

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.372.2

АНАЛИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ И УМЕНЬШЕНИЯ АМПЛИТУД СОСТАВЛЯЮЩИХ ВРЕМЕННОГО ОТКЛИКА В ВИТКЕ МЕАНДРОВОЙ ЛИНИИ

© 2022 г. Р. С. Суровцев*

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
просп. Ленина, 40, Томск, 634050 Российская Федерация*

**E-mail: surovtsvrs@gmail.com*

Поступила в редакцию 30.04.2021 г.

После доработки 23.08.2021 г.

Принята к публикации 02.09.2021 г.

Отмечена актуальность защиты радиоэлектронной аппаратуры от кондуктивных воздействий, в частности сверхкоротких импульсов (СКИ). Выделен виток меандровой линии (МЛ), позволяющий улучшить защиту от СКИ за счет его разложения на последовательность импульсов меньшей амплитуды. Отмечено, что для быстрой априорной оценки амплитуды СКИ на выходе МЛ в ряде случаев целесообразно применение простых аналитических моделей, а не затратного полноволнового анализа. Описан процесс получения аналитических моделей в замкнутой форме для расчета временного отклика в узлах витка МЛ. На основе разработанных моделей получены условия равенства амплитуд импульсов разложения в конце витка МЛ для трех случаев разложения.

DOI: 10.31857/S0033849422010090

ВВЕДЕНИЕ

Современные электронные системы постоянно совершенствуются, становясь все более функциональными, компактными и быстродействующими, но при этом более сложными и уязвимыми. Для разработки систем с множеством параметров применяется автоматизированное проектирование, основанное на математическом моделировании. Разнообразие моделей формирует соответствующую теоретическую основу автоматизированного проектирования и имеет большое практическое значение при моделировании, позволяя разработчику проверить его достоверность и сократить вычислительные затраты. Поэтому необходима разработка новых моделей для улучшения конструкции элементов электронных систем.

Типичным примером такого элемента является меандровая линия (МЛ), традиционно применяемая для задержки сигналов, поступающих из разных точек печатных плат для их синхронизации в точке приема. Также МЛ нашли применение в приемных и передающих антеннах [1], индукторах [2], многослойных конденсаторах [3], фильтрующих устройствах [4], корректорах групповой задержки и фазовых корректорах [5].

Между тем широко применяемые МЛ, если сделать их в специальной конфигурации, можно использовать также для подавления опасных кондуктивных воздействий, в частности сверхкорот-

кого импульса (СКИ). Так, СКИ, распространяющийся вдоль витка МЛ, может быть разложен на несколько основных импульсов меньшей и одинаковой амплитуды: два импульса в воздушной МЛ [6], три – в микрополосковой [7] и четыре – в несимметричной, с лицевой связью [8]. Действительно, необходимость защиты от такого воздействия отмечалась в указанных работах [6–8], подтвердилась опубликованными фактами различных применений [9], показана, например, для авионики [10], став особенно насущной для беспилотных летательных аппаратов [11]. Специфика результата воздействия именно СКИ состоит в том, что наводки от него могут восприниматься в качестве полезных сигналов, однако они нарушают цифровой обмен, а при более высокой амплитуде проникают через традиционные средства защиты и приводят к выходу из строя [12, 13]. Уменьшение результирующей амплитуды помехи до безопасного уровня с помощью новых (одиночных или последовательно соединенных) устройств, используемых вместо известных или дополнительно с ними, может улучшить защиту. Поэтому активно исследуются новые устройства, позволяющие ослабить влияние СКИ за счет его разложения на импульсы с меньшими амплитудами (минимальными при их выравнивании), например, модальные фильтры [14]. Между тем очень близки к ним защитные МЛ [15, 16], которые могут да-

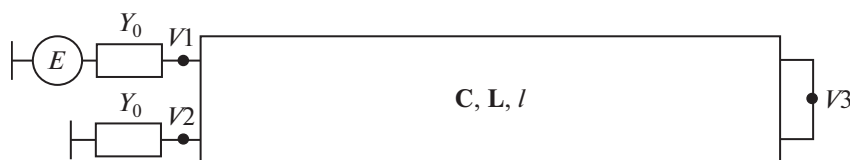


Рис. 1. Схема соединений витка МЛ; прямоугольником обозначен отрезок регулярной связанной линии.

же превосходить их: за счет большего числа импульсов разложения, удвоенного пути вдоль МЛ и отсутствия резисторов [6–8]. Таким образом, исследование и применение МЛ для защиты от СКИ видится перспективным.

