

УДК 621.372.22

П.В. Микола, З.М. Кенжегулова, Р.С. Суровцев

## Анализ распространения импульсного сигнала в одиночной линии передачи из двух отрезков на основе диаграммы координата–время

Выполнен анализ распространения импульсного сигнала в одиночной линии передачи из двух отрезков для режимов холостого хода и короткого замыкания в конце линии. Выполнено сравнение диаграммы координата–время и временных откликов на импульсное воздействие. Получено полное совпадение амплитуд импульсов в узлах линии.

**Ключевые слова:** сверхкороткий импульс, микрополосковая линия передачи, временной отклик, диаграмма координата–время.

Важным этапом в проектировании радиоэлектронных средств (РЭС) является обеспечение требований по их электромагнитной совместимости (ЭМС). Так, важно обеспечение помехозащищенности РЭС критически важных объектов страны [1]. В связи с плотной компоновкой печатных плат, уменьшением рабочих напряжений внутренних элементов и ростом диапазона частот используемых сигналов РЭС становится все более уязвимым к электромагнитным воздействиям [2, 3].

При эксплуатации критичных РЭС (например, объектов связи) опасность представляет возможность преднамеренного использования генераторов мощных сверхкоротких импульсов (СКИ) с целью дестабилизации работы объекта [4]. Традиционные устройства не всегда способны обеспечить защиту от СКИ из-за ряда недостатков (пробой при высоких напряжениях, паразитные параметры, недостаточное быстродействие) [5]. Специфика воздействия СКИ состоит в том, что наводки от него могут восприниматься в качестве полезных сигналов, нарушая целостность цифрового сигнала, а при более высокой амплитуде проникать через традиционные средства защиты и приводить к выходу РЭС из строя [6] даже по цепям питания [7]. Поэтому актуален поиск новых подходов для обеспечения защиты РЭС от СКИ и совершенствование известных средств защиты.

Одним из принципов защиты от СКИ является его разложение на последовательность импульсов меньшей (относительно исходной) амплитуды в меандровых линиях специальной конфигурации [8]. Традиционно меандровые линии применяются для задержки сигнала на печатной плате при его тактировании в точке приема. Поэтому существенная часть исследований направлена на анализ искажений сигнала в меандровых линиях задержки [9, 10].

В основе таких устройств лежит явление модального искажения сигнала (разложение помехового сигнала на моды за счет различия скоростей их распространения) [11]. Так, исследовано разложение СКИ в витке меандровой линии с нерегулярным поперечным сечением и представлены первые результаты такого анализа для витка, состоящего из двух

отрезков с разными параметрами поперечного сечения. В результате выявлены дополнительные импульсы на выходе линии, возникающие из-за рассогласования на стыке отрезков [12].

Поскольку результаты анализа получены с помощью численного моделирования, то для более полного понимания причин искажения сигнала целесообразно оценить его аналитически. Такие оценки легко получить на основе диаграмм координата–время [13]. Между тем виток меандра является достаточно сложной структурой, поэтому сначала нужно выполнить анализ диаграмм координата–время более простой модели, например, одиночной линии передачи из двух отрезков, но с учетом окончаний на стыке проводников, которые в меандре характеризуются холостым ходом (ХХ) для четной моды и коротким замыканием (КЗ) для нечетной. Цель данной работы – выполнить такой анализ.

### Исходные данные для моделирования

Для исследования выбрана одиночная линия из двух одинаковых отрезков со следующими параметрами поперечного сечения (рис. 1): ширина проводников первого и второго отрезков  $w = 1000$  мкм и  $w = 500$  мкм соответственно; толщина фольги  $t = 100$  мкм; толщина подложки  $h = 510$  мкм; относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r = 10$ ; расстояние от края структуры до проводников  $d = 3w$ .

