

УДК 621.3.049.779

Усовершенствованный алгоритм исследования безопасности электронных цепей с помощью N -норм в радиоэлектронной аппаратуре

Газизов Р. Р.*

(*научный руководитель исследования: профессор департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», доктор технических наук Елизаров А. А.)

Постановка задачи: с ростом числа электронных устройств их совместная работа может затрудняться. Существующая тенденция к миниатюризации мотивирует разработчиков радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) проектировать компоненты так, чтобы между ними было минимальное расстояние. Тема взаимовлияний устройств актуальна и из-за существования сложных критических комплексов систем, в которых выход одного компонента из строя может повлиять на всю систему. Примерами таких систем являются крупные центры обработки данных или аппараты аэрокосмической отрасли. Как известно, при взаимодействии компонентов РЭА есть вероятность появления электромагнитных помех или наводок, которые могут негативно повлиять на работоспособность критичных элементов. Сложность разработки устройств с учетом их безопасности заключается в больших временных затратах на проектирование электронной техники, благодаря системам моделирования у инженеров появляется возможность сократить время на разработку аппаратуры, при этом учесть случаи, при которых могут появляться потенциально опасные состояния, например, электрические пробои, наводки или искрения компонентов, при расположении нескольких проводов близко друг к другу. Благодаря поиску экстремумов напряжения и использованию N -норм появляется возможность находить уязвимые места – с наибольшим напряжением. Таким образом, совершенствование систем моделирования является одним из эффективных способов поиска и предотвращения неконтролируемого поведения электронной техники на этапе проектирования РЭА. **Целью работы** является сравнение работы существовавшего и усовершенствованного алгоритмов определения отклика сигналов по всем возможным путям распространения с использованием N -норм на тестовых и реальной структурах. **Используемые методы:** в рамках исследования применяются поиск экстремумов напряжения, N -нормы, квазистатический анализ многопроводных линий передачи. **Новизна:** сравнение работы алгоритма определения всевозможных путей с ранее существующим с применением N -норм впервые проведено на примере реальной структуры. **Результат:** использование нового алгоритма позволило определять все возможные пути распространения сигналов на примере 6 структур, одна из которых является реальным модальным фильтром. В результате моделирования получено, что при использовании усовершенствованного алгоритма найден глобальный максимум напряжения, превышающий найденный старым алгоритмом на 15%, а также найден минимум, превышающий старое значение на 110%. **Практическая значимость:** проведение сравнения алгоритма на примере реальной структуры позволило шире апробировать работу нового алгоритма. Доработка алгоритма позволит более качественно анализировать безопасность электронных устройств повышенной сложности. Улучшение алгоритма реализовано в отечественном программном обеспечении TALGAT, что важно для технологического развития нашей страны.

Библиографическая ссылка на статью:

Газизов Р. Р. Усовершенствованный алгоритм исследования безопасности электронных цепей с помощью N -норм в радиоэлектронной аппаратуре // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 4. С. 267-282. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-267-282

Reference for citation:

Gazizov R. R. An improved algorithm for studying the safety of electronic circuits using N -norms in electronic equipment. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 4, pp. 267-282 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-4-267-282

Ключевые слова: электромагнитная совместимость; N -норма; меандровая линия; локализация экстремумов напряжения.

Введение

Быстрая сотовая связь, доступ в интернет, использование электронных устройств – все это уже не норма жизни для человека, а крайняя необходимость. Это значит, что каждое электронное устройство, с которым взаимодействует человек, также влияет на него своим электромагнитным полем. Более того, при использовании нескольких электронных устройств, происходит их влияние друг на друга. Это относится не только к случаям, когда применяется технология *internet of things* (IoT) [1], когда несколько устройств работают в «одной связке», но и в повседневной жизни: при использовании смартфона возле ноутбука или Bluetooth-наушников в зоне Wi-Fi.

Тенденция к компактности предполагает дополнительные требования к разработке и проектированию. Расстояния между элементами и их размеры уменьшаются, тем самым увеличивая вероятность взаимовлияний друг на друга. Поэтому, важно тщательно исследовать их при проектировании радиоэлектронных устройств (РЭУ) [2-4]. При этом нужно учитывать не только различные типы сигналов, например, сверхкороткие импульсы (СКИ) или электростатические разряды (ЭСР), но и разные параметры окружающей среды: влажность, температуру и т.д. Одним из способов комплексного исследования безопасности воздействия на электронную цепь является вычисление N -норм [5-7]: интегральных параметров временного отклика на конкретное воздействие. Пока этот способ исследования только набирает популярность, так как научных статей с его упоминанием еще мало. Однако это важный инструмент для получения выводов о состоянии структур.

Для ясности в таблице 1 приведены описание и физический смысл каждой из N -норм [8].

Таблица 1 – Описание и физический смысл N -норм

№	Формула	Название	Применение
1	$N_1 = R(t) _{max}$	Пиковое (абсолютное) значение	Сбой схемы / электрический пробой / дуговые эффекты
2	$N_2 = \left \frac{\partial R(t)}{\partial t} \right _{max}$	Пиковая (абсолютная) производная	Искрение компонента / сбой схемы
3	$N_3 = \left \int_0^t R(t) dt \right _{max}$	Пиковый (абсолютный) импульс	Диэлектрический пробой (если R обозначает поле E)
4	$N_4 = \int_0^{\infty} R(t) dt$	Выпрямленный общий импульс	Повреждение оборудования
5	$N_5 = \left\{ \int_0^{\infty} R(t) ^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$	Квадратный корень интеграла действия	Выгорание компонента

Для сокращения времени проектирования используют системы моделирования [9]. Существуют несколько видов моделирования, одним из которых является электродинамическое. Ниже в таблице 2 приведен список некоторых примеров ПО для электродинамического моделирования [10].