Для моделирования полосковых устройств, в том числе МЛ, как правило, используются численные методы. Например, для исследования минимизации искажений полезных сигналов, возникающих в МЛ на печатных платах из-за перекрестных связей, успешно применяется SPICE-моделирование [17], а также широко известные полноволновые методы [18]. Однако использование численных методов не всегда целесообразно, поскольку в ряде частных случаев (с незначительными потерями и дисперсией) вычислительные затраты на моделирование численным методом могут быть крайне высоки. Типичным примером является оптимизация, выполняемая для выравнивания и минимизации амплитуд разложенных импульсов [19]. Тогда для предварительных оценок целесообразно использовать аналитические модели, которые дают быстрые оценки с приемлемой точностью. Кроме того, аналитическая модель, представленная в общем виде, позволяет получить на ее основе более простые и эффективные модели для некоторых частных, но важных структур. Наконец, такие модели позволяют получить аналитические условия для расчета оптимальных параметров без использования вычислительно затратной оптимизации. Поэтому развитие аналитического моделирования не теряет актуальности.

Представим несколько примеров таких исследований. Например, хорошо известен подход к анализу перекрестных помех, задержки распространения сигнала и импульсных искажений в межсоединениях [20]. В [21] авторы приводят выражения в замкнутой форме для определения передаточных функций N связанных межсоединений с произвольными импедансами на концах. Заслуживают внимания также модели, основанные на численном обратном преобразовании Лапласа [22, 23], и аналитические модели для периодических многокаскадных структур из одиночных и симметричных связанных линий [24].

Между тем, насколько известно автору, к настоящему моменту нет окончательных аналитических моделей в замкнутой форме для временного отклика на концах витка МЛ на импульсное

воздействие. Этот факт ограничивает получение аналитических оценок для важных приложений МЛ, например, в качестве устройств защиты от кондуктивных СКИ. Однако можно предположить, что подходы и методы, представленные в [20–24], могут быть эффективно использованы для заполнения этих пробелов. В частности, модели из [24] успешно модифицированы в работах [25, 26] для сложных структур, но также могут быть использованы для витка МЛ. Это позволит сделать вклад в решение проблемы эффективного автоматизированного синтеза оптимальных МЛ.

Целью данной работы является вывод простых аналитических моделей для быстрой и априорной оценки амплитуд импульсов разложения, а также условий их выравнивания в конце витка МЛ.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

На рис. 1 представлена схема соединений исследуемого витка МЛ. Он состоит из одного опорного и двух параллельных ему и друг другу сигнальных проводников длиной l , соединенных на одном конце. Один из сигнальных проводников соединен с источником электродвижущей силы (ЭДС) E с внутренним адмиттансом Y_0 , а другой – с нагрузкой Y_0 . Поскольку сигнал в конце витка МЛ представлен последовательностью его составляющих, то сначала нужно получить их амплитуды в аналитическом виде. Для этого удобно использовать аналитические модели для отрезка симметричной связанной линии передачи, полученные на основе моделей для одиночной линии с адмиттансом Y_1 и задержкой τ_1 (рис. 2) [24].

Для ясности дальнейшего изложения, представим эти модели. Компоненты отклика для дальнего конца, учитывающие проходящую волну $V_0(t)$, и ближнего конца, учитывающие отраже-

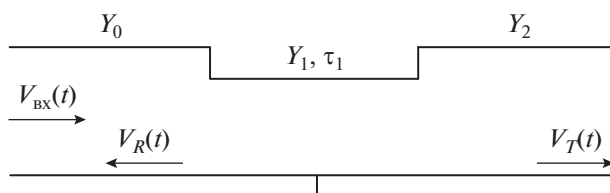


Рис. 2. Эквивалентная схема одиночного отрезка линии передачи с окончаниями [24].

ние от начала $V_1'(t)$ и конца $V_1''(t)$ отрезка линии, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} V_0(t) &= \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_1} \frac{2Y_1}{Y_1 + Y_2} V_{\text{BX}}(t - \tau_1), \\ V_1'(t) &= \frac{Y_0 - Y_1}{Y_0 + Y_1} V_{\text{BX}}(t), \\ V_1''(t) &= \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_1} \frac{2Y_1}{Y_1 + Y_2} \frac{Y_1 - Y_2}{Y_2 + Y_1} V_{\text{BX}}(t - 2\tau_1), \end{aligned} \quad (1)$$

где $V_{\text{BX}}(t) = E(t)/2$.