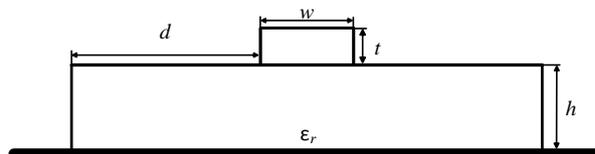


Рис. 1. Вид поперечного сечения отрезка исследуемой линии

Длина исследуемой линии  $l = 0,4$  м. Первый отрезок на ближнем конце соединен с источником импульсных сигналов ( $E_{ист}$ ) с внутренним сопротивлением  $R_1 = 50$  Ом, а второй – с приемным устройством с сопротивлением  $R_2$ . При моделировании сопротивление  $R_2 \rightarrow \infty$  для имитации ХХ и  $R_2 \rightarrow 0$  для имитации КЗ (1 МОм, 10 мкОм). В качестве воздействия выбран импульс в виде трапеции с ЭДС 1 В и длитель-

ностями фронта, плоской вершины и спада импульса по 50 пс.

### Выражения для вычисления амплитуды сигнала на стыках линии

Для построения диаграмм координата–время надо вычислить амплитуду напряжения сигнала на каждом стыке исследуемой линии: между источником и первым отрезком; между приемным устройством и вторым отрезком; между первым и вторым отрезками. Далее приведены используемые выражения, детально описанные в [14]. Амплитуды проходящей и отраженной волн определяются как

$$U_{\text{прох}} = U_{\text{пад}} T, \quad (1)$$

$$U_{\text{отр}} = U_{\text{пад}} \Gamma, \quad (2)$$

где  $U_{\text{пад}}$  – амплитуда падающей волны (в узле  $V_1$ ), которая определяется как

$$U_{\text{пад}} = E_{\text{ист}} \frac{Z_1}{Z_1 + R_1}, \quad (3)$$

где  $Z_1$  – волновое сопротивление первого отрезка,  $\Gamma$  и  $T$  – коэффициенты передачи и отражения соответственно. Для стыка между источником и первым отрезком эти коэффициенты определяются как

$$\Gamma_{\text{ист}} = \frac{R_1 - Z_1}{R_1 + Z_1}, \quad (4)$$

$$T_{\text{ист}} = 1 + \Gamma_{\text{ист}}, \quad (5)$$

стыка между вторым отрезком и нагрузкой –

$$\Gamma_{\text{нагр}} = \frac{R_2 - Z_2}{R_2 + Z_2}, \quad (6)$$

$$T_{\text{нагр}} = 1 + \Gamma_{\text{нагр}}, \quad (7)$$

стыка отрезков –

$$\Gamma_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad \Gamma_{21} = -\Gamma_{12}, \quad (8)$$

$$T_{12} = 1 + \Gamma_{12}, \quad T_{21} = 1 + \Gamma_{21}, \quad (9)$$

где  $Z_2$  – волновое сопротивление второго отрезка.

Выражения (6), (7) после простых преобразований при  $R_2 \rightarrow \infty$  и  $R_2 \rightarrow 0$  примут вид

$$\Gamma_{\text{нагр}}^{\text{КЗ}} = -1, \quad (10)$$

$$\Gamma_{\text{нагр}}^{\text{XX}} = 1, \quad (11)$$

$$T_{\text{нагр}}^{\text{КЗ}} = 0, \quad (12)$$

$$T_{\text{нагр}}^{\text{XX}} = 2. \quad (13)$$

### Построение диаграмм координата–время

Для детального анализа распространения сигнала в одиночной линии из двух отрезков построены диаграммы координата–время по (1) и (2) для режимов КЗ и XX в конце линии (рис. 2). Для этого в системе TALGAT [15] вычислены волновые сопротивления ( $Z_1 = 36,54$  Ом и  $Z_2 = 53,12$  Ом) и погонные задержки ( $\tau_1 = 1,58$  нс/м,  $\tau_2 = 1,48$  нс/м) отрезков.

