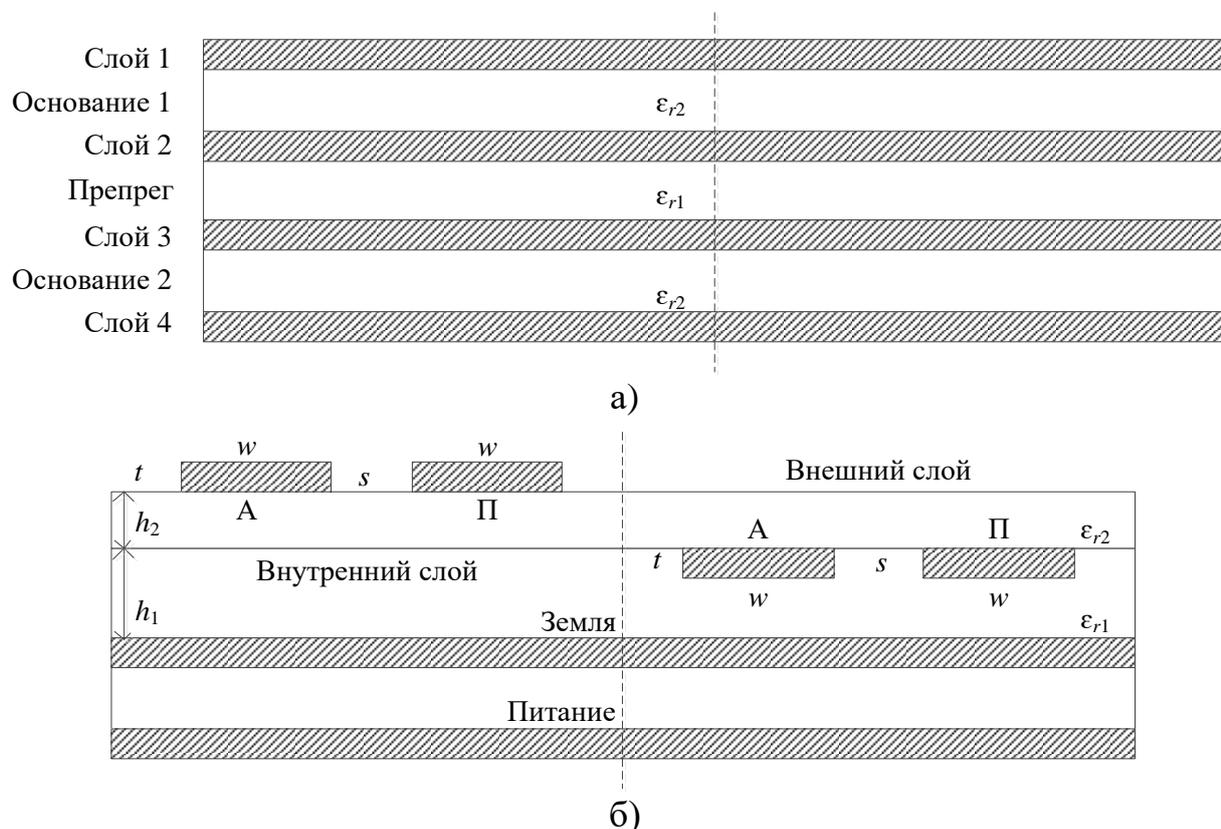


Рис. 1. Слои четырехслойной ПП (а), реализация структуры с МР проводников на внешнем и внутреннем слоях (б) (слои 1 и 2)

Данный способ может быть использован, как при ортогональной трассировке (когда проводники трассируются на одном слое и ортогонально на другом, а между собой соединяются переходными отверстиями), так и отдельно, когда участки с МР трассируются только на одном слое. В работе [8] исследован вариант с ортогональной трассировкой. Показано, что из-за того, что разности скоростей распространения четной и нечетной мод на разных слоях могут иметь разные знаки, разность задержек может уменьшаться и в некоторых случаях равняться нулю.

Между тем, при попытке оптимизации структур с проводниками на внутреннем и внешнем слоях ПП по отдельности (геометрические и электрофизические параметры у них общие, но структуры рассматриваются отдельно), изменение исходного набора параметров поперечного сечения структур приводило к изменению модуля разности погонных задержек $|\Delta\tau|$ и средних геометрических импедансов (R) четной и нечетной мод по-разному. Например, если при увеличении одного общего параметра для одной структуры $|\Delta\tau|$ увеличивалась, то для другой могла уменьшаться. Это приводит к трудностям в процессе оптимизации этих структур на одной ПП, так как без информации о характере зависимостей $|\Delta\tau|$ и R от параметров поперечного сечения данных структур, невозможно корректно определить оптимальный общий набор параметров. Поэтому при определении максимальных значений $|\Delta\tau|$, с учетом согласования и без, для данных структур необходимо комплексное исследование, включающее одновариантный и многовариантный анализы, а также оптимизацию с помощью эвристического поиска (ЭП) и генетического алгоритма (ГА).

Цель работы – провести одновариантный анализ временного отклика и многовариантный анализ параметров структур с проводниками на внутреннем и внешнем слоях и по полученным данным провести оптимизацию структур, с учетом согласования и без, по критерию максимизации $|\Delta\tau|$.

Исследуемая структура

Моделирование проводилось в системе TALGAT [9] без потерь в проводниках и диэлектриках. Поперечные сечения для моделирования исследуемых структур на внешнем и внутреннем слоях ПП представлены на рис. 2, а принципиальная электрическая схема – на рис. 3.

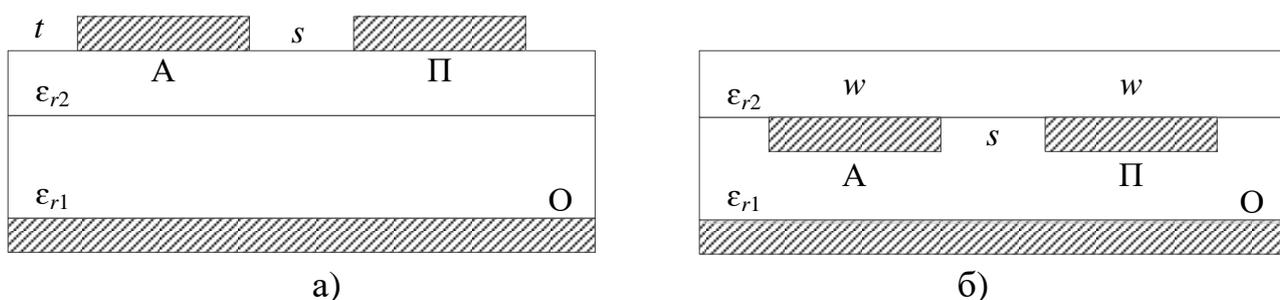


Рис. 2. Поперечные сечения исследуемых структур с МР проводников на внешнем (а) и внутреннем (б) слоях

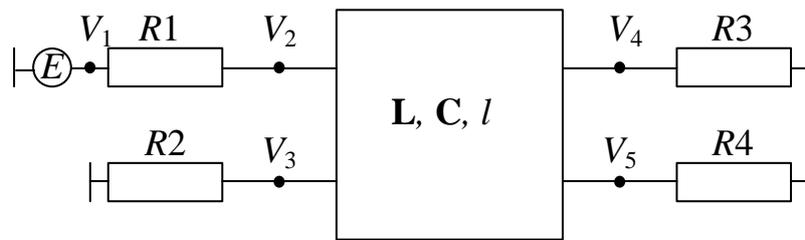


Рис. 3. Принципиальная схема

В таблице 1 представлен исходный набор параметров поперечного сечения. Параметры источника воздействия: форма трапецевидная, амплитуда электродвижущей силы 2 В, длительности нарастания, плоской вершины и спада – по 10 пс.