Таблица 2 – ПО для электродинамического моделирования

Название	Производитель	Страна
Метод конечных разностей во временной области		
XFDTD	RECOM	США
CEM One	ESI Group	Франция
GEMS	Computer and Communication Unlimited	США
QuickWave	QWED	Польша
Semcad-X	SPEAG	Швейцария
EMPIRE	IMST GmbH	Германия
EMA3D	Electro Magnetic Applications	США
Em.cube	EMAG Technologies	США
Метод моментов		
Concept-II	University of Technology Hamburg-Harburg	Германия
Altair FEKO	Altair Engineering, Inc.	США
WIPL-D	WIPL-D	Сербия
Singula	Integrated Engineering Software Sales Inc.	Канада
HyperLynx 3D EM	Mentor Graphics	США
GEMACS	Applied Research Associates	США
newFASANT	NEWFASANT SL	Испания
EMCoS Studio	EmCoS	Грузия
Momentum	Keysight	США
Lucernhammer	Tripoint Industries, Inc.	США
ЭДЭМ	EDEM3D	Россия
Метод матрицы линий передачи		
CST MICROSTR.	CST AG (Flomerics Gr.)	Германия
MEFiSTo	FAUSTUS Scientific Corp.	Канада
Метод конечного интегрирования		
Microwave Studio	CST AG	Германия
Метод конечных элементов		
ANSYS HFSS	Ansoft Corp.	США
EMPro	Keysight	США
Opera	Cobham	Великобритания
Асоника-ЭМС	«НИИ «АСОНИКА»	Россия
RFS	LG Russian R&D center	Россия

Данный список является не полным, однако он показывает актуальность развития ПО в сфере моделирования во многих странах мира. Одной из систем моделирования является TALGAT [11], разрабатываемая в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). В системе TALGAT реализован модуль DynaVis, с помощью которого можно определять временной отклик вдоль проводников многопроводных линий передачи, разделенных на сегменты. Кроме того, с помощью данного модуля вычисляются N -нормы отклика, а также строятся их портреты вдоль проводников. Суще-

ствуют случаи, когда отрезки запаралеллены, т.е. имеются разные пути распространения сигналов, например, при резервировании [12, 13]. В таких случаях важно проводить вычисления по всем возможным путям распространения сигналов.

Постановка задачи

Ранее при вычислении сигналов вдоль проводника и их N -норм в системе TALGAT рассматривался только один возможный путь распространения сигналов, даже при его разветвлении. Было принято решение о модернизации алгоритма определения пути распространения сигналов. На рис. 1 приведен пример визуализации проблемной ситуации: из двух путей распространения сигнала между точками А и В (пути отмечены стрелками и цифрами 1 и 2) рассматривался только тот путь, ближайший узел которого к точке А имел наименьший индекс, т.е. моделирование сигнала проходило только через узлы 3–4 (верхний путь), в то время как путь 6–5 не рассматривался, так как 3 (индекс ближайшего узла к точке А) меньше, чем 6. Таким образом, имелась потенциальная вероятность ненахождения глобального максимума, расположенного на других параллельных путях распространения сигнала, а значит, наиболее уязвимо место вдоль проводника. Это особенно актуально, когда есть две и более параллельные линии.

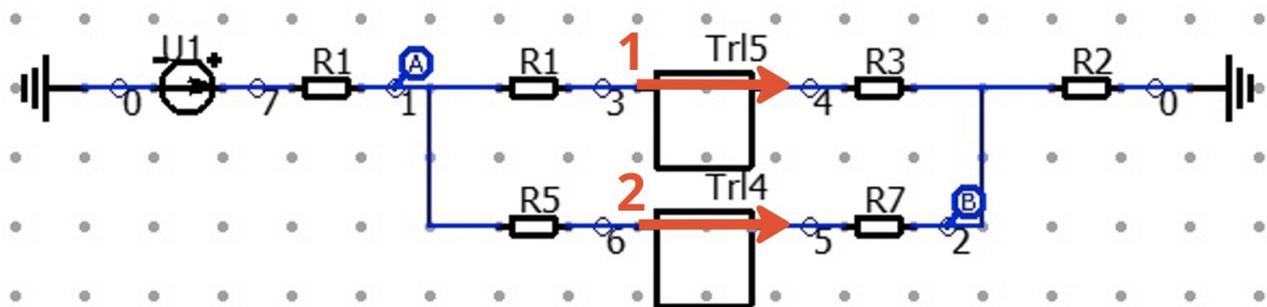


Рис. 1. Пример двух путей распространения сигнала между точками А и В

Доработанный алгоритм, реализованный на языке C++, рассматривает не один, а все пути от начальной до конечной точки. В рамках определения всевозможных путей строится дерево решений, каждая ветвь (путь) которого рассматривается. Так происходит в каждом узле. Таким образом, использование нового алгоритма позволит исследовать распространение сигнала на обоих путях: 1 и 2 на рис. 1. На рис. 2 приведена упрощенная блок-схема работы усовершенствованного алгоритма моделирования сигналов, его отличие от блок-схемы ранее существовавшего ранее алгоритма заключается в дополнительной проверке наличия путей распространения (шаги 8 и 10).

Ниже на рис. 3 приведено окно, разработанное с помощью Qt Designer – среды для разработки графических интерфейсов. При доработке алгоритма внесены изменения в интерфейс: добавлена возможность выбора режима «Parallel

mode», при выборе которого активируется режим анализа всех возможных путей, с помощью глобальной переменной parallelMode в коде системы TALGAT.