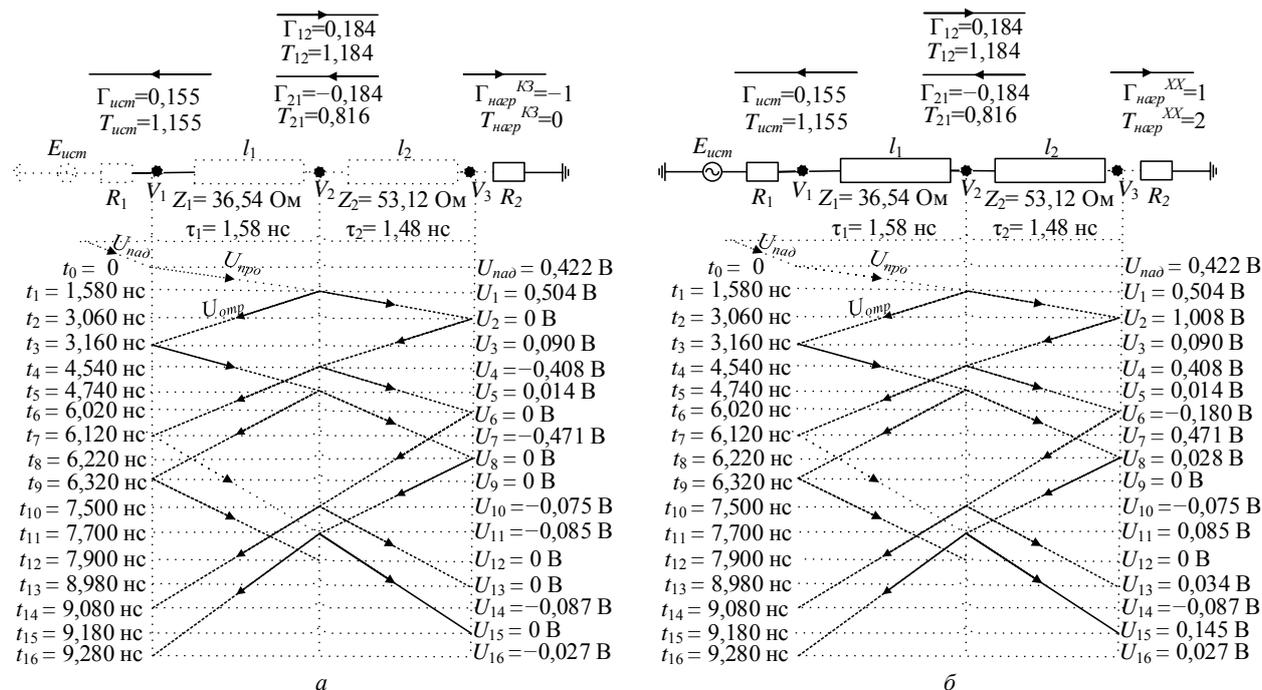


Рис. 2. Диаграммы координата–время для режимов КЗ (а) и XX (б) в конце второго отрезка

На рис. 2, а представлена диаграмма координата–время для режима КЗ в конце линии. Из диаграммы видно, что первое отражение проходящей волны возникает от стыка между первым и вторым отрезками с коэффициентом отражения  $\Gamma_{12} = 0,184$ .

Отраженный импульс приходит в начало линии с задержкой  $t_3$  и амплитудой  $0,09$  В. Следующее отражение возникает от стыка между вторым отрезком и приемным устройством (узел  $V_3$ ). Импульс падающей волны полностью отражается ( $\Gamma_{\text{нагр}} = -1$ ) от

стыка и приходит в узел  $V_2$  в момент времени  $t_4$  с обратным знаком в соответствии с выражением (10) и амплитудой 0,408 В. Последующие импульсы являются переотражениями от стыков (между отрезками и вторым отрезком и приемным устройством), этих импульсов. Следуя рассмотренному принципу, можно оценить амплитуду импульсного сигнала в любом узле линии с учетом всех отражений вплоть до полного его затухания.

