

УДК 621.3.049.779

Р.Р. Газизов, М.Д. Юсаф

## Поиск экстремумов напряжения вдоль заземленных проводников модального фильтра со связывающими проводниками

Рассматривается редко исследуемый вопрос об электрических сигналах в цепях заземления. Он оказывается довольно сложным, когда такие цепи состоят из нескольких и разных проводников, а сигналы являются импульсными. Появление новых устройств с такими цепями требует исследования для его полноты не только их основных характеристик, но и распространения электрических сигналов в цепях заземления. Исследуется новое устройство защиты от сверхкоротких импульсов: модальный фильтр со связывающими проводниками. У него есть 4 разных проводника схемной земли, электрически соединенных параллельно на концах. Моделируются формы напряжения вдоль каждого проводника с поиском их экстремумов. Для этого используются исходный (с поиском вдоль только одного из параллельных проводников) и усовершенствованный (с поиском вдоль всех параллельных проводников) алгоритмы. Сравняются их результаты для  $N$ -норм сигнала. Усовершенствованным алгоритмом выявлен максимум напряжения в несколько раз больше, чем исходным алгоритмом. Кроме того, наглядно показано различие максимумов в разных проводниках схемной земли и вдоль них. Подобный анализ представляется полезным для анализа перенапряжений в цепях заземления при других воздействиях, в том числе преднамеренных.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость,  $N$ -норма, модальный фильтр, система компьютерного моделирования, схемная земля, многопроводная линия передачи, экстремум напряжения, TUSUR.EMC.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2025-28-1-7-13

Современные радиоэлектронные устройства (РЭУ) становятся меньше, так как их компактность является важным фактором для мобильности современного человека. При уменьшении размеров устройства расстояние между его элементами уменьшается, отчего возникает риск нежелательных электромагнитных воздействий при совместной работе нескольких элементов [1, 2]. Также это возможно, когда несколько устройств работают в одной зоне распространения электромагнитных волн, например, при использовании планшетов в зоне Wi-Fi или смартфонов возле ноутбуков. Все это осложняется коммуникацией между устройствами с помощью технологии Internet of Things (IoT), при которой возникают дополнительные взаимодействия устройств [3].

Предварительное моделирование – важный этап проектирования сложных РЭУ, позволяющий сократить время разработки и повысить их безопасность [4–7]. Для комплексного анализа необходимо учитывать различные типы помеховых сигналов, например, электростатические разряды (ЭСР) или сверхкороткие импульсы (СКИ).

Выявление и локализация экстремумов сигнала очень важны. Так, считается, что места с максимумами напряжения уязвимы, так как в них могут возникнуть помехи, пробой [8] и другие неконтролируемые взаимодействия с другими элементами системы. Локализация минимумов напряжения может быть полезна для выявления не уязвимых, а напротив, самых защищенных мест. Поэтому определение всевозможных путей распространения сигнала актуально для поиска уязвимых мест и комплексного анализа безопасности электронных устройств, для чего активно используется вычисление  $N$ -норм [9, 10] временного отклика на конкретное воздействие (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики  $N$ -норм [9, 10]

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

Однако при разработке РЭУ отдельные вопросы рассматриваются довольно редко. К ним относится анализ электрических сигналов в цепях заземления. Он может оказаться довольно сложным по ряду причин: цепь имеет не один, а несколько проводников для возврата обратных токов; это проводники разных размеров поперечного сечения и расположения; сигналы являются импульсными. Между тем появление новых устройств с такими цепями требует исследования для его полноты не только основных характеристик устройства, но и цепей заземления. Особо актуальным это является для новых помехозащитных устройств, в том числе сложных, с несколькими

путями распространения сигналов по схемной земле, а также с различными вариантами модального резервирования [11]. В этой связи показательно новое устройство защиты от СКИ: модальный фильтр (МФ) со связывающими проводниками. У него есть 4 разных проводника схемной земли, электрически соединенных параллельно на концах. Однако формы напряжения вдоль проводников земли, их  $N$ -нормы и экстремумы этих норм при распространении СКИ по сигнальному проводнику ранее не рассматривались. Цель данной работы – представить такие результаты.