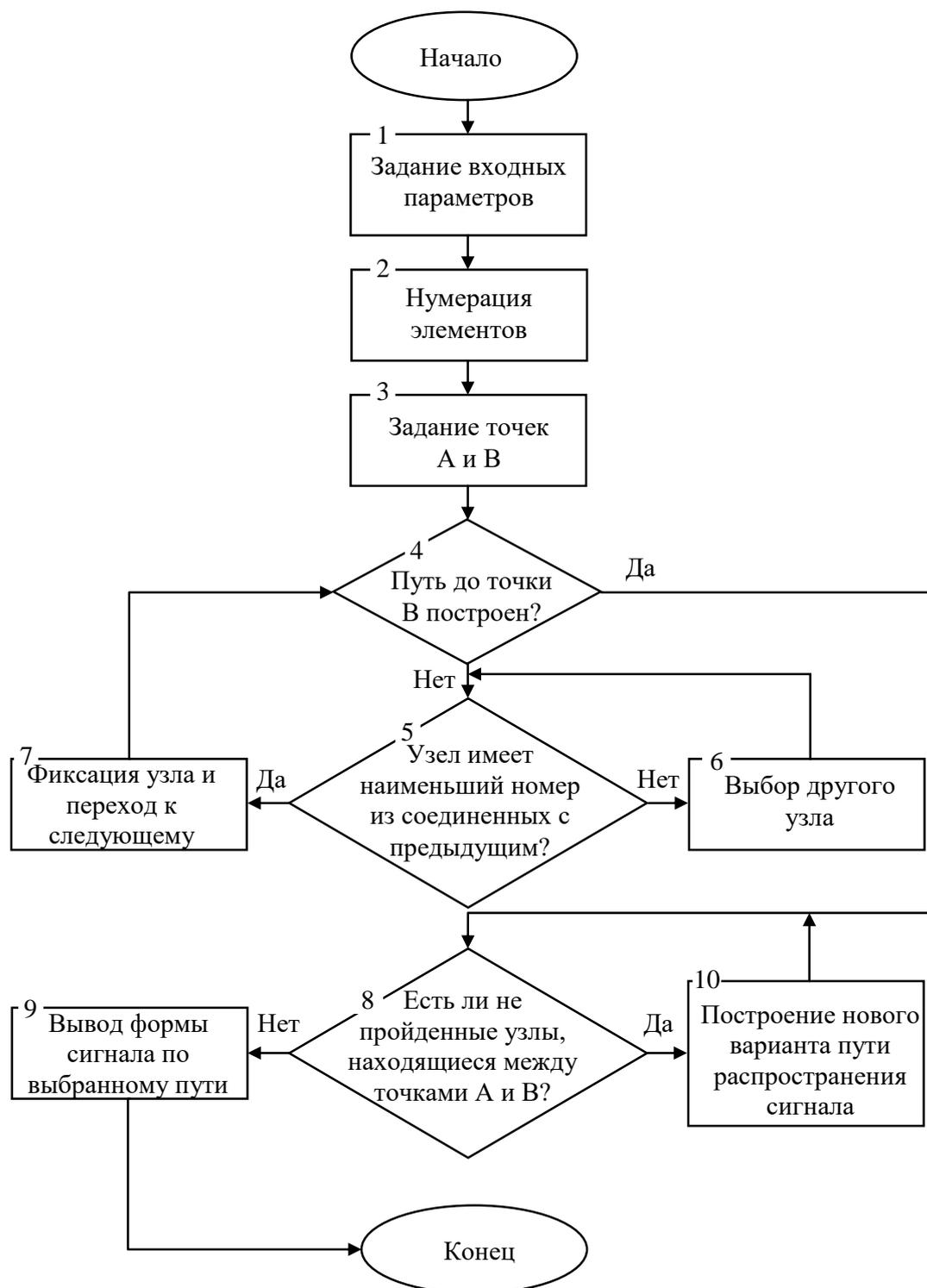


Рис. 2. Блок-схема усовершенствованного алгоритма поиска путей распространения сигналов

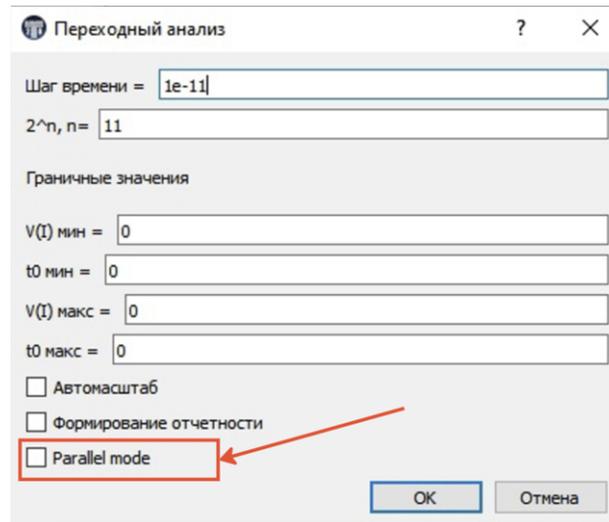


Рис. 3. Измененный графический интерфейс в системе моделирования TALGAT

Ранее выполнен первый шаг к проверке эффективности усовершенствованного алгоритма на нескольких примерах [14]. Однако в том случае использовались только тестовые структуры, в то время как в данном исследовании сравнение работы двух алгоритмов проводится в том числе при использовании реальной структуры модального фильтра (МФ) без одного опорного проводника, которая использовалась в другом исследовании ранее [15].

Исходные данные для моделирования

В качестве исследуемых структур, для получения результатов сравнения, использовались 6 МПЛ разной сложности (таблица 3). Структуры 1–5 – являются тестовыми, а структура 6 – реальной.

Таблица 3 – Описание исследуемых структур

№	Описание структуры	Принципиальная схема	Поперечное сечение
1	Двухпроводная МПЛ	рис. 3	рис. 10
2	Последовательное соединение двухпроводных МПЛ	рис. 4	рис. 10
3	Параллельное соединение двухпроводных МПЛ	рис. 5	рис. 10
4	Параллельное соединение двух одиночных МПЛ	рис. 6	рис. 9
5	Трехпроводная МПЛ	рис. 7	рис. 11
6	Реальный МФ без одного опорного проводника	рис. 8	рис. 12

Ниже приведены принципиальные схемы тестовых структур (рис. 4–8) и их поперечные сечения (рис. 10–12). Длина каждой линии $l=0,5$ м. Каждая линия разделена на 30 сегментов. Центральные резисторы=10 Ом (примеры центральных резисторов на рис. 4 – R_0 , R_1 , R_2 и R_3). Боковые резисторы по 68 Ом (R_4 и R_5). В качестве источника воздействия во всех случаях использовался трапецевидный СКИ с временем нарастания, плоской вершины и спада по 100 пс.

На рис. 8 приведена принципиальная схема реальной структуры МФ.