Следующие выражения, когда задано четное или нечетное число отражений ($k_{\text{отр}}$), позволяют вычислить отклик на дальнем (с учетом компонент, испытавших четное число отражений) или ближнем (с учетом компонент, испытавших нечетное число отражений) концах линии:

$$\begin{aligned} V_T(t) &= V_0(t) + \sum_{k=1}^{k_{\text{отр}}/2} V_{\text{ВЫХ}}(t), \\ V_R(t) &= V_1'(t) + V_1''(t) + \sum_{k=1}^{(k_{\text{отр}}-1)/2} V_{\text{ОТР}}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} V_{\text{ВЫХ}}(t) &= \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_1} \frac{2Y_1}{Y_1 + Y_2} \times \\ &\times V_{\text{BX}}(t - (2k + 1)\tau_1) \prod_{i=1}^k \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 + Y_2} \frac{Y_1 - Y_0}{Y_0 + Y_1}, \\ V_{\text{ОТР}}(t) &= \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_1} \frac{2Y_1}{Y_1 + Y_2} \frac{Y_1 - Y_2}{Y_2 + Y_1} \times \\ &\times V_{\text{BX}}(t - 2(k + 1)\tau_1) \prod_{i=1}^k \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 + Y_2} \frac{Y_1 - Y_0}{Y_0 + Y_1}. \end{aligned}$$

Выражения (2) для одиночной линии применимы для симметричной (в поперечном сечении и по нагрузкам) связанной линии, если записать их отдельно, заменив индекс "1" в Y_1 и τ_1 на индексы "e" и "o" для четной и нечетной мод соответственно. Тогда компоненты отклика для четной и нечетной мод позволяют получить отклик в каждом узле связанной линии как

$$\begin{aligned} V_1(t) &= \frac{1}{2} [V_R^e(t) + V_R^o(t)], \quad V_2(t) = \frac{1}{2} [V_R^e(t) - V_R^o(t)], \\ V_3(t) &= \frac{1}{2} [V_T^e(t) + V_T^o(t)], \quad V_4(t) = \frac{1}{2} [V_T^e(t) - V_T^o(t)], \end{aligned} \quad (3)$$

где $V_1(t)$ и $V_3(t)$ – отклики в начале и конце активного проводника, а $V_2(t)$ и $V_4(t)$ – пассивного.

2. МОДЕЛИ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВРЕМЕННОГО ОТКЛИКА

Структура на рис. 1 – это связанная линия с замкнутыми на дальнем конце проводниками

без окончаний. Поэтому на дальнем конце (рис. 2, выражения (2)) $Y_2 = \infty$ для нечетной моды и $Y_2 = 0$ – для четной. Тогда выражения (2) для каждой моды существенно упрощаются. Используя (3), получим окончательно для отклика в узлах V_1, V_2, V_3 :

$$\begin{aligned} V_1(t) &= \frac{V_{\text{BX}}(t)}{2} \left(\frac{Y_0 - Y_e}{Y_0 + Y_e} + \frac{Y_0 - Y_o}{Y_0 + Y_o} \right) + \\ &+ 2Y_0 \left(\frac{Y_e V_{\text{BX}}(t - 2l\tau_e)}{(Y_e + Y_0)^2} - \frac{Y_o V_{\text{BX}}(t - 2l\tau_o)}{(Y_o + Y_0)^2} \right) + 2Y_e Y_0 \times \\ &\times \sum_{i=2}^{k_{\text{отр}}} (-1)^{i+1} V_{\text{BX}}(t - 2l\tau_e i) (Y_e + Y_0)^{-(1+i)} (Y_0 - Y_e)^{i-1} - \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &- 2Y_o Y_0 \sum_{i=2}^{k_{\text{отр}}} V_{\text{BX}}(t - 2l\tau_o i) (Y_o + Y_0)^{-(1+i)} (Y_0 - Y_o)^{i-1}, \\ V_2(t) &= \frac{V_{\text{BX}}(t)}{2} \left(\frac{Y_0 - Y_e}{Y_0 + Y_e} - \frac{Y_0 - Y_o}{Y_0 + Y_o} \right) + \\ &+ 2Y_0 \left(\frac{Y_e V_{\text{BX}}(t - 2l\tau_e)}{(Y_e + Y_0)^2} + \frac{Y_o V_{\text{BX}}(t - 2l\tau_o)}{(Y_o + Y_0)^2} \right) + 2Y_e Y_0 \times \\ &\times \sum_{i=2}^{k_{\text{отр}}} (-1)^{i+1} V_{\text{BX}}(t - 2l\tau_e i) (Y_e + Y_0)^{-(1+i)} (Y_0 - Y_e)^{i-1} + \\ &+ 2Y_o Y_0 \sum_{i=2}^{k_{\text{отр}}} V_{\text{BX}}(t - 2l\tau_o i) (Y_o + Y_0)^{-(1+i)} (Y_0 - Y_o)^{i-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_3(t) &= V_4(t) = \frac{2Y_0 V_{\text{BX}}(t - l\tau_e)}{(Y_e + Y_0)} + \\ &+ 2Y_0 \sum_{i=2}^{k_{\text{отр}}} (-1)^{i+1} V_{\text{BX}}(t - l\tau_e(2i - 1)) \times \\ &\times (Y_e + Y_0)^{-i} (Y_0 - Y_e)^{i-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для проверки (4)–(6) вычислены временные отклики в узлах V_1, V_2, V_3 (рис. 3) на импульсное воздействие в системе TALGAT численным методом в частотной области [27]. Параметры поперечного сечения витка, источника и нагрузки взяты из [7]. Полученные формы сигналов полностью совпали.