Таблица 1 – Исходный набор параметров поперечного сечения (мкм)

w	s	t	h_1	h_2	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}	$l, \text{ м}$
200	200	18	200	200	4	10,2	1

Одновариантный анализ временного отклика

В ходе одновариантного анализа использовались поперечные сечения, представленные на рис. 2, при исходном наборе параметров из таблицы 1. Для моделирования использовалась принципиальная схема, представленная на рис. 3, которая представляет собой двухпроводную структуру (длиной $l=1$ м) с источником воздействия в активной линии и нагрузками $R1-R4$ на ближнем и дальнем концах равными R .

Сопротивления на внешнем и внутреннем слоях 49,63 Ом и 67,87 Ом соответственно. На рис. 4 представлены формы напряжений на ближнем и дальнем концах структур на внутреннем и внешнем слоях при исходном наборе параметров, соответственно. На ближнем конце наблюдается импульс с амплитудой 1 В, а на дальнем – два импульса для каждой из структур с максимальной амплитудой 0,5 В. Разности задержек ($l/\Delta\tau$) в структурах на внешнем и внутреннем слоях ПП равны 1 и 0,04 нс, соответственно.

Таким образом, выполнен одновариантный анализ структур с МР на внутреннем и внешнем слоях. Результатом анализа стали формы напряжения, а также значения $l/\Delta\tau$ и R при исходном наборе параметров. Наблюдается большая разница значений $l/\Delta\tau$ и R между структурами с проводниками на внешнем и внутреннем слоях, которая составляет 92 и 16 %, соответственно. При этом для структуры на внешнем слое $R \approx 50$ Ом, а $l/\Delta\tau$ больше, чем на внутреннем слое. Это говорит о том, что для данной реализации по критерию согласования и максимизации $l/\Delta\tau$ оптимально использовать только структуру на внешнем слое. Однако, необходимо добиться, чтобы оптимальны были обе структуры. Таким образом, необходимо провести многовариантный анализ, чтобы исследовать свойства структур с проводниками на внутреннем и внешнем слоях и возможность их одновременной оптимизации.

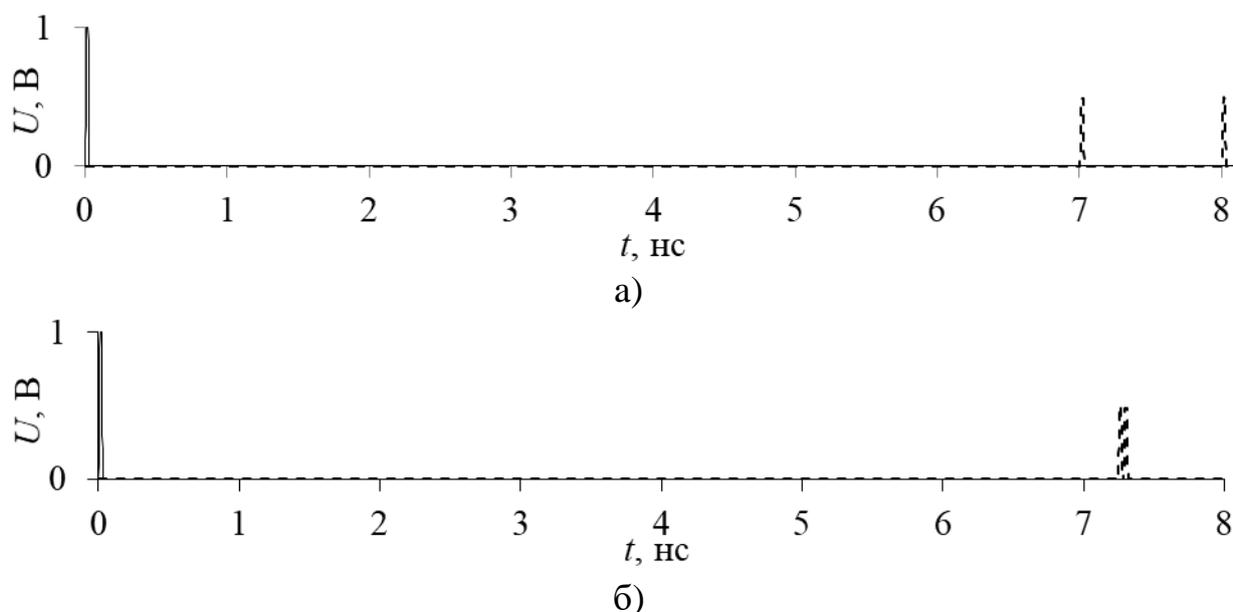


Рис. 4. Формы напряжения на ближнем (—) и дальнем (---) концах структуры с МР проводников на внутреннем (а) и внешнем (б) слоях

Многовариантный анализ параметров структуры с МР проводников на внешнем слое

Первым этапом многовариантного анализа было рассмотрение $|\Delta\tau|$ и R структуры с проводниками на внешнем слое. На рис. 5 и рис. 6 представлены их зависимости от геометрических параметров, изменяемых по отдельности. Взяты стандартные для отечественных материалов значения $t=18, 35, 70, 105$ мкм. Остальные параметры менялись от 100 до 1000 мкм с шагом 100 мкм.

При изменении параметров поперечного сечения, $|\Delta\tau|$ и R изменились в пределах, приведенных в таблице 2. Из рис. 5 и рис. 6 видно, что увеличение параметров w, t и h_2 ведет к увеличению $|\Delta\tau|$. Увеличение параметров s и h_1 уменьшает $|\Delta\tau|$ до определенного значения, а затем увеличивает. Увеличение h_1, h_2 и s ведет к росту R , а w и t – к уменьшению. Также, по изменению параметров можно сделать вывод, что наибольшее влияние на $|\Delta\tau|$ оказывают h_1, h_2 и t , а на R – w и h_1 . Для максимального роста $|\Delta\tau|$ надо брать максимальные значения всех параметров.

Отметим, что на исследуемых зависимостях обнаружены точки экстремумов, обладающие нулевой чувствительностью к изменению параметра. На рис. 5а, показывающий зависимости $|\Delta\tau|$ от геометрических параметров, экстремумы достигаются при значении w, s и h_2 равным 300 мкм и $h_1=200$ мкм. На рис. 5б, показывающий зависимости R от геометрических параметров, а также на рис. 6 точек экстремумов не наблюдается.

