

УДК 621.372

Оптимизация модального фильтра на основе микрополосковой линии по частотным критериям

Белоусов А. О., Гордеева В. О., Ким Г. Ю.

Постановка задачи: в последнее десятилетие должное функционирование современных радиоэлектронных средств осложняется сложной электромагнитной обстановкой ввиду влияния электромагнитных помех (ЭМП) различной природы. В качестве ЭМП могут выступать сверхкороткие импульсы (СКИ), представляющие особую опасность ввиду высокого уровня напряжения и быстрого времени нарастания. Время срабатывания традиционных защитных устройств зачастую оказывается недостаточным. Поэтому активно разрабатываются новые устройства для защиты от СКИ – модальные фильтры (МФ). При проектировании МФ у разработчика возникает необходимость выбора набора оптимальных параметров под конкретную область применения. Для этого результативно применяются методы глобальной оптимизации, в частности, генетический алгоритм (ГА), эволюционные стратегии (ЭС) и метод случайного поиска (СП). Сформулирован ряд критериев для оптимизации МФ во временной области. В то же время, анализ частотных характеристик МФ не менее важен, например, при учете требований к полосе пропускания (ПП) полезного сигнала. Поэтому актуальна реализация возможности оптимизации МФ в частотной области при их проектировании под конкретные электрические цепи. **Целями работы** являются формулировка и апробация частотных критериев для максимизации и контроля ПП при оптимизации МФ на основе 3-проводной микрополосковой линии (МПЛ). **Используемые методы:** при моделировании использована система квазистатического моделирования, основанная на методе моментов, а при оптимизации – ГА, модифицированный алгоритм ЭС и метод СП. Оптимизация выполнялась отдельно по двум новым частотным критериям: максимизации и контроля ПП полезного сигнала. **Новизна:** впервые сформулированы и апробированы два критерия для оптимизации любой полосковой или кабельной структуры в частотной области: максимизации (для максимизации частоты среза МФ) и контроля (для задания частоты среза требуемому значению) ПП. **Результат:** При оптимизации в диапазоне заданных параметров по критерию максимизации ПП, удалось увеличить ПП МФ с 20,9 до 518,2 МГц при использовании модифицированного алгоритма ЭС, 517 МГц – ГА и 505,8 МГц – СП. При оптимизации по критерию контроля ПП получен требуемый уровень ПП 425 МГц для МФ при работе всех алгоритмов. С учетом детальной оценки работы алгоритмов, при оптимизации МФ на основе 3-проводной МПЛ в частотной области, наиболее предпочтителен алгоритм ЭС ввиду наилучших показателей сходимости и нахождения глобального экстремума целевой функции. **Практическая значимость:** сформулированные частотные критерии оптимизации открывают возможность учитывать уровень ПП при проектировании защитных устройств, работающих по принципу модальной фильтрации. Они применимы к различным видам МФ, вне зависимости от структуры (полосковая или кабельная), и могут быть результативно использованы при проектировании.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, сверхкороткий импульс, оптимизация, эволюционный алгоритм, полоса пропускания.

Библиографическая ссылка на статью:

Белоусов А. О., Гордеева В. О., Ким Г. Ю. Оптимизация модального фильтра на основе микрополосковой линии по частотным критериям // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 4. С. 219-242. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-219-242

Reference for citation:

Belousov A. O., Gordeyeva V. O., Kim G. Yu. Optimization of a modal filter based on a microstrip line according to frequency criteria. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 4, pp. 219-242 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-219-242

Актуальность

В последнюю декаду должный уровень функционирования современных радиоэлектронных средств (РЭС) затрудняется сложной электромагнитной обстановкой. Это обусловлено их стремительным ростом в части увеличения рабочих частот, миниатюризации, возможности интеграции в самые различные области и, как следствие, широкой распространенности. Между тем влияние электромагнитных помех (ЭМП) (как естественного, так и искусственного происхождения) способно нарушить штатный режим работы РЭС. Так, подобные ЭМП способны привести к временному нарушению работы (с последующим самостоятельным восстановлением работы) или физическим повреждениям РЭС (с восстановлением посредством ремонта) [1, 2]. К источникам подобных ЭМП могут относиться промышленные установки, средства радиоэлектронной борьбы (средства функционального поражения мощным электромагнитным излучением (ЭМИ)), устройства обработки сигналов, охранные системы, природные явления, а причинами их возникновения могут быть взаимное влияние РЭС, некорректно выполненные средства коммуникации и др. В этой связи последняя декада отмечена большим числом научных работ в направлении защиты критичных РЭС при воздействии ЭМП [3, 4]. Среди них можно выделить серии работ, направленные на решение проблемы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) [5–7]. Помимо прочего, исследования в данном направлении нацелены на создание новых методов обнаружения и анализа ЭМИ [8, 9], анализа ЭМП в отдельных РЭС [10], разработку новых способов защиты от ЭМИ [11–13] и др. Общая классификация ЭМП подразумевает их разделение на два основных типа: излучаемые и кондуктивные. Последние распространяются по проводникам, а их источниками могут служить коммутации токовых цепей, вторичные эффекты разряда молнии, электростатические разряды, преднамеренные импульсные воздействия сверхширокополосные (СШП) помехи и др. [14, 15]. СШП помехи представляют особый интерес ввиду малой длительности распространяющихся импульсов, при которой традиционные защитные устройства могут оказаться бесполезными [16]. Сверхкороткие импульсы (СКИ), отличающиеся крайне быстрым нарастанием и высоким уровнем напряжения, являются разновидностью СШП помех. Так, СКИ способны причинить серьезные повреждения компонентам РЭС, изменить их режим работы или даже вывести из строя при локализации в критически важных узлах. Причина кроется в том, что поглощенная энергия СКИ локализуется и за время импульса не успевает передаться окружающим элементам структуры, что способствует дефектообразованию в чувствительных зонах выделения тепла [17]. В настоящее время для защиты РЭС от СКИ активно исследуются и разрабатываются устройства на основе технологии модальной фильтрации, известные как модальные фильтры (МФ) [18]. Принцип модальной фильтрации заключается в разложении СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды (не превышающих критический порог конкретного РЭС) за счет различия задержек мод в линии передачи. Традиционно МФ разрабатываются в виде полосковых

структур (на печатных платах), но также возможно применение МФ на основе кабельных структур (защитные кабели).

На этапе проектирования МФ существенное значение имеет выбор его оптимального набора геометрических и электрофизических параметров, преимущественно из-за особенностей и специфики предъявляемых требований. Поскольку диапазон допустимых значений параметров МФ и их количество охватывают много вариантов (их число может достигать 1012 и более), оптимизация посредством эвристического поиска (ручная), сравнение и анализ всех возможных комбинаций практически невозможны. В таких ситуациях обращаются к различным методам оптимизации. В общем случае, их можно разделить на локальные (нахождение локальных экстремумов) и глобальные (нахождение глобальных экстремумов) [19]. Как правило, полосковые МФ оптимизируют, используя эволюционные алгоритмы: генетические алгоритмы (ГА) и эволюционные стратегии (ЭС) ввиду простоты их реализации и точности определения глобального экстремума [20]. Выбор эволюционных алгоритмов определяется особенностями задачи оптимизации МФ, включая наличие большого числа локальных экстремумов, оптимизируемых параметров (например, ввиду геометрической сложности структуры МФ: больше 2 слоев печатной платы, большое число проводников и диэлектриков и др.) и одновременно выполняемых критериев оптимизации.

Важными характеристиками МФ являются частотные. В самом общем случае они отражают реакцию фильтра на сигналы различных частот. Как правило, разработка конкретного защитного устройства должна соответствовать предъявляемым требованиям, в частности, к полосе пропускания (ПП) полезного сигнала. Нередко разработчику требуется корректировать оптимизированные параметры МФ таким образом, чтобы МФ соответствовал требуемой ПП цепи, в которую он включается. Сформулирован ряд критериев для оптимизации МФ: амплитудный, временные, согласования, массогабаритный и стоимостной. Между тем данные критерии (за исключением массогабаритного и стоимостного) предназначены для обработки формы напряжения, распространяющегося по МФ СКИ (т.е. выполнялись анализ и оптимизация исключительно во временной области). В то же время, никогда не оценивалась возможность оптимизации МФ в частотной области, например, по критерию максимизации или контроля ПП [21, 22]. Однако это актуально для возможности проектирования МФ под конкретные электрические цепи. Поэтому целями данной работы являются формулировка данных критериев и их апробация при оптимизации МФ.

