

УДК 621.372

Анализ характеристик трёхпроводного модального фильтра в экстремальных условиях

Белоусов А. О., Гордеева В. О.

Постановка задачи: проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) современных радиоэлектронных средств (РЭС) все больше актуализируется с каждым годом. Причиной этому служит растущая функциональная сложность РЭС и тенденция к их миниатюризации, в т.ч. за счет увеличения плотности монтажа трассировки печатных плат (ПП). Электромагнитные помехи (ЭМП) различной природы способны привести к дестабилизации и разрушению элементов критичных РЭС. Под ними понимаются такие РЭС, выход из строя которых влечет за собой различные негативные последствия. Одним из видов ЭМП искусственной природы, отличающихся высоким напряжением, малой длительностью и широким спектром, являются сверхкороткие импульсы (СКИ). Последняя декада отмечена активным исследованием защитных структур с модальными явлениями для защиты критичных РЭС от СКИ, отличающихся рядом достоинств по сравнению с традиционными защитными устройствами. Принцип действия таких структур заключается в разложении СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды из-за различия задержек мод в линии передачи. Их называют модальными фильтрами (МФ) и реализуют как в полосковом, так и в кабельном исполнениях. При проектировании МФ, одним из важнейших этапов является оптимизация, возможности которой, применительно к МФ, в настоящее время исследованы недостаточно. Кроме этого, без должного внимания остается вопрос функционирования МФ в экстремальных условиях. В частности, целесообразна оценка защитных характеристик МФ (ослабления СКИ, разности погонных задержек мод и др.) при воздействии температуры и влаги. Наконец, представляется важным определение оптимальных значений геометрических параметров МФ в экстремальных условиях и оценка возможности сохранения требуемых защитных характеристик. **Целью работы** является исследование защитных характеристик МФ на основе 3-проводной микрополосковой линии (МПЛ) при влиянии температуры и влаги при одно- и двухкритериальной оптимизации. **Используемые методы:** при вычислениях использована система квазистатического моделирования, основанная на методе моментов, а при оптимизации использовались простой генетический алгоритм (ГА) и модифицированный алгоритм эволюционных стратегий (ЭС). Оптимизация выполнялась по амплитудному критерию и критерию согласования. Моделирование влияния температуры выполнено с учетом известной модели вида $P(T)$ с учетом термического изменения геометрических и электрофизических параметров МПЛ. **Новизна:** впервые выполнена одно- и двухкритериальная оптимизация с использованием ГА и модифицированного алгоритма ЭС МФ на основе 3-проводной МПЛ при влиянии температуры и влаги. Достигнута высокая сходимость результатов при оптимизации: отклонение максимального значения напряжения на выходе МФ не превышает 1% при использовании температурной модели и 6% при исследовании влияния влаги. В результате двухкритериальной оптимизации получены равные амплитуды импульсов разложения на выходе МФ при согласовании МФ с трактом. Установлено, что наименьшее значение максимального напряжения на выходе МФ достижимо при более низкой температуре окружающей среды. Продемонстрирован рост результирующего значения максимального напряжения на выходе при моделировании МФ с учетом конденсата. **Результат:** в результате двухкритериальной оптимизации удалось получить равные амплитуды импульсов разложения на выходе МФ при его согласовании с трактом. Таким образом, продемонстрирована возможность обеспечения высоких защитных характеристик МФ на основе 3-

Библиографическая ссылка на статью:

Белоусов А. О., Гордеева В. О. Анализ характеристик трёхпроводного модального фильтра в экстремальных условиях // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 64-82. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-64-82

Reference for citation:

Belousov A. O., Gordeyeva V. O. Analysis of the characteristics of three-conductor modal filter under extreme conditions. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 4, pp. 64-82 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-64-82

проводной МПП в экстремальных условиях. **Практическая значимость:** выявленные особенности поведения защитных характеристик МФ при воздействии температуры и влаги, а также их высокий уровень при функционировании в подобных средах, открывают возможность детализации и оценки параметрических и электрофизических параметров ПП, в т.ч. за счет оптимизации, с учетом воздействий окружающей среды еще на этапе проектирования ПП. Наконец, открывается возможность практического применения исследуемого МФ для защиты РЭС от СКИ (ввиду малой массы, радиационной стойкости, надежности и улучшенных характеристик) в самых различных сферах, в т.ч. в экстремальных условиях.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, сверхкороткий импульс, модальная фильтрация, модальный фильтр, микрополосковая линия, оптимизация, генетический алгоритм, эволюционные стратегии, влияние температуры, влияние влаги.

Введение

Стремительное развитие современных радиоэлектронных средств (РЭС) с каждым годом все сильнее обращает внимание общественности на обеспечение должного уровня электромагнитной обстановки для их корректной работы. Известно, что самые различные электромагнитные помехи (ЭМП) могут приводить к дестабилизации и разрушению критичных РЭС [1]. Это такие РЭС, функционирование которых на должном уровне является приоритетной задачей, поскольку нарушение режима их работы может повлечь за собой различные негативные последствия. В общем случае различают излучаемые и кондуктивные ЭМП [2]. Вторые заслуживают отдельного внимания, поскольку распространяются непосредственно по проводникам. Источниками таких ЭМП могут выступать коммутации токовых цепей, удары молнии, электростатические разряды, преднамеренные импульсные воздействия сверхширокополосными (СШП) помехами и др. [3]. Последний вариант представляет наибольший интерес ввиду своих особенностей. Так, в качестве СШП помех могут выступать сверхкороткие импульсы (СКИ), обладающие субнаносекундным временем нарастания и высоким уровнем напряжения. Несмотря на небольшую энергию СКИ, ввиду их локализации в критичных узлах, они способны нанести существенные повреждения компонентам РЭС, нарушив режим их работы или даже выведя их из строя. В настоящее время, для защиты РЭС от СКИ предложена технология модальной фильтрации. Реализация данной технологии возможна как на структурах в виде печатных плат (ПП), так и кабелей. Ее принцип заключается в разложении СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды из-за различия задержек мод в линии передачи. Устройства, функционирующие на основе данного принципа, называют модальными фильтрами (МФ) [4].

При проектировании МФ особую важность представляет выбор оптимального набора геометрических и электрофизических параметров разрабатываемой структуры (в основном, из-за специфики требований, предъявляемых к МФ). Для поиска такого набора параметров применяются различные методы оптимизации. Они подразделяются на локальные (если метод ориентирован на определение локального экстремума) и глобальные (когда результатом ожидается глобальный экстремум) [5]. Полосковые МФ, как правило, оптимизируются с помощью эволюционных алгоритмов (ввиду наличия большого числа ло-

кальных экстремумов, оптимизируемых параметров и ряда критериев оптимизации, применяемых к МФ одновременно), таких как генетический алгоритм (ГА) и эволюционные стратегии (ЭС) [6]. Кроме этого, при учете эксплуатационных характеристик, важна оценка влияния внешних факторов (например, температурных воздействий, а также влаги) на функционирование МФ, ввиду риска деформации элементов ПП под влиянием температур и внесения дополнительных модальных искажений под влиянием влаги [7]. Между тем задача обеспечения должных защитных характеристик МФ (посредством оптимизации) в экстремальных условиях ранее не ставилась, но это актуально. Исходя из этого, представляется возможным спрогнозировать поведение МФ, на примере 3-проводной микрополосковой линии (МПЛ), еще на этапе моделирования. Поэтому целью данной работы является исследование защитных характеристик МФ на основе 3-проводной МПЛ при влиянии температуры и влаги при одно- и двухкритериальной оптимизации.

Основные подходы к моделированию и оптимизации

При моделировании сначала строилась геометрическая модель поперечного сечения МФ. Затем вычислялись матрицы погонных коэффициентов электростатической (C) и электромагнитной (L) индукций. Для вычисления откликов составлялась схема для моделирования, задавались нагрузки и воздействие, после чего вычислялись временные отклики на импульсное воздействие в диапазоне параметров. Моделирование выполнялось в системе квазистатического моделирования TALGAT, которая дает приемлемую точность и не требует высоких вычислительных затрат [8]. Матрицы потерь в проводниках (R) и диэлектриках (G) принимались равными нулю для исключения их влияния на данном этапе исследования.

Исследовался МФ на основе 3-проводной МПЛ, представляющий собой 3 проводника на диэлектрической подложке, под которой расположена опорная плоскость. Геометрическая модель поперечного сечения МФ представлена на рис. 1а (где проводники А – активный, П – пассивные, w – ширина проводников, s_i – расстояния между ними, t – толщина проводников, h – толщина диэлектрика, d – расстояние от края МПЛ до ближайшего крайнего проводника, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки), а эквивалентная схема – на рис. 1б (воздействие – трапецеидальный импульс с амплитудой ЭДС 1 В и длительностями фронта, спада и плоской вершины по 150 пс; длина МФ – 60 см; нагрузки на концах всех проводников (R) по 50 Ом).