Таблица 2 – Диапазоны изменения $|\Delta\tau|$ и R при изменении параметров поперечного сечения (мкм)

w		s		h_1		h_2		t	
$ \Delta\tau $, пс/м	R , Ом	$ \Delta\tau $, пс/м	R , Ом	$ \Delta\tau $, пс/м	R , Ом	$ \Delta\tau $, пс/м	R , Ом	$ \Delta\tau $, пс/м	R , Ом
260	49	200	9	615	32	380	16	424	6

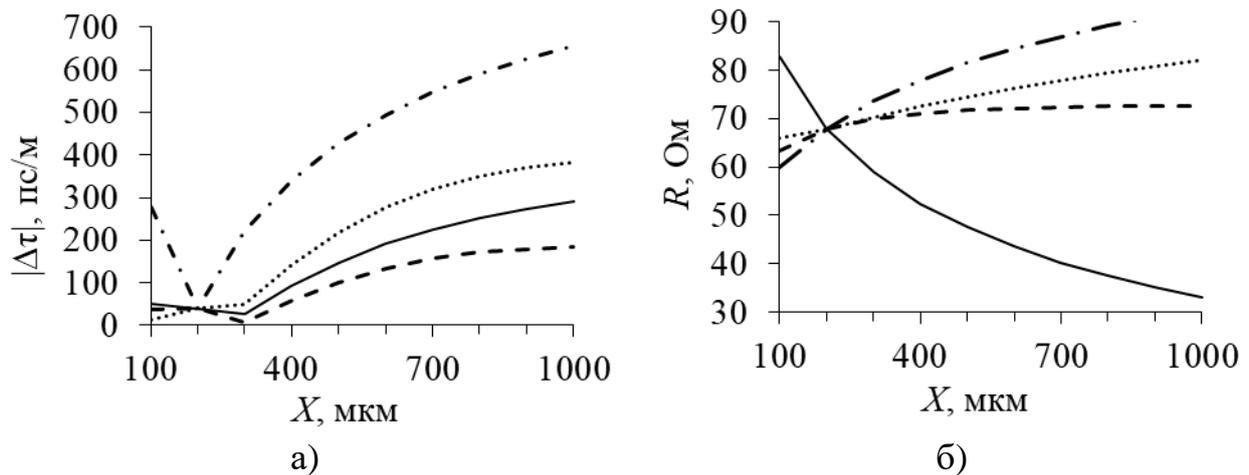


Рис. 5. Зависимости $|\Delta\tau|$ (а) и R (б) от X , где $X = w$ (—), s (---), h_1 (-·-·-), h_2 (...)

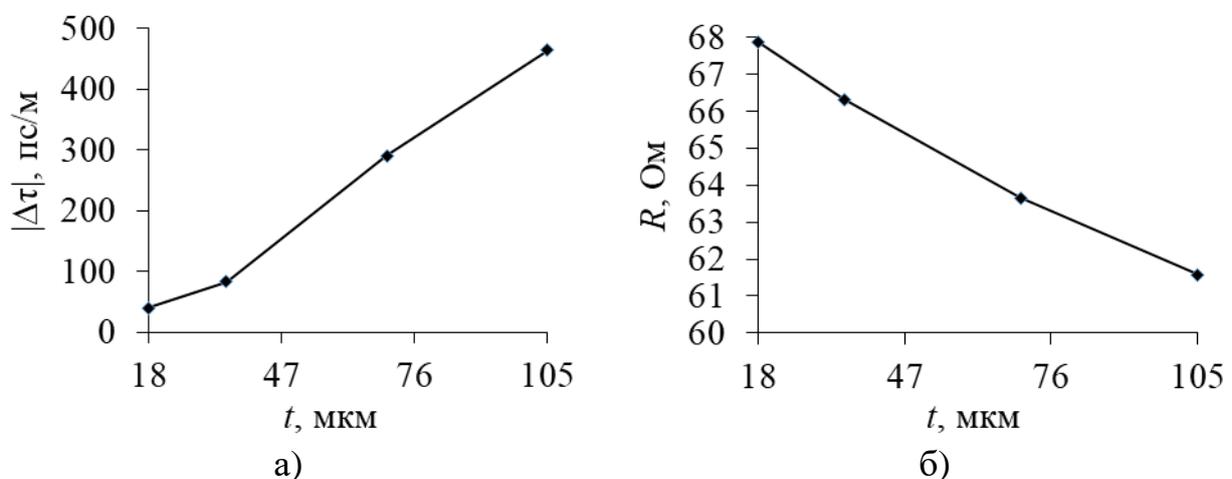


Рис. 6. Зависимости $|\Delta\tau|$ (а) и R (б) от t

Многовариантный анализ параметров структуры с МР проводников на внутреннем слое

Вторым этапом многовариантного анализа было аналитическое рассмотрение для внутреннего слоя. Результаты которого представлены на рис. 7 и рис. 8. При изменении параметров поперечного сечения, $|\Delta\tau|$ и R изменились в пределах, которые приведены в таблице 3. Из рис. 7 и рис. 8 видно, что увеличение h_1 увеличивает $|\Delta\tau|$, а t , s и w – уменьшает. При увеличении h_2 сначала $|\Delta\tau|$ уменьшается, а затем увеличивается. Увеличение h_1 и s ведет к росту R , а w , h_2 и t – к уменьшению. Наибольшее влияние на $|\Delta\tau|$ оказывают w , s и h_1 , а на R – w и h_1 . Для максимального роста $|\Delta\tau|$ надо брать w , s и t минимальными, h_1 максимальным, а h_2 около 300 мкм. Отметим, наличие экстремума на рис. 7а при $h_2=300$ мкм. Он дает нулевую чувствительность $|\Delta\tau|$ к изменению h_2 .

Таблица 3 – Диапазоны изменения $|\Delta\tau|$ и R при изменении параметров поперечного сечения (мкм)

w		s		h_1		h_2		t	
$ \Delta\tau $, пс/м	R , Ом	$ \Delta\tau $, пс/м	R , Ом	$ \Delta\tau $, пс/м	R , Ом	$ \Delta\tau $, пс/м	R , Ом	$ \Delta\tau $, пс/м	R , Ом
500	43	1000	5	630	50	300	7	285	18

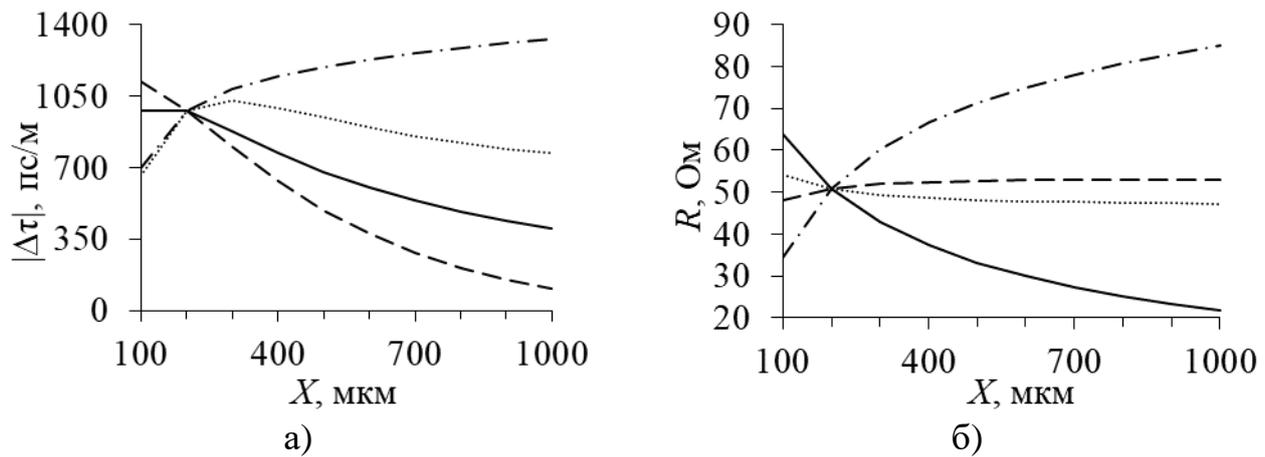


Рис. 7. Зависимости $|\Delta\tau|$ (а) и R (б) от X , где $X = w$ (—), s (---), h_1 (-·-·-), h_2 (...)