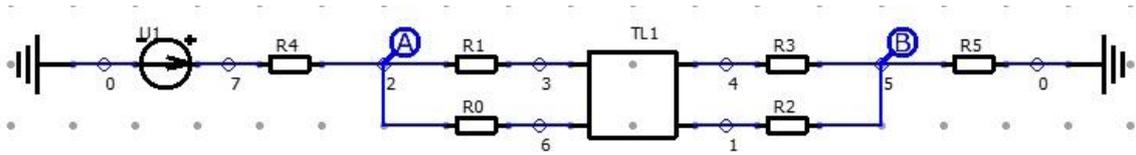


Рис. 4. Принципиальная схема двухпроводной МПЛ

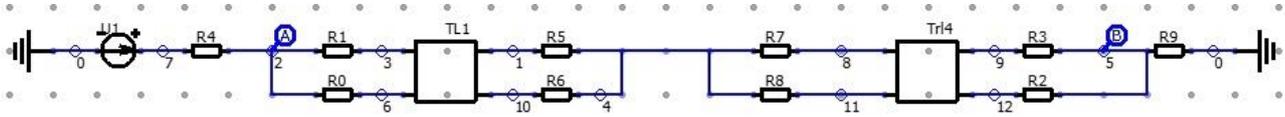


Рис. 5. Принципиальная схема последовательного соединения двухпроводных МПЛ

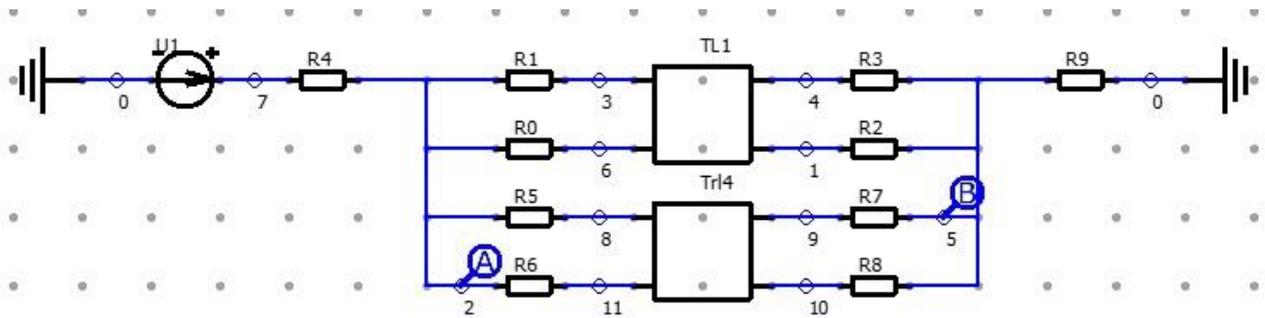


Рис. 6. Принципиальная схема параллельного соединения двухпроводных МПЛ

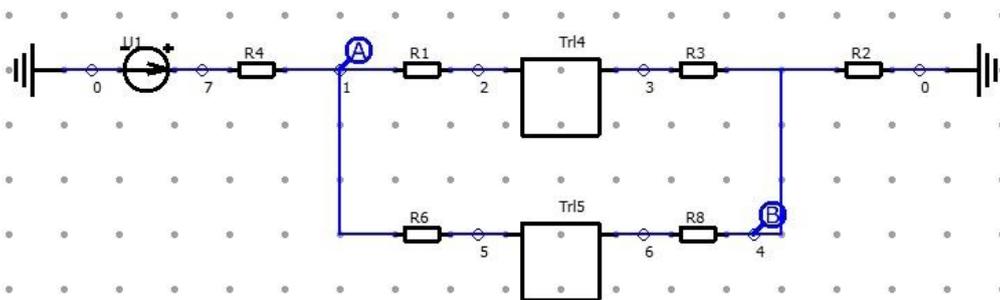


Рис. 7. Принципиальная схема параллельного соединения двух одиночных МПЛ

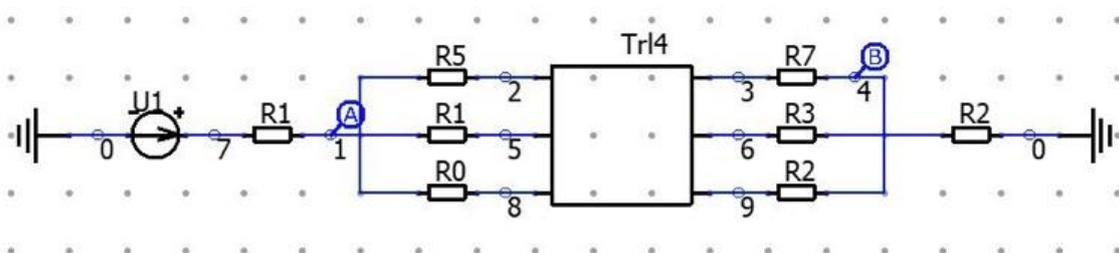


Рис. 8. Принципиальная схема трехпроводной МПЛ

Важно отметить, что параметры реальной структуры отличаются от тестовых схем. Линия имеет длину $l=1$ м и разделена на 30 сегментов. Верхние боковые резисторы $R1, R2, R3$ и $R4 = 50$ Ом, центральные нижние резисторы $R6, R7, R8$ и $R9 = 50$ мкОм, боковые нижние резисторы $= 1$ мОм.

