

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.1>

УДК: 621.391

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАВЛЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОПРОВОДНЫХ И МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Н.О. Кузьмин, Е.С. Жечев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 16 июля 2023.

Аннотация. Постоянная модернизация радиоэлектронных средств приводит к необходимости улучшения методов изготовления компонентов, входящих в их состав. Преимущественно, печатные платы изготавливаются субтрактивным методом. В условиях постоянной миниатюризации, необходимо учитывать степень влияния подтравливания проводников на работу изготовленного прототипа. В данной работе проведена оценка влияния параметров травления на характеристики однопроводных и связанных микрополосковых линий. Предложен алгоритм оценки влияния параметров травления на характеристики рассматриваемых структур. В дальнейшем планируется проведение лабораторного эксперимента с экстракцией собственных коэффициентов травления и оценка их влияния на характеристики рассматриваемых структур.

Ключевые слова: коэффициенты травления, квазистатическое моделирование, травление, микрополосковая линия, погонные параметры, электродинамическое моделирование, микросборки.

Автор для переписки: Кузьмин Никита Олегович kuzjmin.nikita23@gmail.com

Введение

В настоящее время радиоэлектронные средства (РЭС) получили широкое распространение во многих сферах жизнедеятельности. В состав РЭС может входить большой комплекс компонентов, электрических цепей и узлов. Одним из них является печатная плата (ПП), представляющая из себя плоское изоляционное основание (диэлектрик), на одной или обеих сторонах которого расположены токопроводящие слои металла (проводники). Зачастую ПП применяются для электрического и механического соединения различных электронных компонентов [1, 2]. Они нашли широкое применение, т.к. с их помощью можно собрать большое количество конфигураций для различных задач. Таким образом, ПП являются основной сборочной единицей, используемой при проектировании РЭС, начиная с аппаратов сотовой связи, заканчивая крупными радиолокационными комплексами.

В связи со стремительным развитием РЭС, стоит необходимость в постоянной модернизации ПП, что требует отыскания наилучших методов их изготовления. При этом, важно учитывать ряд требований: плотность монтажа, надежность, обеспечение помехозащищенности и т.д., эти факторы зависят от прогрессов радиоконструирования и технологического процесса производства ПП [3-5]. Таким образом, увеличиваются слои ПП и количество переходных и монтажных отверстий, уменьшается площадь проводящего контура, сужение проводящих дорожек и т.д. В связи с этим, крайне важно учитывать возможность появления любого дефекта, поскольку они напрямую влияют на класс точности ПП, и, как следствие, на изготовленное устройство. В условиях миниатюризации учет данного явления все более актуален. Целью данной работы является оценка влияния параметров травления на характеристики однопроводных и многопроводных линий передачи.

1. Субтрактивный метод изготовления печатных плат

Существует достаточно большое количество технологий изготовления ПП, таких как: комбинированный (позитивный метод), тентинг-метод (металлизация

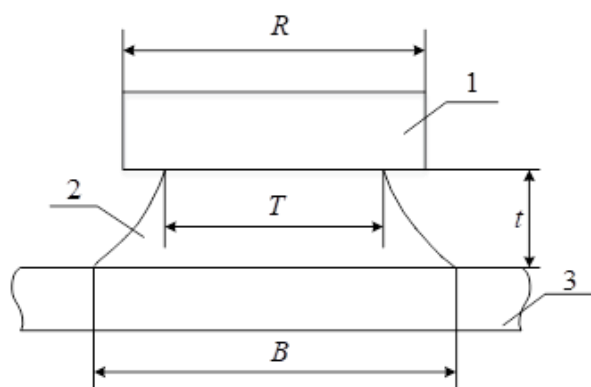
заготовки), аддитивный метод, а также механический метод [6, 7]. Для оценки качества изготовленной ПП введены критерии, по которым определяется класс точности ПП – условное цифровое обозначение, характеризующее наименьшее значение размеров элементов рисунка ПП и определяющие значения допусков на размеры этих элементов. Действительным регламентом является ГОСТ Р 53429-2009 [8], согласно нему, различают семь классов точности ПП. В нем содержится описание для всевозможных дефектов, в том числе допустимость и недопустимость их наличия, а также рассматриваются материалы ПП, паяльные маски, переходные отверстия, конструктивные особенности и т.д., в нем описаны приемлемые и неприемлемые отклонения, и дефекты для разных классов точности ПП. Используя данные стандарты можно определиться с параметрами на соответствующий класс, обусловленный выбором технологического уровня производства. Также и с методами, они выбираются в соответствии со стоимостью, требованиям к электрическим параметрам, температурному режиму и плотности межсоединений. Эти факторы также влияют на класс точности готового изделия.

Помимо этого, стоит избегать использования ПП с различного рода дефектами. Первым из них является заужение – явление, при котором уменьшается ширина проводящего контура так, что разные участки ПП обладают разной шириной проводника. Зазором между проводниками является расстояние между двумя проводниками. Проводящие дорожки трассируются так, чтобы обеспечивалась изоляция между несколькими проводящими контурами ПП. Причинами возникновения являются погрешности при производстве, например, несоответствующие температурные и временные интервалы. Как правило, чем больше толщина проводящего слоя, тем больше интервал этих значений. При изготовлении ПП субтрактивным методом стоит учитывать величину заужения, суммируя ее к ширине проводника. Данный дефект оказывает влияние на емкость проводящих контуров и их взаимодействие друг с другом. Расширение – увеличение проводящего слоя по сравнению с заданной шириной проводника, использовавшейся при нанесении селективной

защиты. Причинами возникновения данного явления могут являться плохо обработанная поверхность проводящего слоя, механический дефект и неровность структуры. Данный дефект также оказывает влияние на емкость проводящих контуров и их взаимодействие друг с другом. Трещиной является разрыв проводящего слоя, при котором теряется электрическая связь между двумя частями проводящего контура. Данный дефект может достигать глубины вплоть до диэлектрической основы. Причинами возникновения могут оказаться механическая деформация, температурное воздействие и повышенная влажность. Данный дефект может привести к значительному ослаблению электромагнитной связи между проводящими слоями. Расслоение – образование воздушного пространства в слоях диэлектрической основы или в слоях между диэлектриком и проводящим слоем. Причинами возникновения являются недостаточное количество слоев препрега между ядрами многослойной ПП. Изгиб – явление, при котором один из углов диэлектрического основания ПП находится в другой плоскости относительно трех других углов. Причинами возникновения является некорректное прессование диэлектрической основы, а также то, что каждый диэлектрический материал требует индивидуальных производственных условий. Скручиванием является дефект, при котором скручивается диэлектрическое основание ПП и приобретает сферическую или цилиндрическую форму. Заусенцами являются металлические ворсинки, выходящие от проводящего слоя. Данный дефект возникает при механической обработке заготовки и влияет на класс точности изделия. Также в долгосрочной перспективе данный дефект может послужить причиной нестабильной работы оборудования, из-за влияния на емкость проводящего контура, и возможного повреждения межсоединений. Протрав – вытравливание проводящего слоя в конкретном участке сплошного слоя фольги. Данный дефект приводит к сильному изменению емкости и индуктивности, вплоть до отсутствия электрической связности проводящих слоев. Причинами возникновения данного дефекта являются некорректное нанесение селективной защиты проводника и высокая концентрация травильного раствора [9]. Протрав является наиболее

распространенным и критичным дефектом, поскольку при протраве теряется электрическая связь проводящего слоя, что делает ПП непригодной для использования. Также недотрав приводит к нежелательному искаженному поведению сигнала.