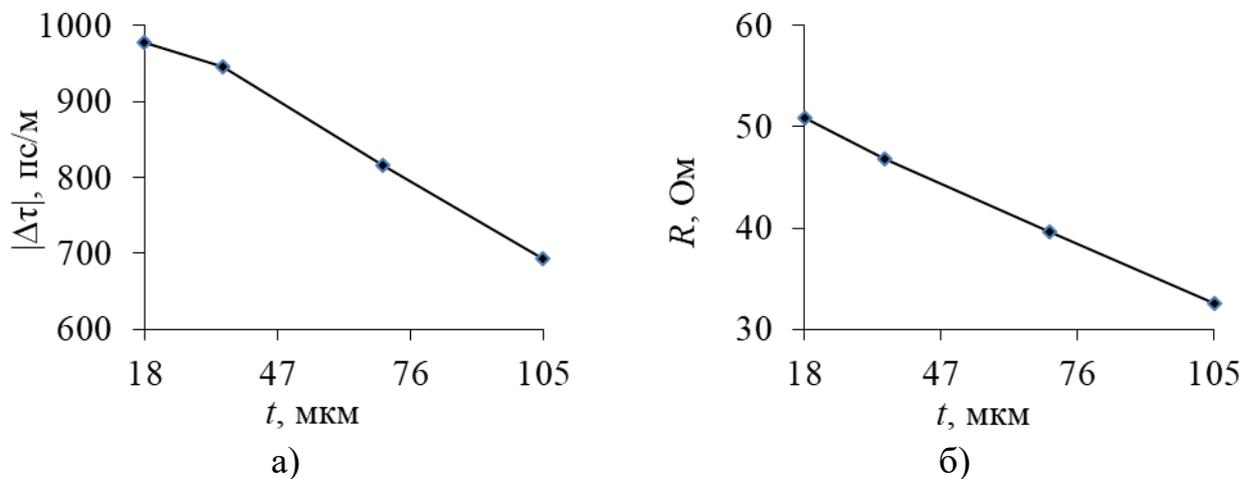


Рис. 8. Зависимости $\Delta\tau$ (а) и R (б) от t

Таким образом, выполнен многовариантный анализ $|\Delta\tau|$ и R структур с МР проводников на внешнем и внутреннем слоях ПП. Рассмотрены их зависимости от параметров поперечного сечения. Определены параметры, наиболее влияющие на $|\Delta\tau|$ и R . Выявлено, что изменение параметров w , s и t исследуемых структур ведет к противоположным результатам, а увеличение h_1 ведет к увеличению $|\Delta\tau|$ для обеих структур. Таким образом, на основе полученных данных возможен оптимальный общий выбор параметров.

Оптимизация параметров структур эвристическим поиском

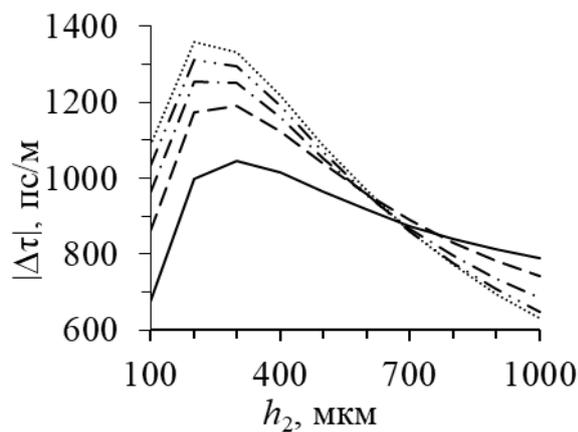
Третьим этапом работы была оптимизация параметров структур с помощью ЭП. В качестве исходного выбран набор из таблицы 1. Максимизировались разности погонных задержек ($|\Delta\tau|_{\max}$) с учетом и без учета согласования R с трактом 50 Ом. Оптимальные параметры приведены в таблице 4.

Далее рассматривались обе структуры так, если бы они располагались на одной ПП. На рис. 9–11 представлены зависимости $|\Delta\tau|$ и соответствующее им R , при которых достигается в структуре на внутреннем слое $|\Delta\tau|_{\max}=1382$ пс/м. Также представлены их зависимости при таких же изменениях параметров структуры на внешнем слое, как и на внутреннем. Используя эти

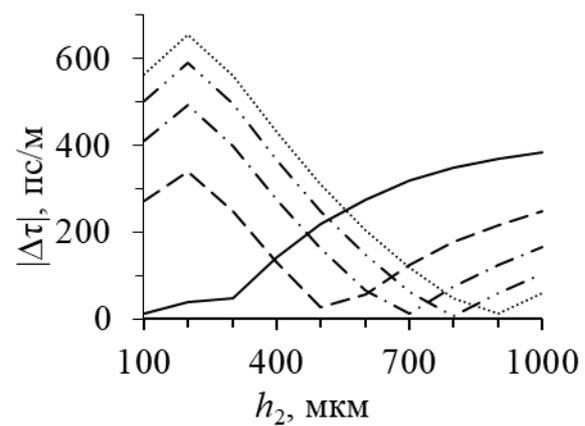
зависимости, можно определить параметры, при которых $|\Delta\tau|$ максимален в обеих структурах, а также согласовать обе структуры с трактом 50 Ом. Далее по критерию $|\Delta\tau|_{\max}$ оптимизировались параметры ПП, на которой расположены обе структуры, и получены наборы параметров, представленные в таблице 5, где $|\Delta\tau|$ и R структур на внутреннем и внешнем слоях обозначены как $|\Delta\tau|_{in}$, R_{in} и $|\Delta\tau|_{out}$, R_{out} соответственно. Отметим наличие экстремумов: на рис. 9а в области 200–300 мкм; рис. 9г от 200 до 300 мкм; рис. 10а от 200 до 700 мкм; рис. 10б от 200 до 400 мкм; рис. 11б в области 200 мкм.