Материалы и методы

Выполнялись моделирование и оптимизация МФ на основе 3-проводной микрополосковой линии (МПЛ) (рис. 1). Данный МФ выбран ввиду повсеместной распространенности печатных плат подобной конфигурации и широкого ряда работ, направленных на исследование его защитных характеристик в задаче ослабления воздействующих СКИ. С учетом этого, возможно качественное сравнение характеристик МФ после оптимизации с результатами, полученными

ранее. Поперечное сечение МФ представлено на рис. 1а (проводники А – активный, П – пассивный), где w – ширина проводников, s_1, s_2 – зазоры между проводниками, t – толщина проводников, h – толщина подложки, d – расстояние от края МФ до ближайших проводников, а ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки.

Моделирование и оптимизация выполнялись в системе TALGAT [23]. Допускалось, что в рассматриваемых МФ распространяются T -волны. Вначале строилась геометрическая модель поперечного сечения исследуемой структуры. Затем вычислялись матрицы погонных коэффициентов электростатической (\mathbf{C}) и электромагнитной (\mathbf{L}) индукций. На основе данных матриц получены вторичные характеристики: матрицы характеристических импедансов (\mathbf{Z}_C) и погонные задержки мод (τ_i). При этом матрицы погонных сопротивлений \mathbf{R} (для учета потерь в проводниках) и проводимостей \mathbf{G} (для учета потерь в диэлектриках) приняты равными нулю для исключения их влияния.

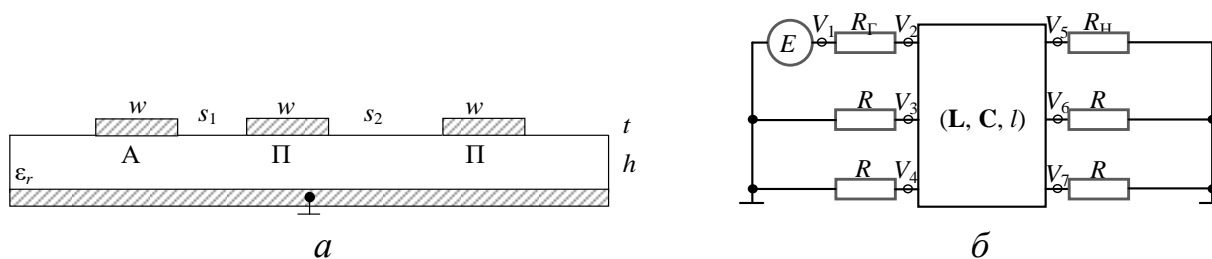


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема (б) МФ

Для корректной апробации предложенных частотных критериев использовались три алгоритма: ГА, ЭС и метод случайного поиска (СП) (метод Монте-Карло). ГА реализован в виде встроенной библиотеки в системе TALGAT. Он представляет собой простой ГА с коэффициентами мутации и кроссовера по 0,1 и 0,5, соответственно [24]. В качестве ЭС использована модифицированная версия алгоритма (далее по тексту – ЭС) [20]. Его суть заключается в реализованной возможности задания конкретных диапазонов оптимизируемых параметров (тогда как в классическом исполнении алгоритма предполагается задание начального значения оптимизируемых параметров и изменяемого, в процессе оптимизации, шага). Алгоритм ЭС реализован на основе библиотеки «baremaes2» на языке Python. При оптимизации посредством алгоритма СП, использована библиотека «random_s» на языке Python [25, 26]. В качестве входных параметров алгоритм принимает списки с минимальными и максимальными значениями (которые выступают в роли диапазонов оптимизируемых параметров) и общее число вычислений [27]. Оптимизация выполнялась по 5 запусков при числе вычислений (N_{it}) 500, 1000, 2500 и 5000 для ЭС и СП и при соотношении числа особей и поколений 5/10, 10/10, 10/100 и 50/100 для ГА в диапазоне частот от 1 МГц до 10 ГГц с шагом 2,5 МГц.

Формулировка частотных критериев для максимизации и контроля полосы пропускания полезного сигнала

В общем случае, формулировка целевой функции (с одним или несколькими критериями) сводится к задаче минимизации или максимизации. Общая целевая функция для многокритериальной оптимизации, а также основные критерии, сформулированы в [24]. Аналогично можно сформулировать выражения для целевых функций f_i и нормировочных коэффициентов K_i частотных критериев для максимизации и контроля ПП полезного сигнала.

Как известно, ширина ПП определяется частотой среза f_{cp} по уровню 0,707 или минус 3 дБ. Если важно максимизировать ПП, вне зависимости от иных предъявляемых требований, то критерий максимизации ПП:

$$f_{cp} \rightarrow \max. \quad (1)$$

Однако реализация данного критерия в системе TALGAT имеет свои особенности. Поскольку значения напряжений и соответствующих им частот (на АЧХ) хранятся в виде матриц-строк в разных массивах, сначала надо определить значение АЧХ, максимально приближенное к 0,707. Далее необходимо определить соответствующее ему значение частоты. Это сделано посредством нахождения индексов искомым значений в массивах. Так, сначала определяются индексы значений, удовлетворяющих условию

$$x \leq 0,707 \text{ или } x \leq -3 \text{ дБ}. \quad (2)$$

После этого, отдельной переменной, формируется отдельный список данных значений. В результате этого, искомым индекс, соответствующий первому определенному значению f_{cp} , удовлетворяющему указанному условию, в списке стоит первым (учитывая, что характер частотной зависимости МФ соответствует фильтрам нижних частот). Далее из массива со значениями частот определяется значение, соответствующее первому элементу списка с индексами (удовлетворяющему указанному условию). Поскольку i -ые элементы массивов частот и напряжений находятся в полном соответствии, мы получаем искомое значение f_{cp} . Между тем известные критерии сформулированы под задачу минимизации целевой функции [24]. Поэтому при формулировке итогового вида критерия максимизации ПП минимизируется выражение, обратное величине f_{cp} . Тогда итоговый вид критерия (1) и соответствующего ему весового коэффициента

$$f_1 = \frac{1}{f_{cp}}, K_1 = f_{\max}, \quad (3)$$

где f_{\max} – максимальная частота в диапазоне моделирования (задаваемая пользователем).

Как отмечалось ранее, практика разработки современных РЭС предполагает конкретное значение соответствующих им ПП. Кроме этого, в разрабатываемых МФ, с увеличением полосы пропускания, возможно уменьшение результирующего ослабления распространяющегося СКИ (и наоборот). Поэтому при разработке МФ под конкретное РЭС важно соблюсти баланс между указанными характеристиками, обеспечив максимальное ослабление в полосе пропускания конкретного РЭС. Поэтому если важен контроль ПП (приведение к

конкретной частоте), вне зависимости от иных предъявляемых требований, критерий контроля ПП:

$$|f_x - f_{cp}| \rightarrow \min, \quad (4)$$

где f_x – заданное значение f_{cp} .

Это условие реализуется, как предыдущее, но минимизируется модуль разности f_x и определенного значения f_{cp} . В результате, чем меньше эта разница – тем результат ближе к заданной частоте. Тогда итоговый вид критерия (4) и соответствующего ему весового коэффициента

$$f_2 = |f_x - f_{cp}|, K_2 = f_{max}. \quad (5)$$

Результаты оптимизации по сформулированным критериям посредством трех алгоритмов сравнивались между собой по итоговым значениям оптимизированных параметров и ряду характеристик. Отклонение (Δ) рассчитывалось как

$$\Delta = \left| \frac{X_1 - X_2}{X_1 + X_2} \right| \cdot 100\%, \quad (6)$$

где X_1 – максимальное значение, X_2 – минимальное значение.

Апробация частотных критериев

Как отмечалось ранее, апробация сформулированных критериев выполнялась при моделировании и оптимизации МФ на основе 3-проводной МПЛ (рис. 1). В качестве оптимизируемых параметров выбраны h , t , s_1 и s_2 , как основные, оказывающие непосредственное влияние на изменение целевой функции (состоящей из одного из сформулированных критериев). Диапазоны изменения оптимизируемых параметров взяты (для всех алгоритмов): 200–1000 мкм для h , 18–200 мкм для t , 10–300 мкм для s_1 и s_2 . Выбранные диапазоны оптимизации соответствуют стандартному технологическому процессу изготовления печатных плат. Остальные параметры приняты неизменными: $w=1000$ мкм, $d=3w$, $\epsilon_r=4,5$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta=0,025$. Значение w ранее оптимизировано для обеспечения согласования одиночной МЛП 50 Ом. Кроме этого, задание неизменным одного из геометрических параметров МПЛ важно для сокращения числа глобальных экстремумов целевой функции в диапазоне оптимизируемых параметров. Значения ϵ_r и $\text{tg}\delta$ соответствуют материалу FR-4, выбранному в качестве диэлектрической подложки МФ. Эквивалентная схема данного МФ представлена на рис. 1б. Длина МФ принята $l=1$ м, а значения R_Γ , R_H и R взяты по 50 Ом. Частотные характеристики снимались при воздействии источника гармонической ЭДС 2 В. Вычисления выполнялись на нескольких персональных компьютерах (ПК) с незначительно отличными характеристиками и загруженностью. Начальные решения для алгоритма ЭС: $h=500$ мкм, $t=30$ мкм, $s_1=200$ мкм, $s_2=200$ мкм, а шаг – $\sigma=10$ мкм. Результаты оптимизации по критерию максимизации ПП с использованием ГА, ЭС и СП представлены в таблицах 1–3, куда сведены итоговые значения оптимизируемых параметров (h , t , s_1 и s_2), значения f_{cp} , максимальные значения напряжения

на выходе МФ (U_{\max}), время, затраченное на единичный расчет, а также отклонение результатов 5 запусков алгоритмов при конкретном числе вычислений. На рис. 2 показаны графики сходимости результатов из таблиц 1–3.