#### Исходные данные для моделирования

В качестве исследуемого выбран упомянутый выше МФ со связывающими проводниками. Он уже рассматривался при разном расстоянии между проводниками, когда использовался для трёхкратного резервирования [12]. На рис. 1 приведены его поперечное сечение и эквивалентная схема. МФ состоит из 8 проводников (номера указаны на рис. 1, 2): проводник 1 активный или резервируемый (обозначен на рис. 1, а буквой «А»); проводники 2–4 пассивные или резервные (обозначены на рис. 1, а буквой «П»); проводники 5 и 6 связывающие (обозначены на рис. 1, а буквой «С»); проводники 7 и 8 опорные (расположены в центре структуры на рис. 1, а). Геометрические параметры:  $w_1 = 1$  мм,  $w_2 = 9$  мм,  $w_3 = 12,1$  мм,  $h_1 = 0,51$  мм,  $h_2 = 1,24$  мм,  $h_3 = 0,75$  мм,  $s = 10$  мм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r = 4,5$  и толщина проводников  $t = 0,035$  мм. Окружающая среда – воздух. Связывающие проводники могут располагаться на вспененном диэлектрике, здесь не показанном.

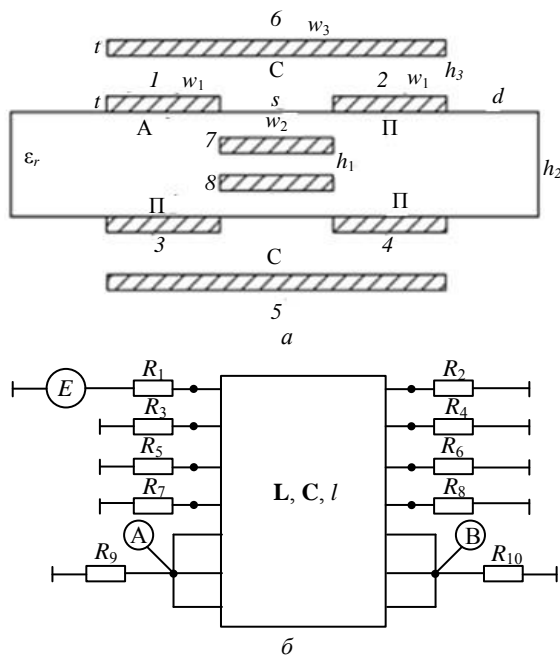


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и эквивалентная схема (б) исследуемой структуры

Термин «опорный проводник» используется для обозначения проводника, относительно которого отсчитываются уровни напряжения в электрической схеме. В этом устройстве два опорных проводника (7

и 8), но для отсчета уровней напряжения при моделировании выбирается только один из них (8), а второй моделируется как сигнальный, соединенный с опорным на концах. Их симметрия относительно горизонтальной оси удобна для определения тока или напряжения вдоль одного проводника по тому, каковы они в другом, так как токи в них одинаковы.

Термин «связывающий проводник» впервые введен в патентах (2801688 и 2801830) на изобретение, детально описанных в [12]. Наличие такого проводника над парой других, даже довольно сильно удаленных друг от друга, увеличивает емкостную и индуктивную связи между ними. Это позволяет сохранить модальное разложение импульса помехи даже при большом разnose проводников, полезном для уменьшения вероятности их одновременного механического повреждения (например, пульс в резервируемых цепях беспилотника). Кроме того, связывающий проводник защищает эти проводники сверху.

Поперечное сечение с реальными размерами и принципиальная схема исследуемой структуры, построенные в системе TUSUR.EMC (ранее называвшейся TALGAT) [13], представлены на рис. 2. Каждый проводник имеет длину  $l = 1$  м и разделен на 20 сегментов. Номинал резисторов  $R_1$ – $R_8$  равен 50 Ом (тракт) а  $R_9 = R_{10} = 1$  МОм (соединение со схемной землей). Источник воздействия – трапецевидный СКИ с амплитудой электродвижущей силы 2 В и временем нарастания, спада и плоской вершины по 100 пс. Между точками А и В рассматриваются все пути распространения сигнала. В данном случае исследуется максимальное влияние СКИ в активном проводнике на связывающие и опорный проводники.