Оптимизация выполнялась при последовательном увеличении числа вычислений от 500 до 1000. Одно- и многовариантный анализ, предшествующий оптимизации, не выполнялся во избежание дублирования материала, ввиду разностороннего исследования данного МФ ранее [9]. По этой же причине, для рассматриваемого МФ заранее известны диапазоны параметров, в которых лежит искомый глобальный экстремум, соответствующий рассматриваемым критериям оптимизации. Так, интерес представляет непосредственно степень «смещения» глобального экстремума, соответствующего оптимальным характеристикам МФ при влиянии температуры и влаги.

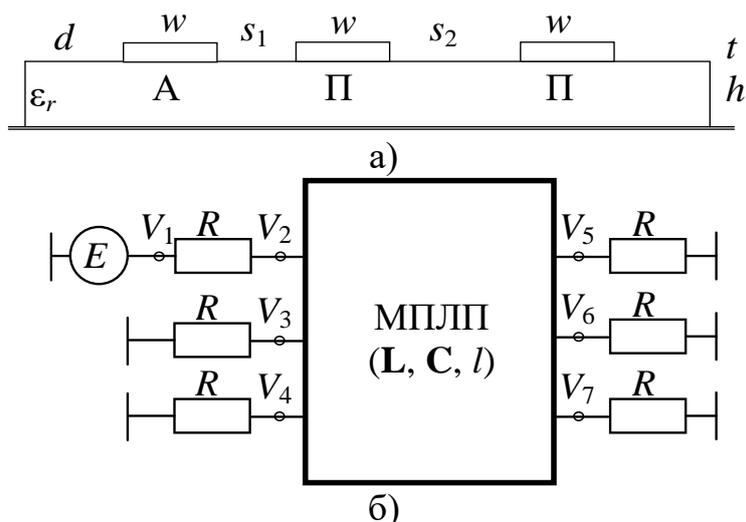


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема (б) МФ на основе 3-проводной МПЛ

При оптимизации с помощью ГА и ЭС диапазоны оптимизируемых параметров приняты следующими: 100–300 мкм для h , 20–200 мкм для t , 100–300 мкм для s_1 , 400–600 мкм для s_2 . Остальные параметры приняты неизменными: $w=1000$ мкм (при однокритериальной оптимизации) и 500 мкм (при двухкритериальной оптимизации), расстояние от проводников до края структуры $d=3w$ при $\epsilon_r=4,6$. При оптимизации с помощью ГА использовался простой ГА с параметрами: число особей – 10; число поколений – 50 и 100; коэффициент мутации 0,1; коэффициент кроссовера 0,5; число бит для кодирования каждого параметра – 10. При оптимизации с помощью ЭС применялась открытая библиотека *barectaes2* с алгоритмом на языке Python [10]. Она включает в себя сокращенный алгоритм ЭС с основным функционалом ЭС, но без некоторых функций, присутствующих в полной версии библиотеки. К сожалению, при использовании данной библиотеки отсутствует возможность задания диапазонов оптимизируемых параметров. При оптимизации данного МФ это приводит к тому, что значение h стремится к нулю и далее в отрицательную область, что дает нефизичные результаты. Поэтому при вычислениях использован модифицированный алгоритм ЭС, который, в отличие от классического, позволяет выставить диапазоны оптимизируемых параметров, при этом затрачивая больше времени на оптимизацию (по сравнению с классическим алгоритмом), однако лучше себя проявляя при нахождении глобального экстремума ЦФ [11]. Число вычислений при оптимизации посредством ЭС принималось равным 1000 (для качественного сравнения с ГА с числом особей 10 и числом поколений 100). В качестве входных параметров для алгоритма ЭС принимается список из начальных точек, от которых выполнялся поиск оптимальных значений с заданным шагом, равным 10 мкм. Так, начальными точками отсчета выбраны середины диапазонов оптимизируемых параметров, а именно: $h=200$ мкм, $t=100$ мкм, $s_1=200$ мкм, $s_2=500$ мкм. Кроме этого, оптимизация посредством ЭС выполнялась на ПК, отличном от основного (с меньшей производительностью, относительно ПК, на котором выполнялась оптимизация посредством ГА). Так,

на один запуск, в среднем, уходило в 1,5 раза больше времени, чем при запусках ГА. Поэтому корректное сравнение времени вычислений при оптимизации с помощью ЭС с оптимизацией посредством ГА в работе не представляется возможным.

Оптимизация выполняется по критериям: амплитудному (посредством ГА и ЭС); амплитудному и согласования (для ГА). Первый критерий важен для минимизации максимального уровня выходного напряжения на выходе МФ. Второй необходим для минимизации отражений полезных высокочастотных сигналов от входа МФ. На основе [9] сформулируем общую целевую функцию (ЦФ) F для одновременной оптимизации по амплитудному критерию и критерию согласования.

$$F = M_1 \frac{\max(U(t))}{\max(E(t))} + M_2 \frac{|\max(E(t)) - 2 \max(U_{\text{вх}}(t))|}{\max|E(t)|},$$

где M_i – весовой коэффициент i -го критерия, $i=1, 2, \dots, N_c$, где N_c – число критериев оптимизации, а $U(t)$ – напряжение на выходе МФ, $E(t)$ – напряжение ЭДС источника и $U_{\text{вх}}(t)$ – напряжение на входе МФ. Значения весовых коэффициентов приняты равными 0,5.

Отклонения результатов оптимизации рассчитаны по формуле

$$a = \left| \frac{X1 - X2}{X1 + X2} \right| \cdot 100\%,$$

где $X1$ – максимальное значение, $X2$ – минимальное значение.

В качестве подхода к моделированию температуры использована простая температурная модель вида $P(T)$, где P – какая-либо из характеристик структуры, а T – текущая температура окружающей среды. Модель термического изменения каждого из параметров МФ имеет вид

$$x = x_0(1 + \alpha \Delta T),$$

где x – значение параметра МПЛП с учетом термического расширения; x_0 – исходное значение этого параметра; α – коэффициент линейного термического расширения материала; ΔT – разница температур. Значение α для меди принято равным $17 \cdot 10^{-6}$ ($1/^\circ\text{C}$) в соответствии с [12], а для диэлектрической основы, в качестве которой взят материал FR-4, по оси Z – $70 \cdot 10^{-6}$ ($1/^\circ\text{C}$), а по осям X и Y – $17 \cdot 10^{-6}$ ($1/^\circ\text{C}$) [13].

Температурная зависимость ϵ_r учтена аналогично. Для FR-4 коэффициент α получен следующим образом. На основе данных из работы [7] вычислен абсолютный коэффициент изменения ϵ_r от T как

$$\alpha_0 = \frac{\epsilon_{r\text{max}} - \epsilon_{r\text{min}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}},$$

где T_{max} и T_{min} – максимальное и минимальное из значений диапазона температур, а $\epsilon_{r\text{max}}$ и $\epsilon_{r\text{min}}$ – максимальное и минимальное из значений диэлектрической проницаемости для крайних точек диапазона T . На рис. 2 приведены зависимости ϵ_r от T для разных частот, из которых следует, что $\alpha_0 = -0,003$ ($1/^\circ\text{C}$). Тогда, разделив α_0 на среднее значение $\epsilon_r = 5,6$ (при $T \approx 25$ $^\circ\text{C}$), получим $\alpha = -5,35 \cdot 10^{-4}$ ($1/^\circ\text{C}$).

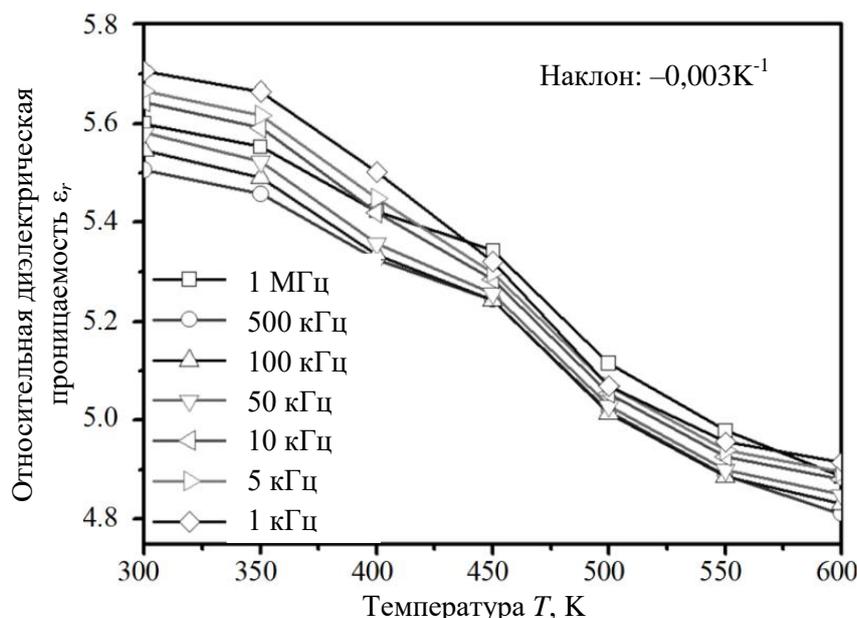


Рис. 2. Зависимость $\epsilon_r(T)$ для разных частот из [7]

Результаты моделирования и оптимизации МФ при влиянии температуры

Здесь приведены результаты исследования МФ на основе 3-проводной МПЛ с использованием температурной модели. Оптимизация МФ выполнялась при крайних (минус 50°C и 150°C) и среднем (25°C) значениях температур. Приведены значения оптимизируемых параметров h, t, s_1, s_2 , а также максимальный уровень выходного напряжения ($U_{\text{вых}}$) и общее время расчета. Для начала выполнена оптимизация только по амплитудному критерию (минимизация $U_{\text{вых}}$ на выходе МФ) посредством ГА при 500 вычислениях (10 особей и 50 поколений). Результаты такой оптимизации представлены в таблице 1, где m – среднее значение параметров, Δ – отклонение параметров. На рис. 3 показаны формы ЭДС и напряжения на входе и выходе МФ после оптимизации.