3. УСЛОВИЯ ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ АМПЛИТУД СОСТАВЛЯЮЩИХ ВРЕМЕННОГО ОТКЛИКА

Модель (5) пригодна для воздействия произвольной формы, но для определенности рассмотрим воздействие СКИ. Для выравнивания амплитуд импульсов разложения (исходного СКИ) в конце витка МЛ сначала необходимо определить нормированные амплитуды каждой составляющей временного отклика в конце МЛ. Из (5) легко получить аналитические выражения, определяющие амплитуды первого (перекрестной на-

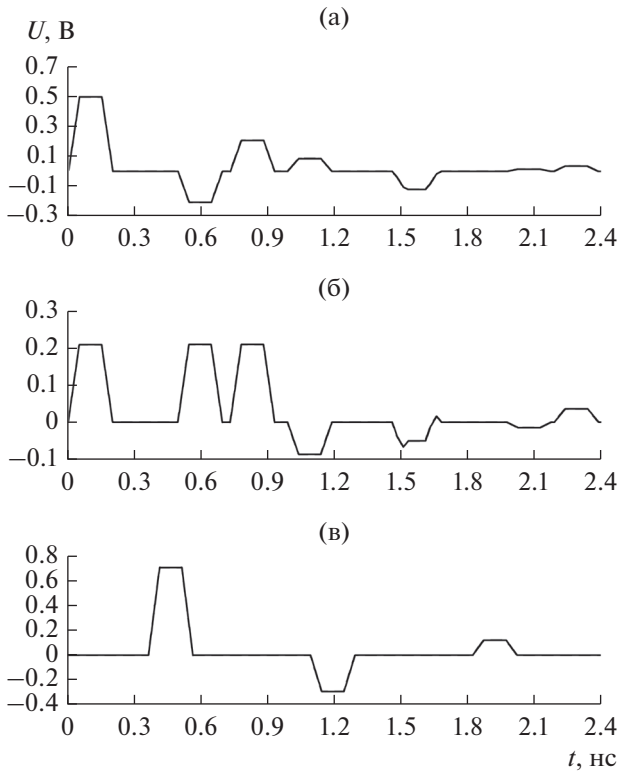


Рис. 3. Формы напряжения в узлах $I1$ (а), $I2$ (б), $I3$ (в) схемы рис. 1, вычисленные по выражениям (4)–(6) (штриховые кривые) и в TALGAT (сплошные), полностью совпадают.

водки, V_c), второго (нечетной моды, V_o) и третьего (четной моды, V_e) импульсов:

$$V_c = \frac{Y_0(Y_o - Y_e)}{(Y_o + Y_0)(Y_e + Y_0)}, \quad V_o = \frac{2Y_0Y_o}{(Y_o + Y_0)^2}, \quad (7)$$

$$V_e = \frac{2Y_0Y_e}{(Y_e + Y_0)^2}.$$

Далее можно сформулировать условия для выравнивания амплитуд импульсов и вывести окончательные выражения для нескольких частных случаев.

3.1. Выравнивание амплитуд двух импульсов

Если погонные задержки четной и нечетной мод линии одинаковы (например, при однородном диэлектрическом заполнении), то в конце линии наблюдаются только два импульса: наводки и основного сигнала. Амплитуда второго импульса определяется как сумма амплитуд четной и нечетной мод линии. Тогда из условия равенства амплитуд первого и второго импульсов $V_c = V_o + V_e$ с учетом (7) получим

$$\frac{Y_o + 3Y_e}{Y_0} + \frac{3Y_o + Y_e}{Y_o} + \frac{Y_o - Y_e}{Y_e} = -8. \quad (8)$$

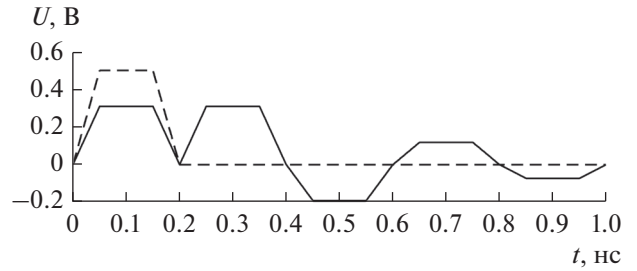


Рис. 4. Формы напряжения в узлах $I1$ (штриховая) и $I2$ (сплошная) витка МЛ в воздухе при $k \approx 4.236$.