Таблица 1 – Результаты оптимизации по критерию максимизации ПП, полученные с помощью ЭС

N	h , МКМ	t , МКМ	s_1 , МКМ	s_2 , МКМ	U_{\max} , МВ	$f_{\text{ср}}$, МГц	Время, с
	$N_{\text{ит}}=500$						
1	264,8	19,1	277,9	216,5	259,4	448	5918
2	243,8	19,8	297,3	287,4	237	452,4	5383
3	232,5	19,5	297,9	164,8	283,5	453,9	5214
4	204,1	18,2	297,5	211	260,3	508,2	5240
5	248,5	25,6	297,9	11,1	344,3	516,6	4934
Δ , %	12,95	16,9	3,47	92,56	18,46	7,11	9,06
$N_{\text{ит}}=1000$							
1	292,4	26,2	282	13,7	346	451	3443
2	237,8	18	296,1	122,5	299,4	504,2	3535
3	257,1	18,2	296,5	36,8	333,8	510,7	3533
4	208,9	20	297,3	22,7	334,2	511	3684
5	237,9	22,2	290	11,7	342,9	516	3781
Δ , %	16,66	18,55	2,64	82,56	7,22	6,72	4,68
$N_{\text{ит}}=2500$							
1	250,3	18,1	293,2	23,8	339,9	513,3	8748
2	237,5	19,3	297,3	14,6	343,8	516,2	8321
3	236,3	21	297,7	17,3	342,2	515,2	8500
4	264,8	20,1	291,1	11,7	345,7	516,1	8939
5	257,1	20,4	290	11,6	346,3	516,3	8446
Δ , %	5,69	7,42	1,31	34,46	0,93	0,29	3,58
$N_{\text{ит}}=5000$							
1	232,2	21,4	295,3	10,4	344,8	516,4	22179
2	259,6	21,9	295,6	10,7	344,7	516,7	24629
3	235	18,6	295,2	32,8	332,8	511,3	12262
4	242,9	19,2	297,8	10,5	346,2	517,5	14135
5	257,6	18,3	299,8	11	345,4	518,2	16368
Δ , %	5,57	8,96	0,77	51,85	13,45	0,67	33,14

Из таблицы 1 следует, что наибольшее значение ПП в результате оптимизации посредством ЭС получено при $N_{\text{ит}}=5000$ и составляет 518,2 МГц. Для ГА наилучшее значение получено при $N_{\text{ит}}=5000$ и составляет 517 МГц, а для СП – 505,8 МГц (при $N_{\text{ит}}=2500$). Также наглядно видно, что с ростом $f_{\text{ср}}$ увеличивается U_{\max} . Для всех алгоритмов наибольшее значение Δ (для оптимизируемых параметров) соответствует параметру s_2 (от 34,46% до 92,56%). Это говорит о том, что его изменение мало влияет на целевую функцию. Минимум Δ соответству-

ет параметру s_1 (от 0,77% до 8,99%), что говорит о его существенном влиянии на целевую функцию.

Таблица 2 – Результаты оптимизации по критерию максимизации ПП, полученные с помощью ГА

N	h, мкм	t, мкм	s ₁ , мкм	s ₂ , мкм	U _{max} , мВ	f _{cp} , МГц	Время, с
	N _{it} =5/10						
1	338	23	288,6	204,5	272,3	434,6	380
2	209,4	20,9	253,4	130,5	279,7	439,2	511
3	222	20,1	261,3	10	338,8	446	340
4	425,9	27,3	284,1	165,8	285,6	399	360
5	278,4	57,3	299	35	339,5	441,2	363
Δ, %	34,08	48,06	8,25	90,68	11	5,56	20,09
N _{it} =10/10							
1	338	20,9	290,9	279,5	248,7	437,2	454
2	347,5	22,3	293,2	23,6	344,1	447,6	741
3	237,6	20,1	293,2	19,1	340,9	452	822
4	209,4	20,9	292	273,8	233,5	450,6	740
5	234,5	18	270,4	174,9	270,3	446,3	683
Δ, %	24,8	10,67	4,05	87,21	19,15	1,66	28,84
N _{it} =10/100							
1	222	22,3	295,5	13,4	341,5	515	6203
2	206,3	19,4	299	18	338	512	6016
3	203,1	18	297,7	245,4	246,7	509,5	5797
4	243,9	18	294,3	10	344,9	517,6	5763
5	297,3	22,3	297,7	10	350,5	461,1	2818
Δ, %	18,82	10,67	0,79	92,17	17,38	5,77	37,52
N _{it} =50/100							
1	237,6	22,3	296,6	12,3	344,4	516,4	12676
2	275,3	20,9	296,6	13,5	344,9	459,8	12592
3	212,5	19,4	300	257,9	243,4	509	12868
4	253,3	18,7	293,2	12,3	346	517	13208
5	215,7	19,4	300	15,7	338,6	514,3	13532
Δ, %	12,87	8,78	1,15	90,9	14,41	5,86	3,6

Таблица 3 – Результаты оптимизации по критерию максимизации ПП, полученные с помощью СП

N	h, мкм	t, мкм	s ₁ , мкм	s ₂ , мкм	U _{max} , мВ	f _{cp} , МГц	Время, с
	N _{it} =500						
1	261,2	29,6	298,1	174,2	282,5	444,7	5558
2	278,8	24	248,9	260	233,6	434	5306
3	307,4	30,6	291,3	255,3	252,9	435,8	7271
4	221,5	29,3	272,1	219,2	249,9	441	4752
5	241,8	22,7	282,5	86,4	309,8	445,3	4473

N	h , МКМ	t , МКМ	s_1 , МКМ	s_2 , МКМ	U_{\max} , МВ	$f_{\text{ср}}$, МГц	Время, с
	$N_{\text{ит}}=500$						
Δ , %	16,24	14,82	8,99	50,12	14,02	1,29	23,82
$N_{\text{ит}}=1000$							
1	260,9	21,3	259,6	189,7	263,6	441,1	13019
2	320,5	53,7	276,6	12,3	345,8	439,4	8948
3	231,5	38	288,6	266,9	239,2	441	8981
4	227,7	34,1	270,2	219,8	251	438,5	9091
5	265,7	20,7	270,2	162,2	278	443,4	9094
Δ , %	16,93	44,35	5,29	91,19	18,22	0,56	18,53
$N_{\text{ит}}=2500$							
1	268,7	21	287	285,7	237	447,2	6031
2	325,5	43,2	287,1	24,7	344,4	442	6540
3	217,5	24,3	281,8	188,5	267	446	7610
4	237,9	20,6	299,1	134,7	296,5	453,3	8399
5	230,4	20,3	295,9	71,6	319	505,8	8761
Δ , %	19,89	36,06	2,98	84,1	18,47	6,73	18,46
$N_{\text{ит}}=5000$							
1	209	22,2	286,8	189	266,4	446,5	13396
2	266,2	18,3	284,5	28,8	335,8	449,2	12669
3	211	18,7	299	94,1	309	505,3	13611
4	230,4	19,2	293,2	120,1	299,4	452,2	15732
5	217,5	21,4	289,6	201,4	264,5	448,6	19018
Δ , %	12,04	9,63	2,49	74,98	11,88	6,18	20,04

Между тем из таблицы 2 видно, что минимум Δ для ГА наблюдается при $N_{\text{ит}}=10/10$ и составляет 1,66%, однако при большем количестве вычислений сходимость ухудшается при увеличении значения $f_{\text{ср}}$. Это говорит о наличии явного локального экстремума, в который попадает ГА при недостаточном количестве вычислений. При этом миновать локальный экстремум возможно при увеличении числа вычислений (в данном случае, до 5000). Отклонение $f_{\text{ср}}$ при ЭС достигает 7,11% и 6,72% при $N_{\text{ит}}=500$ и 1000, однако далее достигает всего 0,29% при $N_{\text{ит}}=2500$ и 0,67% при $N_{\text{ит}}=5000$. Такое поведение говорит о том, что алгоритму ЭС достаточно 2500 вычислений для достижения глобального экстремума (разница между наилучшими значениями $f_{\text{ср}}$ при 2500 и 5000 вычислениях меньше 0,2%). Отклонения $f_{\text{ср}}$ не превышает 6% при ГА и 7% – при СП. В общем случае, при оптимизации МФ по критерию максимизации $f_{\text{ср}}$, сходимость $f_{\text{ср}}$ увеличивать только для алгоритма ЭС. Тем не менее, отклонение $f_{\text{ср}}$ не превышает 7% для всех алгоритмов, что приемлемо. Отметим, что сходимость оптимизируемых параметров и целевой функции у алгоритма СП ниже, чем у эволюционных алгоритмов, что вполне ожидаемо, учитывая его специфику.