В настоящее время используется автоматизированное производство ПП. Брак и производственные дефекты определяются, как правило, благодаря автоматизированному визуальному контролю ПП [10]. Поскольку в условиях студенческого образования многие методы изготовления ПП являются недопустимо затратными, выбран самый простой и дешевый метод – субтрактивный. Согласно данной технологии, рисунок ПП получается травлением медной фольги по защитному изображению в фоторезисте или по металлорезисту, осажденному на поверхность гальванически сформированных проводников в рельефе фоторезиста на фольгированных диэлектриках. Данный способ зарекомендовал себя как очень простой и дешевый [11]. Субтрактивный метод используется для изготовления как односторонних и двусторонних, так и многослойных ПП. При травлении заготовка, покрытая селективной защитой, погружается в травильный раствор, как правило, это хлорид железа (III). В процессе травления, раствор расщепляет медный слой, постепенно подбираясь к участку меди, покрытому фоторезистом. Изначально процесс имеет линейный характер, медь сходит равномерно, но, с увеличением времени травления, у основания проводника появляются чашевидные дефекты [12]. Описанный выше процесс, представлен на рисунке 1.



1 – селективная защита; 2 – медь; 3 – изоляционный материал.

Рис. 1. Поперечное сечение проводника ПП при травлении.

Введены два параметра, характеризующих процесс травления: подтравливание U , обозначающий уменьшение медного слоя под фоторезистом, и коэффициент бокового подтравливания F , обозначающий уменьшение медного слоя по центру проводника. Данные коэффициенты определяются по следующим выражениям:

$$U = \frac{(R-T)}{2};$$

$$F = \frac{2t}{(B-T)},$$

где R – ширина резиста, T – ширина верхнего основания проводника, B – ширина нижнего основания проводника.

Стоит отметить, что при изготовлении ПП необходимо достигнуть наименьшее значение U и большее значение F [13]. При несоблюдении техники изготовления ПП, встречаются недотравы и перетравы, что может привести к некорректной работе оборудования, в состав которого входит данная линия передачи (ЛП). В работе [13] приводится прогрессия травления ПП, представленная в таблице 1.

Таблица 1. Исходная прогрессия травления.

Время травления S , 90 с	Подтравливание U	Коэффициент бокового подтравливания F	Величина травления R/B
90	0,05	0,90	0,5
110	0,30	1,75	0,75
125	0,45	2,33	0,9
140	0,525	2,67	1,0

Из таблицы 1 видно, что, с увеличением времени травления, увеличиваются U и F . Аналогично, уменьшаются и ширины верхнего, нижнего оснований, а также середина проводника.

2. Квазистатическое моделирование одиночной и связанной микрополосковых линий передачи

В связи с ростом конкуренции среди производителей РЭС, необходимо модернизировать продукцию, уменьшая затраты на производство. Как известно

из [14], с ростом сложности проектируемых объектов сроки и стоимость такого проектирования оказываются чрезмерно большими. При своей работе РЭС, в ходе различных переходных процессов, способна генерировать кондуктивные и излучаемые помехи, которые приводят к выходу аппаратуры из строя, и могут нести опасность для жизни людей. К сожалению, традиционные методы фильтрации помех не способны обеспечить безопасное функционирование РЭС [15]. Для успешного помехоподавления предложена технология модальной фильтрации [16]. Таким образом, существует ряд устройств, работающих на основе данной технологии: модальные фильтры [17, 18], меандровые линии задержки [19, 20], структуры с модальным резервированием [21, 22], фазовые расщепители [23]. Основными характеристиками таких устройств являются LC -параметры (первичные), из которых можно получить вторичные параметры. Данные характеристики напрямую зависят от травления. Поскольку каждая структура индивидуальна, необходимо проводить моделирование, опираясь на поперечную структуру объекта. Из большого разнообразия зарубежного и отечественного программного обеспечения (ПО) выбрана система квазистатического анализа TALGAT. Данное ПО позволяет проводить моделирование задач электромагнитной совместимости (ЭМС) на этапах проектирования и разработки РЭС различного назначения [24]. Также стоит отметить, что TALGAT базируется на квазистатическом анализе (вычисление матриц погонных параметров) [25]. Поперечные сечения исследуемых структур одиночной и связанной микрополосковых линий (МПЛ) представлены на рисунке 2.

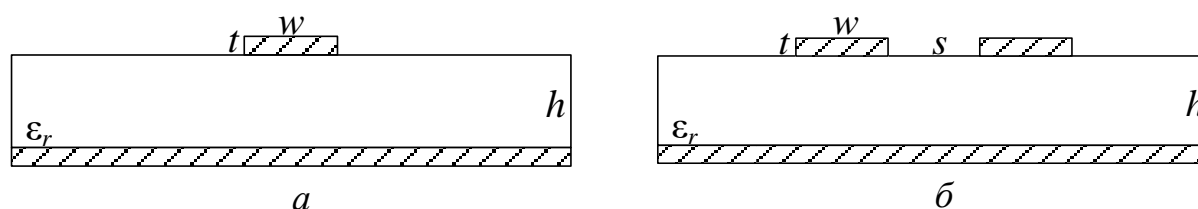


Рис. 2. Поперечное сечение одиночной (а) и связанной (б) МПЛ.

У исследуемых структур следующие параметры: толщина проводника $t = 0,025$ мм, ширина проводника $w = 2$ мм, толщина диэлектрической основы $h =$

1,5 мм, диэлектрическая проницаемость основания $\epsilon_r = 4,5$, расстояние между проводниками $s = 2$ мм, общая ширина структуры составила 13 мм, длина $l = 100$ мм. Рассматриваемые структуры строились как диэлектрическая подложка с равнобедренными трапецеидальными проводниками. Задана ширина фоторезиста $R = 2$ мм. На исследуемые структуры подавались сигналы трапецевидной формы с амплитудой напряжения 1 В, с общей длительностью в 300 пс, время нарастания, спада фронта, а также длительность плоской вершины составила по 100 пс. Изображение данных структур, пример прогрессии травления [13] и геометрические параметры представлены на рисунке 3 и в таблице 2. На рисунке 4 представлены эквивалентные схемы включения исследуемых одиночной и связанной МПЛ.

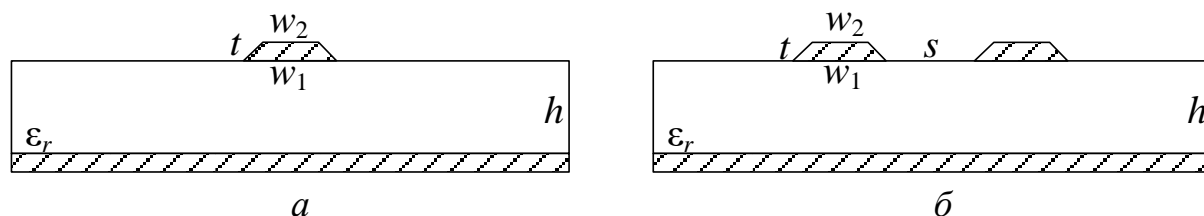


Рис. 3. Поперечные сечения одиночной (а) и связанной (б) МПЛ.