Ниже приведены вычисленные в TUSUR.EMC матрицы (размером  $7 \times 7$ , по количеству проводников, не считая опорного) погонных коэффициентов электромагнитной  $L$  (нГн/м) и электростатической  $C$  (пФ/м) индукции (результаты верификации опубликованы, например, в [14]):

$$L = \begin{bmatrix} 279,30 & 58,28 & 93,52 & 46,39 & 47,56 & 74,88 & 18,09 \\ 58,28 & 275,57 & 46,11 & 90,80 & 47,05 & 75,78 & 17,87 \\ 93,52 & 46,11 & 295,16 & 77,83 & 101,28 & 39,38 & 36,21 \\ 46,39 & 90,80 & 77,83 & 292,91 & 102,06 & 39,24 & 36,36 \\ 47,56 & 47,05 & 101,28 & 102,06 & 139,72 & 29,89 & 42,94 \\ 74,88 & 75,78 & 39,38 & 39,24 & 29,89 & 108,11 & 10,88 \\ 18,09 & 17,87 & 36,21 & 36,36 & 42,94 & 10,88 & 53,89 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 120,12 & -0,13 & -52,33 & -0,13 & -4,08 & -32,03 & -8,34 \\ -0,13 & 121,30 & -0,12 & -51,78 & -4,37 & -33,48 & -8,33 \\ -52,33 & -0,12 & 121,12 & -0,12 & -33,62 & -3,51 & -23,09 \\ -0,13 & -51,78 & -0,12 & 121,97 & -34,79 & -3,75 & -23,08 \\ -3,91 & -4,20 & -33,60 & -34,79 & 189,6 & -5,79 & -106,42 \\ -32,01 & -33,46 & -3,35 & -3,59 & -5,79 & 185,49 & -0,87 \\ -8,34 & -8,33 & -23,09 & -23,26 & -106,24 & -0,7 & 1004,23 \end{bmatrix}.$$

Матрицы не полностью симметричны из-за вычислительных погрешностей. Это устранимо выбором сегментации, но здесь не выполнялось.