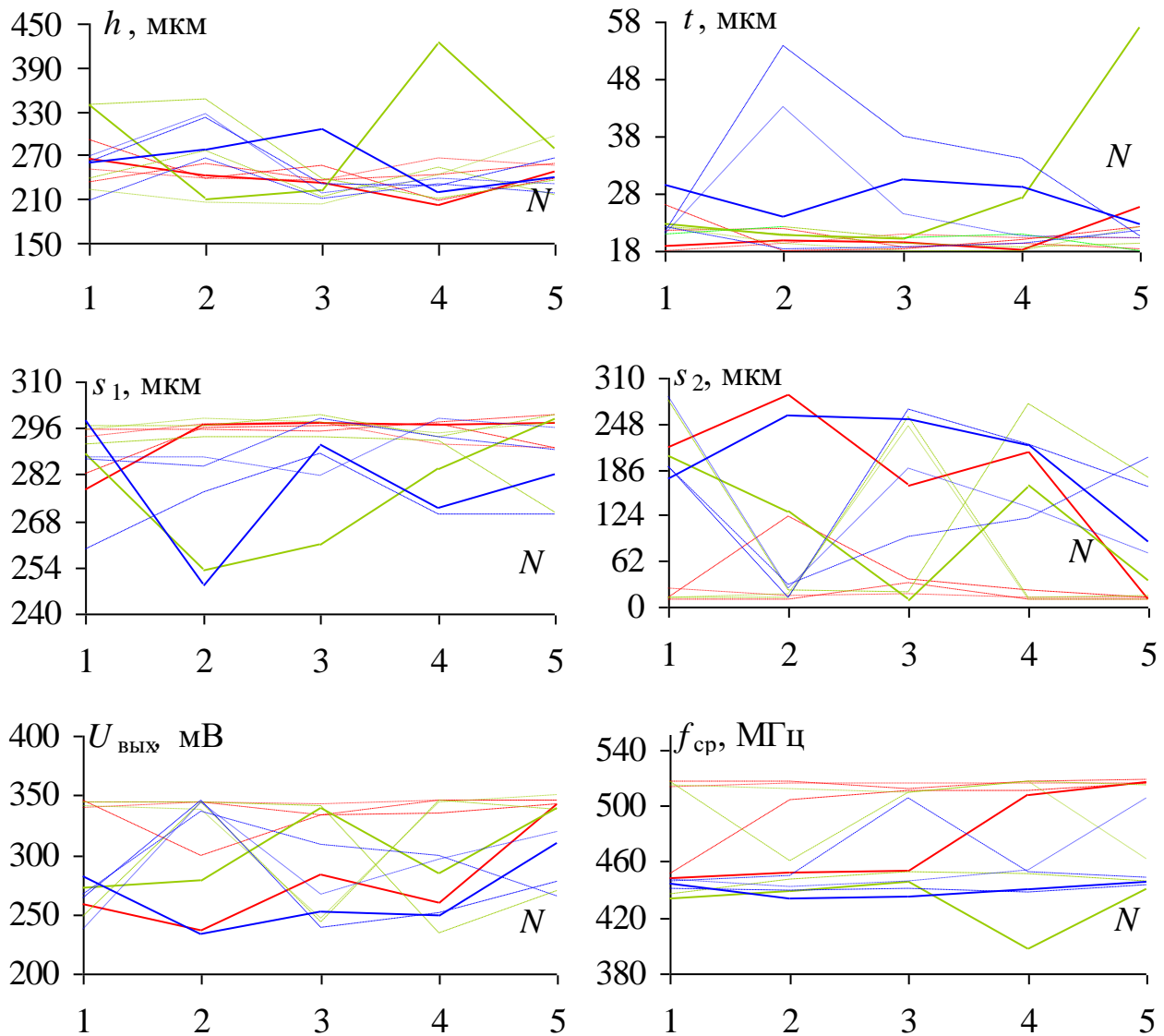


Рис. 2. Результаты оптимизации МФ по критерию максимизации ПП с использованием ЭС при $N_{it}=500$ (—), 1000 (- -), 2500 (⋯), 5000 (-·-), ГА при количестве особей/поколений 5/10 (—), 10/10 (- -), 10/100 (⋯), 50/100 (-·-), СП при $N_{it}=500$ (—), 1000 (- -), 2500 (⋯), 5000 (-·-)

Из таблиц 1–3 и рис. 2 видно, что во всех используемых алгоритмах при увеличении количества вычислений наблюдается рост значения $f_{\text{ср}}$, а вместе с тем – достижение глобального экстремума целевой функции (увеличение ПП). Вместе с этим растет значение U_{max} , что естественно при увеличении ПП. Примечательно, что при СП для параметра t , при $N_{it}=500$, 1000 и 2500, значение Δ достигает 44,35%, тогда как при $N_{it}=5000$ – снижается до 9,63%. Это говорит о важности оптимизации посредством алгоритма СП с большим числом вычислений.

Результаты оптимизации по критерию контроля ПП с использованием тех же алгоритмов представлены в таблицах 4–6. На рис. 3 показаны графики сходимости результатов из таблиц 4–6. Для апробации критерия контроля ПП, значение f_x (целевое значение $f_{\text{ср}}$) установлено на уровне 425 МГц.

Таблица 4 –Результаты оптимизации по критерию контроля ПП, полученные с помощью ЭС

N	h, МКМ	t, МКМ	s ₁ , МКМ	s ₂ , МКМ	U _{max} , МВ	f _{ср} , МГц	Время, с
1	334,4	22,3	231,9	75,7	307,9	424	1584
2	466,5	18,1	297,9	196,9	278,1	406,1	1573
3	376,5	19,5	287,2	215,3	269	425,9	1558
4	397,3	21,6	292,1	128,3	300	424,5	1540
5	266,9	48,8	277,4	193,3	270,4	425,8	1567
Δ, %	27,22	45,89	12,46	47,97	6,74	2,38	1,41
N _{ит} =1000							
1	384,4	28,6	274,5	59,2	327,3	425,9	3066
2	356,3	24,8	266,2	114,9	300	423,6	3099
3	413,9	29,6	277,8	36,8	338,3	425	3037
4	349,7	20,3	269,7	207,3	266,4	426	3120
5	368	21,2	286,8	233,6	263,5	425,36	3087
Δ, %	8,41	18,64	3,73	72,78	12,43	0,28	1,35
N _{ит} =2500							
1	246,6	55,7	269	137,4	289	425,5	6260
2	476	25,3	289,3	14,2	349,3	425,3	13730
3	338,7	26,6	260,6	119,2	296,7	424,6	14344
4	422,8	29,2	287,3	40,2	338,1	425,4	7444
5	332,9	29,6	272,6	154,4	286,8	424,6	7791
Δ, %	31,75	37,53	5,22	83,16	9,83	0,11	39,24
N _{ит} =5000							
1	317,5	28,6	267,1	230,3	256	424	4155
2	343,4	36,8	292,9	135,8	300,9	425,2	13102
3	302,1	41,7	290,1	271,4	246,9	424	7383
4	404	19	296	176,6	284,5	423,7	12522
5	391,9	23,4	283,4	93,5	311,5	424,8	9133
Δ, %	14,43	37,4	5,13	48,75	11,57	0,18	51,85

Таблица 5 –Результаты оптимизации по критерию контроля ПП, полученные с помощью ГА

N	h, МКМ	t, МКМ	s ₁ , МКМ	s ₂ , МКМ	U _{max} , МВ	f _{ср} , МГц	Время, с
1	382	28,7	292	86,2	318,5	427,1	419
2	272,2	50,8	288,6	277,3	241	424,8	395
3	987,5	27,3	290,9	47,5	328	395,4	432
4	385,1	29,4	278,4	69,1	323,6	424,1	416
5	294,1	74,4	282,9	111,2	309,8	371,3	473
Δ, %	56,78	46,31	2,38	70,75	15,29	6,99	8,99