Таблица 2. Прогрессия травления для рассматриваемых структур.

Время травления t, c	Подтравливание U	Нижнее основание $w_1, мм$	Верхнее основание $w_2, мм$
90	0,05	4	1,9
110	0,30	2,6	1,4
125	0,45	2,2	1,1
140	0,525	2	0,95

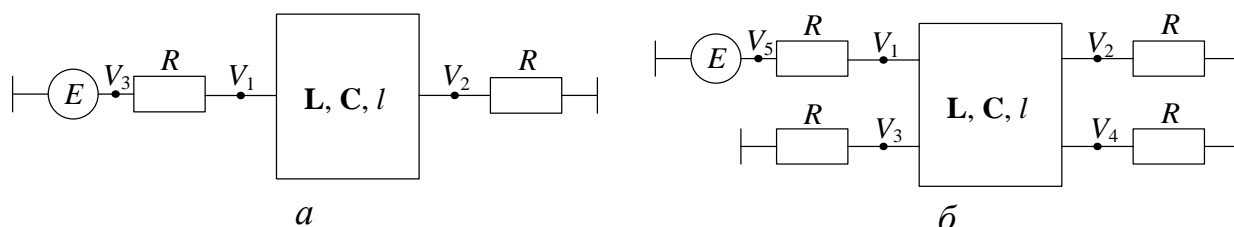


Рис. 4. Эквивалентные схемы включения одиночной (а) и связанной (б) МПЛ.

В ходе моделирования получены матрицы погонных значений коэффициентов электромагнитной **L** и электростатической **C** индукций для одиночной и связанной МПЛ, представленные в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Значения матриц коэффициентов **L** и **C** для одиночной МПЛ при различном времени травления.

Параметры	Одиночная			
<i>t</i> , с	90	110	125	140
<i>C</i> , пФ/м	155,244	116,71	105,44	99,76
<i>L</i> , мкГн/м	0,25	0,32	0,35	0,37

Таблица 4. Значения матриц коэффициентов **L** и **C** для связанной МПЛ при различном времени травления.

Параметры	Связанная						
<i>t</i> , с	90	110		125		140	
<i>C</i> , пФ/м	263,98	118,219	-10,667	106,1	-7,57	100,25	-6,39
		-10,667	118,219	-7,57	106,14	-6,39	100,25
<i>L</i> , мкГн/м	0,16	0,00012	0,00001	0,35	0,05	0,37	0,05
		0,00001	0,00012	0,05	0,35	0,05	0,37

Видно, что с увеличением *t* уменьшаются значения коэффициентов матриц **C**, а также увеличиваются значения коэффициентов матриц **L**. Такое поведение вызвано уменьшением площади проводника. В крайней точке, при *t* = 90 с наблюдается большее значение **C**, это связано с особенностью выбранных параметров структуры. В такой ситуации имеется два проводника, которые накладываются друг на друга, то есть имеется один широкий проводник с двумя расширениями и тремя сужениями. Также в ходе моделирования получены зависимости входных и выходных напряжений для одиночной и связанной МПЛ при различном времени травления, представленные на 5 и 6 рисунках.

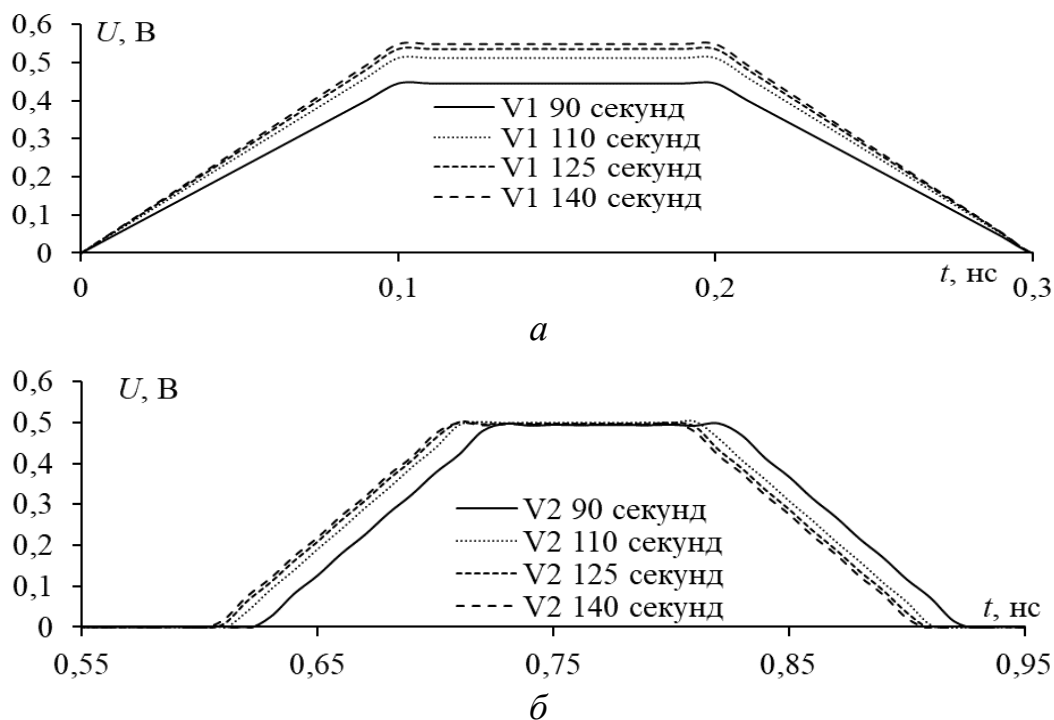


Рис. 5. Зависимости входных (а) и выходных (б) напряжений одиночной МПЛ.