Рассмотрим частный случай минимизации отражений сигнала от концов проводников, когда $Y_o = \sqrt{Y_e Y_0}$. Тогда после подстановки $k = \sqrt{Y_o/Y_e}$ с физическим смыслом коэффициента связи, получим уравнение 4-й степени

$$k^4 - 2k^3 - 8k^2 - 6k - 1 = 0,$$

имеющее один физический корень $k = \sqrt{5} + 2 \approx 4.236$, который определяет нормированную к амплитуде $V_{вх}(t)$ амплитуду напряжения на выходе витка МЛ как $(k - 1)/(k + 1) = (\sqrt{5} - 1)/2 \approx 0.618$.

Для проверки полученных аналитических моделей и оценок вычислены матрицы и временные отклики в узлах $I1$ и $I2$ на импульсное воздействие в системе TALGAT. Параметры воздействия, поперечного сечения МЛ в воздухе, генератора и нагрузки взяты из [6]. Вычисленные методом моментов [27] матрицы \mathbf{C} и \mathbf{L} структуры и вычисленная из них матрица \mathbf{Z} имеют вид:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 153.16 & -136.99 \\ -136.99 & 153.16 \end{bmatrix} \text{ пФ/м},$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 363.35 & 325.00 \\ 325.00 & 363.35 \end{bmatrix} \text{ нГн/м},$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 108.93 & 97.43 \\ 97.43 & 108.93 \end{bmatrix} \text{ Ом}.$$

Как разность и сумма по строке матрицы \mathbf{Z} , вычислены волновые сопротивления нечетной и четной мод линии ($Z_o = 11.50 \text{ Ом}$, $Z_e = 206.36 \text{ Ом}$), обеспечивающие условие $k = \sqrt{Z_e/Z_o} \approx 4.236$. На рис. 4 представлены формы напряжений в узлах $I1$ и $I2$. Первые два импульса в конце витка имеют одинаковые амплитуды, около 61.8% от амплитуды $V_{вх}(t)$.

3.2. Выравнивание амплитуд трех импульсов

Если погонные задержки четной и нечетной мод линии различны (в неоднородном диэлектрическом заполнении), то их импульсы можно

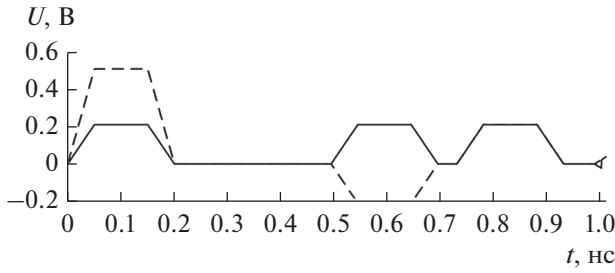


Рис. 5. Формы напряжения в узлах $V1$ (штриховая) и $V2$ (сплошная) витка микрополосковой МЛ при $k \approx 2.413$.

разности по времени. Тогда, приравняв их амплитуды ($V_o = V_e$ из (7)), получим

$$Y_0 = \sqrt{Y_e Y_o}. \quad (9)$$

Из условия равенства амплитуд первого и второго импульсов ($V_c = V_o$) получим

$$\frac{Y_0 - 3Y_e}{Y_o} + \frac{Y_e}{Y_o} = 1. \quad (10)$$

Учитывая (9), при подстановке $k = \sqrt{Y_o/Y_e}$ получим кубическое уравнение

$$k^3 - k^2 - 3k - 1 = 0,$$

имеющее один физический корень $k = \sqrt{2} + 1 \approx 2.414$, который определяет нормированную амплитуду напряжения на выходе витка как $(k - 1)/(k + 1) = \sqrt{2} - 1 \approx 0.414$.