Таблица 1 – Результаты 5 запусков ГА при -50, 25 и 150°C по амплитудному критерию при 500 вычислениях

№	h , МКМ			t , МКМ			s_1 , МКМ			s_2 , МКМ			$U_{\text{вых}}$, МВ			Время, с		
	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°
1	99,5	100,8	100,9	167,3	139,3	161,5	287,8	299,2	300,6	416,0	436,1	439,3	114,8	117,8	120,0	2018	1962	1939
2	100,3	100,0	102,5	154,6	147,0	199,0	290,2	296,9	283,3	423,7	429,8	416,6	115,1	116,2	120,2	1999	1983	1950
3	100,3	100,8	100,9	198,3	168,9	124,1	280,0	282,0	298,2	405,8	409,4	433,8	114,7	116,7	120,3	1500	1950	1952
4	101,1	101,6	100,9	185,0	199,3	151,6	292,5	291,4	275,5	421,5	425,1	404,6	115,3	116,8	119,9	2019	1972	1931
5	99,5	100,8	103,3	173,7	159,1	198,3	278,4	274,9	281,0	407,3	406,3	410,3	114,4	117,3	120,0	1459	1948	1929
m	100,1	100,8	101,7	175,8	162,7	166,9	285,8	288,9	287,2	414,9	421,3	420,9	114,9	117,0	120,1	1799	1963	1940
$\Delta, \%$	0,4	0,8	1,2	12,4	17,7	23,2	2,5	4,2	4,4	2,2	3,5	4,1	0,4	0,7	0,2	16,1	0,9	0,6

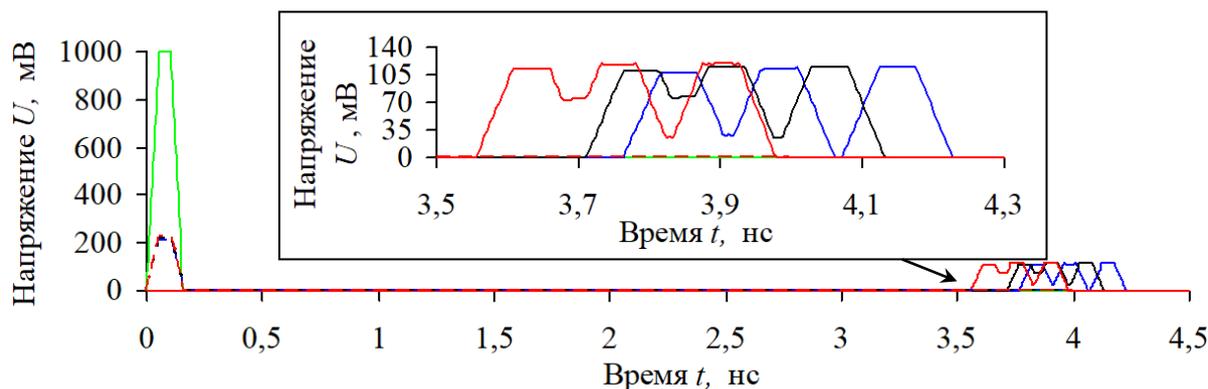


Рис. 3. Формы ЭДС (—) и напряжения на входе МФ при минус 50 (---), 25 (---), 150 (— · —) °С и выходе МФ при минус 50 (—), 25 (---), 150 (— · —) °С после оптимизации посредством ГА по амплитудному критерию при 500 вычислениях

Из таблицы 1 видно, что при увеличении температуры (от минус 50°С до 150°С) t для всех оптимизируемых параметров незначительно увеличиваются (например, на 1,53% для h). Также, с увеличением температуры, ввиду учета термического расширения всех параметров МПЛ, аналогично увеличиваются значения фиксированных параметров w и d (с 998,7 до 1002 мкм и с 299,2 до 301,2 мкм, соответственно). Значение $U_{\text{вых}}$ также увеличивается: с ростом температуры на 40°С, в среднем, на 1 мВ. В результате оптимизации удалось получить наименьший уровень $U_{\text{вых}}$, составляющий 114,4 мВ (при минус 50°С), что в 2 раза меньше уровня входного напряжения ($U_{\text{вх}}$). При этом наибольшее значение Δ наблюдается у параметра t , поскольку его изменение оказывает меньшее влияние (по сравнению с другими параметрами) на достижение экстремума данной ЦФ, состоящей из одного критерия. В то же время, значение Δ для $U_{\text{вых}}$ составляет менее 1%, что говорит о хорошей сходимости вычислений. Значение t для одного запуска, при температуре минус 50°С, составило 1799 с, при 25°С – 1963 с, а при 150°С – 1940 с. Из рис. 3 видно, что, несмотря на частичное наложение фронтов и спадов импульсов разложения, результирующее значение $U_{\text{вых}}$ не превышает 120,3 мВ для 150°С, а критерий достигается при выравнивании амплитуд мод импульсов разложения.

Далее выполнена аналогичная оптимизация, но при 1000 вычислениях (10 особей и 100 поколений), результаты которой представлены в таблице 2. На рис. 4 показаны формы ЭДС, напряжения на входе и выходе МФ после оптимизации.

Видно, что, по сравнению с оптимизацией при 500 вычислениях, значение Δ для оптимизируемых параметров уменьшается (например, с 0,8% до 0,4% для h , с 17,7% до 9,1% для t , с 4,2% до 3% для s_1 , с 3,5% до 2,6% для s_2 при 25°С). Значение Δ для ЦФ также уменьшается при температурах минус 50°С и 25°С и во всех случаях также остается в пределах 1%. Однако, при большем числе вычислений, время расчетов увеличивается примерно в 2 раза (значение t для одного запуска при температуре минус 50°С – 3900 с, при 25°С – 3860 с, при 150°С – 4105 с). Минимальное значение $U_{\text{вых}}$ наблюдается также при тем-

пературе минус 50°С и составляет 114,3 мВ, что в 2 раза меньше уровня $U_{вх}$. Из представленных таблиц 1–2 видно, что ГА сходится к одному и тому же значению ЦФ уже при 500 вычислениях. Это подтверждает нахождение глобального экстремума ЦФ, который изменяется при крайних значениях температуры.

Таблица 2 – Результаты 5 запусков ГА при -50, 25 и 150°С по амплитудному критерию при 1000 вычислениях

№	h , МКМ			t , МКМ			s_1 , МКМ			s_2 , МКМ			$U_{вых}$, мВ			Время, с		
	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°
1	99,5	100,0	100,9	170,1	163,3	199,0	277,6	278,0	287,3	405,8	404,7	418,1	114,3	116,4	118,9	3962	3871	3902
2	99,5	100,0	100,9	190,6	178,8	176,4	284,7	287,5	287,3	412,0	416,5	417,4	114,7	116,6	118,8	3927	3856	3874
3	99,5	100,0	102,5	174,4	192,9	187,7	276,1	276,5	281,8	404,2	407,8	412,6	114,7	116,9	120,0	3838	3873	4180
4	100,3	100,0	100,9	198,3	181,6	127,6	280,0	293,7	292,8	406,5	425,1	425,2	114,8	116,3	119,9	3864	3850	4254
5	100,3	100,8	100,9	196,2	195,8	165,0	277,7	292,2	294,3	403,4	425,9	426,0	114,4	116,7	119,7	3914	3852	4316
m	99,8	100,2	101,2	185,9	182,5	171,1	279,2	285,6	288,7	406,4	416,0	419,9	114,6	116,6	119,5	3901	3860	4105
Δ ,%	0,4	0,4	0,8	7,6	9,1	21,9	1,5	3	2,2	1,1	2,6	1,6	0,2	0,3	0,5	1,6	0,3	5,4