Таблица 4 – Оптимальные параметры (мкм) отдельных структур

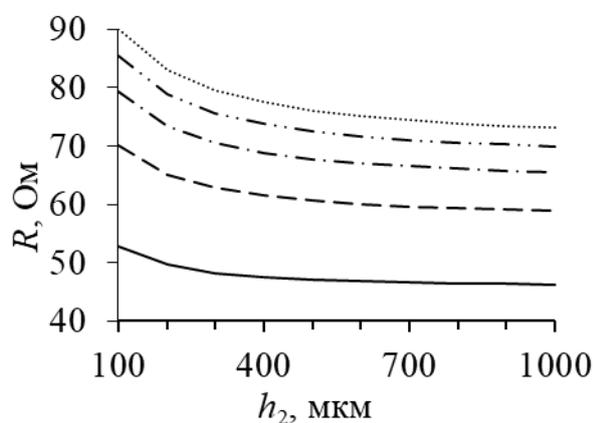
Слой	Критерий	w	s	h_1	h_2	t	$ \Delta\tau $, пс/м	R , Ом
Внутренний	$ \Delta\tau _{\max}$	100	200	1000	200	18	1382	95
	$ \Delta\tau _{\max}$ и $R \rightarrow 50$ Ом	1000	200	1000	400	18	1225	50
Внешний	$ \Delta\tau _{\max}$	200	200	200	1000	105	917	74
	$ \Delta\tau _{\max}$ и $R \rightarrow 50$ Ом	900	200	200	1000	18	489,4	50



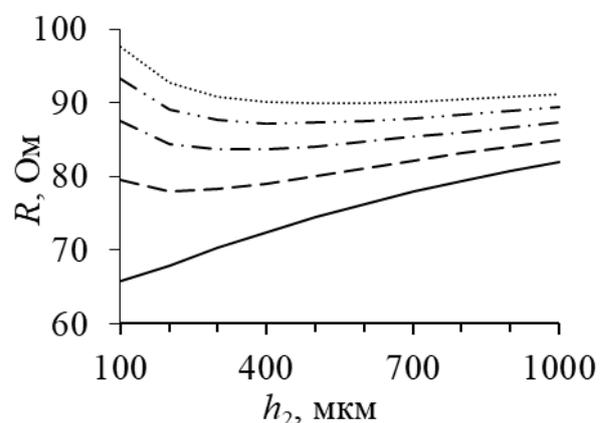
а)



б)



в)



г)

Рис. 9. Зависимости $|\Delta\tau|$ на внутреннем (а) и внешнем (б) и R на внутреннем (в) и внешнем (г) слоях от h_2 при $h_1= 200$ (—), 400 (- -), 600 (-·-), 800 (-·-·-), 1000 (···)

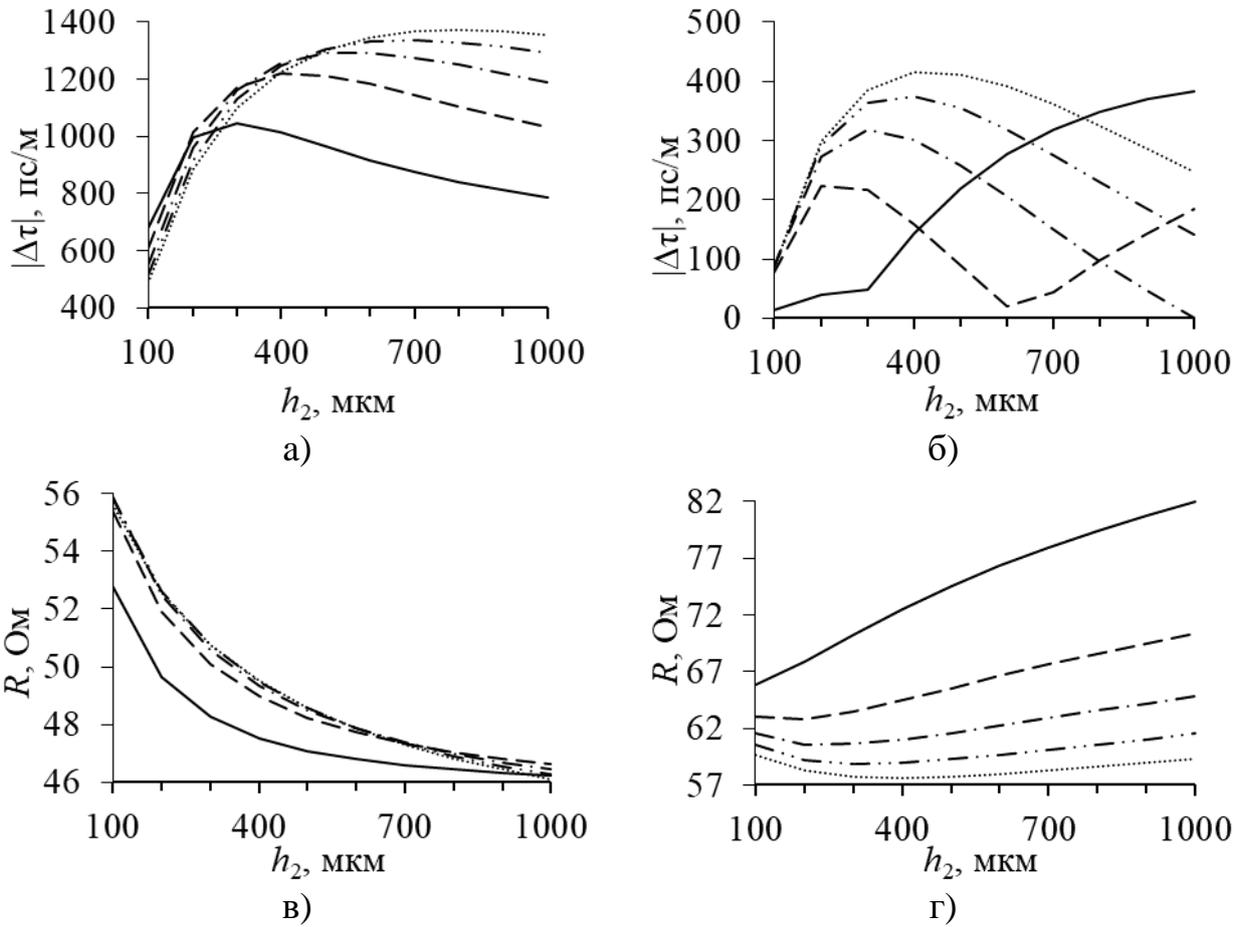
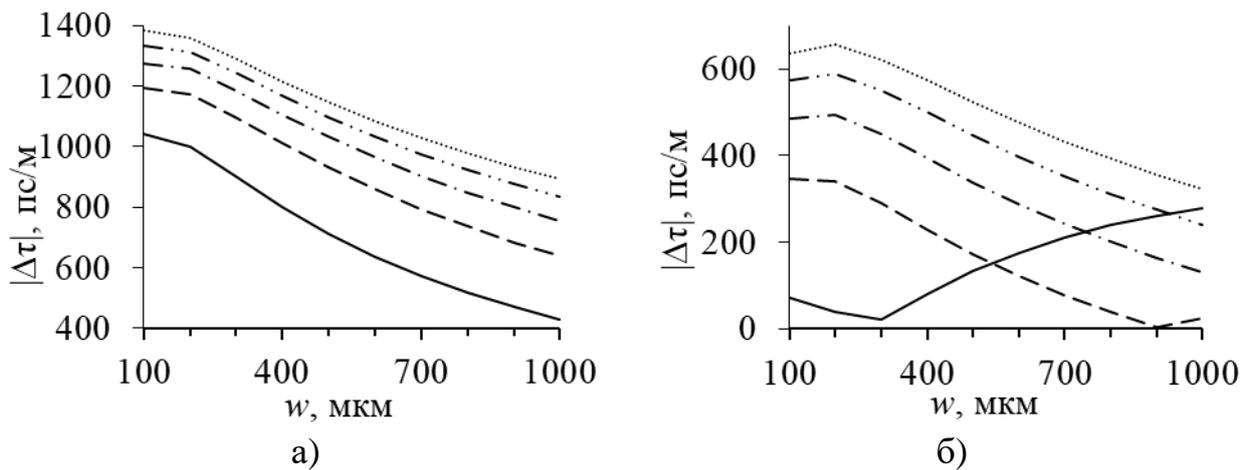