Для проверки моделей и оценок, параметры воздействия, поперечного сечения микрополосковой МЛ, источника и нагрузки взяты из [7]. Вычисленные методом моментов матрицы \mathbf{C} и \mathbf{L} структуры и вычисленная из них матрица \mathbf{Z} имеют вид:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 232.06 & -138.12 \\ -138.12 & 232.06 \end{bmatrix} \text{ пФ/м,}$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 390.34 & 309.03 \\ 309.03 & 390.34 \end{bmatrix} \text{ нГн/м,}$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 50.55 & 35.73 \\ 35.73 & 50.55 \end{bmatrix} \text{ Ом.}$$

Из матрицы \mathbf{Z} вычислены волновые сопротивления нечетной и четной мод линии ($Z_o = 14.82$ Ом, $Z_e = 86.28$ Ом), которые дают $k = \sqrt{Z_e/Z_o} \approx 2.413$, что очень близко к $\sqrt{2} + 1 \approx 2.414$. На рис. 5 представлены формы напряжения в узлах $V1$ и $V2$. Первые три импульса в конце витка имеют одинаковую амплитуду, около 41.4% от амплитуды $V_{\text{вх}}(t)$.

3.3. Дополнительное уменьшение амплитуд трех импульсов

Для дополнительного уменьшения амплитуды СКИ на выходе витка МЛ сначала надо обеспечить равенство моментов прихода импульса поздней моды (третий импульс на рис. 3б) и отраженного от начала линии импульса ранней моды отрицательной полярности (четвертый импульс на рис. 3б). Для этого нужно обеспечить условие [28]

$$\tau_{\text{max}} = 2\tau_{\text{min}}, \quad (11)$$

где τ_{max} и τ_{min} – погонные задержки поздней и ранней мод. Пусть далее для определенности они будут погонными задержками четной (τ_e) и нечетной (τ_o) мод, хотя может быть и наоборот.

Теперь дополнительно надо определить амплитуду четвертого импульса разложения (отраженного импульса нечетной моды, V_{Ro}) на выходе МЛ (см. рис. 3б), также нормированную относительно амплитуды $V_{\text{вх}}(t)$:

$$V_{Ro} = -\frac{2Y_o Y_0 (Y_o - Y_0)}{(Y_o + Y_0)^3}. \quad (12)$$

Приравняв V_c и V_o из (7), получим

$$Y_0 = \frac{Y_o (Y_o - 3Y_e)}{Y_o + Y_e}. \quad (13)$$

Приравняв V_o и $V_e + V_{Ro}$ из (7) и (12), получим

$$\frac{Y_e}{(Y_e + Y_0)^2} = \frac{2Y_o}{(Y_o + Y_0)^3}. \quad (14)$$

Подставив (13) в (14), получим уравнение

$$Y_e^2 - Y_o^2 + 4Y_o Y_e = 0, \quad (15)$$

имеющее два физических корня:

$$Y_o/Y_e = \sqrt{5} + 2 \approx 4.236, \quad (16)$$

$$Y_o/Y_e = \sqrt{5} - 2 \approx 0.236. \quad (17)$$

Отметим, что второй корень обратен первому, что означает взаимозамену значений Y_o и Y_e в (16) или (17), поэтому далее для определенности используем первый корень. Выразив Y_o из (16) и подставив в (13), получим

$$Y_0 = Y_e. \quad (18)$$

Таким образом, при выполнении (16) достаточно выполнить (18) вместо (13).

Рассмотрим случай, когда (16) и (18) выполняются, так что $V_c = V_o = V_e + V_{Ro}$. Тогда вычислить нормированную амплитуду первых трех импульсов можно, например, по второму выражению из (7) после подстановки в него (13) с учетом (16):

$$V_o = (\sqrt{5} - 1)/4 \approx 0.309. \quad (19)$$

Таким образом, при выполнении (11), (16) и (18) амплитуда первых трех импульсов на выходе

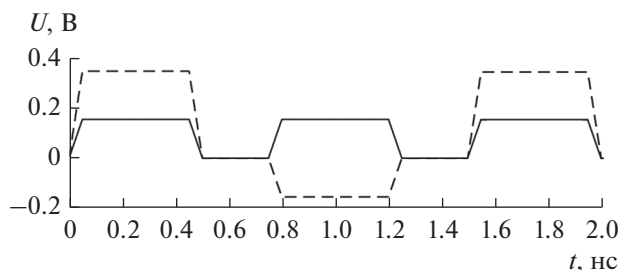


Рис. 6. Формы напряжения в узлах $V1$ (штриховая) и $V2$ (сплошная) витка микрополосковой МЛ при выполнении (11), (16) и (18).