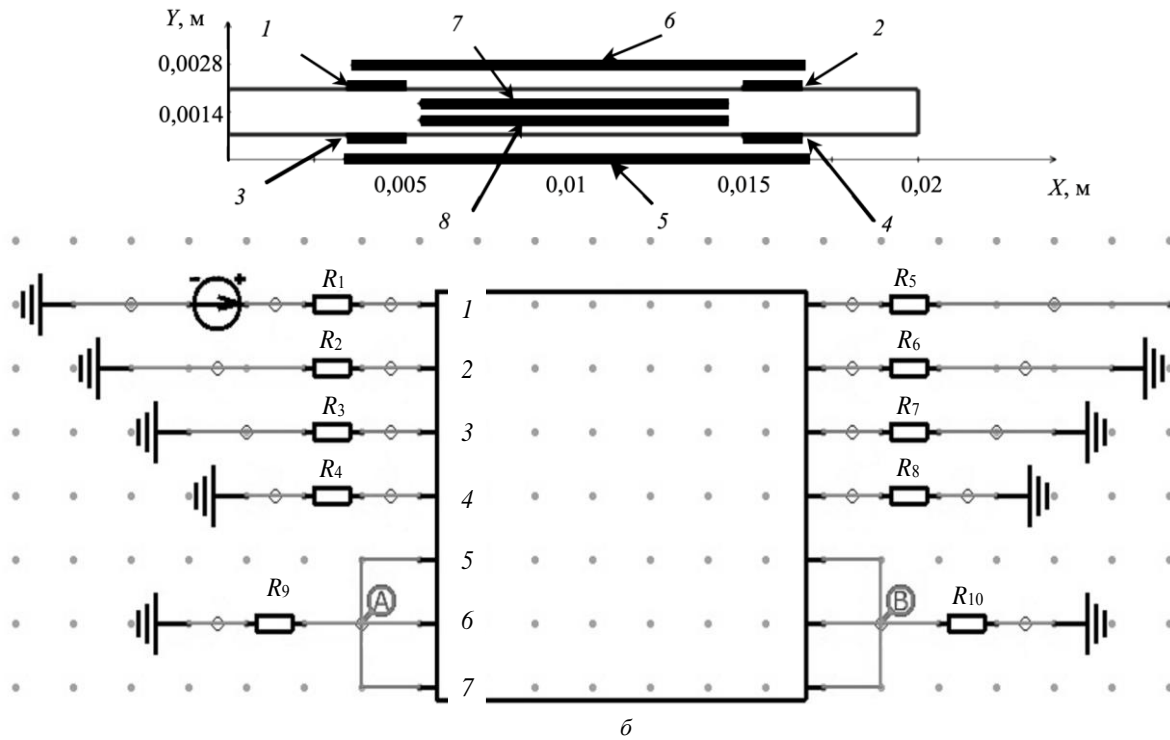


Рис. 2. Поперечное сечение (а) и принципиальная схема (б) исследуемой структуры в системе TUSUR.EMC

**Поиск экстремумов**

Моделирование для поиска экстремумов выполнялось с помощью квазистатического анализа также в системе TUSUR.EMC. В ней реализован усовершенствованный алгоритм вычисления временного отклика вдоль параллельно соединенных проводников многопроводных линий передачи с поиском экстремума [15]. Так, исходный алгоритм рассматривал только один возможный путь из параллельных. Если их больше, то по-прежнему рассматривался только один (первым соединенный с точкой А). При этом результаты анализа путей были неполными. Для иллюстрации на рис. 3 приведена структура с тремя проводниками, в которой проводники 1 и 2 соединены параллельно. Алгоритм определял только путь 1, а путь 2 оставался неисследованным. Между тем на пути 2 мог находиться более выраженный максимум или минимум напряжения.

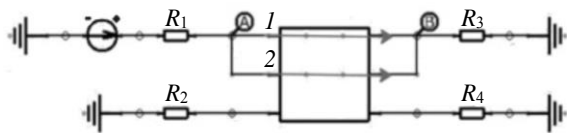


Рис. 3. Пример структуры с параллельными путями

Также стоит отметить логику визуализации  $N$ -норм при работе усовершенствованного алгоритма. Для иллюстрации взята структура из рис. 3, в которой каждый проводник разделен на 3 сегмента. Значение  $N$ -норм вычисляется в начале и конце проводника, а также между сегментами, но без дублирования. Для пояснения на рис. 4, а показан портрет  $N_1$  с 6 значениями, а на рис. 4, б отмечены 6 точек, где они вычислены.

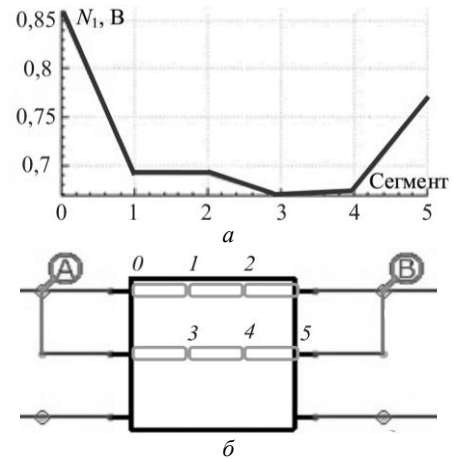


Рис. 4. Портрет  $N_1$  (а) и эквивалентная схема (б) тестовой структуры из рис. 3

Техническое описание и детальное различие алгоритмов описаны в [15], где также проверялась работоспособность усовершенствованного алгоритма на простых тестовых и реальных структурах. Кроме того, она проверялась в коммерческом программном обеспечении и экспериментально [16]. Поэтому это здесь не приводится, и далее рассматривается исследуемая структура.

Сравнены результаты двух алгоритмов для максимума (табл. 2) и минимума (табл. 3) напряжений. Видно, что максимум у усовершенствованного алгоритма в 5 раз больше, чем исходного, а минимум – 4 раза. При этом пути, где обнаружены экстремумы, отличаются от путей для исходного алгоритма.

Для интегральной оценки различных угроз (искрения, пробоя диэлектрика, выгорания и т.п.) вычислены портреты  $N$ -норм с помощью исходного и усовершенствованного алгоритмов (табл. 4).