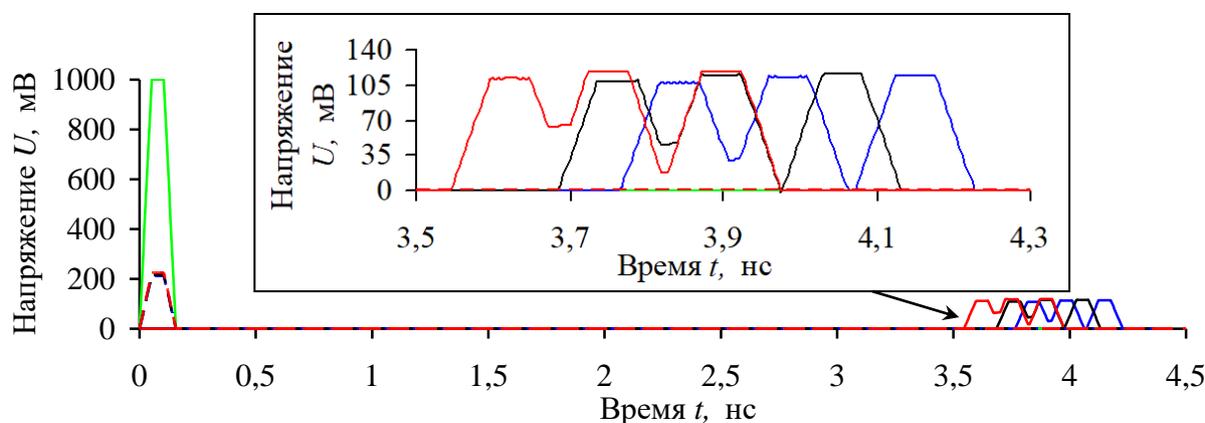


Рис. 4. Формы ЭДС (—) и напряжения на входе МФ при минус 50 (---), 25 (---), 150 (---) °С и выходе МФ при минус 50 (—), 25 (—), 150 (—) °С после оптимизации посредством ГА по амплитудному критерию при 1000 вычислениях

Из рис. 3 и 4 видно, что при оптимизации, импульсы 1 и 2 (а в некоторых случаях также 2 и 3 импульсы) на выходе МФ частично накладываются друг на друга. Также видно, что температура 150°С является причиной более раннего прихода импульсов в конец МФ (около 3,56 нс), по сравнению с 25°С (около 3,71 нс) и минус 50°С (около 3,764 нс). В то же время, из рис. 3 и 4 видно, что имеет место рассогласование линии с трактом ввиду несоблюдения условия равенства напряжения на входе половине ЭДС источника (критерий согласования) [9]. Кроме этого, видно, что во всех случаях сходимость ЦФ достигалась при полном рассогласовании МФ с трактом (при ЭДС 1В, значение $U_{вх}$ составляет примерно 0,2 В). Поэтому важно также оценить возможность минимизации значения $U_{вых}$ при согласовании МФ с трактом.

Для этого выполнена двухкритериальная оптимизация: одновременно по амплитудному критерию и критерию согласования. Ее результаты при 500 вычислениях для крайних (минус 50°С и 150°С) и среднего (25°С) значений температур представлены в таблице 3. Значения t для $U_{вх}$ для минус 50°С,

25°C и 150°C составили 501,2, 509,1 и 517,7 мВ, соответственно. На рис. 5 показаны формы ЭДС, напряжения на входе и выходе МФ после оптимизации.

Таблица 3 – Результаты 5 запусков ГА при -50, 25 и 150°C по двум критериям при 500 вычислениях

№	h , МКМ			t , МКМ			s_1 , МКМ			s_2 , МКМ			$U_{\text{вых}}$, мВ			Время, с		
	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°
1	296,8	299,2	297,1	20,7	24,9	20,0	280,0	293,7	200,0	558,5	552,9	453,5	172,8	170,3	173,3	1974	1957	1953
2	297,6	300,0	301,0	27,1	20,7	30,0	276,1	292,9	264,5	530,3	559,2	540,7	170,6	170,8	174,8	2059	1948	1950
3	296,8	299,2	301,0	29,2	25,6	22,1	193,1	292,9	209,4	451,2	552,2	477,9	175,9	169,3	174,5	1982	2006	1951
4	296,8	297,6	302,6	24,2	28,5	23,3	205,6	299,2	299,8	450,4	543,5	583,2	170,6	168,0	173,9	1987	1986	1959
5	298,4	296,1	301,8	20,0	24,2	23,5	251,1	298,4	268,4	506,7	552,9	539,1	170,2	169,6	173,2	1925	1995	1948
m	297,3	298,4	300,7	24,2	24,8	23,8	241,2	295,4	248,4	499,4	552,1	518,9	172,0	169,6	173,9	1985	1978	1952
Δ , %	0,3	0,6	0,9	18,7	15,9	20	18,4	1,1	20	10,7	1,4	12,5	0,7	0,8	0,5	3,4	1,5	0,3

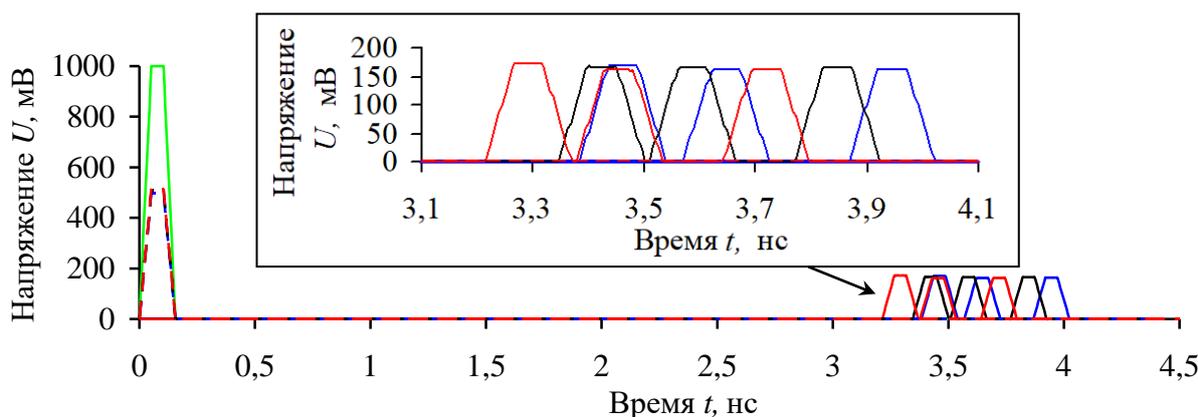


Рис. 5. Формы ЭДС (—) и напряжения на входе МФ при минус 50 (---), 25 (---), 150 (---) °C и выходе МФ при минус 50 (—), 25 (—), 150 (—) °C после оптимизации посредством ГА по двум критериям при 500 вычислениях

Из таблицы 3 видно, что для оптимизируемых параметров значение Δ выросло (максимум 20% для t и s_1) по сравнению с оптимизацией по одному критерию, однако оно находится в допустимых пределах, поскольку значение Δ для $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ остается меньше 1% для температур 25°C и 150°C, а для минус 50°C – не превышает 2%. При этом значение Δ для $U_{\text{вх}}$ не превышает 1%. Тем не менее, по сравнению с оптимизацией по одному критерию, Δ для $U_{\text{вых}}$ увеличилось, что связано с введением дополнительного критерия в ЦФ при оптимизации. Наименьшее значение $U_{\text{вых}}$ составляет 168 мВ для температуры 25°C. В общем случае, при двухкритериальной оптимизации алгоритм пытается определить «золотую середину» между результатами (ввиду задания весовых коэффициентов по 0,5 для каждого критерия). Однако, при оптимизации, достижение одного критерия может противоречить достижению другого. Этот факт может служить причиной возросших значений Δ . Также из таблицы 3 и рис. 5 видно, что значение $U_{\text{вх}}$ составляет примерно 500 мВ, т.е. половину ЭДС источника, обеспечивая тем самым согласование, а времена, затраченные на оптимизацию по одному и двум критериям (при 500 вычислениях), сопоставимы друг с другом. Результаты аналогичной оптимизации при 1000 вычислениях представлены в таблице 4. Значения m для $U_{\text{вх}}$ для минус 50°C, 25°C и 150°C

составили 503, 509,5 и 520,5 мВ, соответственно. На рис. 6 показаны формы ЭДС и напряжения на входе и выходе МФ после оптимизации.