линии должна составлять 30.9% от амплитуды $V_{вх}(t)$. Для проверки этого вычислен временной отклик в узле $V2$ на воздействие СКИ численным методом в системе TALGAT. Параметры поперечного сечения выбраны такими же, как в [28], поскольку они обеспечивают приблизительное выполнение (11) и равенства амплитуд первых трех импульсов. Вычисленные методом моментов матрицы C и L структуры и вычисленная из них матрица Z имеют вид:

$$C = \begin{bmatrix} 1100.42 & -396.78 \\ -396.78 & 1100.42 \end{bmatrix} \text{ пФ/м,}$$

$$L = \begin{bmatrix} 219.04 & 172.95 \\ 172.95 & 219.04 \end{bmatrix} \text{ нГн/м,}$$

$$Z = \begin{bmatrix} 14.575 & 9.027 \\ 9.027 & 14.575 \end{bmatrix} \text{ Ом.}$$

Квадратный корень собственных значений произведения матриц C и L дает погонные задержки четной ($\tau_e = 16.608$ нс/м) и нечетной мод ($\tau_o = 8.307$ нс/м). Тогда $2\tau_o = 16.614$ нс/м, что отличается от $\tau_e = 16.608$ нс/м на 0.04%. Из матрицы Z вычислены волновые сопротивления нечетной и четной мод линии: $Z_o = 5.548$ Ом, $Z_e = 23.603$ Ом. Тогда $Z_o/Z_e = Y_o/Y_e = 4.254$, что отличается от значения в (16) на 0.423%. Полученное выше значение $Z_e = 23.603$ Ом отличается от сопротивления 23 Ом, использованного в [28], на 2.555%. Таким образом, условия (11), (16) и (18) выполняются с хорошей точностью.

Далее был вычислен отклик численным методом в системе TALGAT на воздействие СКИ с амплитудой ЭДС 1 В, длительностью плоской вершины 400 пс, а фронта и спада – по 50 пс. Длина линии $l = 45$ мм. На рис. 6 показана форма напряжения в узле $V2$ микрополосковой МЛ, из которой видно, что сигнал в конце линии представлен последовательностью из трех импульсов с близкими амплитудами: перекрестной наводки (0.156 В), нечетной моды (0.157 В), а также суммы четной моды и отраженной нечетной моды (0.154 В), составляющими 31.2, 31.4 и 30.8% от амплитуды

$V_{вх}(t)$ соответственно, что отличается от 30.9% из (19) менее чем на 0.5%.

Таким образом, полученное аналитически значение амплитуды в конце линии подтверждается моделированием численным методом, а выполнение (11), (16) и (18) позволяет выровнять и дополнительно уменьшить амплитуды импульсов в конце витка МЛ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены и проверены аналитические модели для расчета отклика на произвольное кондуктивное воздействие во временной области в витке МЛ. Разработанные модели позволили получить условия равенства составляющих отклика в конце витка МЛ на примере воздействия СКИ для трех случаев его разложения: на два импульса (при равных погонных задержках); на три импульса (при разных погонных задержках); на три импульса с дополнительным уменьшением амплитуды (за счет наложения на импульс поздней моды отраженного импульса ранней моды отрицательной полярности). Аналитические модели и условия подтверждены численным моделированием на основе метода моментов и модифицированного узлового метода.

Полученные модели отличаются от сложных алгоритмических моделей, основанных на численных методах, использованием простых выражений в замкнутой форме. Достоинства моделей (по сравнению с анализом численными методами) заключаются в точности (за счет аналитики) и гораздо меньших вычислительных затратах (в том числе за счет учета заданного числа отражений во временном отклике). Таким образом, эти модели позволят ускоренное проектирование и параметрическую оптимизацию витка МЛ в различных приложениях.

Полученные для трех случаев МЛ условия равенства амплитуд импульсов позволят добиться его гораздо эффективнее: вовсе не вычисляя временной отклик, в отличие от того, как это делалось ранее во всех предыдущих работах. Кроме того, полученные аналитические оценки значений коэффициента связи и уровня напряжения позволят выбрать конструкцию МЛ с учетом имеющихся технологических ограничений, сделав это априори, до анализа и оптимизации.