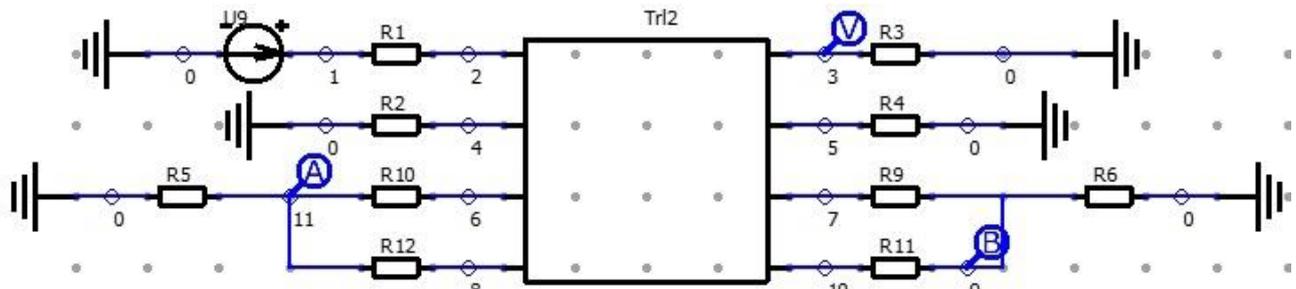


Рис. 9. Принципиальная схема реального МФ без одного опорного проводника

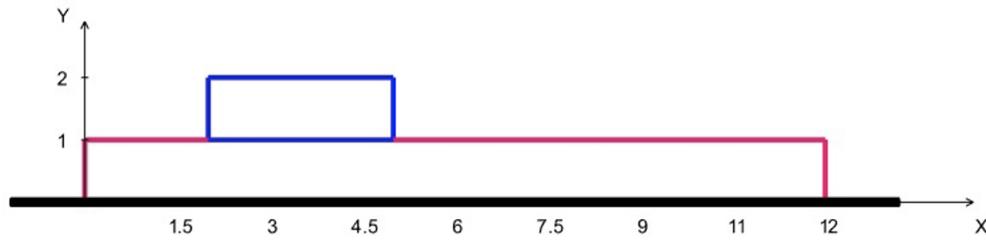


Рис. 10. Поперечное сечение однопроводной МПЛ

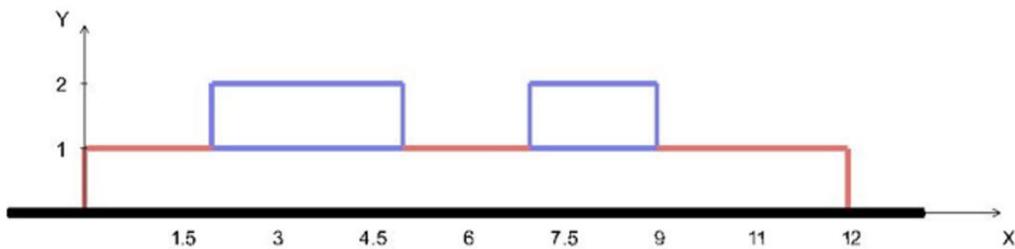


Рис. 11. Поперечное сечение двухпроводной МПЛ

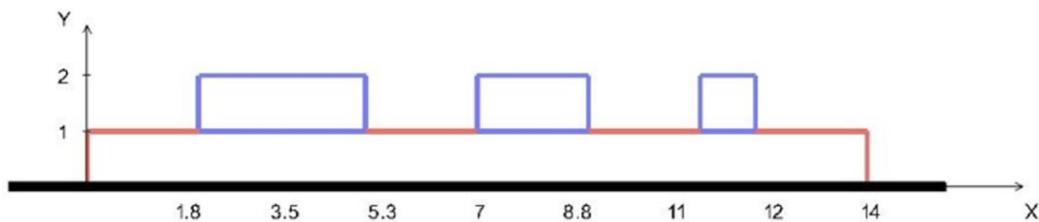


Рис. 12. Поперечное сечение трехпроводной МПЛ

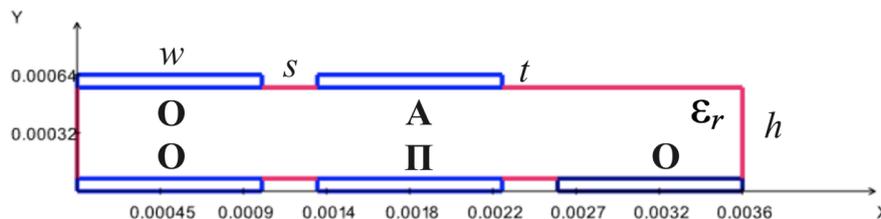


Рис. 13. Поперечное сечение реального МФ без одного опорного проводника

Также стоит отдельно привести геометрические параметры поперечного сечения реального МФ: расстояние между проводниками $s=0,5$ мм, ширина проводников $w=1,5$ мм, относительная диэлектрическая проницаемость под-

ложки $\epsilon_r=4,5$, толщина подложки $h=1$ мм и высота проводников $t=18$ мкм. Такой набор параметров обусловлен тем, чтобы к выходу МФ приходили отдельно все моды, которые распространяются в линии. Буквами обозначены проводники: О – опорный, А – активный и П – пассивный.

Вычисленные методом моментов матрицы коэффициентов электромагнитной L (нГн/м) и электростатической C (пФ/м) индукции:

для однопроводной МПЛ (рис. 10)

$$L=[201,353] \text{ и } C=[90,749];$$

для двухпроводной МПЛ (рис. 11):

$$L=\begin{bmatrix} 198,766 & 35,300 \\ 35,300 & 240,799 \end{bmatrix} \text{ и } C=\begin{bmatrix} 92,644 & -8,249 \\ -8,260 & 73,989 \end{bmatrix};$$

для трехпроводной МПЛ (рис. 12)

$$L=\begin{bmatrix} 198,643 & 34,796 & 11,748 \\ 34,796 & 238,52 & 49,052 \\ 11,748 & 49,052 & 311,487 \end{bmatrix} \text{ и } C=\begin{bmatrix} 92,669 & -8,069 & -0,837 \\ -8,080 & 75,595 & -7,331 \\ -0,837 & -7,344 & 54,682 \end{bmatrix};$$

для реального МФ без одного опорного проводника (рис. 13)

$$L=\begin{bmatrix} 559,984 & 347,588 & 370,206 & 403,473 \\ 347,588 & 493,283 & 364,365 & 346,106 \\ 370,206 & 364,365 & 716,218 & 543,312 \\ 403,473 & 346,106 & 543,312 & 730,693 \end{bmatrix};$$

$$C=\begin{bmatrix} 131,910 & -81,766 & -8,889 & -20,574 \\ -81,766 & 136,454 & -20,309 & -8,860 \\ -8,889 & -20,309 & 116,825 & -84,543 \\ -20,574 & -8,860 & -84,543 & 116,791 \end{bmatrix}.$$

Результаты моделирования

В таблицах 4–9 приведены сравнения результатов поиска максимума и минимума напряжения при работе двух алгоритмов.