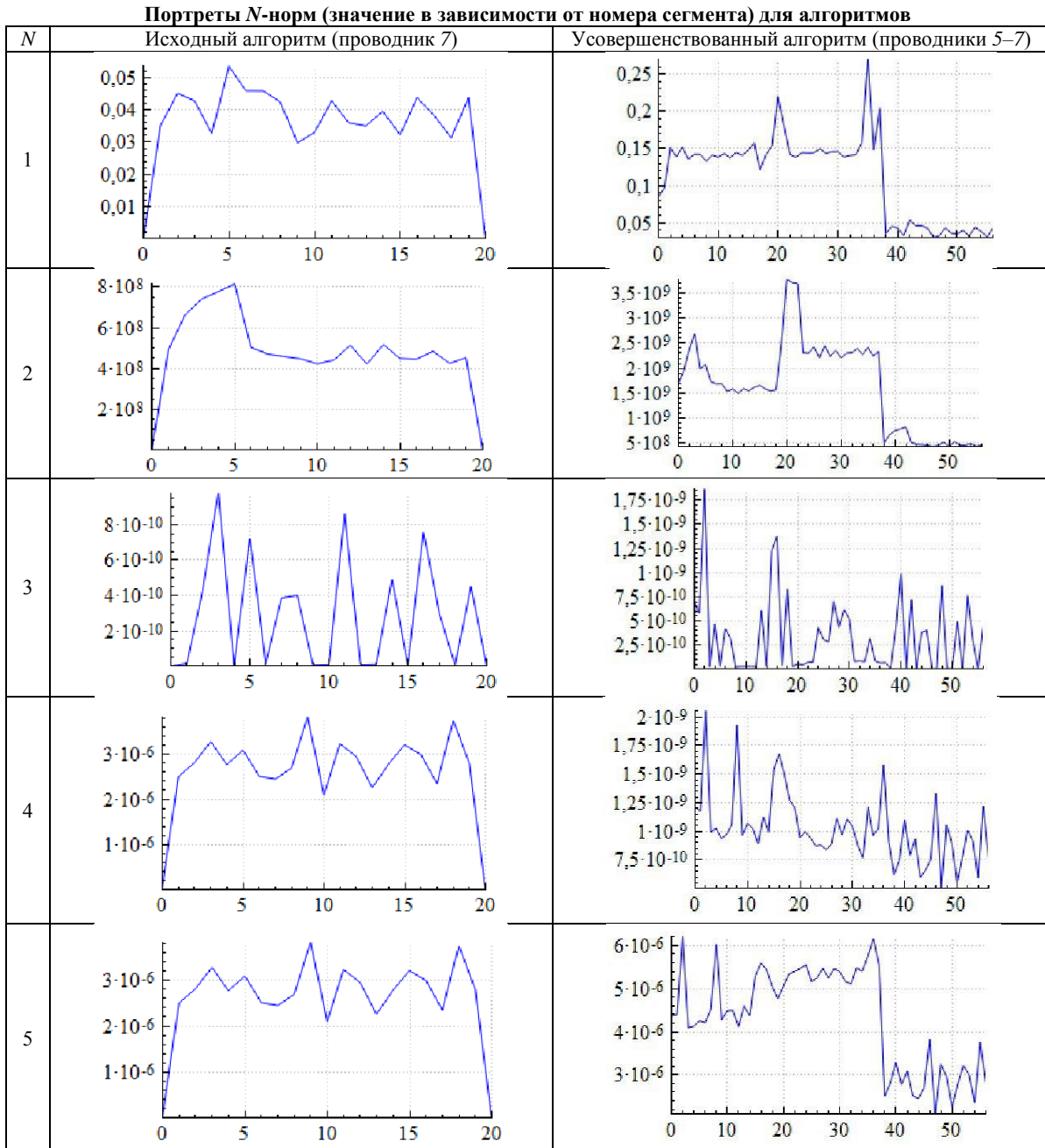
Таблица 2

Сравнение для максимума напряжения на рис. 2		
Алгоритм	$U_{\max}$ , В	Проводник (сегмент)
Исходный	0,0536	7(5)
Усовершенствованный	0,2699	6(17)
Различие	5,03 раза	Разные пути

Таблица 3

Сравнение для минимума напряжения на рис. 2		
Алгоритм	$U_{\min}$ , В	Проводник (сегмент)
Исходный	-0,0509	7(12)
Усовершенствованный	-0,2248	6(18)
Различие	4,42 раза	Разные пути

Таблица 4



На портретах  $N$ -норм исходного алгоритма по горизонтальной оси 20 сегментов (проводник 7), а усовершенствованного – 60, так как портрет последовательно отражает все три пути распространения сигнала по 20 сегментов каждый (проводники 5–7).