Рис. 10. Зависимости $|\Delta\tau|$ на внутреннем (а) и внешнем (б) и R на внутреннем (в) и внешнем (г) слоях от h_2 при h_1 и $w=200$ (—), 400 (---), 600 (-·-), 800 (- - -), 1000 (···)



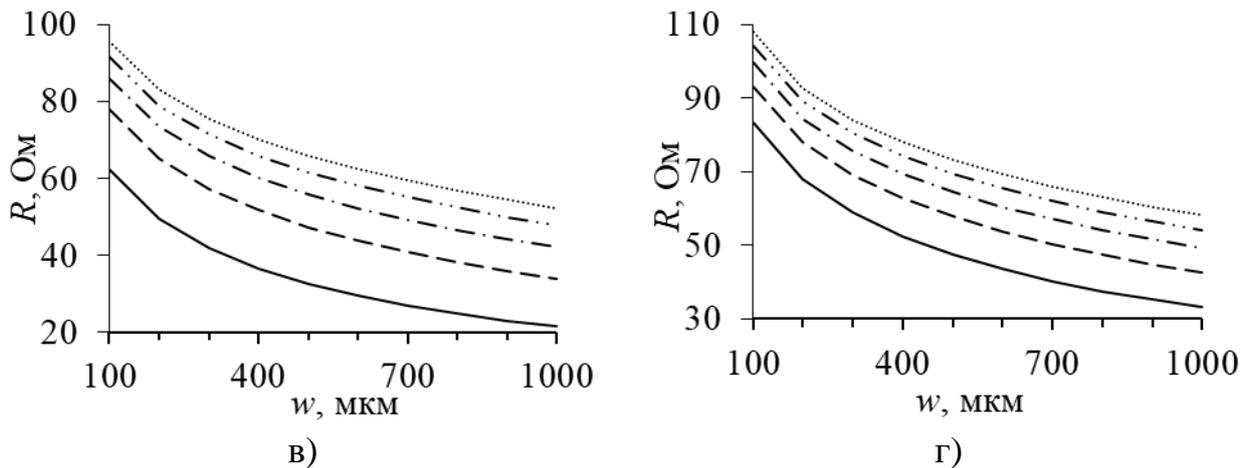


Рис. 11. Зависимости $|\Delta\tau|$ на внутреннем (а) и внешнем (б) и R на внутреннем (в) и внешнем (г) слоях от w при $h_1=200$ (—), 400 (- -), 600 (-·-), 800 (-··-), 1000 (···)

Таблица 5 – Оптимальные параметры (мкм) и их значения $|\Delta\tau|$ и R на внутреннем и внешнем слоях

№	w	s	t	h_1	h_2	$ \Delta\tau _{in}$, пс/м	$ \Delta\tau _{out}$, пс/м	R_{in} , Ом	R_{out} , Ом
1	200	200	18	1000	200	1358	656	83	93
2	1000	200	18	1000	400	1225	415	49,5	58

Таким образом, выполнена оптимизация структур ПП с двуслойным диэлектриком и МР. Получены наборы параметров, при которых достигается $|\Delta\tau|_{max}$ в обеих структурах, а также примерное согласование с трактом 50 Ом. Также у ряда графиков выявлены экстремумы, с нулевой чувствительностью к изменению параметра.

Оптимизация параметров структур генетическим алгоритмом

Четвертый этап работы заключался в оптимизации структур с помощью ГА [10], как по отдельности, так и при расположении на одной печатной плате. Для обеих структур w , h_1 и h_2 изменялись в диапазоне от 100 до 1000 мкм. Параметр s выбран минимально возможным ($s=200$ мкм) для обеих структур, а t на внутреннем и внешнем слоях – 18 и 105 мкм, соответственно. Для размещения на одной ПП $t=18$ мкм. На рис. 12 приведены зависимости отклонения $|\Delta\tau|$ (отличие в % между максимальным и минимальным значениями $|\Delta\tau|$ за 5 запусков), $|\Delta\tau|_{max}$ и среднего времени оптимизации одного запуска (T) от числа поколений при 5 и 15 особях в поколении. Наиболее приемлем выбор 5 особей и 25 поколений, так как он дал малое отклонение (0,39%) при небольшом времени расчета (в среднем 768), хоть и при некотором уменьшении $|\Delta\tau|_{max}$.

В ходе оптимизации структуры на внешнем и внутреннем слоях, получены наборы параметров, представленные в таблицах 6 и 7 соответственно. Они получены как в ходе ЭП, так и при оптимизации посредством ГА по одному и двум критериям.

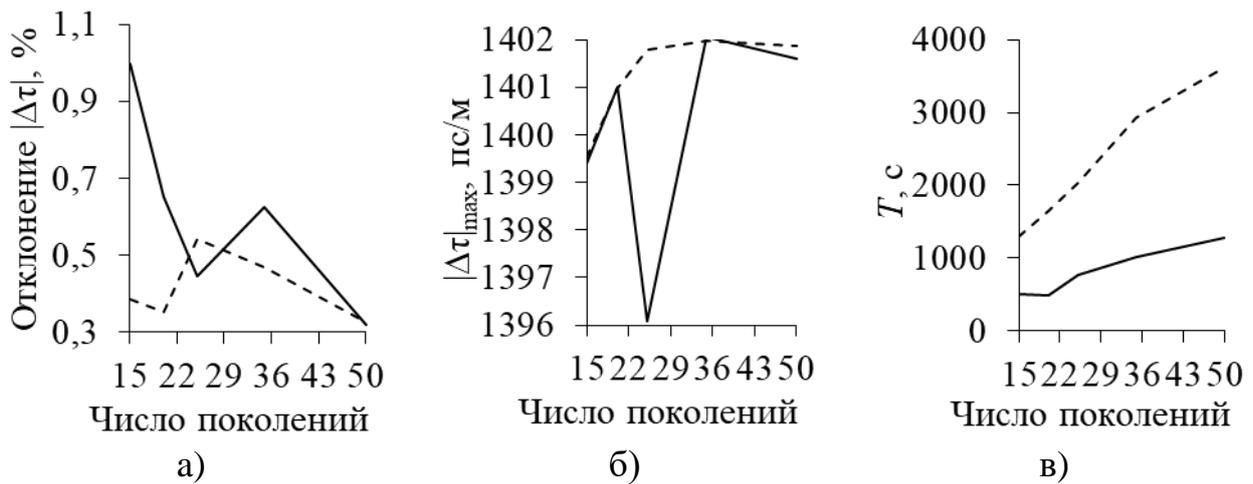


Рис. 12. Зависимости отклонения (а), $|\Delta\tau|_{\max}$ (б) и T (в) от числа поколений при 5 (—) и 15 (---) особях