На рис. 2, б представлена диаграмма координата–время для режима ХХ в конце линии. Видно, что первое отражение проходящей волны возникает

от стыка между отрезками с коэффициентом отражения  $\Gamma_{12} = 0,184$ , а отраженный импульс приходит в узел  $V_1$  в момент времени  $t_3$  с амплитудой сигнала 0,09 В (как и для режима КЗ). При этом проходящий импульс приходит к концу линии (узел  $V_3$ ) с задержкой  $t_2$ , а его амплитуда составила 1,008 В за счет коэффициента передачи  $T_{\text{нагр}} = 2$  согласно (13). Второй отраженный импульс приходит в узел  $V_2$  с задержкой  $t_4$  и амплитудой 0,408 В за счет коэффициента отражения от стыка между вторым отрезком и нагрузкой ( $\Gamma_{\text{нагр}} = 1$ ).

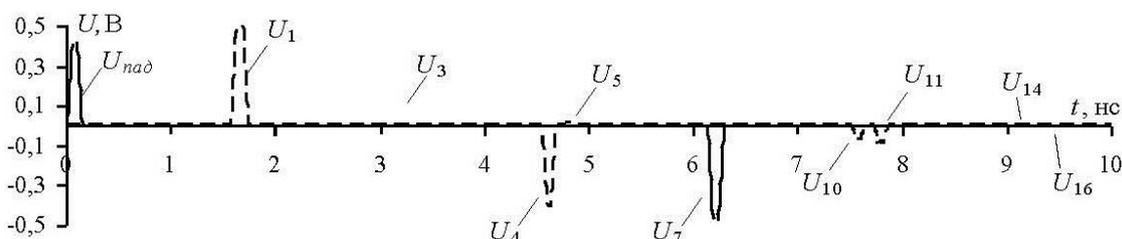


Рис. 3. Форма напряжения в узлах  $V_1$  (—) и  $V_2$  (- -) линии из рис. 2, а

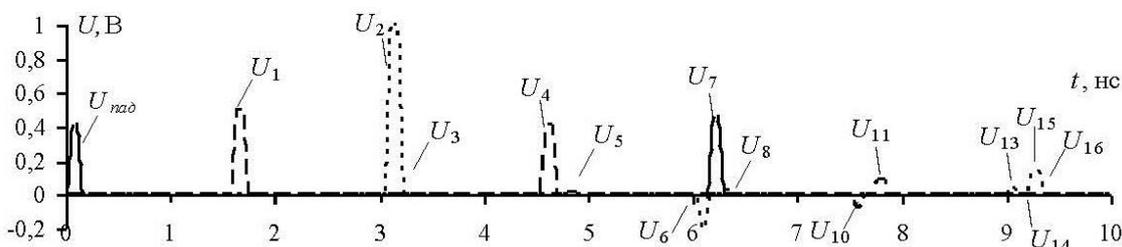


Рис. 4. Форма напряжения в узлах  $V_1$  (—),  $V_2$  (- -) и  $V_3$  (- . -) линии из рис. 2, б

Для оценки корректности полученных результатов в системе TALGAT вычислены формы напряжения в начале и конце линии для режима КЗ (см. рис. 3). На рисунке видно 10 импульсов. Первый импульс является импульсом падающей волны и имеет амплитуду  $U_{\text{пад}}$ , а второй – импульсом проходящей волны, пришедшим в узел  $V_2$  и имеющим амплитуду  $U_1$ . Последующие импульсы являются результатом отражений от стыков. Отметим, что амплитуды всех наблюдаемых импульсов на рис. 3 совпали с амплитудами, вычисленными по выражениям (1) и (2). Кроме того, из-за режима КЗ в моменты времени  $t_2$ ,  $t_6$ ,  $t_8$ ,  $t_{13}$  и  $t_{15}$  амплитуда сигнала в конце линии (узел  $V_3$ ) равна 0.

Вычислена форма сигнала во всех узлах линии для режима ХХ (рис. 2, б). Получено 16 импульсов в узлах линии. Первые три импульса являются основными. Так, первый импульс с амплитудой  $U_{\text{пад}}$  является падающим, второй с амплитудой  $U_1$  – отраженным от стыка между отрезками и проходящим во второй отрезок, а третий с амплитудой  $U_2$  – отраженным от стыка между вторым отрезком и приемным устройством и пришедшим к концу линии. Остальные импульсы возникают в результате отражений от стыков и приходят после трех основных импульсов. Также отметим, что амплитуды всех наблюдаемых импульсов на рис. 4 совпали с амплитудами, вычисленными по выражениям (1) и (2).