N	h, МКМ	t, МКМ	s ₁ , МКМ	s ₂ , МКМ	U _{max} , мВ	f _{cp} , МГц	Время, с
	N _{it} =10/10						
1	287,8	41,6	264,7	132,8	292,9	425,5	776
2	265,9	29,4	230,6	160,1	266,2	424,7	1006
3	237,6	43,7	263,6	222,7	248,6	430,8	978
4	360	23,7	287,5	284,1	247,1	422,3	897
5	479,2	27,3	300	25,9	344	420	741
Δ, %	33,71	29,67	13,08	83,29	16,39	1,27	15,17
N _{it} =10/100							
1	391,4	22,3	261,3	58,9	322,9	424,1	5959
2	237,6	35,1	226,1	113,5	283,4	425,3	6263
3	275,3	55,1	273,8	122,6	300,5	425,2	6236
4	262,7	25,1	215,8	136,2	269,4	424,5	6239
5	319,2	53	285,2	95,3	316,9	424,6	6226
Δ, %	24,45	42,38	13,85	39,62	9,03	0,14	2,49
N _{it} =50/100							
1	269	22,3	196,5	69,1	298,2	425,4	34101
2	394,5	28,7	272,7	54,4	328,5	423,5	32235
3	366,3	35,1	294,3	101	312,5	425	32229
4	369,4	18	256,8	101	301,5	424,8	35064
5	287,8	44,4	271,6	140,8	291,8	425,5	12820
Δ, %	18,91	42,3	19,93	44,26	5,92	0,24	46,45

Таблица 6 – Результаты оптимизации по критерию контроля ПП, полученные с помощью СП

N	h, МКМ	t, МКМ	s ₁ , МКМ	s ₂ , МКМ	U _{max} , мВ	f _{cp} , МГц	Время, с
	N _{it} =500						
1	313,5	35,5	272,4	144,4	290,8	425,5	1545
2	298,3	36,7	267	156,6	282	425,5	1569
3	329,4	23	263,8	273,8	240,5	423,4	1650
4	219	59,8	272,3	141,9	285,1	376,3	1653
5	417,1	26	263,5	19,5	344	429,6	1700
Δ, %	31,14	44,44	1,66	86,7	17,71	6,61	4,78
N _{it} =1000							
1	325,9	22,3	246,3	120	291,4	425,8	3099
2	367,1	55,8	280,8	10,4	347,8	428,1	3171
3	298,2	36,3	277,8	198,5	270,4	428	3155
4	205,3	47,3	253,4	66,3	308,4	427,8	3128
5	209,9	42	248	90,9	296,2	427,2	3085
Δ, %	28,27	42,89	6,55	90,04	12,52	0,27	1,37

N	h, мкм	t, мкм	s ₁ , мкм	s ₂ , мкм	U _{max} , мВ	f _{cp} , МГц	Время, с
	N _{it} =2500						
1	422,5	36,8	282,2	15,7	348,4	424,8	7724
2	250,2	45,8	260,8	22,4	335,8	440,2	8159
3	298,9	33,9	243,1	91,2	304,8	425,6	8579
4	283,4	39,9	262,1	158,8	280,4	424,6	7691
5	249,5	33	221,6	105,2	287,3	424,9	8228
Δ, %	25,74	16,24	12,03	82	10,81	1,8	5,46
N _{it} =5000							
1	228	38,1	229,7	108,8	285,7	425,3	16036
2	430,5	18,2	249	26,1	336,9	423,5	15941
3	416	19,5	279,4	71,6	319	424,3	16372
4	277,5	58,5	289,6	152,4	290,9	425	16506
5	305,8	29,2	229,7	83,6	302,2	423,7	15860
Δ, %	30,75	52,54	11,53	70,76	8,22	0,21	2

Из таблиц 4–6 следует, что все алгоритмы достигли глобального экстремума (425 МГц). Важно то, что при любом значении N_{it} для всех алгоритмов, так или иначе, достигается глобальный экстремум целевой функции. Кроме этого, отклонение f_{cp} при оптимизации посредством ЭС, ГА и СП достигает 2,38%, 6,99% и 6,61% при $N_{it}=500$, однако далее достигает всего 0,18%, 0,24% и 0,21% при $N_{it}=5000$. Такое поведение говорит о том, что алгоритмам, в общем случае, достаточно 500 вычислений для достижения глобального экстремума (разница между наилучшими значениями f_{cp} при 1000, 2500 и 5000 вычислениях меньше 0,2% для ЭС, 0,4% для ГА и 1,8% для СП). Аналогично, для всех алгоритмов наибольшее значение Δ (для оптимизируемых параметров) соответствует параметру s_2 (от 39,62% до 90,04%). Наименьшее значение Δ соответствует параметру s_1 (от 1,66% до 19,93%). Отклонения полученных значений f_{cp} не превышают 3% при оптимизации посредством ЭС и 7% – при ГА и СП. Так, отклонение f_{cp} не превышает 7% для всех алгоритмов, что приемлемо.

Из таблиц 4–6 и рис. 3 видно, что во всех используемых алгоритмах при увеличении количества вычислений результат приближается к искомому значению 425 МГц. Примечательно, что в случае оптимизации по критерию контроля ПП, большинство вычислений при использовании ЭС (при $N_{it}=1000, 2500$ и 5000) заканчивались по причине достижения сходимости целевой функции.

Результаты оптимизации по критерию контроля ПП с использованием тех же алгоритмов представлены в таблицах 4–6. Для апробации критерия контроля ПП, значение f_x (целевое значение f_{cp}) установлено на уровне 425 МГц.

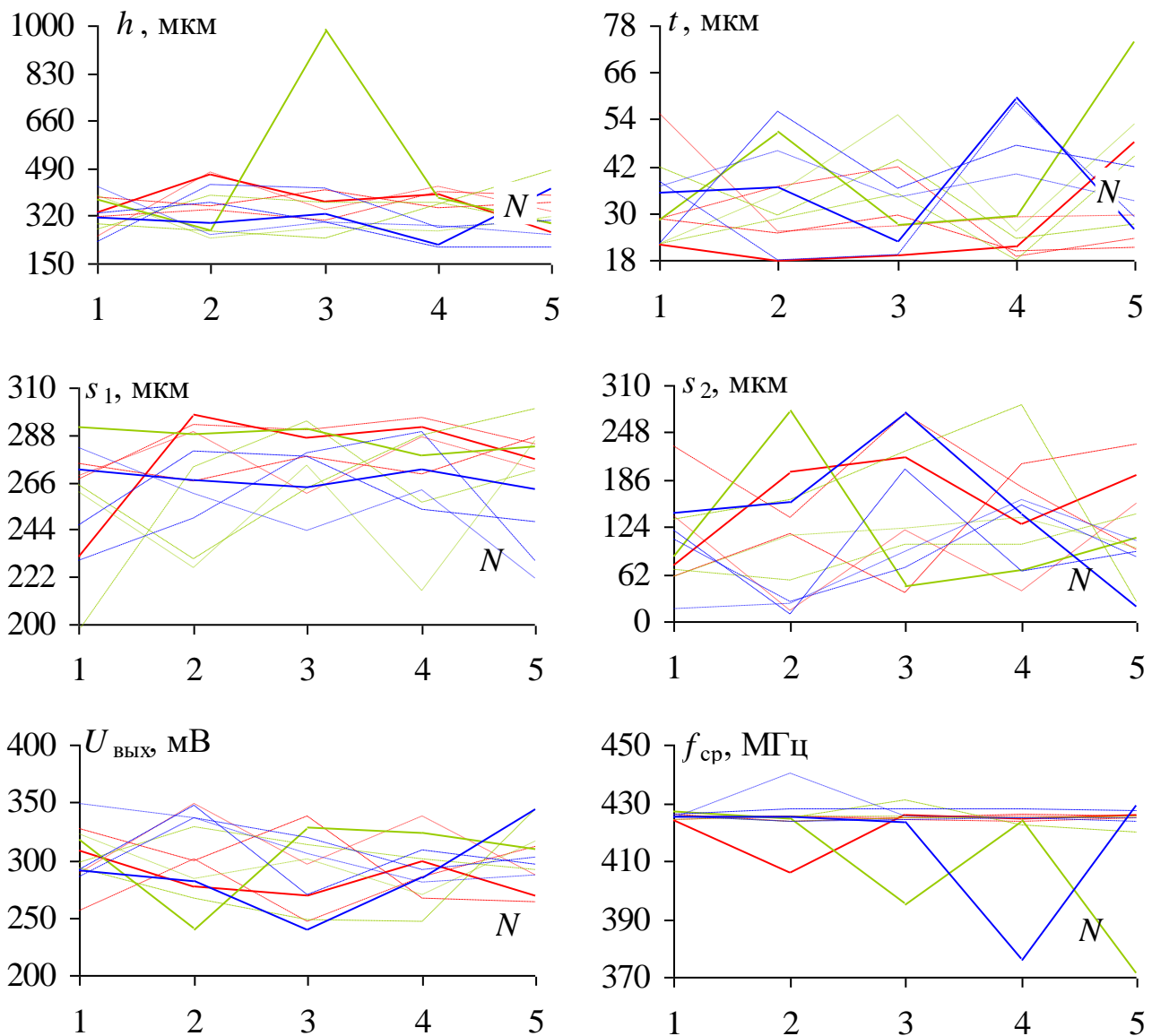


Рис. 3. Результаты оптимизации МФ по критерию контроля ПП с использованием ЭС при $N_{it}=500$ (—), 1000 (- -), 2500 (···), 5000 (-·-), ГА при количестве особей/поколений 5/10 (—), 10/10 (- -), 10/100 (···), 50/100 (-·-), СП при $N_{it}=500$ (—), 1000 (- -), 2500 (···), 5000 (-·-)