В табл. 5 приведены максимумы портретов  $N$ -норм, рассчитанных с помощью исходного и усовершенствованного алгоритмов.

Таблица 5

Максимумы $N$ -норм		
Алгоритм	Исходный	Усовершенствованный
$N_1$	0,0536	0,2699
$N_2$	$8,148 \cdot 10^8$	$3,778 \cdot 10^9$
$N_3$	$9,817 \cdot 10^{-10}$	$1,86 \cdot 10^{-9}$
$N_4$	$1,336 \cdot 10^{-9}$	$2,054 \cdot 10^{-9}$
$N_5$	$3,831 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$

$N_1$  в первой строке табл. 4 означает максимум напряжения. Зависимость  $N_1$  от номера сегмента наглядно показывает изменение максимума напряжения вдоль каждого проводника. Примечательно, что максимумы в параллельно соединенных со схемой землей проводниках могут сильно отличаться (строка 1, столбец 2, табл. 4), что может быть важным. В общем случае это различие определяется различием емкостных и индуктивных связей между проводниками, а также отражениями различных мод Т-волн от соприкосновений на концах проводников.

Аналогична ситуация и с  $N_2$ – $N_5$ . Их значения вдоль проводников, а также их максимумы могут отличаться в несколько раз.

### Заключение

Дополнительно апробирован усовершенствованный алгоритм, позволяющий определять глобальные максимум и минимум напряжения с помощью  $N$ -норм вдоль всех проводников линии передачи, в том числе соединенных параллельно. Полученные результаты (максимум в 5 раз больше найденного исходным алгоритмом) доказывают, что усовершенствованный алгоритм позволит проводить более точные и быстрые исследования и получить более корректные результаты. Его теоретической значимостью является возможность исследовать целый класс структур с параллельно соединенными проводниками многопроводных линий передачи (модальных фильтров на основе гибких печатных кабелей, структур с модальным резервированием, сложных систем заземления и т.п.), а практической – возможность его программной реализации и интеграции в системы моделирования с целью коммерциализации и повышения конкурентоспособности отечественного программного обеспечения для импортозамещения. Первой, где он уже реализован, стала система TUSUR.EMC.

На примере структуры, исследованной в данной работе, портреты  $N$ -норм наглядно показывают их изменения вдоль каждого проводника. Выявлено, что максимумы в параллельно соединенных со схемой землей проводниках могут сильно отличаться. Причины этих различий легко определить более детальным анализом, но ключевым фактором являются различия емкостных и индуктивных связей между проводниками, а также отражения различных мод Т-волн от окончаний проводников.

Примечательно, что усовершенствованный алгоритм может быть полезен не только для анализа токов в цепях заземления при воздействиях на сигнальные проводники. Результаты преднамеренного воздействия по цепям заземления, состоящим из нескольких проводников, также полезно исследовать таким алгоритмом. Первые результаты такого исследования того же устройства представлены в [17].

В дальнейшем полезно детально исследовать максимумы в параллельно соединенных со схемой землей проводниках в различных структурах. Кроме того, для такого анализа целесообразно учесть потери в диэлектриках и проводниках, в том числе схемной земли.

Авторы выражают благодарность А.А. Квасникову за помощь в работе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00579, <https://rscf.ru/project/24-29-00579/> в ТУСУР.