Таблица 4 – Результаты 5 запусков ГА при -50, 25 и 150°С по двум критериям при 1000 вычислениях

№	h, МКМ			t, МКМ			s ₁ , МКМ			s ₂ , МКМ			U _{вх} , мВ			Время, с		
	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°
1	297,6	300,0	302,6	22,1	20,0	21,4	297,2	278,0	243,2	533,0	562,4	505,4	169,8	174,1	171,7	4018	3841	3837
2	297,6	300,0	302,6	20,0	24,2	20,7	289,4	278,8	290,4	548,3	535,7	571,4	169,9	170,0	172,6	3922	3861	3801
3	298,4	300,0	302,6	27,0	24,9	20,0	244,0	293,7	244,8	502,1	563,1	498,4	172,7	172,2	170,3	4647	3857	3806
4	298,4	298,4	302,6	24,2	20,7	20,0	224,4	284,3	275,5	470,8	542,0	543,8	170,8	169,8	170,6	3824	3860	3809
5	297,6	299,2	302,6	23,5	20,7	22,8	273,0	220,0	295,9	522,4	472,9	569,0	169,2	171,8	172,3	3794	3841	3804
m	297,9	299,5	302,6	23,4	22,1	21,0	265,6	271,0	270,0	515,3	535,2	537,6	170,5	171,6	171,6	4041	3852	3811
Δ, %	0,1	0,3	0	9,5	10,9	6,5	14	14,3	9,8	7,6	8,7	6,8	1,0	1,3	0,7	10,1	0,3	0,5

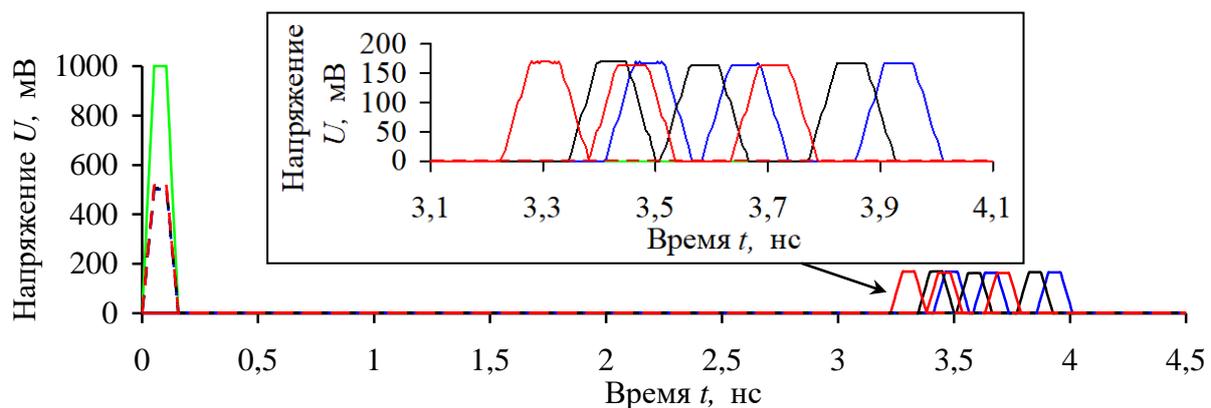


Рис. 6. Формы ЭДС (—) и напряжения на входе МФ при минус 50 (---), 25 (---), 150 (---) °С и выходе МФ при минус 50 (—), 25 (—), 150 (—) °С после оптимизации посредством ГА по двум критериям при 1000 вычислениях

Из таблицы 4 видно, что, по сравнению с оптимизацией при 500 вычислениях, значение Δ для оптимизируемых параметров уменьшается (максимум 14,3% для s_1) по аналогии с однокритериальной оптимизацией. Значение Δ для $U_{вх}$ и $U_{вых}$ также уменьшается (максимум 1,3% для значения $U_{вых}$ при 25°С). При необходимости Δ для $U_{вых}$ меньше 1%, целесообразно дальнейшее увеличение числа вычислений. Время расчетов, по сравнению с аналогичным при однокритериальной оптимизации, практически не меняется. Также, наименьшее значение $U_{вых}$ в случае двухкритериальной оптимизации при 1000 вычислениях находится на уровне 169,2 мВ для температуры минус 50°С, тогда как при однокритериальной оптимизации оно составляет 114,3 мВ (что естественно при достижении критерия согласования, увеличивающего значение $U_{вх}$). Для температуры 25°С при двухкритериальной оптимизации это значение составляет 168 мВ, для однокритериальной – 116,2 мВ, а при 150°С для двухкритериальной – 170,3 мВ и для однокритериальной – 118,8 мВ. Из рис. 6 и таблицы 4 также видно, что значение $U_{вх}$ близко к 500 мВ, что говорит о достижении согласования. Как и в случае однокритериальной оптимизации, при 150°С импульсы разложения приходят раньше (около 3,22 нс), чем при 25°С (около 3,346 нс) и минус 50°С (около 3,412 нс). Наконец, видно, что, по

аналогии с однокритериальной оптимизацией, минимизация значения $U_{\text{ВЫХ}}$ достижима при выравнивании амплитуд импульсов разложения, однако в случае двухкритериальной оптимизации не происходит частичного наложения импульсов мод на выходе МФ.

Результаты аналогичной оптимизации посредством ЭС представлены в таблице 5. На рис. 7 показаны формы ЭДС и напряжения на входе и выходе МФ после оптимизации. Как отмечалось ранее, оптимизация посредством ЭС выполнялась по амплитудному критерию при 1000 вычислениях.

Таблица 5 – Результаты 5 запусков ЭС при -50, 25 и 150°C по амплитудному критерию

№	h , МКМ			t , МКМ			s_1 , МКМ			s_2 , МКМ			$U_{\text{ВЫХ}}$, мВ			Время, с		
	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°	-50°	25°	150°
1	99,5	100,1	100,9	172,7	160,8	127,0	293,7	279,9	300,2	423,5	409,0	433,3	113,9	116,0	119,8	5657	4892	4150
2	99,5	100,0	100,9	173,1	191,0	189,5	293,5	295,6	288,2	423,6	426,6	418,0	114,0	115,9	118,6	5100	5120	4112
3	99,5	100,0	100,9	94,2	186,2	189,5	294,2	281,3	288,2	427,0	408,6	418,0	114,7	115,6	118,6	4729	5262	4123
4	99,8	100,1	100,9	140,8	187,2	121,5	292,8	280,8	290,1	422,7	408,6	421,3	115,5	115,8	120,3	5038	5211	4186
5	99,7	100,0	100,9	94,4	104,5	189,1	293,6	280,0	287,6	426,8	410,0	417,1	114,9	116,4	118,7	4148	5190	4178
m	99,6	100,0	100,9	135,0	165,9	163,3	293,6	283,5	290,9	424,7	412,6	421,5	114,6	115,9	119,2	4934	5135	4150
Δ ,%	0,2	0,1	0	29,5	29,3	21,9	0,3	2,7	2,1	0,5	2,2	1,9	0,7	0,3	0,7	15,6	3,6	0,9

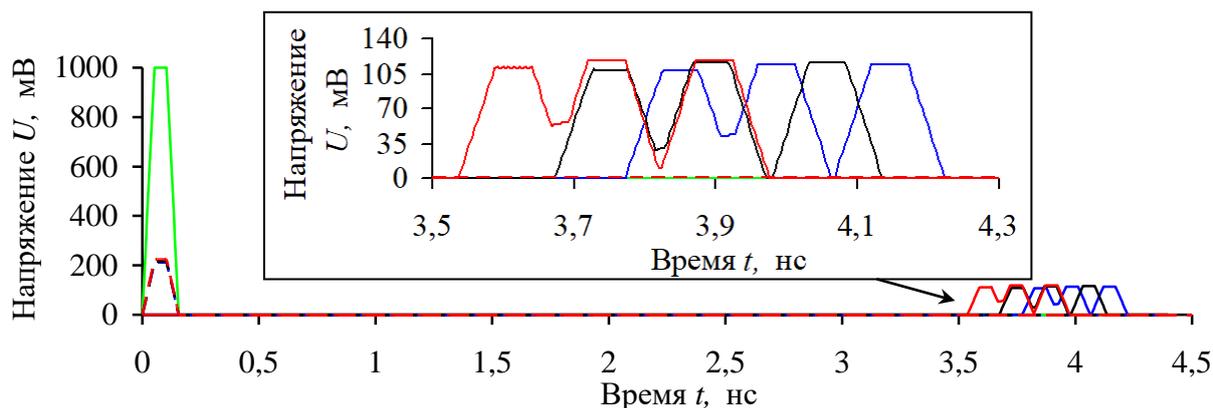


Рис. 7. Формы ЭДС (—) и напряжения на входе МФ при минус 50 (---), 25 (---), 150 (---) °C и выходе МФ при минус 50 (—), 25 (—), 150 (—) °C после оптимизации посредством ЭС по амплитудному критерию

Из таблицы 5 и рис. 7 видно, что результаты оптимизации посредством ЭС во многом схожи с результатами однокритериальной оптимизации посредством ГА. Наибольшее значение Δ наблюдается у параметра t (29,5% при температуре минус 50°C), поскольку, как отмечалось ранее, его изменение оказывает меньшее влияние (по сравнению с другими параметрами) на достижение экстремума данной ЦФ, состоящей из одного критерия. Обычно, при оптимизации МФ при помощи классического алгоритма ЭС (без возможности задания диапазонов оптимизируемых параметров), сходимость ЦФ или оптимизируемых параметров достигается, в среднем, уже при 1500 вычислениях, показывая хорошие результаты, даже по сравнению с ГА (в основном, за счет значительного выигрыша по времени вычисления). Однако, при использовании модифицированного алгоритма ЭС видно, что достаточно 1000 вычислений (а может и

меньше), чтобы максимальное значение Δ для $U_{\text{вых}}$ не превышало 0,7%. Более того, наименьшие значения $U_{\text{вых}}$ получены при оптимизации посредством модифицированного алгоритма ЭС и составили 113,9 мВ при минус 50°C (тогда как лучший результат при однокритериальной оптимизации посредством ГА, при той же температуре, составил 114,4 мВ), 115,8 мВ при 25°C (116,2 мВ при ГА) и 118,8 мВ (119,9 мВ при ГА). При этом время, затраченное на оптимизацию посредством ЭС, сопоставимо со временем оптимизации посредством ГА.