Для полноты исследования, на рис. 4а приведены формы напряжений на входе и выходе МФ после оптимизации по амплитудному и частотным критериям. В [27] выполнена оптимизация МФ на основе МПЛ по амплитудному критерию (для минимизации выходного напряжения). Наименьшее значение U_{max} достигнуто при параметрах МФ: $h=990,6$ мкм, $t=191,4$ мкм, $s_1=10$ мкм, $s_2=55,5$ мкм. Для МФ после оптимизации по критерию максимизации ПП взят результат запуска ЭС (при $N_{it}=5000$) с параметрами: $h=257,6$ мкм $t=18,3$ мкм $s_1=299,8$ мкм $s_2=11$ мкм. Для МФ после оптимизации по критерию контроля ПП взят результат запуска ГА (при $N_{it}=50/100$) с параметрами: $h=366,3$ мкм, $t=35,1$ мкм, $s_1=294,3$ мкм, $s_2=101$ мкм. Для анализа во временной области в качестве входного воздействия взят СКИ с амплитудой ЭДС 1 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада импульса по 50 пс, так что общая дли-

тельность СКИ составляет 150 пс. Значения l , а также R_{Γ} , R_{H} и R остались без изменений. На рис. 4б представлены зависимости коэффициента передачи $|S_{21}|$ при оптимизации МФ по трем различным критериям.

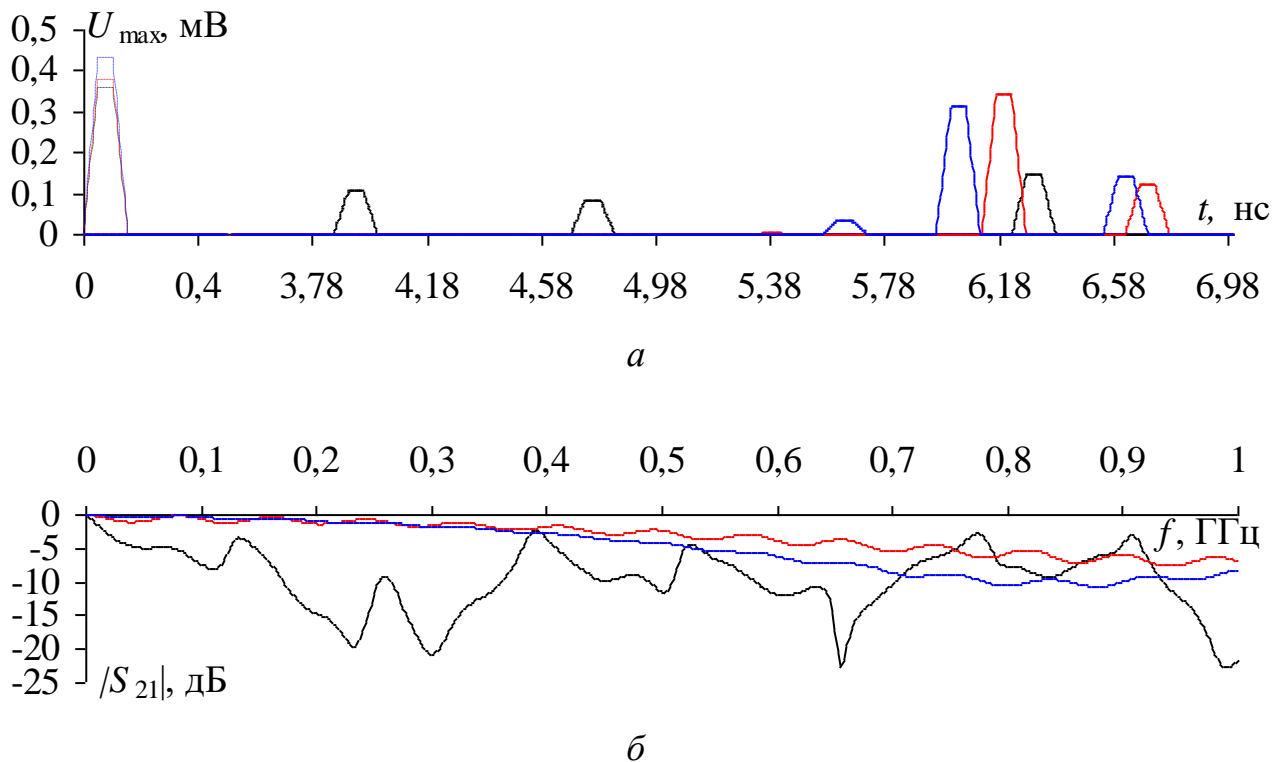


Рис. 4. Формы напряжений на входе (---) и выходе (—) МФ при оптимизации по амплитудному критерию, на входе (---) и выходе (—) МФ при оптимизации по критерию максимизации ПП, на входе (---) и выходе (—) МФ при оптимизации по критерию максимизации ПП (а); $|S_{21}|$ МФ с параметрами, полученными после оптимизации по амплитудному критерию (—), по критерию максимизации ПП (—), а также по критерию контроля ПП (—) (б)

Из рис. 4а видно, что формы выходных напряжений для МФ с параметрами, полученными в результате оптимизации по амплитудному и частотным критериям, существенно разнятся. В частности, минимальное значение U_{max} на выходе МФ, оптимизированного по амплитудному критерию, составляет 145 мВ (ослабление СКИ на входе МФ составляет 2,5 раза при моделировании без учета потерь), а значения разностей погонных задержек импульсов разложения ($\Delta\tau$) составляют 0,832 и 1,536 нс/м (между модами 1 и 2, 2 и 3, соответственно). В то же время, для МФ, оптимизированных по критериям максимизации и контроля ПП минимальные значения U_{max} составили 345 и 312 мВ (ослабление СКИ на входе МФ – 1,1 и 1,4 раза при моделировании без учета потерь), а значения $\Delta\tau$ – 0,772, 0,512 нс/м и 0,392 и 0,58 нс/м, соответственно. Очевидно, что защитные характеристики (в части максимального ослабления U_{max} на выходе и значений $\Delta\tau$) лучше у МФ, оптимизированного по амплитудному критерию.

Из рис. 4б следует, что форма $|S_{21}|$ МФ с параметрами, полученными после оптимизации по критерию максимизации ПП, имеет преимущественно осцилляционный характер. Причиной этого может являться частичное рассогласование линии с включаемым трактом, что также следует из формы входного воздействия (которая в случае согласования должна достигать 0,5 от уровня ЭДС) на рис. 4а. Этот факт подтверждают временные зависимости для МФ, полученные при оптимизации по критерию контроля ПП, где осцилляции имеют менее выраженный характер. Так, напряжение на входе МФ при оптимизации по критерию контроля ПП составило 431 мВ, тогда как в случае оптимизации по критерию максимизации ПП – 385 мВ. Тем не менее, значение f_{cp} МФ оптимизированного по амплитудному критерию составляет всего 20,9 МГц, в то время как для МФ, оптимизированных по критериям максимизации и контроля ПП – 518,2 и 425 МГц.

Выводы

В работе впервые сформулированы два новых критерия, пригодных для оптимизации структур с модальными явлениями (причем с любыми геометрическими и схемными исполнениями) в частотной области. Первый целесообразно применять для максимизации ПП МФ в задачах, когда требуется увеличение ПП до предельно возможного в заданном диапазоне оптимизируемых параметров, а второй – в задачах, когда задана конкретная ПП защищаемого устройства, а увеличение ПП МФ может быть излишним (например, при одновременно установленном требовании к коэффициенту ослабления МФ). Выполнена апробация сформулированных критериев при оптимизации МФ на основе МПЛ с использованием трех различных алгоритмов. В результате оптимизации по критерию максимизации ПП в диапазоне заданных параметров, удалось увеличить ПП МФ (изначально оптимизированного по амплитудному критерию) с 20,9 до 518,2 МГц. При оптимизации по критерию контроля ПП получена величина f_{cp} равная требуемой (425 МГц) при использовании всех алгоритмов. Выполнен детальный анализ результатов оптимизации с использованием трех алгоритмов.