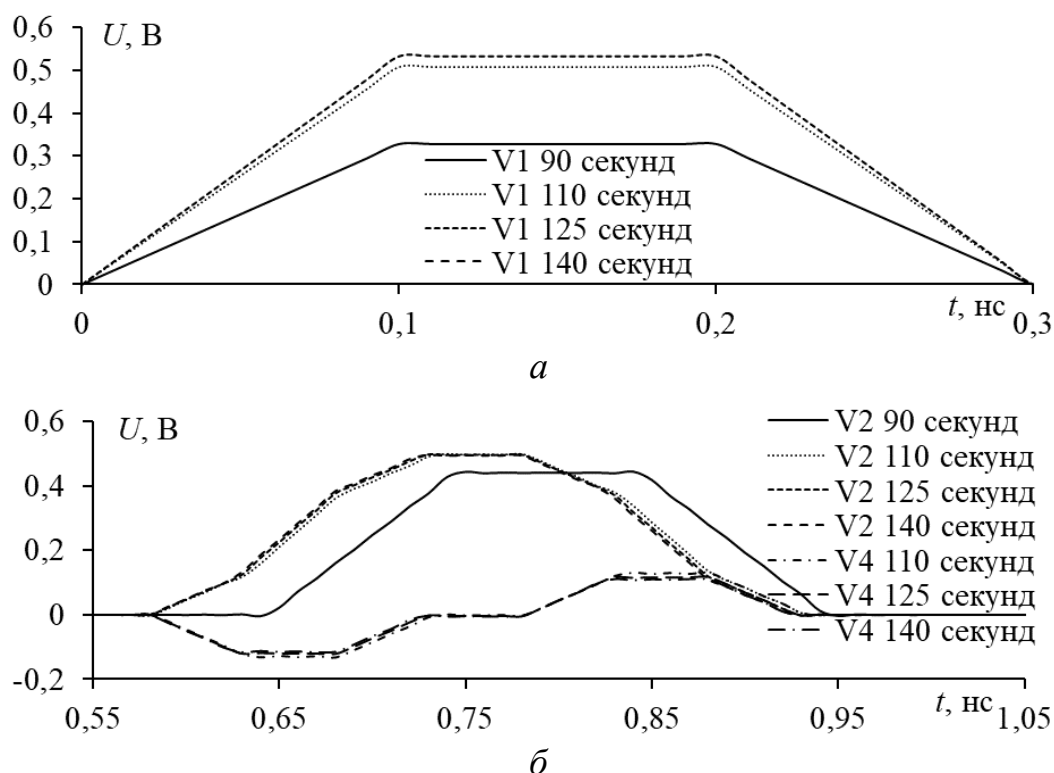


Рис. 6. Временная зависимость входных (а) и выходных (б) напряжений связанной МПЛ.

С увеличением времени травления достигается увеличение входного напряжения (узел V1), данное утверждение справедливо как для одиночной, так и для связанной МПЛ. Для одиночной МПЛ наименьшим входным

напряжением, равным 0,45 В, обладает структура при $t = 90$ с. Наибольшим же напряжением, равным 0,55 В, обладает структура при $t = 140$ с. Из зависимостей выходных напряжений (узел V2) для одиночной МПЛ видно, что амплитуды сигналов имеют схожие значения для каждого случая и равняются 0,49 В. При этом, отчетливо видно различие во времени задержки импульсов. Так, самым первым приходит сигнал структуры при $t = 140$ с, время задержки составило 0,6 нс. Последним приходит импульс структуры при $t = 90$ с, время задержки составило 0,62 нс. Для двухпроводной МПЛ наблюдается схожее поведение входных напряжений (узел V1), но при этом различаются амплитуды. Так, меньшая амплитуда на входе имеет значение 0,327 В, а наибольшая – 0,546 В. У выходного напряжения на активной линии (узел V2) максимальное значение составило 0,494 В, наименьшее – 0,44 В. На выходе пассивной линии (узел V2) напряжение между случаями отличается незначительно, как и время задержки. Самым большим временем задержки на активной линии обладает структура при $t = 90$ с, время задержки составило 0,64 нс. Остальные случаи обладают сравнимо одинаковым временем задержки, равным $0,58 \pm 0,01$ нс.

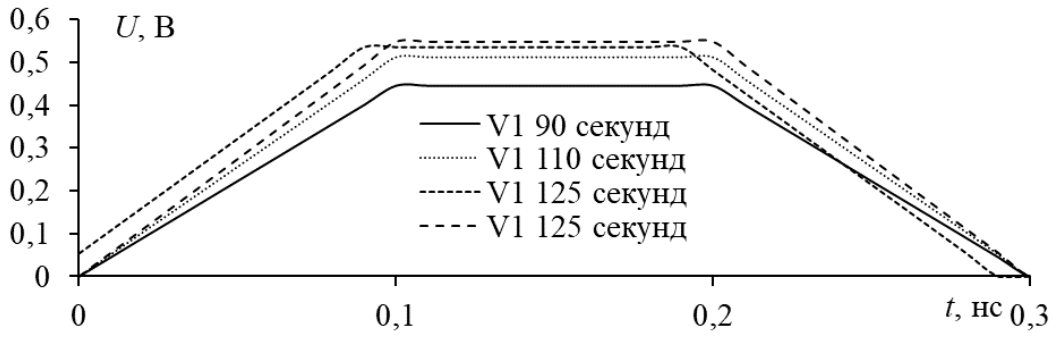
Для качественной оценки влияния времени травления, изменялся параметр U в диапазоне 68 % [26] по обе границы от исходных значений, представленных выше. Таким образом, рассматривалось семь случаев с различными U : –34%, –23%, –12%, исходный, +12%, +23%, +34%. В каждом из этих случаев проводилось моделирование, аналогичное представленному выше, за исключением изменения геометрических размеров проводников. Прогрессия травления для рассматриваемых случаев представлена в таблице 5.

Как было сказано ранее, при увеличении t , увеличиваются коэффициенты, характеризующие травление, также уменьшается геометрия проводника. При уменьшении коэффициента подтравливания U наблюдается увеличение w_2 . Соответственно, при увеличении U наблюдается уменьшение w_2 . Данные структуры также моделировались в системе квазистатического анализа TALGAT. В ходе моделирования получены зависимости входных

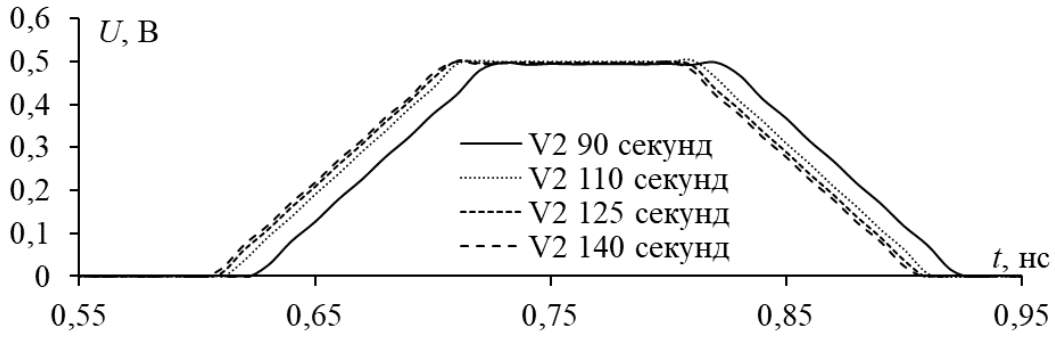
и выходных напряжений одиночных и связанных МПЛ при различном U , представленные на рисунках 7-10.

Таблица 5. Геометрические параметры рассматриваемых структур при различных значениях U .