Результаты моделирования и оптимизации МФ при влиянии влаги

В общем случае, моделирование воздействия влаги на МФ в системе TALGAT можно выполнять в 3 различных вариантах: когда с использованием модуля двухмерного моделирования полагалось, что вдоль поверхности МФ образован конденсат в виде случайных капель воды различного размера, образующий «дорожки» воды (рис. 8а); когда с использованием модуля двухмерного моделирования полагалось, что на отдельных сегментах МФ (например, в начале и в конце) образован конденсат в виде случайных капель воды различного размера (например, в эквивалентной схеме из рис. 8в, МПЛП 1 и 3 соответствуют поперечные сечения из рис. 1а, а МПЛП 2 – из рис. 8а); когда с использованием модуля трёхмерного моделирования полагалось, что на поверхности МФ образован конденсат в виде случайных капель воды различного размера (рис. 8б).

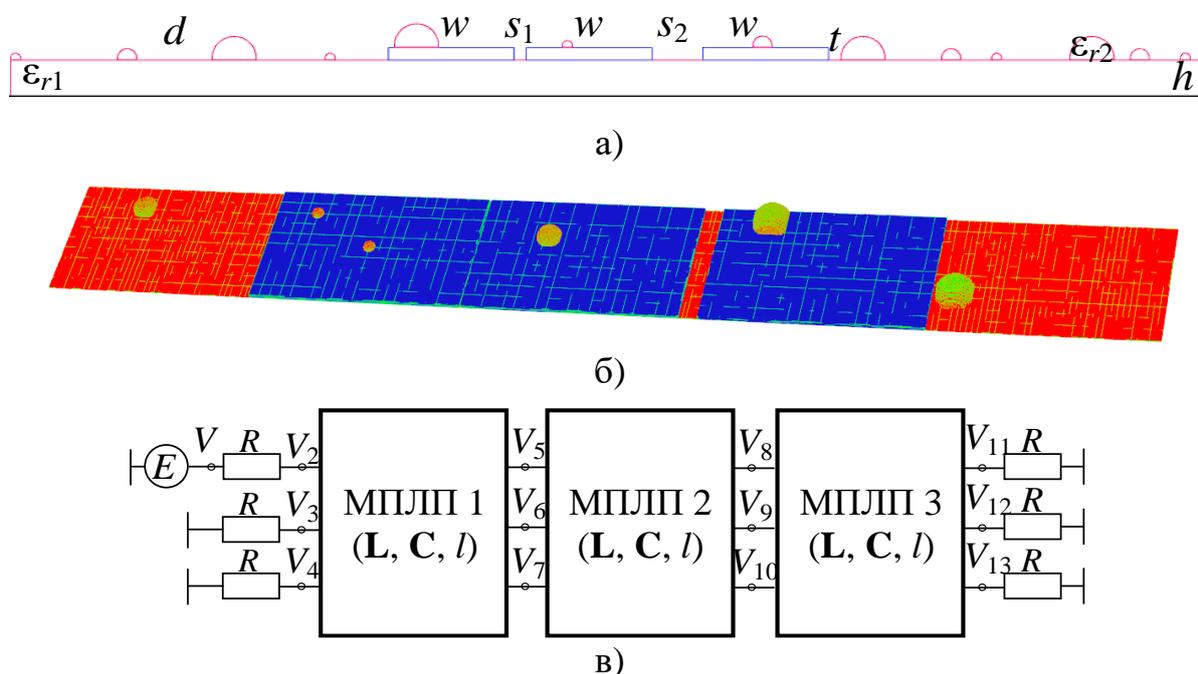


Рис. 8. Поперечное сечение МФ на основе 3-проводной МПЛ с учетом влаги в модулях двухмерного (а) и трёхмерного (б) моделирования TALGAT и эквивалентная схема с разграничением сегментов МФ (в)

Рассмотрим оптимизацию посредством ГА и ЭС применительно к первому варианту воздействия влаги на МФ. Геометрическая модель поперечного сечения МФ на основе 3-проводной МПЛ представлена на рис. 8а, где ϵ_{r1} – отно-

сительная диэлектрическая проницаемость подложки (4,4), а ϵ_{r2} – воды (80). Эквивалентная схема МФ представлена на рис. 1в. В таблице 6 представлены результаты оптимизации посредством ГА и ЭС (для ГА, однокритериальная оптимизация выполнялась при 500 вычислениях, а двухкритериальная – при 1000). Значение m для $U_{\text{вх}}$ составило 473,8 мВ. На рис. 9–11 показаны формы ЭДС и напряжения на входе и выходе МФ после оптимизации.

Таблица 6 – Результаты 5 запусков одно- и двухкритериальной оптимизации ГА при 500 (ГА 1) и 1000 (ГА 2) вычислениях и ЭС с учетом влияния влаги

№	h , МКМ			t , МКМ			s_1 , МКМ			s_2 , МКМ			$U_{\text{вых}}$, мВ			Время, с		
	ГА 1	ГА 2	ЭС	ГА 1	ГА 2	ЭС	ГА 1	ГА 2	ЭС	ГА 1	ГА 2	ЭС	ГА 1	ГА 2	ЭС	ГА 1	ГА 2	ЭС
1	100,0	300,0	100,1	195,8	102,6	196,7	294,5	298,4	297,7	407,8	403,1	400,7	131,8	244,4	130,3	8388	7965	8248
2	100,8	300,0	100,0	199,3	87,8	199,7	293,7	289,8	299,7	401,6	400,0	401,7	131,2	252,5	130,2	8422	7906	8023
3	101,6	300,0	100,1	192,2	108,2	196,5	292,9	289,8	294,8	400,0	401,6	516,6	132,1	240,1	146,2	8284	7899	8095
4	100,0	300,0	100,1	197,2	130,8	186,4	298,4	293,7	299,3	402,4	405,5	400,2	130,5	231,0	131,1	8348	7927	7800
5	100,0	300,0	101,8	195,8	102,6	199,6	298,4	297,6	203,3	407,1	402,5	408,9	131,8	244,3	143,7	8491	7938	7894
m	100,5	300,0	100,4	196,1	106,4	195,8	295,6	293,9	279,0	403,8	402,5	425,6	131,5	242,5	136,3	8387	7927	8012
$\Delta, \%$	0,8	0,0	0,9	1,8	19,7	3,4	0,9	1,5	19,2	1,0	0,7	12,7	0,6	4,4	5,8	1,2	0,4	2,8

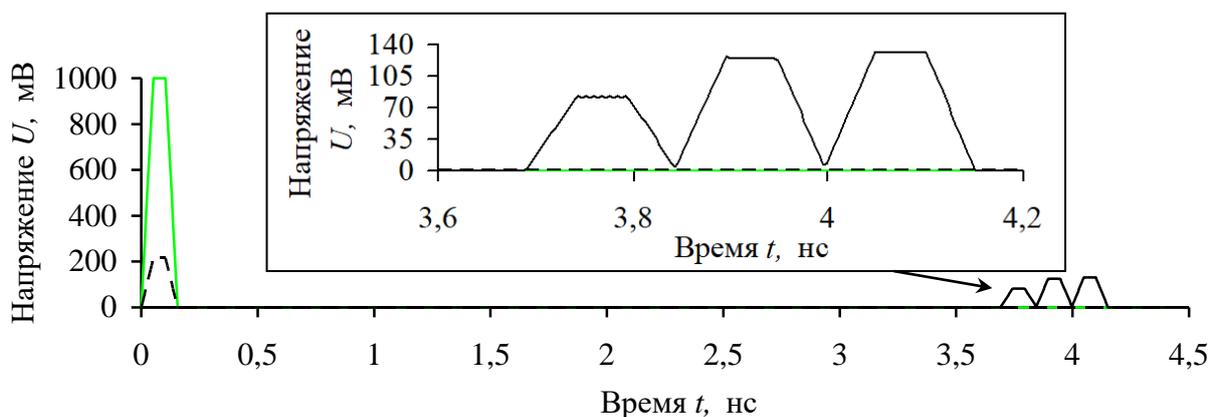


Рис. 9. Формы ЭДС (—) и напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ после оптимизации посредством ГА по амплитудному критерию при 500 вычислениях