Определено, что для оптимизации в частотной области наиболее предпочтительным алгоритмом является ЭС (ввиду лучшей сходимости при нахождении глобального экстремума целевой функции). При этом, при оптимизации по критерию контроля ПП (в отличие от максимизации ПП), нет необходимости в увеличении числа вычислений до 5000, поскольку сходимость целевой функции к глобальному экстремуму в явном виде наблюдается уже при 1000 вычислениях.

Таким образом, сформулированные критерии успешно апробированы на примере оптимизации МФ с реальными параметрами и могут быть результативно использованы при их проектировании. Дальнейшим шагом является проработка возможности многокритериальной оптимизации с использованием частотных критериев, в том числе одновременно с критериями, пригодными для

оптимизации исключительно во временной области (амплитудный и временные критерии, критерий согласования).

Моделирование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-900.2022.4. Оптимизация выполнена при финансовой поддержке проекта «Приоритет-2030. Дальний Восток».

Литература

1. Hamamah F., Ahmad W. W., Gomes C., Isa M. M., Homam M. Concerns on the Risk of Malaysian Civil and Defense Systems Due to Intentional Electromagnetic Interference // IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE). 2019. P. 1–6. doi: 10.1109/APACE47377.2019.9021096.
2. Kaur M., Kakar S., Mandal D. Electromagnetic interference // 2011 3rd Intern. Conference on Electronics Computer Technology. 2011. P. 1–5. doi: 10.1109/ICECTECH.2011.5941844.
3. Shirai R., Wada K., Shimizu T. Failure Protection Method for CAN Communication Against EMI Noise Generated by Switched-Mode Power Supplies // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2021. Vol. 9. № 5. P. 6152–6160. doi: 10.1109/JESTPE.2021.3053025.
4. Xi Y., Salcedo J. A., Dong A., Liou J. J., Hajjar J.-J. Robust Protection Device for Electrostatic Discharge/Electromagnetic Interference in Industrial Interface Applications // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2016. Vol. 16. № 2. P. 263–265. doi: 10.1109/TDMR.2016.2530701.
5. Gizatullin Z., Shkinderov M. Increasing the Noise Immunity of the Access Monitoring and Control System under the Influence of Electrostatic Discharge // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2021. P. 515–519. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446434.
6. Malyutin N. D., Trenkal E. I., Sychev A. N. An experimental research of the ultra-wideband pulse propagation in a transdirectional coupler based on coupled striplines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 919. № 052017. P. 1–5. doi: 10.1088/1757-899X/919/5/052017.
7. Khristenko A. V., Konovalenko M. O., Rovkin M. E., Khlusov V. A., Marchenko A. V., Sutulin A. A. Malyutin N. D. Magnitude and Spectrum of Electromagnetic Wave Scattered by Small Quadcopter in X-Band // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66. № 4. P. 1977–1984. doi: 10.1109/TAP.2018.2800640.
8. Shishir R. Providing EMI protection and addressing EMC compatibility issues in a cognitive radio network // 2016 International Conference on ElectroMagnetic Interference & Compatibility (INCEMIC). 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/INCEMIC.2016.7921513.

9. Su D., Wu J., Shang X., Zhu K., Peng Z. A novel method of detecting and analyzing electromagnetic emission // 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC). 2017. P. 1156–1158. doi: 10.1109/APMC.2017.8251662.

10. Bai J., Shi Y., Zhao G. Research on electromagnetic interference of vehicle GPS navigation equipment // IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing). 2017. P. 1–5. doi: 10.1109/EMC-B.2017.8260366.

11. New electromagnetic protection devices based on filtering / Y. Fei, H. Haoquan, L. Ruiming, L. Lutong, L. Zhipeng // IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing). 2017. P. 1–3. doi: 10.1109/EMC-B.2017.8260382.

12. Nevlyudov I., Palagin V., Botsman I. The general principles of electromagnetic compatibility improving with microsystem technology using // 2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T). 2016. P. 237–238. doi: 10.1109/INFOCOMMST.2016.790539.

13. Бурутин А. Г., Балюк Н. В., Кечиев Л. Н. Электромагнитные эффекты среды и функциональная безопасность радиоэлектронных систем вооружения // Технологии ЭМС. 2010. № 1 (32). С. 3–27.

14. Bai J., Shi Y., Zhao G. Research on electromagnetic interference of vehicle GPS navigation equipment // IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing). 2017. P. 1–5. doi: 10.1109/EMC-B.2017.8260366.

15. Lee H., Kim K., Yousaf J., Nah W., Youn J., Lee D., Hwang C. Analysis of electromagnetic field interference between an antenna and a multiple-noise source using active scattering parameters // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI). 2017. P. 643–646. doi: 10.1109/ISEMC.2017.8077947.

16. 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 // XIV Intern. Scientific-Technical Conf. on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). 2018. P. 355–358. doi: 10.1109/APEIE.2018.8545950.

17. Егоров А. Б., Сотников А. М., Рыбалко И. Ф. Воздействие мощного электромагнитного излучения на радиоэлектронные средства // Сборник научных трудов ДонИЖТ. 2012. № 29. С. 49–54.

18. 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. doi: 10.1109/TEMC.2016.2548783.

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

20. Gordeyeva V. O, Belousov A. O. Multicriteria Optimization of Modal Filters Using Evolutionary Algorithms and Random Search Method // IEEE 24th

International Conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2023). 2023. P. 1–6. doi: 10.1109/EDM58354.2023.10225018.

21. Liu X., Li Z., Xu P., Li J. Joint Optimization for Bandwidth Utilization and Delay Based on Particle Swarm Optimization // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 92125–92133. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091693.

22. Huang W., Yang Z., Pan C., Pei L., Chen M., Shikh-Bahaei M., Elkashlan M., Nallanathan A. Joint Power, Altitude, Location and Bandwidth Optimization for UAV With Underlaid D2D Communications // *IEEE Wireless Communications Letters*. 2019. Vol. 8. № 2. P. 524–527. doi: 10.1109/LWC.2018.2878706.

23. Куксенко С. П., Газизов Т. Р., Квасников А. А., Демаков А. В., Иванов А. А., Ключкин Д. В., Алхадж Хасан А., Максимов А. Е., Осинцев А. В. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР // *Наноиндустрия*. 2023. Т. 16. № S9–1(119). С. 170–178.

24. Belousov A.O., Gazizov T.R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters // *Complexity*. 2018. Vol. 2018. P. 1–15. doi: 10.1155/2018/5676504.

25. Pereira V. Python: Random Search algorithm // Github [Электронный ресурс]. 18.10.2023. – URL: https://github.com/Valdecy/pyMetaheuristic/blob/main/pyMetaheuristic/algorithm/random_s.py (дата обращения: 18.10.2023).

26. Anderson R. L. Recent Advances in Finding Best Operating Conditions // *Journal of the American Statistical Association*. 2012. Vol. 264. № 48. P. 789–798. doi: 10.1080/01621459.1953.10501200.

27. Gordeyeva V. O., Belousov A. O. Optimization of strip modal filters by random search method // *Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON–2022)*. 2022. P. 1–5. doi: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002986.

References

1. Hamamah F., Ahmad W. W., Gomes C., Isa M. M., Homam M. Concerns on the Risk of Malaysian Civil and Defense Systems Due to Intentional Electromagnetic Interference. *Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, Melacca, Malaysia, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/APACE47377.2019.9021096.

2. Kaur M., Kakar S., Mandal D. Electromagnetic interference. *3rd International Conference on Electronics Computer Technology*, Kanyakumari, India, 2011, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICECTECH.2011.5941844.

3. Shirai R., Wada K., Shimizu T. Failure Protection Method for CAN Communication Against EMI Noise Generated by Switched-Mode Power Supplies. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, vol. 9, no. 5, pp. 6152–6160. doi: 10.1109/JESTPE.2021.3053025.

4. Xi Y., Salcedo J. A., Dong A., Liou J. J., Hajjar J.-J. Robust Protection Device for Electrostatic Discharge/Electromagnetic Interference in Industrial Interface Applications. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 263–265. doi: 10.1109/TDMR.2016.2530701.

5. Gizatullin Z., Shkinderov M. Increasing the Noise Immunity of the Access Monitoring and Control System under the Influence of Electrostatic Discharge. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Sochi, Russia, 2021, pp. 515–519. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446434.

6. Malyutin N. D., Trenkal E. I., Sychev A. N. An experimental research of the ultra-wideband pulse propagation in a transdirectional coupler based on coupled striplines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 919, no. 052017, pp. 1–5. doi: 10.1088/1757-899X/919/5/052017.