$U - 34 \%$			
Время травления t , с	Подтравливание U	Нижнее основание w_1 , мм	Верхнее основание w_2 , мм
90	0,0335	4	1,9333
110	0,201	2,6	1,598
125	0,3015	2,2	1,397
140	0,35175	2	1,2965
$U - 23 \%$			
90	0,039	4	1,922
110	0,234	2,6	1,532
125	0,351	2,2	1,298
140	0,4095	2	1,181
$U - 12 \%$			
90	0,0445	4	1,911
110	0,267	2,6	1,466
125	0,4005	2,2	1,199
140	0,46725	2	1,0655
$U + 12 \%$			
90	0,0555	4	1,889
110	0,333	2,6	1,334
125	0,4995	2,2	1,001
140	0,58275	2	0,8345
$U + 23 \%$			
90	0,061	4	1,878
110	0,366	2,6	1,268
125	0,549	2,2	0,902
140	0,6405	2	0,719
$U + 34 \%$			
90	0,061	4	1,878
110	0,366	2,6	1,268
125	0,549	2,2	0,902
140	0,6405	2	0,719

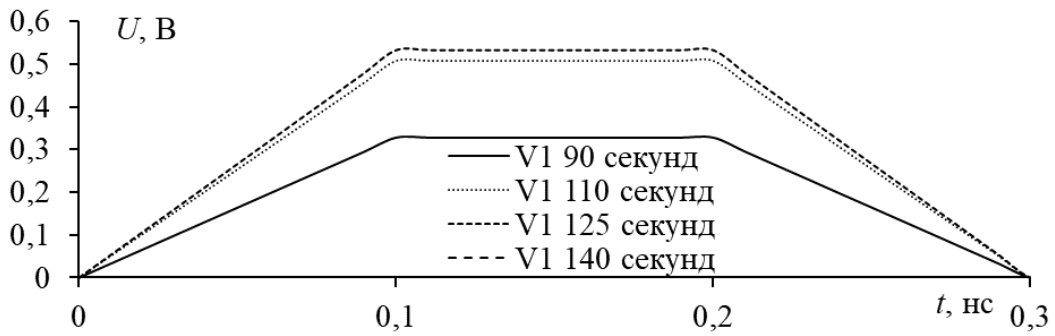


a

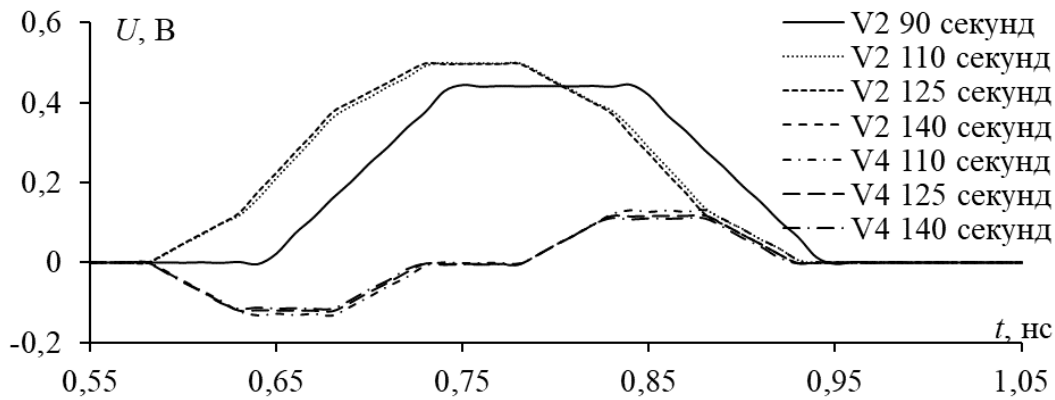


б

Рис. 7. Временная зависимость входных (*a*) и выходных (*б*) напряжений одиночной МПЛ при $U = 34\%$.

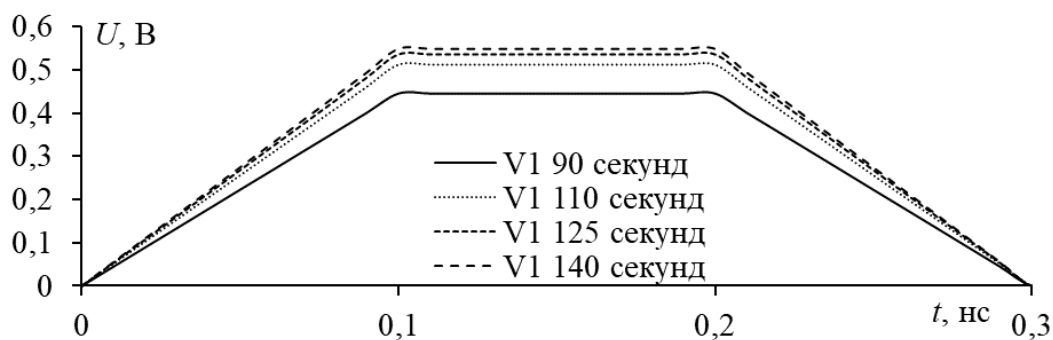


a

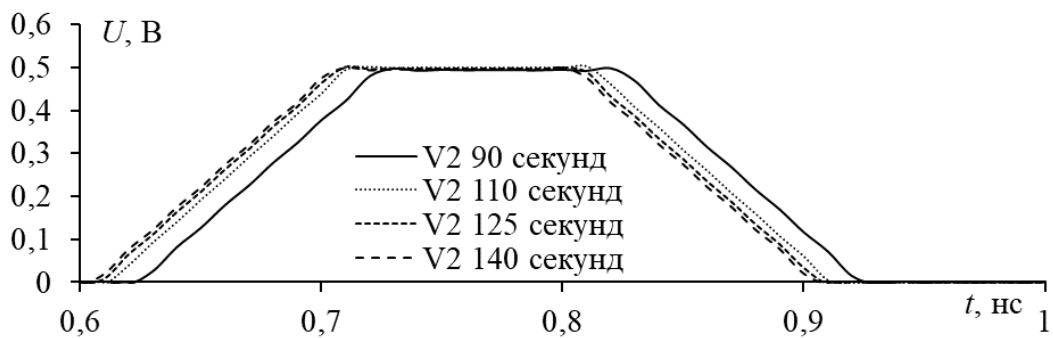


б

Рис. 8. Временная зависимость входных (*a*) и выходных (*б*) напряжений связанной МПЛ при $U = 34\%$.