Таблица 4 – Сравнение работы алгоритмов для рис. 4

Алгоритм	Максимум напряжения		Минимум напряжения	
	U_{\max} , В	Путь (интервал)	U_{\min} , В	Путь (интервал)
Старый	0,76411	3_4 (29)	-0,06241	3_4 (1)
Новый	0,76411	3_4 (29)	-0,09008	6_1 (29)
Разница	–	–	0,02799 (30,9%)	Разные пути

Таблица 5 – Сравнение работы алгоритмов для рис. 5

Алгоритм	Максимум напряжения		Минимум напряжения	
	U_{\max} , В	Путь (интервал)	U_{\min} , В	Путь (интервал)
Старый	0,68960	3_1 (29)	-0,04559	8_9 (1)
Новый	0,68960	3_1 (29)	-0,05591	11_12 (29)
Разница	–	–	0,01032 (22,5%)	Разные пути

Таблица 6 – Сравнение работы алгоритмов для рис. 6

Алгоритм	Максимум напряжения		Минимум напряжения	
	U_{\max} , В	Путь (интервал)	U_{\min} , В	Путь (интервал)
Старый	0,42901	11_10 (29)	-0,03518	11_10 (2)
Новый	0,50170	6_1 (29)	-0,10449	6_1 (3)
Разница	0,07269 (15%)	Разные пути	0,06931 (70,4%)	Разные пути

Таблица 7 – Сравнение работы алгоритмов для рис. 7

Алгоритм	Максимум напряжения		Минимум напряжения	
	U_{\max} , В	Путь (интервал)	U_{\min} , В	Путь (интервал)
Старый	0,63130	6_5 (29)	-0,02187	6_5 (14)
Новый	0,64924	3_4 (29)	-0,02187	6_5 (14)
Разница	0,01794 (3%)	Разные пути	–	–

Таблица 8 – Сравнение работы алгоритмов для рис. 8

Алгоритм	Максимум напряжения		Минимум напряжения	
	U_{\max} , В	Путь (интервал)	U_{\min} , В	Путь (интервал)
Старый	0,71372	2_3 (29)	-0,08969	2_3 (18)
Новый	0,71372	2_3 (29)	-0,18840	5_6 (1)
Разница	–	–	0,09871 (110%)	Разные пути

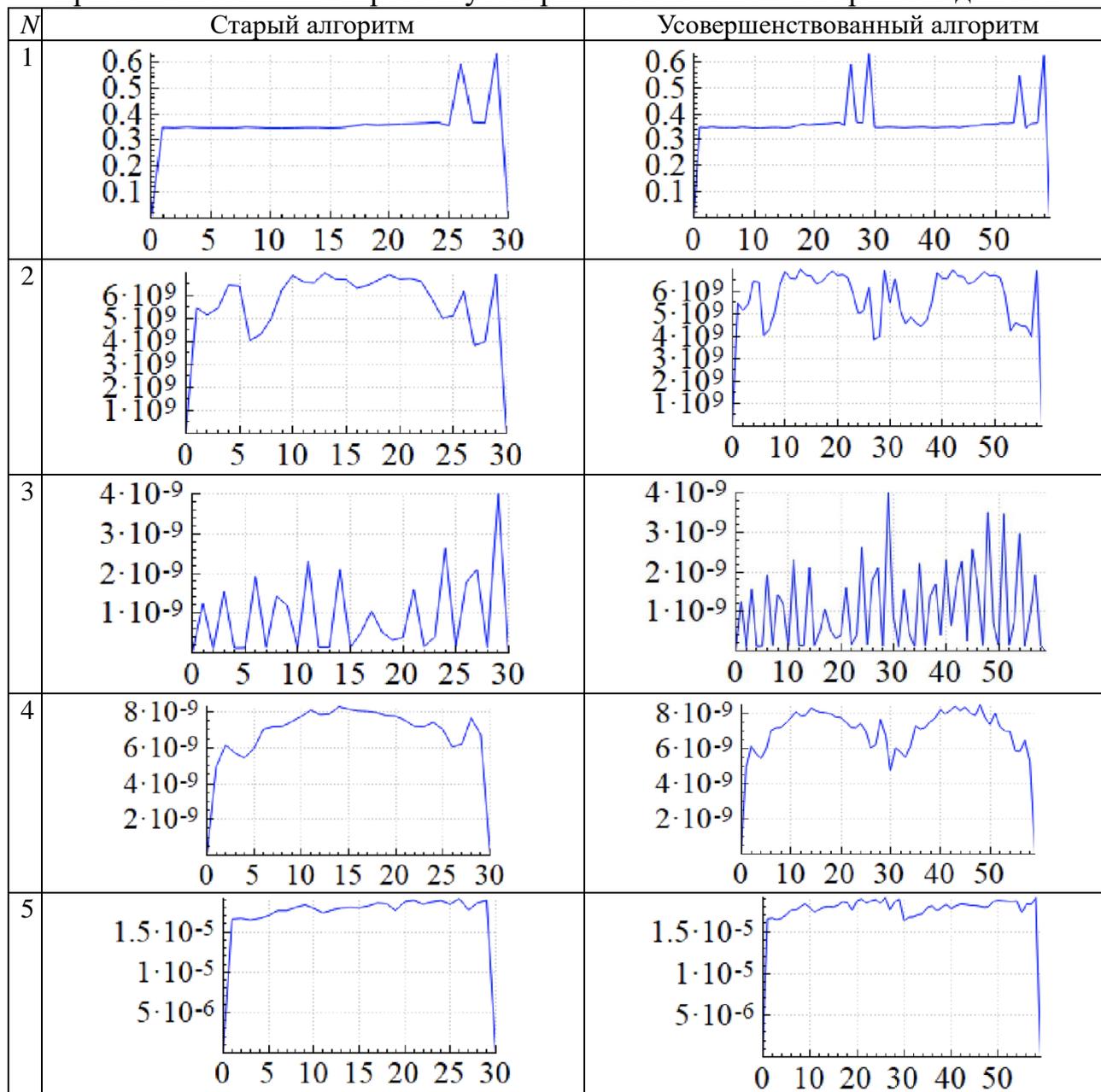
Таблица 9 – Сравнение работы алгоритмов для рис. 9

Алгоритм	Максимум напряжения		Минимум напряжения	
	U_{\max} , В	Путь (интервал)	U_{\min} , В	Путь (интервал)
Старый	0,63180	6_7(29)	-0,49282	6_7(1)
Новый	0,63180	6_7(29)	-0,49324	8_10 (1)
Разница	–	–	0,00042 (0,08%)	Разные пути

Из таблиц 4, 5 и 8 видно, что значение максимума не изменяется. Это значит, что после анализа всех путей распространения обнаружен такой же глобальный максимум, что и в предыдущей версии алгоритма. Аналогичная ситуация с анализом реальной структуры (таблица 9). Значения минимума напряжения в данных случаях различаются от 22 до 110%, а также отличается их локализация. В реальной структуре (таблица 9) значение минимума незначительно (0,08%), при разной локализации. Из таблицы 6 видно, что при использовании нового алгоритма обнаружен новый глобальный максимум. Он находится на другом пути, при этом он больше на 15%. Локализации минимумов различны, при этом значения отличаются на 70%. Из таблицы 7 видно, что значение и локализация минимума не изменяются, а значение максимума меняется только на 3%, но при этом данный максимум обнаружен на другом пути.