Таблица 6 – Оптимальные наборы параметров (мкм) структуры с МР проводников на внешнем слое

№	Критерий	Метод	w	s	t	h_1	h_2	$ \Delta\tau $, пс/м	R , Ом
1	$ \Delta\tau \rightarrow \max$	ЭП	200	200	105	200	1000	918	75
2		ГА	1000	200	105	104	996	1197	43
3	$ \Delta\tau \rightarrow \max$ и $R \rightarrow 50$ Ом	ЭП	400	200	105	200	200	514	49
4		ГА	677	200	105	100	998	1154	50

Таблица 7 – Оптимальные наборы параметров (мкм) структуры с МР проводников на внутреннем слое

№	Критерий	Метод	w	s	t	h_1	h_2	$ \Delta\tau $, пс/м	R , Ом
1	$ \Delta\tau \rightarrow \max$	ЭП	100	200	18	1000	200	1382	94
2		ГА	435	200	18	1000	400	1402	64
3	$ \Delta\tau \rightarrow \max$ и $R \rightarrow 50$ Ом	ЭП	1000	200	18	1000	356	1177	50
4		ГА	855	200	18	1000	693	1381	50

При оптимизации структуры с проводниками на внешнем слое (таблица 6) по одному критерию, найдены наборы 1 (при ЭП) и 2 (при ГА), при которых $|\Delta\tau|$ максимально. Посредством ГА найден набор с $|\Delta\tau|$ на 13,2% больше, чем посредством ЭП. По двум критериям получились наборы 3 (при ЭП) и 4 (при ГА). Посредством ГА найден набор с $|\Delta\tau|$ на 38,4% больше, чем посредством ЭП. При этом, в обоих случаях выполнялось согласование R структуры с трактом 50 Ом.

Для внутреннего слоя (таблица 7) по одному критерию получились наборы 1 (при ЭП) и 2 (при ГА), при которых $|\Delta\tau|$ максимально. Набор параметров, определенный с помощью ГА, дал $|\Delta\tau|$ на 0,71% больше, чем при ЭП, тогда как R меньше на 18,52%. По двум критериям получились наборы 3 (при ЭП) и 4 (при ГА). С помощью ГА получено $|\Delta\tau|$ на 8% больше, чем с ЭП, тогда как R согласовано с трактом 50 Ом в обоих случаях.

При расположении на одной ПП получены наборы параметров, как в ходе ЭП, так и при оптимизации ГА по одному и двум критериям. Они представлены

в таблице 8, где $|\Delta\tau|$ и R структур на внутреннем и внешнем слоях обозначены как $|\Delta\tau|_{in}$, R_{in} и $|\Delta\tau|_{out}$, R_{out} соответственно.

Таблица 8 – Оптимальные наборы параметров структуры (мкм) с МР проводников на внутреннем и внешнем слоях, расположенных на одной ПП

Критерий	Метод	w	s	t	h_1	h_2	$ \Delta\tau _{in}$, пс/м	$ \Delta\tau _{out}$, пс/м	R_{in} , Ом	R_{out} , Ом
$ \Delta\tau \rightarrow \max$	ЭП	200	200	18	1000	200	1358	656	83	93
	ГА	284	200	18	1000	248	1381	644	75	85
$ \Delta\tau \rightarrow \max$ и $R \rightarrow 50$ Ом	ЭП	1000	200	18	1000	400	1225	415	50	58
	ГА	1000	200	18	1000	375	1199	411	50	57

При оптимизации структур на одной ПП по одному критерию, получены наборы, при которых $|\Delta\tau|$ максимальны в обеих структурах. Для ГА и ЭП значения $|\Delta\tau|$ примерно одинаковы, но у структуры на внутреннем слое больше, чем на внешнем. При оптимизации структур на одной ПП по двум критериям, получены наборы для ГА и ЭП. Результаты аналогичны, но $|\Delta\tau|$ ниже из-за согласования.

Выводы

Таким образом, проведены одновариантный анализ временного отклика и многовариантный анализ параметров структур с МР проводников на внутреннем и внешнем слоях и по полученным данным проведена оптимизация структур, с учетом согласования и без, по критерию максимизации модуля разности погонных задержек. Практическая значимость исследования определяется тем, что полученные данные могут быть использованы в задачах оптимизации структур, выполненных по аналогичной компоновке, и открывают возможности эффективной реализации сложных ПП с МР.

В ходе многовариантного анализа установлено, что на $|\Delta\tau|$ наибольшее влияние оказывают параметры h_1 , h_2 , t и w , s , h_1 для структуры на внешнем и внутреннем слоях соответственно, а на R – w и h_1 для обеих структур. Так же у графиков $|\Delta\tau|$ и R были выявлены экстремумы.

В ходе оптимизации с помощью ЭП определены оптимальные наборы параметров структур на внешнем и внутреннем слоях по критерию максимизации $|\Delta\tau|$, с учетом и без учета критерия согласования с трактом 50 Ом, по отдельности и при расположении на одной ПП. Так, при оптимизации по отдельности максимальные значения $|\Delta\tau|$ составили 1382 и 917 пс/м при одном критерии с $R=95$ Ом, 74 Ом, а при двух – 1225 и 489,4 пс/м у структур с проводниками на внутреннем и внешнем слоях соответственно. При расположении на одной ПП, максимальные $|\Delta\tau|$ составили 1358 и 656,14 пс/м при одном критерии с $R = 83, 92,8$ Ом, а при двух – 1225 и 415 пс/м при R равном 50 и 58 Ом у структур с проводниками на внутреннем и внешнем слоях соответственно.

С помощью ГА для структур по отдельности получились $|\Delta\tau|$ больше полученных при ЭП на 13,2 и 38,4 % для внешнего слоя и на 0,71 и 8 % для внутреннего. При оптимизации посредством ГА двух структур на одной ПП, значения задержек не сильно отличаются от полученных при ЭП, однако при двух-

критериальной оптимизации значение задержек, полученных с помощью ГА, даже стало меньше, что объясняется чуть лучшим согласованием с трактом 50 Ом второй структуры.

Полученные наборы параметров можно использовать для реализации различных задач при проектировании ПП. Например, параметры, полученные при оптимизации только по критерию максимизации $|\Delta t|$, можно использовать в цифровых цепях, где рабочая частота схемы небольшая и не требуется согласование линий передачи с трактом. Параметры, оптимизированные по двум критериям, можно использовать в радиочастотных и СВЧ схемах, где требуется согласование линии передачи с трактом. Выбор значений параметров вблизи экстремумов можно использовать для минимизации изменений характеристик при производственном разбросе параметров.

Полученные в данной работе результаты будут использованы в дальнейшем исследовании, предполагающем создание реального макета ПП с целью проведения измерений. Кроме того, целесообразно детально исследовать выявленные экстремумы в зависимостях, поскольку это важно на практике.

Работа выполнена при финансовой поддержке российского научного фонда (проект № 19-19-00424) в ТУСУРе.