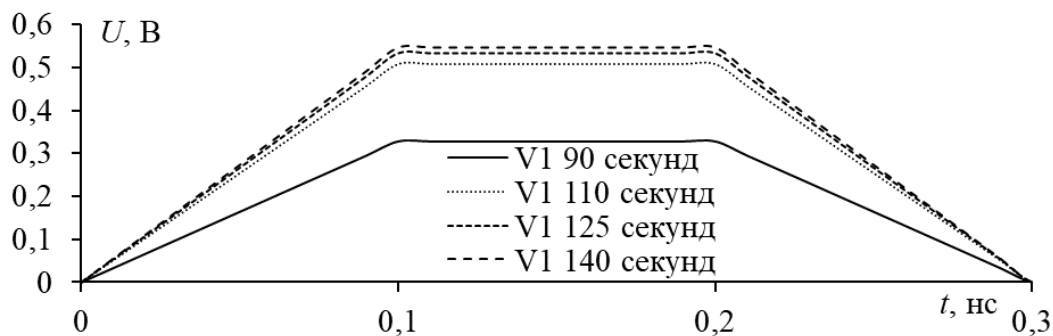


a

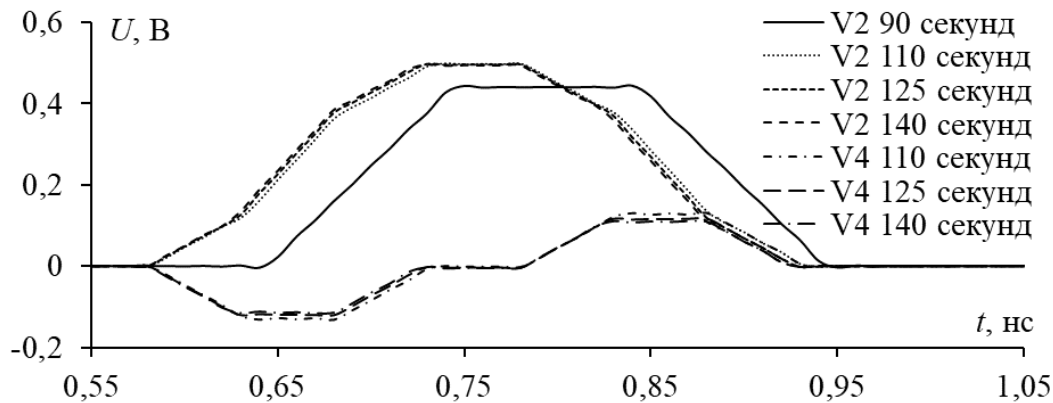


б

Рис. 9. Временная зависимость входных (*a*) и выходных (*б*) напряжений одиночной МПЛ при $U + 34\%$.



a



б

Рис. 10. Временная зависимость входных (*a*) и выходных (*б*) напряжений связанной МПЛ при $U + 34\%$.

Из полученных результатов видно, что с увеличением времени травления увеличиваются входные напряжения для одиночной и связанной МПЛ. В случае при $U - 34\%$ у выходных напряжений для одиночной МПЛ наблюдается совпадение амплитуд напряжений, однако различается время задержек импульсов τ . Так, отношение максимального входного напряжения $U_{1\max}$ к минимальному $U_{1\min}$ для однопроводной МПЛ составило 1,23. Отношение большего времени задержки τ_{\max} к меньшему τ_{\min} составило 1,03. Для двухпроводной МПЛ в отношении максимального входного напряжения $U_{1\max}$ к минимальному $U_{1\min}$ составило 1,62. На выходе активной линии (узел V2) отношение максимального выходного напряжения $U_{2\max}$ к минимальному $U_{2\min}$ составило 1,12. Отношение τ_{\max} к τ_{\min} составило 1,1. Амплитуды напряжений на выходе пассивной линии отличаются тысячными долями, время задержек совпадает.

В случае при $U + 34\%$ у выходных напряжений для одиночной МПЛ наблюдается совпадение амплитуд напряжений, однако различается время задержек импульсов τ . Так, отношение $U_{1\max}$ к $U_{1\min}$ для однопроводной МПЛ составило 1,23. Отношение τ_{\max} к τ_{\min} составило 1,03. Для двухпроводной МПЛ в отношении $U_{1\max}$ к $U_{1\min}$ составило 1,66. На выходе активной линии (узел V2) отношение $U_{2\max}$ к $U_{2\min}$ составило 1,12. Отношение τ_{\max} к τ_{\min} составило 1,1. Амплитуды напряжений на выходе пассивной линии отличаются тысячными долями, время задержек совпадает.

Для более наглядной оценки влияния изменения характеристик одиночной и связанной МПЛ снизу представлены графики зависимостей коэффициентов матриц **C** и **L** связанной и одиночной МПЛ при различных U (рис. 11, 12).

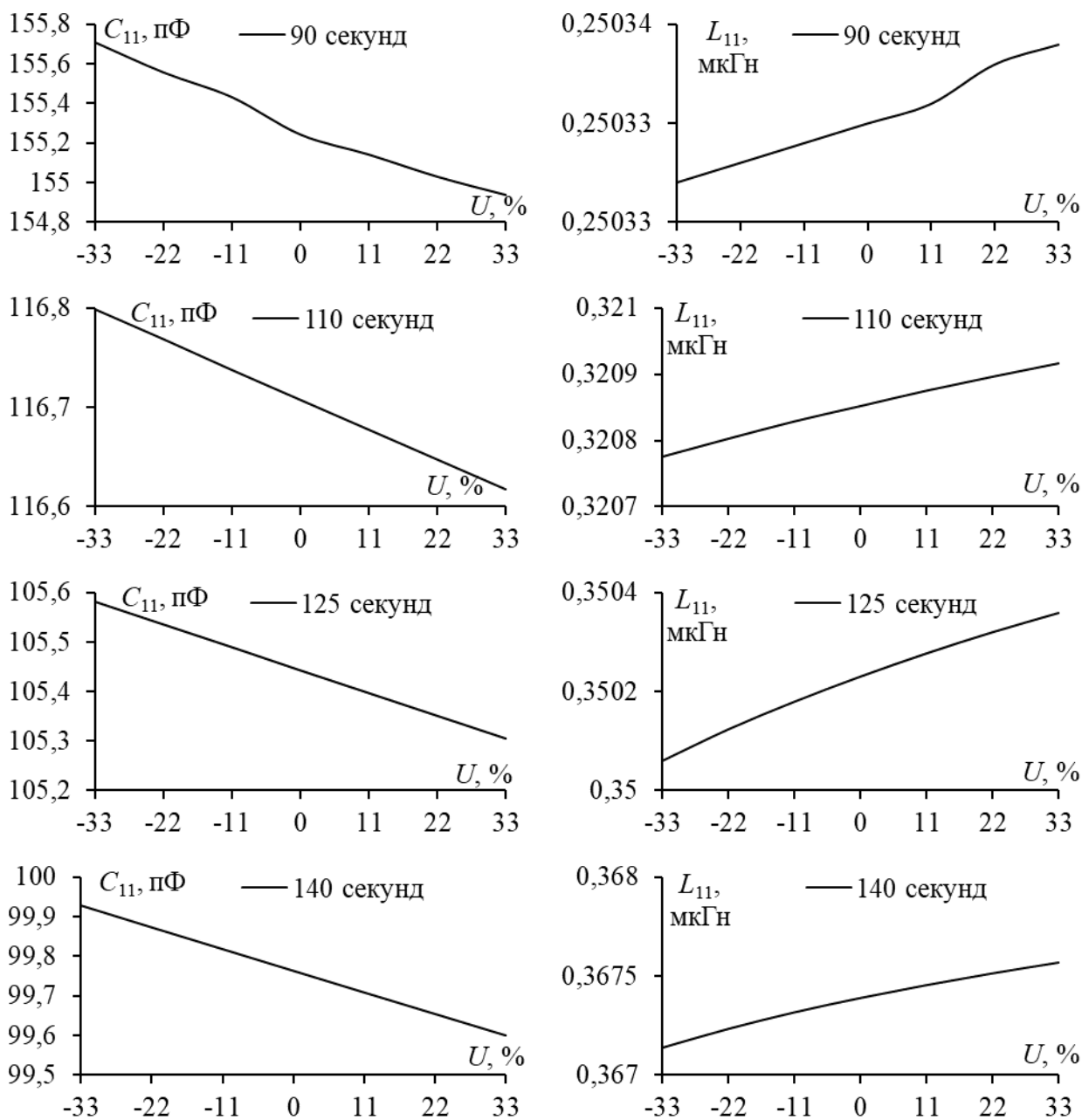


Рис. 11. Зависимости значений матриц L и C одиночной МПЛ при различных U .