Для более комплексного определения угроз безопасности структур далее рассматриваются портреты N -норм. Приведен пример их использования только для реального МФ (рис. 9). Рассчитывались N -нормы при запуске старого, ранее реализованного алгоритма и нового алгоритма, который учитывает все возможные пути распространения сигнала (таблица 10).

Таблица 10 – Сравнение значений N -норм в зависимости от номеров сегментов при использовании старого и усовершенствованного алгоритмов для МФ



Рассмотрим таблицу 10. Разница в результатах в таблице 10 заключается в том, что, при работе старого алгоритма на графике изображены только 30 сегментов одного пути распространения, а усовершенствованного – 60 (т.е. сначала рассматриваются 30 сегментов первого пути, а потом 30 сегментов второго). Важно отметить, что в результатах N -норм первый и последний элементы (0 и 30-й – при запуске старого, и 0 и 60-й – при запуске нового) имеют нулевые значения – это значит, что на данной схеме не приводятся нормы для сигнала на входе и выходе. На схемах с результатом работы усовершенствованного алгоритма видно, что на нем отсутствует 30-й «нулевой» сегмент, так как выходной сегмент является 60-ым. Также стоит отметить, что значения на графиках – это значения в концах сегментов, например под номером 1 это значение N -нормы в конце сегмента 1.

N_1 в таблице 10 обозначает максимум напряжения. Таким образом, видно, что глобальный максимум сохраняется в обоих случаях. Аналогичная ситуация с N_2 , N_3 , N_5 : наибольшее значение сохраняется в обоих случаях. Однако при расчете N_4 по усовершенствованному алгоритму обнаруживается более высокое значение N -нормы: было $8,282 \cdot 10^{-9}$, а стало $8,487 \cdot 10^{-9}$. А это значит, что ранее обнаружить данный факт, увеличивающий вероятность повреждения оборудования, не удавалось.

Заключение

Доработанный алгоритм поможет проводить более корректные исследования распространения сигналов вдоль различных линий, рассматривая все варианты их путей. Текущие результаты (5 тестовых и 1 реальная структуры) показали, что в большинстве случаев изменяются локализация и значение минимума напряжения, при этом максимум изменяется только в двух случаях. Это обусловливается тем, что параметры 5 из 6 структур выбраны произвольно. При анализе реальной структуры значение максимума также не изменилось, а значение минимума изменилось незначительно. В результате появилась возможность более точного анализа схем со специфичной конструкцией, когда существуют параллельные пути распространения сигнала.

В дальнейшем планируется провести сравнение при использовании более сложных реальных структур, для получения более прикладных результатов, в том числе на примере горячего резервирования. Так, показательно важен такой анализ для блока управления нагревателями бортовой аппаратуры космического аппарата, где резервируется каждый проводник параллельной трассировкой другого. Между тем отдельным направлением эффективного применения усовершенствованного алгоритма является целостность питания. Действительно, именно цепи питания и цепи возврата его обратных токов отличаются большим количеством различных запараллеленных путей. При этом очень важно в них локализовать экстремумы сигналов, которыми являются различные помехи.

Автор выражает благодарность Квасникову А.А. и Елизарову А.А. за оказанную помощь при получении результатов работы.

Литература

1. Yelizarov A. A., Nazarov I. V., Skuridin A. A., Yakimenko S. I. and Ikonnikova D. M. Features of wireless charging of mobile and wearable devices for the IoT and cyber physical systems // International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). 2020. P. 1–4. doi: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261567.
2. 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. P. 6152–6160. doi: 10.1109/JESTPE.2021.3053025.

3. 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. P. 263–265. doi: 10.1109/TDMR.2016.2530701.
4. Ramdani M., Sicard E., Boyer A., Dhia S. B., Whalen J. J., Hubing T. H., Coenen M., Wada O. The electromagnetic compatibility of integrated circuits—Past, present, and future // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2009. Vol. 51. No. 1. P. 78–100. doi: 10.1109/TEMC.2008.2008907.
5. Giri D. V. High-Powered Electromagnetic Radiators: Nonlethal Weapons and Other Applications. – Harvard University Press, 2004. – 198 p.
6. Gazizov R. R., Muhambetzhanova B. S., Gazizov T. T., Kvasnikov A. A. Diagnostics of the printed circuit board bus of a spacecraft autonomous navigation system with using the N -norms // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 560. No. 1. P. 1–5. doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012017.
7. Gazizov R. R., Gazizov T. R. The models for evaluation of environment impact for the circuit board with modal reservation using N -norms // 2022 Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). 2022. P. 119–121. doi: 10.1109/USBREIT56278.2022.9923342.
8. Zhechev Y. S., Zhecheva A. V., Kvasnikov A. A., Zabolotsky A. M. Using N -Norms for Analyzing Symmetric Protective Electrical Circuits with Triple Modal Reservation // Symmetry. 2021. Vol. 13. No. 12. P. 1–17. doi: 10.3390/sym13122390.
9. Achar R., Nakhla M. S. Simulation of high-speed interconnects // Proceedings of the IEEE. 2001. Vol. 89. P. 693–728. doi: 10.1109/5.929650.
10. Куксенко С. П. Методы уменьшения вычислительных затрат на анализ и оптимизацию полосковых структур и линейных антенн при их проектировании с учетом электромагнитной совместимости. Дис. ... док. техн. наук. – Томск: ТУСУР, 2019. – 436 с.
11. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. No. 012110. P. 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012110
12. Morozov S. R., Lakoza A. M. Quasi-static simulation of a double-sided PCB with triple modal reservation // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2022. P. 324–329. doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906693.
13. Medvedev A. V. Interconnect Routing on two signal layers of a modal reservation PCB: a Case Study // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2022. P. 301–306. doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906750.
14. Gazizov R. R., Kvasnikov A. A., Yelizarov A. A. Studying the safety of electronic circuits using an improved N -norms-based approach // 2023 International Conference «Engineering management of communication and technology» (EMCTECH). 2023. P. 1–5. doi: 10.1109/EMCTECH58502.2023.10297013.