### Литература

1. Loborev V.M. The modern research problems. Plenary lecture // Proc. of AMEREM Conference. – Albuquerque, USA, 1996. – P. 121–127.
2. Tihanyi L. EMC in power electronics. – N.J.: IEEE Press, 1995. – 415 p.
3. Yelizarov A.A. Features of wireless charging of mobile and wearable devices for the IoT and cyber physical systems / A.A. Yelizarov, I.V. Nazarov, A.A. Skuridin, S.I. Yakimenko, D.M. Ikonnikova // International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). – 2020. – P. 1–4.
4. Modeling challenging EMC problems / H.D. Brüns, A. Vogt, C. Findelee, A. Schröder, M. Magdowski, M. Robinson, F. Heidler, C. Schuster // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2017. – Vol. 6, No. 3. – P. 45–54.
5. Meany T. Functional safety and industrie 4.0 // 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC). – 2017. – P. 1–7.
6. Patel M.R. Spacecraft power systems. – Boca Raton: CRC Press, 2005. – 691 p.
7. Суровцев Р.С. Методика предварительного моделирования целостности сигналов в межсоединениях печатных плат бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата в системе TALGAT // Доклады ТУСУР. – 2013. – Т. 29, № 3. – С. 165–169.
8. Гизатуллин З.М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях. – Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 2012. – 254 с.
9. Gazizov R.R. Studying the safety of electronic circuits using an improved  $N$ -norms-based approach / R.R. Gazizov, A.A. Kvasnikov, A.A. Yelizarov // 2023 International Conference «Engineering management of communication and technology» (EMCTECH). – Vienna, Austria, 2023. – P. 1–5.
10. Using  $N$ -norms for analyzing symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation / Y.S. Zhechev, A.V. Zhecheva, A.A. Kvasnikov, A.M. Zabolotsky // Symmetry. – 2021. – Vol. 13, No. 12. – P. 1–17.
11. Gazizov T.R. Complex analysis of IEMI in grounding circuits of critical equipment: preliminary results / T.R. Gazizov, V.D. Nguyen, A. Alhaj Hasan // 2024 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM). – 2024. – P. 413–417.
12. Иванцов И.А. Модальное разложение помехи в связанной микрополосковой линии при удалении сигнальных проводников друг от друга // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 124–133.
13. Система TUSUR.EMC – программный комплекс для моделирования задач электромагнитной совместимости [Электронный ресурс]: официальный сайт системы TUSUR.EMC. – URL: <https://emc.tusur.ru/> (дата обращения: 30.07.2024).
14. Gazizov T.R. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations / T.R. Gazizov, I.Ye. Sagiyeva, and S.P. Kuxsenko // Complexity. – 2019. – Vol. 2019. – Article ID 6301326. – 11 p. DOI: 10.1155/2019/6301326.
15. 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.

16. Газизов Р.Р. Локализация максимума синфазного напряжения вдоль связанной микрополосковой линии тремя способами // Матер. 30-й Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-30–2024)». – Томск: ТУСУР, 2024. – С. 106–110.

17. Юсаф М.Д. Перекрестные наводки в модальном фильтре со связывающими проводниками при воздействии сверхкороткого импульса по схемной земле / М.Д. Юсаф, Р.Р. Газизов // Матер. 30-й Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-30–2024)». – Томск: ТУСУР, 2024. – С. 168–174.

#### Газизов Рустам Рифатович

Мл. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. безопасности и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-7717-4215  
Тел.: +7-952-802-23-10  
Эл. почта: gazizovtsk@yandex.ru

#### Юсаф Мохаммад Джунаид

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0009-0009-9764-143X  
Тел.: +7-952-891-42-89  
Эл. почта: junaidyousaf761@gmail.com

Поступила в редакцию: 16.01.2025.

Принята к публикации: 22.04.2025.

Gazizov R.R., Yousaf M.J.

#### Searching for voltage extrema along grounded conductors of a modal filter with coupling conductors

The rarely studied issue of electrical signals in grounding circuits is considered. It turns out to be rather complicated when such circuits consist of several and different conductors and the signals are pulsed. The emergence of new devices with such circuits requires a comprehensive investigation, examining not only their primary characteristics but also the propagation of electrical signals within the grounding circuits. A new device for protection against ultra-short pulses is investigated: a modal filter with coupling conductors. It features four distinct circuit ground conductors electrically connected in parallel at their ends. Voltage waveforms are simulated along each conductor, searching for their extrema. This is achieved using an original algorithm (searching along only one of the parallel conductors) and an improved algorithm (searching along all parallel conductors). The results of both algorithms are compared using  $N$ -norms of the signal. The improved algorithm reveals a voltage maximum that is several times greater than the maximum of the original one. In addition, the difference in maxima across different circuit ground conductors and along their lengths is clearly shown. Such an analysis is useful for analyzing overvoltages in grounding circuits under other influences, including intentional ones.