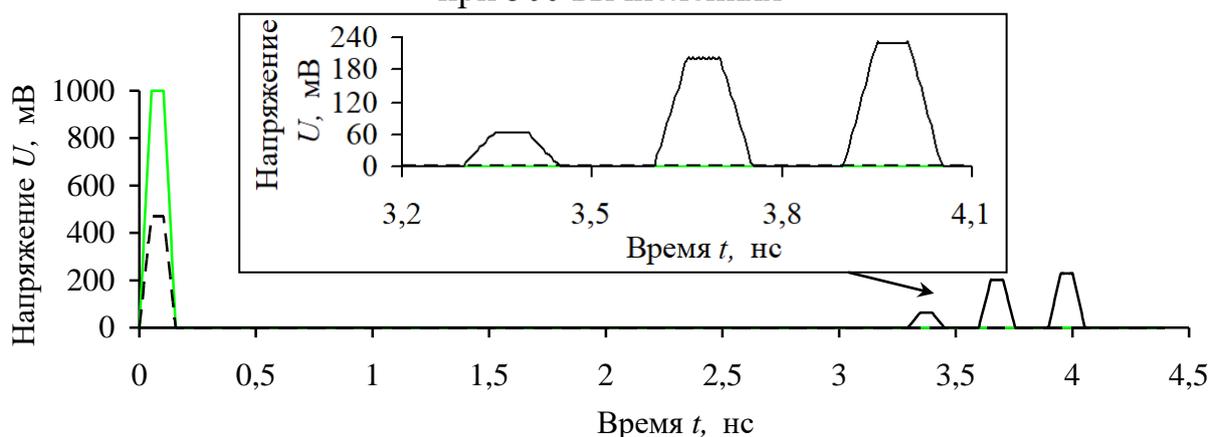


Рис. 10. Формы ЭДС (—) и напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ после оптимизации посредством ГА по двум критериям при 1000 вычислениях

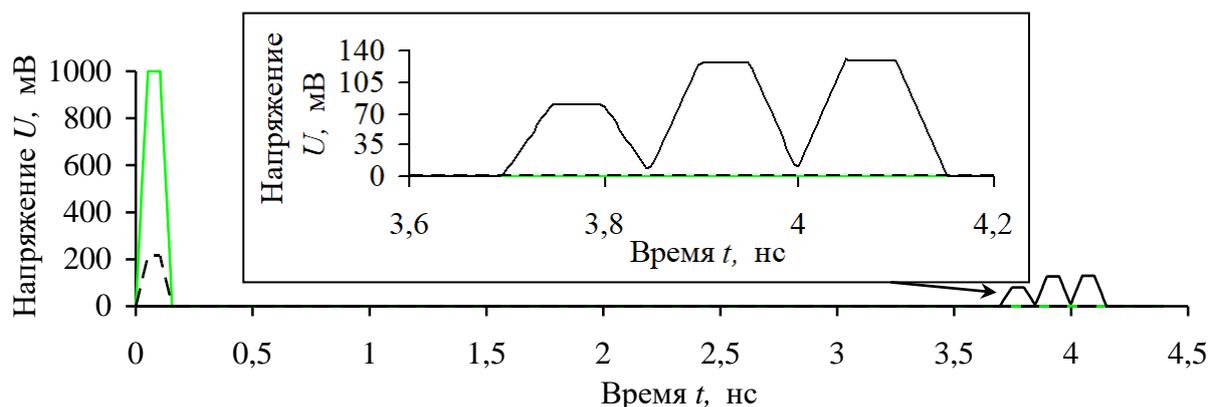


Рис. 11. Формы ЭДС (—) и напряжения на входе (---) и выходе (—) МФ после оптимизации посредством ЭС по амплитудному критерию

Как видно из таблицы 6, Δ составляет менее 2% (даже для параметра t , который, как отмечалось ранее, оказывает меньшее влияние на изменение ЦФ). Время, затраченное на один запуск, в среднем 8386 с (что в 4 раза больше времени, затраченного на оптимизацию посредством ГА, при 500 вычислениях, с использованием температурной модели). Тем не менее, Δ для $U_{\text{вых}}$ не превышает 1%. Из рис. 9 видно, что достижение амплитудного критерия, в данном случае, возможно за счет выравнивания амплитуд не всех, а лишь импульсов мод 2 и 3. При этом минимальное значение $U_{\text{вых}}$ составляет 130,5 мВ (114,4 мВ с использованием температурной модели при оптимизации по одному критерию и 500 вычислениях). Также видно, что импульсы разложения не накладываются друг на друга. Из таблицы 7 и рис. 10 видно, что уровень $U_{\text{вх}}$ около 475 мВ близок к половине значения ЭДС источника, что говорит о согласовании линии с тактом. Кроме того, видно, что разницы задержек соседних импульсов разложения возросли по сравнению с рис. 9 (с 0,15 и 0,15 нс до 0,304 и 0,299 нс между импульсами мод 1, 2 и 2, 3, соответственно). Максимальное значение Δ для t составляет 19,7%, $U_{\text{вх}}$ – 1%, а $U_{\text{вых}}$ – 5%. Время оптимизации немного меньше (в среднем, на 5,48%) аналогичного при однокритериальной оптимизации. Из таблиц 6 и 8 и рис. 9 и 11, видно, что при оптимизации с помощью ГА и ЭС, Δ для h не превышает 1%, что говорит о его хорошей сходимости. Тем не менее, при оптимизации посредством ЭС, Δ остальных параметров возросло (от 1,8% до 3,4% для t , от 0,9% до 19,2% для s_1 и от 1% до 12,7% для s_2). Также видно, что Δ для $U_{\text{вых}}$ возросло до 5,8%, однако на выходе МФ наблюдаются импульсы мод 2 и 3 с равными амплитудами (по аналогии с ГА). Наименьшее значение $U_{\text{вых}}$, полученное при помощи ЭС, составляет 130,2 мВ (при однокритериальной оптимизации с помощью ГА – 130,5 мВ). Наконец, затрачивалось близкое время на один запуск для ЭС и ГА при 1000 вычислениях, что подчеркивает тот факт, что использование модифицированного алгоритма ЭС приближает вычисления к точности ГА при большем времени оптимизации, в отличие от классического алгоритма ЭС.

Выводы

Представлены результаты одно- и двухкритериальной оптимизации посредством ГА и модифицированного алгоритма ЭС МФ на основе 3-проводной МПЛ при влиянии температуры и влаги. С точки зрения оптимизации, работа ЭС показала лучшие результаты в задаче минимизации значения $U_{\text{вых}}$, хотя и заняла больше времени по сравнению с ГА (при учете влияния температуры – 113,9 мВ при 5657 с для ЭС к 114,3 мВ при 3962 с для ГА). Значение Δ для $U_{\text{вых}}$ для всех расчетов при учете влияния температуры находится в пределах 1%, а влияния влаги – 6%. В результате двухкритериальной оптимизации удалось получить равные амплитуды импульсов разложения на выходе МФ при согласовании МФ с трактом (поскольку значение $U_{\text{вх}}$ во всех случаях близко к половине ЭДС источника). Высокая сходимость результатов, в т.ч. для разных методов оптимизации, позволяет делать вывод о достижении глобального экстремума ЦФ (во всех вариантах оптимизации). Также продемонстрировано смещение экстремума ЦФ при влиянии температуры: изменялись значения как оптимизируемых параметров, так и самой ЦФ. Установлено, что наименьшее значение $U_{\text{вых}}$ достижимо при более низкой температуре окружающей среды. Моделирование конденсата на поверхности МФ вносит дополнительную сложность в расчеты, увеличивая общее время оптимизации. Влияние конденсата увеличивает результирующее значение $U_{\text{вых}}$ на выходе МФ (для примера, однокритериальная оптимизация с помощью ГА с учетом влияния температуры позволила получить минимальное значение $U_{\text{вых}}$ – 114,4 мВ, а влаги – 130,5 мВ). Таким образом, продемонстрирована возможность обеспечения высоких защитных характеристик (в частности, эффективного ослабления помехового СКИ) МФ на основе 3-проводной МПЛ в экстремальных условиях при воздействии температуры и влаги.

Выявленные, в результате данной работы, новые причинно-следственные связи, в части влияния температуры и влаги на характеристики МФ на основе 3-проводной МПЛ целесообразно учитывать на этапе проектирования МФ. В дальнейшем предполагается исследовать защитные характеристики более сложных полосковых и кабельных структур в экстремальных условиях.

Результаты оптимизации получены при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-900.2022.4, моделирование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2022-0001.

Литература

1. Nishiyama H., Okamoto T., Kim Y., Fujimoto D., Hayashi Y. i. Fundamental Study on Influence of Intentional Electromagnetic Interference on IC Communication // 2019 12th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo). 2019. P. 201-203.
2. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M., Nuriev M. G. Prediction of Noise Immunity of Computing Equipment under the Influence of Electromagnetic Interference through the Metal Structures of Building by Physical Modeling // 2020

Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), IEEE. 2020. P. 120-123.

3. Nuriev M. G., Gizatullin R. M., Gizatullin Z. M. Physical Modeling of Electromagnetic Interferences in the Electronic Devices at Direct Impact of Lightning on Protection System of Building // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). 2018. P. 355-358.