Потребность в получении этих моделей и условий возникла в целях минимизации напряжения на выходе витка МЛ для улучшения защиты от СКИ. Однако их можно использовать и для других воздействий, например электростатического разряда, затухающей синусоиды или специальных генераторов. Кроме того, важными могут оказаться их применения для расщепления одиночного импульса генератора на последователь-

ность импульсов, а также формирования последовательности импульсов с заданными амплитудами и задержками или сигнала заданной формы за счет частичного наложения этих импульсов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-37-51017), а также Министерства науки и высшего образования (проект FEWM-2020-0041).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Misman D., Aziz M.Z.A. Abd., Husain M.N., Soh P.J.* // Proc. 2009 Europ. Conf. Antennas and Propagation. Berlin. 27–23 Mar. N.Y.: IEEE, 2009. P. 2420.
2. *Acuña J.E., Rodriguez J.L., Obelleiro F.* // Int. J. RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2001. V. 11. № 4. P. 219.
3. *Wang X.C., Sun Y.Y., Zhu J.H.* // IEEE Trans. 2017 V. EMC-59. № 3. P. 996.
4. *Shlepnev Y., Neves A., Dagostino T., Mcmorrow S.* // Proc. 2009 Design Conf. Santa Clara. 2–5 Feb. S.L.C.: UBM Electronics, 2009. P. 2581.
5. *Zhang Q., Bandler J.W., Caloz C.* // IEEE Trans. 2013 V. MTT-18. № 4. P. 4040.
6. *Surovtsev R.S., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M.* // Proc. 2015 Int. Siberian Conf. Control and Communications (SIBCON). Omsk. 21–23 May. N.Y.: IEEE, 2015. P. 7147227.
7. *Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M.* // Proc. 2015 16th Int. Conf. Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electronic Devices. Erlagol, 29 Jun.–3 Jul. N.Y.: IEEE, 2015. P. 175.
8. *Nosov A.V., Surovtsev R.S.* // Proc. 2020 21st Int. Conf. Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electronic Devices. Chemal. 29 Jun.–3 Jul. N.Y.: IEEE, 2020. P. 149.
9. *Петкау О., Тарабцев А., Дерябин А. и др.* // Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. 2014. № 2. С. 74.
10. *Газизов Т.Р.* // Успехи совр. радиоэлектрон. № 2. 2004. С. 37.
11. *Макаренко С.И.* // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 101.
12. *Здухов Л.Н., Парфёнов Л.Н., Тарасов О.А., Ченелев В.М.* // Технологии ЭМС. 2018. № 2. С. 22.
13. *Гизатуллин З.М., Гизатуллин Р.М.* // РЭ. Т. 61. № 5. 2016. С. 500.
14. *Газизов А.Т., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 3. С. 292.
15. *Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R.* // IEEE Trans. 2016. V. EMC-58. № 4. P. 1136.
16. *Surovtsev R.S., Nosov A.V., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R.* // IEEE Trans. 2017. V. EMC-59. № 6. P. 1864.
17. *Wu R.B., Chao F.L.* // IEEE Trans. 1995. V. CPMT-18. № 4. P. 644.
18. *Bhobe A.U., Holloway C.L., Picket-May M.* // Proc. 2001 Int. Symp. EMC. Montreal. 13–17 Aug. N.Y.: IEEE, 2001. P. 805.
19. *Nosov A.V., Surovtsev R.S., Gazizov T.T., Gazizov T.R.* // Proc. 2017 Int. Multi-Conf. Engineering, Computers and Information Sciences (SIBIRCON). Novosibirsk. 18–22 Sept. N.Y.: IEEE, 2017. P. 453.
20. *You H., Soma M.* // IEEE Trans. 1990. V. CS-37. № 8. P. 1019.
21. *You H., Soma M.* // Proc. IEEE Custom Integrated Circuits Conf. Boston 13–16 May 1990. N.Y.: IEEE, 1990. P. 11.2.
22. *Xiao F., Murano K., Kami Y.* // IEICE Trans. Commun. 2009 V. 92B. № 6. P. 1953.
23. *Griffith J.R., Nakhla M.S.* // IEEE Trans. 1990 V. MTT-38. № 10. P. 1480.
24. *Gu Q., Kong J.A.* // IEEE Trans. 1986. V. MTT-34. № 9. P. 952.
25. *Gazizov T.R., Leontiev N.A.* // Proc. 4th Int. Symp. Antennas and EM Theory (ISAE 97). Xi'an, 19–22 Aug. Beijing: Int. Academic Publ., 1997. P. 444.
26. *Gazizov T.R., Leontiev N.A.* // Proc. 1997 Sino-Japanese Joint Meet. Opt. Fiber Sci. and EM Theory. Wuhan, 14–16 Oct. P. 322.
27. *Kuksenko S.P.* // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Engineering. 2019. V. 560. P. 012110.
28. *Nosov A.V., Surovtsev R.S., Gazizov T.T., Gazizov T.R.* // Proc. 2017 18th Int. Conf. Young Specialists Micro/Nanotech. Elec. Devices. Erlagol. 29 Jun.–3 Jul. N.Y.: IEEE, 2017. P. 119.