**Keywords:** electromagnetic compatibility,  $N$ -norm, modal filter, computer modeling system, circuit ground, multiconductor transmission line, voltage extremum, TUSUR.EMC.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2025-28-1-7-13

#### References

1. Loborev V.M. The modern research problems. Plenary lecture. *Proceedings of AMEREM Conference*, Albuquerque, 1996, pp. 121–127.
2. Tihanyi L. *EMC in power electronics*. N.J.: IEEE Press, 1995, 415 p.
3. 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.
4. Brüns H.D., Vogt A., Findekle C., Schröder A., Magdowski M., Robinson M., Heidler F., Schuster C. Modeling challenging EMC problems. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2017, vol. 6, no. 3. pp. 45–54.
5. Meany T. *Functional safety and industry 4.0. 2017 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*. Killarney, Ireland, 2017, pp. 1–7.
6. Patel M.R. *Spacecraft Power Systems*. USA, FL, Boca Raton: CRC Press, 2005, 691 p.
7. Surovtsev R.S. The technique of preliminary modeling of signal integrity in the printed-circuit board interconnections of the radioelectronic spacecraft equipment in the TALGAT system. *Proceedings of TUSUR University*, 2013, vol. 29, no. 3, pp. 165–169 (in Russ.).
8. Gizatullin Z.M. *Pomekhoustojchivost' sredstv vychislitel'noj tekhniki vnutri zdaniy pri shirokopolosnyh elektromagnitnyh vozdeystviyah. Monografija* [The Immunity of Computer Equipment inside Buildings with Broadband Electromagnetic Effects. Monography]. Kazan, Kazan State Technical University Publ., 2012. 254 p. (in Russ.).
9. 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.
10. 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.
11. Gazizov T.R., Nguyen V.D., Alhaj Hasan A. Complex analysis of IEMI in grounding circuits of critical equipment: preliminary results. *2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2024, pp. 413–417.
12. Ivantsov I.A. [Modal decomposition of interference in a coupled microstrip line when the signal conductors are distant from each other]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 3, pp. 124–133 (in Russ.).
13. TUSUR.EMC system – software package for modeling electromagnetic compatibility problems. Official website of the TUSUR.EMC system [Online]: Available at: <https://emc.tusur.ru/>, free (Accessed: July 30, 2024) (in Russ.).
14. Gazizov T.R., Sagiyeva I.Ye., Kuksenko S.P. Solving the complexity problem in the electronics production process by reducing the sensitivity of transmission line characteristics to their parameter variations. *Complexity*, 2019, vol. 2019, Article ID 6301326, 11 p. DOI:10.1155/2019/6301326.
15. 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 Russ.).
16. Gazizov R.R. [Localization of the maximum common-mode voltage along a coupled microstrip line by three techniques]. *30-th International Scientific-practical Conference SIBRESURS*, Tomsk: TUSUR, 2024, pp. 106–110 (in Russ.).

17. Yousaf M.J. [Crosstalk in a modal filter with coupling conductors when subjected to an ultra-short pulse over circuit ground]. *30-th International Scientific-practical Conference SI-BRESURS*, Tomsk: TUSUR, 2024, pp. 168–174 (in Russ.).

**Mohammad Junaid Yousaf**

Postgraduate student,  
Department of Television and Control, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0009-0009-9764-143X  
Phone: +7-952-891-42 89  
Email: junaidyousaf761@gmail.com

**Rustam R. Gazizov**

Junior Researcher, Research Laboratory of Security and  
Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Devices,  
Tomsk State University of Control Systems  
and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-7717-4215  
Phone: +7-952-802-23-10  
Email: gazizovtsk@yandex.ru

Received: 16.01.2025.

Accepted: 22.04.2025.