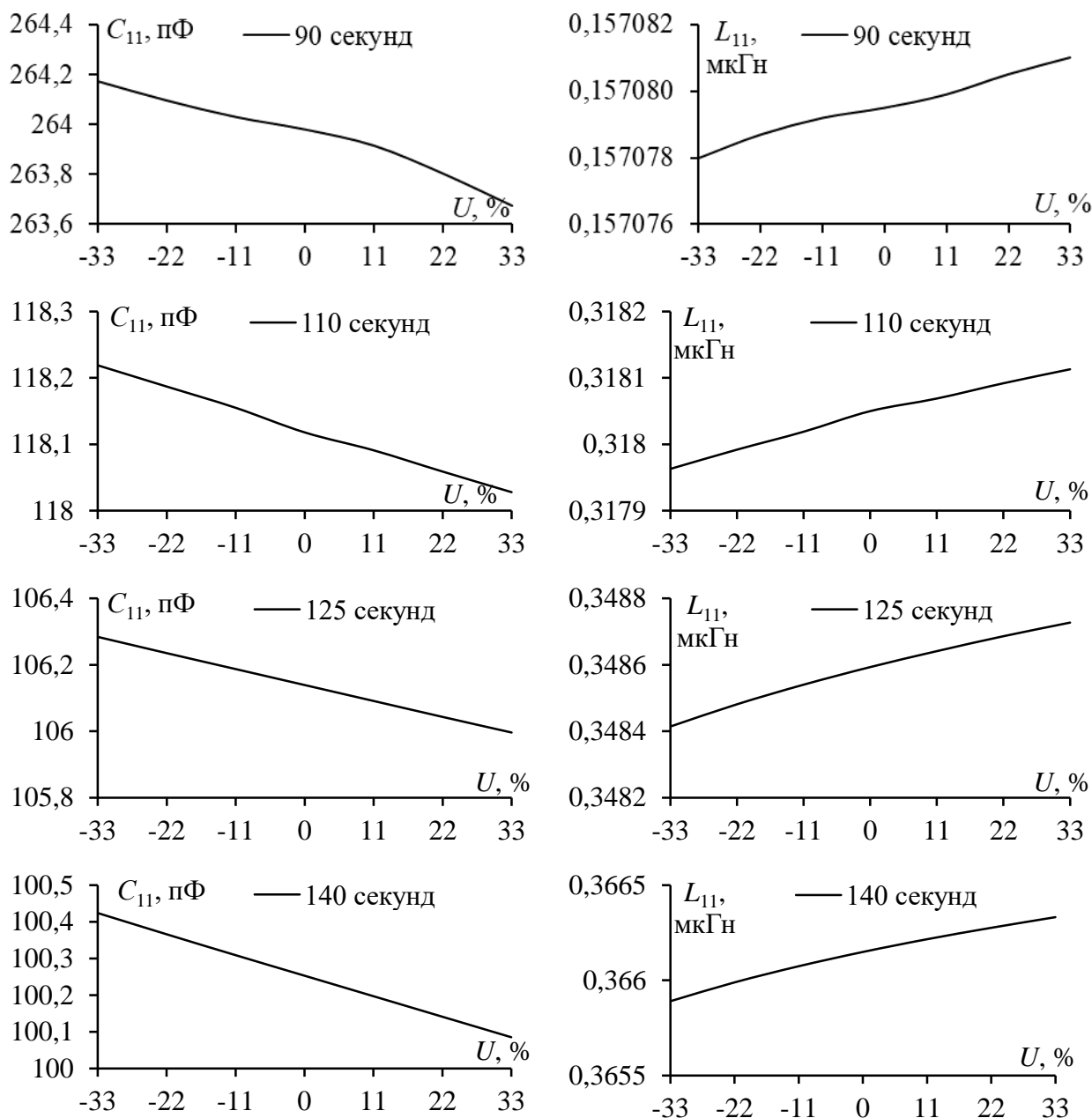


Рис. 12. Зависимости значений матриц L и C связанной МПЛ при различных U .

С увеличением параметра U , уменьшаются собственные значения коэффициентов матриц C , а также увеличиваются собственные значения L . Данные результаты подтверждают представленное ранее утверждение, о влиянии травления на характеристики ПП. Такое изменение вызвано изменением геометрии поперечного сечения проводника, а именно, уменьшением проводящего слоя. Также стоит отметить, что для структур при $t = 90$ с, наблюдается скачкообразное изменение параметров как C , так и L . Данное поведение объясняется неравномерностью структуры, поскольку вместо

одного трапецидального проводника образуется один сплошной проводник с четырьмя сужениями и двумя расширениями по высоте проводника. Для одиночной МПЛ при $t = 110$ с между крайними точками наблюдается разница в 0,181% для **C** и 0,00014% для **L**. При $t = 125$ с между крайними точками наблюдается разница в 0,277% для **C** и 0,0003% для **L**. При $t = 140$ с между крайними точками наблюдается разница в 0,327% **C** и 0,0004% для **L**. Для связанной МПЛ при $t = 110$ с между крайними точками наблюдается разница в 0,191% для **C** и 0,00015% для **L**. При $t = 125$ с между крайними точками наблюдается разница в 0,288% для **C** и 0,000313% для **L**. При $t = 140$ с между крайними точками наблюдается разница в 0,339% для **C** и 0,000442% для **L**. Стоит отметить, что при изменении верхнего основания и неизменности нижнего основания трапеции, наблюдается малое изменение рассматриваемых характеристик в пределах 10 ГГц. При больших, неравномерных изменениях геометрии проводника наблюдается большее изменение характеристик.

3. Электродинамическое моделирование структур с различной степенью подтравы

При использовании системы квазистатического анализа TALGAT, предполагается, что по исследуемой структуре распространяется только поперечная Т-волна. Однако, необходимо провести сравнение результатов, полученных в ПО TALGAT с электродинамическим моделированием. В ходе электродинамического моделирования по исследуемой структуре распространяются, как поперечная Т-волна, так и высшие типы волн, что подразумевает более точный анализ исследуемой структуры.