### Заключение

В работе представлены результаты предварительного анализа распространения импульсного сигнала в одиночной линии, состоящей из двух отрезков, для двух режимов согласования в конце линии: холостого хода и короткого замыкания. Выбор режимов обусловлен последующим переходом от структуры одиночной линии передачи из двух отрезков к более сложной структуре витка меандровой линии из двух отрезков, где распространяются две моды. Анализ выполнен на основе сравнения диаграмм координата–время одиночной линии и временного отклика на импульсное воздействие для каждого из режимов. В результате амплитуды импульсов в узлах линии, полученных двумя способами, совпадают. Далее целесообразно выполнить аналогичный детальный анализ витка меандровой линии.

Разработка алгоритмов и программ выполнена при поддержке гранта РФФ 21-79-0016. Моделирование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект FEWM – 2020-0041).

### Литература

1. Фоминич Э.Н. Электромагнитный терроризм. Новая угроза для информационно-управляющих систем / Э.Н. Фоминич, Д.Р. Владимиров // Военный инженер. – 2016. – № 2 (2). – С. 10–17.

2. Мещеряков С.А. Моделирование физических процессов в полупроводниковых структурах при воздействии мощного СВЧ-импульса // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 12. – С. 1–15.
3. Пирогов Ю.А. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения / Ю.А. Пирогов, А.В. Солодов // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 6. – С. 1–3.
4. Гизатуллин З.М. Исследование электромагнитной совместимости локальных вычислительных сетей при наносекундных электромагнитных воздействиях / З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин // Радиотехника и электроника. – 2014. – Т. 59, № 5. – С. 463–466.
5. Response of telecom protection to three IEC waveforms / M.A. Messier, K.S. Smith, W.A. Radasky, M.J. Madrid // Proceedings of the 15th International Zurich symposium on EMC. – 2003. – P. 127–132
6. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия / Л.Н. Здухов, Л.Н. Парфёнов, О.А. Тарасов, В.М. Чепелев // Технологии электромагнитной совместимости. – 2018. – № 2 (65). – С. 22–34.
7. Гизатуллин З.М. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания / З.М. Гизатуллин, Р.М. Гизатуллин // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 5. – С. 546–550.
8. Surovtsev R.S. Possibility of protection against uwb pulses based on a turn of a meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2017. – P. 1864–1871.
9. Ramahi O.M. Full-wave analysis of delay lines / O.M. Ramahi, B. Archambeault // Proceedings of the International Zurich symposium on EMC. – 2001. – P. 537–539.
10. Bhohe A.U. Meander delay line challenge problems: a comparison using FDTD, FEM and MoM / A.U. Bhohe, C. Lolloway, M. Picket-May // International Symposium on EMC. – 2001. – P. 805–810.
11. Газизов Т.Р. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Технологии электромагнитной совместимости. – 2006. – С. 40–44.
12. Микола П.В. Анализ временного отклика витка меандровой микрополосковой линии из двух отрезков с разными параметрами / П.В. Микола, Р.С. Суровцев // XVI Междунар. науч.-техн. конф. «Электронные средства и системы управления (ЭССУ) – 2020». – 18–20 ноября 2020 г. Томск. – С. 304–306.
13. Князев А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. – М.: Радио и связь, 1989. – С. 142–146.
14. Hall S.H. Advanced signal integrity for high-speed digital designs / S.H. Hall, H.L. Hick. – Published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2009. – 668 p.
15. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.

---

**Микола Павел Владимирович**

Магистрант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа  
Эл. почта: mikolapavell@gmail.com

**Кенжегулова Зарина Муратбековна**

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: zarina.kenzhegulova@mail.ru

**Суровцев Роман Сергеевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: surovtsvrs@gmail.com