Литература

1. IEC 61508-1:2010. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. Part 1: General requirements. Edition 2.0 2010-04. Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC), 2010. 127 p.
2. Шарафутдинов В. Р., Газизов Т. Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 117-144.
3. Резервирование // Надежность технических систем и техногенный риск. Электронное учебное пособие [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.obzh.ru/nad/4-4.html> (дата обращения: 12.07.2023).
4. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ трассировки печатных проводников цепей с резервированием // Патент на изобретение № 2603850, опубл. 10.12.2016, бюл. № 34.
5. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ резервирования для печатных плат // Патент на изобретение № 2603843, опубл. 10.12.2016, бюл. № 34.
6. Газизов Т. Р., Орлов П. Е., Шарафутдинов В. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Буичкин Е. Н. Способ компоновки печатных плат для цепей с резервированием // Патент на изобретение № 2614156, опубл. 23.03.2017, бюл. № 9.
7. Медведев А. В., Алхадж Х. А., Кузнецова-Таджибаева О. М., Газизов Т. Р. Способ трассировки печатных проводников на двуслойной

печатной плате для цепей с резервированием // Патент на изобретение №. 2752233, опубл. 23.07.2021, бюл. № 21.

8. Medvedev A. V. Interconnect Routing on Two Signal Layers of a Modal Reservation PCB: a Case Study // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Chelyabinsk, Russia. 2022. P. 301–306.

9. 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. 2019. № 012110. P. 1–7.

10. Газизов Т. Т., Мелкозеров А. О. Оптимизация генетическими алгоритмами: учебное пособие. – Томск: В-Спектр, 2017. – 30 с.

References

1. IEC 61508-1:2010. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. Part 1: General requirements. Edition 2.0 2010-04. Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC), 2010. 127 p.

2. Sharafutdinov V. R., Gazizov T. R. Analiz sposobov rezervirovaniya na osnove modalnoy filtratsii [Analysis of redundancy methods based on modal filtering]. *Sistemi Ypravleniya, Svazi i Bezopasnosti*, 2019, no. 3, pp. 117–144 (in Russian).

3. Reservirovanie [Reservation]. *Reliability of technical systems and technogenic risk. E-tutorial*. Available at: <http://www.obzh.ru/nad/4-4.html> (accessed 12 June 2023) (in Russian).

4. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafutdinov V. R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. *Sposob trassirovki peshatnih provodnikov chepei s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors of circuits with redundancy]. Patent Russia, no. 2603850, 2016.

5. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafutdinov V. R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. *Sposob rezervirovaniia dlya peshatnih plat* [Reservation method for printed circuit boards]. Patent Russia, no. 2603843, 2016.

6. Gazizov T. R., Orlov P. E., Sharafutdinov V. R., Kuznetsova-Tadzhibaeva O. M., Zabolotsky A. M., Kuksenko S. P., Buichkin E. N. *Sposob kompanovki peshatnih plat dlya cepei s rezervirovaniem* [Printed circuit boards with reserve circuits arrangement method]. Patent Russia, no. 2614156, 2017.

7. Medvedev A. V., Alkhadzh H. A., Kuznetsova-Tadzhibaeva O. M., Gazizov T. R. *Sposob trassirovki peshatnih provodnikov na dvusloinoy pechatnoy plati dlya cepei s rezervirovaniem* [Method of routing printed conductors on a two-layer circuit board for circuits with redundancy]. Patent Russia, no. 2752233, 2021.

8. Medvedev A. V. Interconnect Routing on Two Signal Layers of a Modal Reservation PCB: a Case Study. 2022 *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Chelyabinsk, Russia. 2022. pp. 301–306.

9. 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, no. 012110, pp. 1–7.

10. Gazizov T. T., Melkozerov A. O., *Optimizaciya geneticheskimi algoritmi: Uchebnoe posobie* [Optimization by genetic algorithms: Manual]. Tomsk, V-Spectr, 2017, 30 p. (in Russian).

Статья поступила 20.07.2023.

Информация об авторах

Морозов Сергей Романович – инженер научно-исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости. Магистрант кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, устройства защиты, модальное резервирование. E-mail: pred11072@yandex.ru

Медведев Артём Викторович – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости. Аспирант кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, устройства защиты, модальное резервирование. E-mail: medart20@rambler.ru

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40.

Quasi-static analysis and optimization of a multilayer PCB with modal reservation and a two-sided routing

S. R. Morozov, A. V. Medvedev

Problem statement: For the development of radio-electronic equipment (REA), attention must be paid to ensuring functional safety and electromagnetic compatibility. This process should involve all stages of equipment manufacturing. Conductive ultra-wideband interference (UWBI) is a dangerous type of interference for REA. Modal reservation (MR) is used to prevent the influence of UWB and to increase the functional safety of the REA. There are a number of ways to layout printed circuit boards (PCBs) with MR, but their disadvantage is the complexity of tracing with a large number of electronic circuit elements. However, there is a method that allows the conductor tracing of electronic circuits with a large number of components by arranging the conductors on the outer and inner layers of the PCB and tracing them orthogonally. At the same time, the analysis and optimisation of PCB structures developed by this method have not been carried out. Meanwhile, when trying to optimise the parameters of structures with conductors on the inner and outer layers of the PCB (their geometrical and electrophysical parameters are common), changing the initial set of parameters of the cross-section of the structures led to a change in the modulus of the difference between the delay per unit length and the average geometrical impedances of even and odd modes in different ways. For example, if modulus of the difference between the delay per unit length increased for one structure when increasing one general parameter, it could decrease for another structure. This leads to difficulties in the process of optimisation of these structures on one PCB, because without information on the nature of dependences of characteristics on the cross-sectional parameters of these structures it is impossible to correctly determine the optimal common set of parameters. Therefore, when determining the maximum values of modulus of the difference between the delay per unit length, with and without matching, for these structures, it is necessary to carry out a comprehensive study including analysis and optimisation of the structures **The pur-**

*pose of this work is to conduct such a study. **Methods used:** Univariate and multivariate analyses were used to analyse the dependencies of the structures considered, and heuristic search and genetic algorithm were used for optimisation. **Novelty:** For the first time, the dependences of the parameters of structures with MR conductors on the outer and inner layers are analyzed, and their optimization is carried out. **Result:** Information was obtained on the nature of the dependences of the parameters of each of the structures under study, and the optimal sets of parameters were determined. The possibilities of obtaining zero sensitivity of the characteristics of structures to changes in individual parameters are revealed. **Practical relevance:** The data obtained can be used to develop software with MR.*

***Key words:** electromagnetic compatibility, printed circuit board, modal filtering, modal reservation, univariate analysis, multivariate analysis, heuristic search, genetic algorithm.*

Information about Authors

Sergei Romanovich Morozov – engineer of the research laboratory for fundamental research on electromagnetic compatibility. Master student of the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, protection devices, modal redundancy. E-mail: pred11072@yandex.ru

Artem Viktorovich Medvedev – research assistant of the research laboratory for fundamental research on electromagnetic compatibility. Graduate student of the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, protection devices, modal redundancy. E-mail: medart20@rambler.ru

Address: Russia, 634035, Tomsk, Lenina prospect, 40.