7. Khristenko A. V., Konovalenko M. O., Rovkin M. E., Khlusov V. A., Marchenko A. V., Sutulin A. A., Malyutin N. D. Magnitude and Spectrum of Electromagnetic Wave Scattered by Small Quadcopter in X-Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 4, pp. 1977–1984. doi: 10.1109/TAP.2018.2800640.

8. Shishir R. Providing EMI protection and addressing EMC compatibility issues in a cognitive radio network. *International Conference on ElectroMagnetic Interference & Compatibility (INCEMIC)*, Bengaluru, India, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/INCEMIC.2016.7921513.

9. Su D., Wu J., Shang X., Zhu K., Peng Z. A novel method of detecting and analyzing electromagnetic emission. *Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2017, pp. 1156–1158. doi: 10.1109/APMC.2017.8251662.

10. Bai J., Shi Y., Zhao G. Research on electromagnetic interference of vehicle GPS navigation equipment. *5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, Beijing, China, 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/EMC-B.2017.8260366.

11. Fei Y., Haoquan H., Ruiming L., Lutong L., Zhipeng L. New electromagnetic protection devices based on filtering. *5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, Beijing, China, 2017, pp. 1–3. doi: 10.1109/EMC-B.2017.8260382.

12. Nevlyudov I., Palagin V., Botsman I. The general principles of electromagnetic compatibility improving with microsystem technology using. *Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2016, pp. 237–238. doi: 10.1109/INFOCOMMST.2016.790539.

13. Burutin A.G., Baljuk N.V., Kechiev L.N. Electromagnetic effects of Environment and Functional Safety Radio-electronic Systems of Arms. *Tekhnologii EMC*, 2010, no. 1, pp. 3–27. (In Russian)

14. Bai J., Shi Y., Zhao G. Research on electromagnetic interference of vehicle GPS navigation equipment. *5th International Symposium on Electromagnetic*

Compatibility (EMC-Beijing), Beijing, China, 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/EMC-B.2017.8260366.

15. Lee H., Kim K., Yousaf J., Nah W., Youn J., Lee D., Hwang C. Analysis of electromagnetic field interference between an antenna and a multiple-noise source using active scattering parameters. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*, Washington, DC, USA, 2017, pp. 643–646. doi: 10.1109/ISEMC.2017.8077947.

16. 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. *XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, Novosibirsk, Russia, 2018, pp. 355–358. doi: 10.1109/APEIE.2018.8545950.

17. Egorov A. B., Sotnikov A. M., Rybalko I. F. Vozdeistvie moschnogo elektromagnitnogo izlucheniya na radioelektronnie sredstva [Impact of powerful electromagnetic radiation on radio-electronic equipment]. *Sbornik nauchnikh trudov DonIJT*, 2012, no. 29, pp. 49–54.

18. 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. doi: 10.1109/TEMC.2016.2548783.

19. Norenkov I.P. *Avtomatizirovannoe proektirovanie* [Computer-aided design]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2000. 188 p. (In Russian)

20. Gordeyeva V. O., Belousov A. O. Multicriteria Optimization of Modal Filters Using Evolutionary Algorithms and Random Search Method. *24th International Conference on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2023)*, Erlagol, Altai, 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/EDM58354.2023.10225018.

21. Liu X., Li Z., Xu P., Li J. Joint Optimization for Bandwidth Utilization and Delay Based on Particle Swarm Optimization. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 92125–92133. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091693.

22. Huang W., Yang Z., Pan C., Pei L., Chen M., Shikh-Bahaei M., Elakashlan M., Nallanathan A. Joint Power, Altitude, Location and Bandwidth Optimization for UAV With Underlaid D2D Communications. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, vol. 8, no. 2, pp. 524–527. doi: 10.1109/LWC.2018.2878706.

23. Kuksenko S. P., Gazizov T. R., Kvasnikov A. A., Demakov A. V., Ivanov A. A., Klyukin D. V., Alhadge Hasan A., Maksimov A. E., Osintsev A. V. Developing Software for Modelling Radioelectronic Equipment with Respect to Electromagnetic Compatibility in TUSUR. *Nanoidustria*, 2023, vol. 16, no. 119, pp. 170–178.

24. Belousov A. O., Gazizov T. R. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters. *Complexity*, 2018, vol. 2018, pp. 1–15. doi: 10.1155/2018/5676504.

25. Pereira V. Python: Random Search algorithm. *Github*, 18.10.2023. Available at: https://github.com/Valdecy/pyMetaheuristic/blob/main/pyMetaheuristic/algorithm/random_s.py (accessed 18.10.2023).

26. Anderson R. L. Recent Advances in Finding Best Operating Conditions. *Journal of the American Statistical Association*, 2012, vol. 264, no. 48, pp. 789–798. doi: 10.1080/01621459.1953.10501200.

27. Gordeyeva V. O., Belousov A. O. Optimization of strip modal filters by random search method. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON–2022)*, Russia, Tomsk, 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002986.

Статья поступила 21 ноября 2023 г.

Информация об авторах

Белоусов Антон Олегович – кандидат технических наук, доцент и докторант кафедры телевидения и управления, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Научный сотрудник центра экспертизы и испытаний Сахалинского государственного университета. 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, младший научный сотрудник 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

Ким Георгий Юрьевич – аспирант кафедры телевидения и управления, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, защитные меандровые линии, оптимизация полосковых структур, разработка ПО. E-mail: kimgeoju@gmail.com

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

Optimization of a modal filter based on a microstrip line according to frequency criteria

A. O. Belousov, V. O. Gordeyeva, G. Yu. Kim

Purpose. In the last decade, the proper functioning of modern radio-electronic equipment has been complicated by a complex electromagnetic environment due to the influence of electromagnetic interference (EMI) of various natures. Ultrashort pulses (USPs) can act as EMIs, which are particularly dangerous due to their high voltage level and fast rise time. The response time of traditional protective devices is often insufficient. Therefore, other devices for protection against USPs, called modal filters (MFs), are being actively developed. When designing an MF, the developer has the need to select a set of optimal parameters for a specific application area. For this purpose, global optimization methods are effectively used, in particular, the genetic algorithm (GA), evolutionary strategies (ES) and the random search (RS) method. At the moment, a number of criteria have been formulated for optimizing MF in the time domain. At the same time, analysis of the frequency characteristics of the MF is no less important. For example, when taking into account the requirements for the bandwidth of the useful signal. Thus, realizing the possibility of optimizing MFs in the frequency domain when designing them for specific electrical circuits is an urgent task. Formulation and approbation of frequency criteria for maximizing and controlling useful signal bandwidth when optimizing MF based on a 3-conductor microstrip line (MSL). **Methods.** Simulation and optimization were performed in the TALGAT quasi-static system based on the method of moments. Optimization was performed using a genetic algorithm (GA), a modified evolutionary strategies (ES) algorithm, and a random search (RS) algorithm. Optimization was accomplished separately according to two new frequency criteria: maximization and control of the useful signal bandwidth. **Novelty.** For the first time, two criteria were formulated and tested for optimizing any strip or cable structures in the frequency domain: maximization (to maximize the cutoff frequency MF) and control (to set the cutoff frequency to the required value) of the bandwidth. **Results.** For the first time, two new criteria were formulated and approved, suitable for optimizing any structures with modal phenomena in the frequency domain. These are criteria for maximizing and controlling the bandwidth of the useful signal. When optimizing within the range of specified parameters according to the first criterion, it was possible to increase the bandwidth of MF from 20.9 to 518.2 MHz when using ES, to 517 MHz (using GA) and to 505.8 MHz (using SP). When optimizing according to the second criterion, it was possible to obtain the required bandwidth level of 425 MHz for all algorithms. Taking into account a detailed assessment of the algorithms operation, the most preferable algorithm for optimization in the frequency domain is ES due to the best convergence rates and finding the global extremum of the objective function. The formulated criteria have been successfully approved in the optimization of MFs with real parameters and can be effectively used in their design. The results obtained have practical applications. **Practical relevance.** The formulated frequency optimization criteria make it possible to take into account the bandwidth level when designing protective devices operating on the principle of modal filtration. They are applicable to various types of MFs, regardless of the structure (strip or cable) and can be effectively used in design.

Key words: electromagnetic compatibility, ultrashort pulse, optimization, evolutionary algorithms, bandwidth.

Information about Authors

Anton Olegovich Belousov – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor and Doctoral Student 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. Researcher at the Center for Expertise and Testing at Sakhalin State University. 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, Junior researcher 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

Georgiy Yurievich Kim – Graduate at the Department of Television and Control, Junior researcher 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, protective meander lines, optimization of strip structures, software development. E-mail: kimgeoju@gmail.com

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