4. 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.

5. Норенков И. П. Автоматическое проектирование. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 188 с.

6. Long Q., Wu C., Huang T., Wang X. A genetic algorithm for unconstrained multi-objective optimization // Swarm and Evolutionary Computation. 2015. № 22. P. 1-14. DOI: 10.1016/j.swevo.2015.01.002.

7. Li H.-M., Ra C.-H. Frequency and temperature dependence of the dielectric properties of a PCB substrate for advanced packaging applications // Journal of the Korean Physical Society. 2009. № 3. P. 1096-1099.

8. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR university project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // Journal of Physics: conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. № 012110. P. 1-7.

9. Белоусов А. О. Анализ и оптимизация многопроводных структур с модальным разложением для обработки импульсных сигналов. Дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТУСУР, 2020. – 247 с.

10. Hansen N. Python: module barecmaes2 [Электронный ресурс]. 2014. – URL: <http://www.cmap.polytechnique.fr/~nikolaus.hansen/barecmaes2.html> (дата обращения 06.11.2022).

11. Gordeyeva V. O., Belousov A. O. Optimization of a broad-side coupling modal filter by evolutionary strategy algorithm with setting the ranges of the optimization parameters // Journal of Physics: conference Series. 2022. Vol. 2291. № 012014. P. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/2291/1/012014.

12. Ландсберг Г. С. Элементарный учебник физики. Механика. Теплота. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1985. – 606 с.

13. Новоттник М. Высокотемпературные электронные модули на основе органических плат // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 8. С. 51-55.

References

1. Nishiyama H., Okamoto T., Kim Y., Fujimoto D., Hayashi Y. i. Fundamental Study on Influence of Intentional Electromagnetic Interference on IC Communication. 2019 12th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo), 2019, pp. 201-203.

2. Gizatullin Z. M., Gizatullin R. M., Nuriev M. G. Prediction of Noise Immunity of Computing Equipment under the Influence of Electromagnetic

Interference through the Metal Structures of Building by Physical Modeling. *2020 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2020, pp. 120-123.

3. Nuriev M. G., Gizatullin R. M., Gizatullin Z. M. Physical Modeling of Electromagnetic Interferences in the Electronic Devices at Direct Impact of Lightning on Protection System of Building. *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, 2018, pp. 355-358.

4. Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB Pulse Decomposition in Simple Printed Structures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 1136-1142.

5. Norenkov I. P. *Avtomaticheskoe proektirovanie* [Automatic design]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2000, 188 p. (in Russian).

6. Long Q., Wu C., Huang T., Wang X. A genetic algorithm for unconstrained multi-objective optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2015, no. 22, pp. 1-14, DOI: 10.1016/j.swevo.2015.01.002.

7. Li H.-M., Ra C.-H. Frequency and temperature dependence of the dielectric properties of a PCB substrate for advanced packaging applications. *Journal of the Korean Physical Society*, 2009, no. 3, pp. 1096-1099.

8. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR university project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation. *Journal of Physics: Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, no. 012110, pp. 1-7.

9. Belousov A. O. *Analiz i optimizaciya mnogoprovodnyh struktur s modal'nym razlozheniem dlya obrabotki impul'snyh signalov*. Dis. kand. tekhn. nauk [Analysis and optimization of multiconductor structures with modal decomposition for pulse signal processing. Ph.D. Tesis]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2020, 247 p. (in Russian).

10. Hansen N. Python: module barecmaes2 [Online resource]. 2014. Available at: <http://www.cmap.polytechnique.fr/~nikolaus.hansen/barecmaes2.html> (accessed 6 November 2022).

11. Gordeyeva V. O., Belousov A. O. Optimization of a broad-side coupling modal filter by evolutionary strategy algorithm with setting the ranges of the optimization parameters. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2291, no. 012014, pp. 1-8. DOI: 10.1088/1742-6596/2291/1/012014.

12. Landsberg G. S. *Elementarnyj uchebnik fiziki. Mekhanika. Teplota. Molekulyarnaya fizika* [Elementary physics textbook. Mechanics. Heat. Molecular physics]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 606 p. (in Russian).

13. Nowotnick M. Vysokotemperaturnye elektronnye moduli na osnove organicheskikh plat [High-temperature electronic modules based on organic boards], *Tekhnologii v elektronnoj promyshlennosti*, 2009, No 8, pp. 51-55 (in Russian).

Статья поступила 12 ноября 2022 г.

Информация об авторах

Белусов Антон Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и управления, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, проектирование защитных устройств на основе модальной фильтрации, оптимизация защитных устройств. E-mail: ant1lafleur@gmail.com

Гордеева Виктория Олеговна – аспирант кафедры телевидения и управления, инженер научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, защита от электромагнитных помех, методы оптимизации, эволюционные алгоритмы. E-mail: vikki.gern@gmail.com

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

Analysis of the characteristics of three-conductor modal filter under extreme conditions

A. O. Belousov, V. O. Gordeyeva

Problem statement: *the problem of ensuring electromagnetic compatibility (EMC) of modern radio-electronic equipment (REE) is becoming more and more relevant every year. The reason for this is the growing functional complexity of REE and the tendency to their miniaturization, including by increasing the density of printed circuit board (PCB) routing. Electromagnetic interference (EMI) of various natures can lead to destabilization and destruction of critical REE elements. Critical are understood as such REE, the failure of which entails various negative consequences. Ultrashort pulses (USP) are one of the types of EMI of artificial nature and are characterized by high voltage, short duration and wide spectrum. The last decade is characterized by active research of protective structures with modal phenomena for the protection of critical REE from USP, which differ in a number of advantages compared to traditional protective devices. The principle of operation of such structures is to decompose the USP into a sequence of pulses of smaller amplitude due to the difference in mode delays in the transmission line. They are called modal filters (MF) and are implemented in strip and cable versions. One of the most important stages when designing an MF is optimization. Opportunities for optimization, in relation to the MF, are currently not studied enough. In addition, the issue of the MF operating in extreme conditions remains without due attention. In particular, it is expedient to evaluate the protective characteristics of the MF (USP attenuation, the difference in per-unit-length mode delays, etc.) when exposed to temperature and moisture. Finally, it seems important to determine the optimal values of the geometric parameters of the MF under extreme conditions and assess the possibility of maintaining the required protective characteristics. **The purpose** of this work is to study the protective characteristics of an MF based on a 3-conductor microstrip line (MSL) when exposed to temperature and moisture in single- and multicriteria optimization. **Methods used:** in calculations, we used a quasi-static simulating system based on the method of moments, and in optimization we used a simple genetic algorithm (GA) and a modified algorithm of evolutionary strategies (ES). We performed optimization according to the amplitude the matching criteria. We simulated the temperature exposure taking into account the well-known model of the P(T) type, taking into account the thermal change in the geometric and electrical MSL parameters. **Novelty:** for the first time, single- and multicriteria optimization of the MF based on a 3-conductor MSL was performed using GA and a modified ES algorithm when exposed to temperature and moisture. We managed to achieve high convergence of results during optimization: the deviation of the maximum voltage at the MF*

output does not exceed 1% when using the temperature model and 6% when exposed to moisture. As a result of multicriteria optimization, we obtained equal amplitudes of decomposition pulses at the MF output when matching the MF with the path. We have found that the lowest maximum voltage at the MF output is achievable at lower ambient temperatures. The resulting value of the maximum voltage at the MF output increases when MF is simulated with condensate on its surface. **Results.** As a result of multicriteria optimization, we managed to obtain equal amplitudes of decomposition pulses at the output of the MF when its matching with the path. Thus, the article demonstrates the possibility of providing high protective characteristics of an MF based on a 3-conductor MSL under extreme conditions. **Practical relevance.** The identified features of the behavior of the protective characteristics of the MF when exposed to temperature and moisture, as well as their high level when functioning in such environments, open up the possibility of detailing and evaluating the parametric and electrophysical parameters of the PCB, including through optimization, taking into account environmental exposures at the PCB design stage. Finally, the possibility of practical application of the investigated MF for the protection of REE from USP (due to its low mass, radiation resistance, reliability, and improved characteristics) opens up in a wide variety of areas, including under extreme conditions.

Key words: electromagnetic compatibility, ultrashort pulse, modal filtration, modal filter, microstrip line, optimization, genetic algorithm, evolutionary strategies, temperature exposure, moisture exposure.

Information about Authors

Anton Olegovich Belousov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Television and Control, Senior Research Fellow of the research laboratory «Safety and electromagnetic compatibility of radio-electronic means». Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, design of protective devices based on modal filtration, optimization of protective devices. E-mail: ant1lafleur@gmail.com

Viktoriya Olegovna Gordeyeva – Graduate at the Department of Television and Control, Engineer of the research laboratory «Safety and electromagnetic compatibility of radio-electronic means». Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, electromagnetic interference protection, optimization methods, evolutionary algorithms. E-mail: vikki.gern@gmail.com

Address: Russia, 634050, Tomsk, Lenina prospekt, 40.