15. Samoylichenko M. A., Gazizov T. R. Parametric and structural optimization of the modal filter on a double-sided printed circuit board // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1862. No. 1. P. 1–7. doi: 10.1088/1742-6596/1862/1/012006.

References

1. Yelizarov A. A., Nazarov I. V., Skuridin A. A., Yakimenko S. I. and Ikonnikova D. M. Features of wireless charging of mobile and wearable devices for the IoT and cyber physical systems. *International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, Vienna, Austria, 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261567.

2. 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.

3. 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.

4. Ramdani M., Sicard E., Boyer A., Dhia S. B., Whalen J. J., Hubing T. H., Coenen M., Wada O. The electromagnetic compatibility of integrated circuits—Past, present, and future. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 78–100. doi: 10.1109/TEMC.2008.2008907.

5. Giri D. V. *High-Powered Electromagnetic Radiators: Nonlethal Weapons and Other Applications*. Harvard University Press, 2004, 198 p.

6. Gazizov R. R., Muhambetzhanova B. S., Gazizov T. T., Kvasnikov A. A. Diagnostics of the printed circuit board bus of a spacecraft autonomous navigation system with using the N -norms. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 560, no. 1, pp. 1–5. doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012017.

7. Gazizov R. R., Gazizov T. R. The models for evaluation of environment impact for the circuit board with modal reservation using N -norms. *2022 Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*, Yekaterinburg, Russian Federation, 2022, pp. 119–121. doi: 10.1109/USBREIT56278.2022.9923342.

8. Zhechev Y. S., Zhecheva A. V., Kvasnikov A. A., Zabolotsky A. M. Using N -Norms for Analyzing Symmetric Protective Electrical Circuits with Triple Modal Reservation. *Symmetry*, 2021, vol. 13, no. 12, pp. 1–17. doi: 10.3390/sym13122390.

9. Achar R., Nakhla M. S. Simulation of high-speed interconnects. *Proceedings of the IEEE*, 2001, vol. 89, pp. 693–728. doi: 10.1109/5.929650.

10. Kuksenko S. P. *Metody ucheta vychislitel'nykh zatrat na analiz i optimizatsiyu poloskovykh struktur i lineynykh antenn pri ikh proyektirovanii s uchetom elektromagnitnoy sovmestivosti*. Dis. dokt. tekhn. nauk [Methods for reducing computational costs for the analysis and optimization of strip structures and linear antennas when designing them taking into account electromagnetic

compatibility]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2019, 436 p. (in Russian).

11. Kuksenko S. P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, no. 012110, pp. 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012110.

12. Morozov S. R., Lakoza A. M. Quasi-static simulation of a double-sided PCB with triple modal reservation. *2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Magnitogorsk, Russian Federation, 2022, pp. 324–329. doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906693.

13. Medvedev A. V. Interconnect Routing on two signal layers of a modal reservation PCB: a Case Study. *2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Magnitogorsk, Russian Federation, 2022, pp. 301–306. doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906750.

14. Gazizov R. R., Kvasnikov A. A., Yelizarov A. A. Studying the safety of electronic circuits using an improved N -norms-based approach. *2023 International Conference «Engineering management of communication and technology» (EMCTECH)*, Vienna, Austria, 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/EMCTECH58502.2023.10297013.

15. Samoylichenko M. A., Gazizov T. R. Parametric and structural optimization of the modal filter on a double-sided printed circuit board. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1862, no. 1, pp. 1–7. doi: 10.1088/1742-6596/1862/1/012006.

Статья поступила 24 ноября 2023 г.

Информация об авторе

Газизов Рустам Рифатович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Область научных интересов: электромагнитная совместимость, информационная безопасность, моделирование систем. Тел.: +7 952 802 23 10. E-mail: gazizovtsk@yandex.ru

Адрес: 123458, Россия, г. Москва, Таллинская ул., д. 34.

An improved algorithm for studying the safety of electronic circuits using N -norms in electronic equipment

R. R. Gazizov

Problem statement: As the number of electronic devices grows, it can become difficult for them to work together. The current trend towards miniaturization motivates developers of electronic equipment to design components so that there is a minimum distance between them. However, small distances produce serious coupling issue for the device operation. More specifically, when electronic components interact,

there is a possibility of electromagnetic interference or crosstalk that can negatively affect the performance of critical elements. This issue is particularly relevant for sophisticated critical systems, for example, large data centers or aerospace equipment. The complexity of developing devices and taking into account their safety lies in the large time costs spent on the design process. In this regard, engineers can take advantage of simulation systems and reduce this time. Moreover, they can predict and simulate scenarios that may potentially produce dangerous effects, such as electrical breakdowns, interference or sparking of components, when several wires are located close to each other. However, it is still relevant to improve simulation systems with respect to their accuracy in identifying and preventing uncontrolled behavior of electronic equipment as early as at the design stage. **The purpose of this work** is to present a novel algorithm that features the search for voltage extremes and the use of N -norms for identifying vulnerable places, i.e. with high peak voltages, as well as to compare the performance of this algorithm with the existing one in determining signal responses along all possible propagation paths in test and real structures. **Methods:** Within the framework of the study, we employ the search for extreme voltages, N -norms, and quasi-static analysis of six multi-conductor transmission lines. **Novelty:** A novel algorithm is introduced that determines all possible signal propagation paths of signal response using N -norms on the example of real structures. A superior performance of this algorithm is proven by comparing it with the existing one. **Result:** The use of the novel algorithm enabled determining all possible paths in six structures, one of which is a real modal filter. As a result, a global maximum voltage found with the improved algorithm exceeded the voltage found by the existing algorithm by 15%, and a minimum voltage – by 110%. **Practical relevance:** Comparing the proposed algorithm using real structures allowed us to test the work of this algorithm more widely. Its further refinement will make it possible to more accurately analyze the safety of electronic devices of increased complexity. The proposed improvement of the algorithm was implemented in the domestic software TALGAT, which is vital for the technological sovereignty of our country.

Key words: electromagnetic compatibility; N -norms; meander lines, maximum and minimum voltage.

Information about Author

Rustam Rifatovich Gazizov – Doctoral Student. HSE University. Field of research: electromagnetic compatibility, information security, system modeling.
Tel.: +7 952 802 23 10. E-mail: gazizovtsk@yandex.ru
Address: Russia, 123458, Moscow, Tallinskaya street, 34.