Так, в ходе электродинамического моделирования рассматривались структуры, упомянутые выше. Получены графики временных зависимостей входных и выходных напряжений для одиночной и связанной МПЛ при различном t , представленные на рисунках 13 и 14

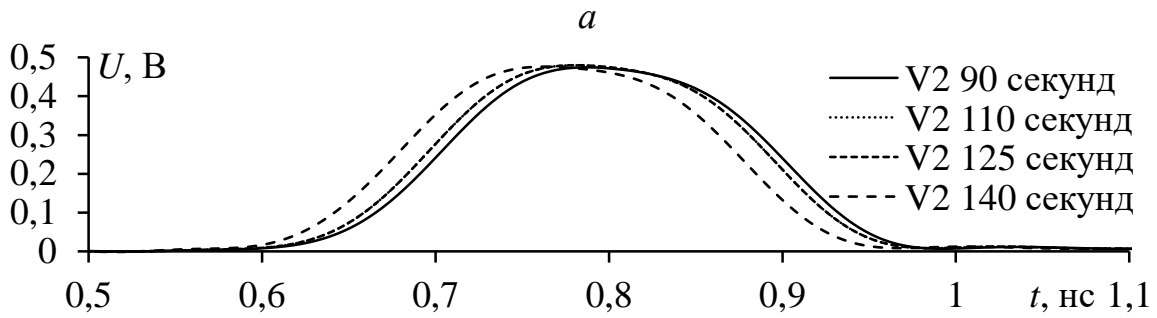
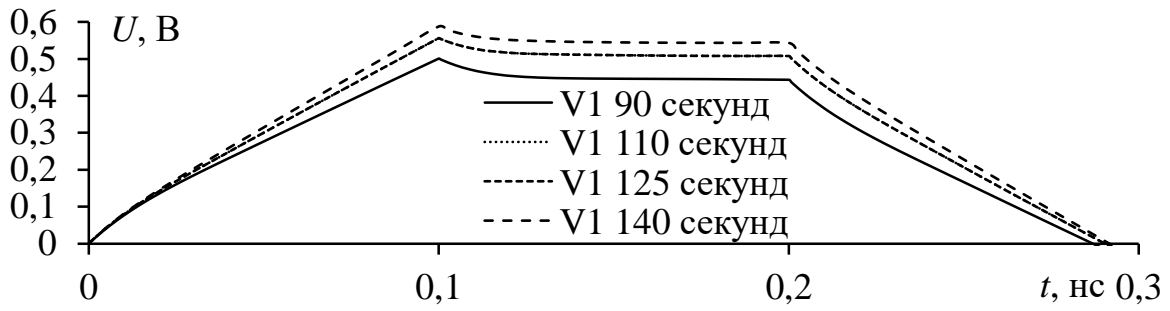


Рис. 13. Зависимости входных (а) и выходных (б) напряжений для одиночной МПЛ при различном t .

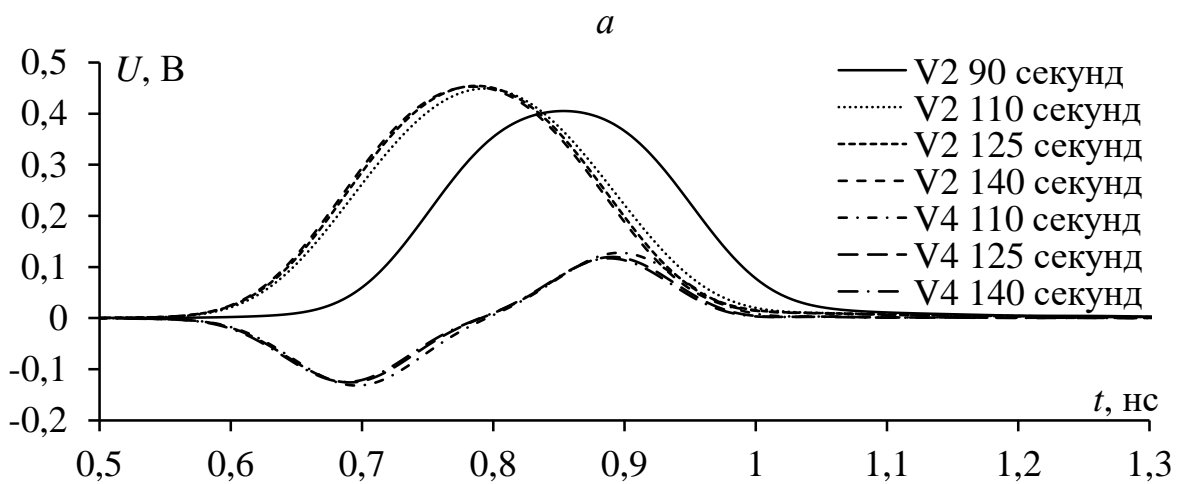
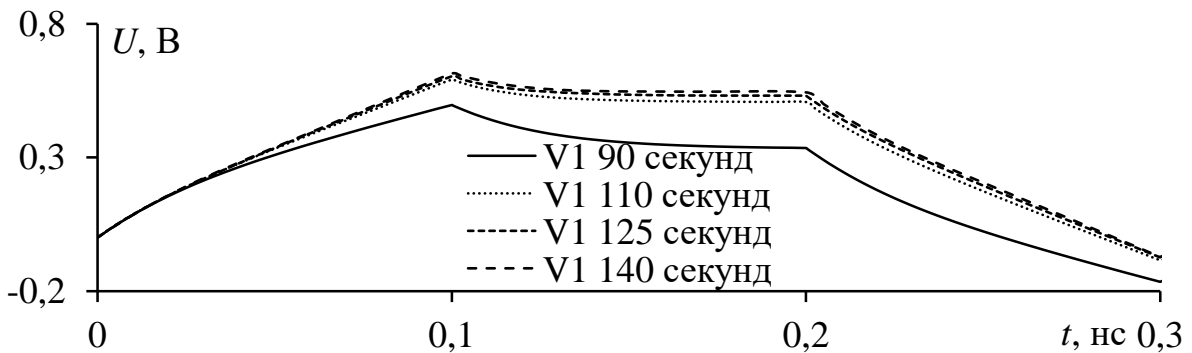


Рис. 14. Зависимости входных (а) и выходных (б) напряжений для связанной МПЛ при различном t .

Как можно увидеть из полученных данных, с увеличением t достигается увеличение входного напряжения (узел $V1$), данное утверждение справедливо как для одиночной, так и для связанной МПЛ. Для одиночной МПЛ наименьшим входным напряжением, равным 0,52 В, обладает структура при $t = 90$ с. Наибольшим же напряжением, равным 0,57 В, обладает структура при $t = 140$ с. Из зависимостей выходных напряжений для одиночной МПЛ (узел $V2$) видно, что амплитуды сигналов имеют схожие значения для каждого случая и равняются 0,474 В. При этом, отчетливо видно различие во времени задержки импульсов. Так, самым первым приходит сигнал при $t = 140$ с, время задержки составило 0,591 нс. Последним приходит сигнал при $t = 90$ с, время задержки составило 0,61 нс. Для двухпроводной МПЛ наблюдается схожее поведение входных напряжений, но при этом различаются амплитуды. Так, наименьшая амплитуда на входе (узел $V1$) имеет значение 0,519 В, а наибольшая 0,605 В. У выходного напряжения на активной линии (узел $V2$) максимальное значение составило 0,451 В, наименьшее 0,404 В. На пассивной линии (узел $V4$) напряжение между случаями отличается незначительно, как и время задержки. Самым большим временем задержки на активной линии обладает структура при $t = 90$ с, время задержки составило 0,666 нс. Остальные случаи обладают сравнимо одинаковым временем задержки, равным 0,582 нс.

Далее рассматривались случаи отклонений U , как и в квазистатическом моделировании. В ходе моделирования получены графики зависимостей входных и выходных напряжений для одиночной и связанной МПЛ при различном t с различной степенью подтравливания U представлены на рисунках 15-18.

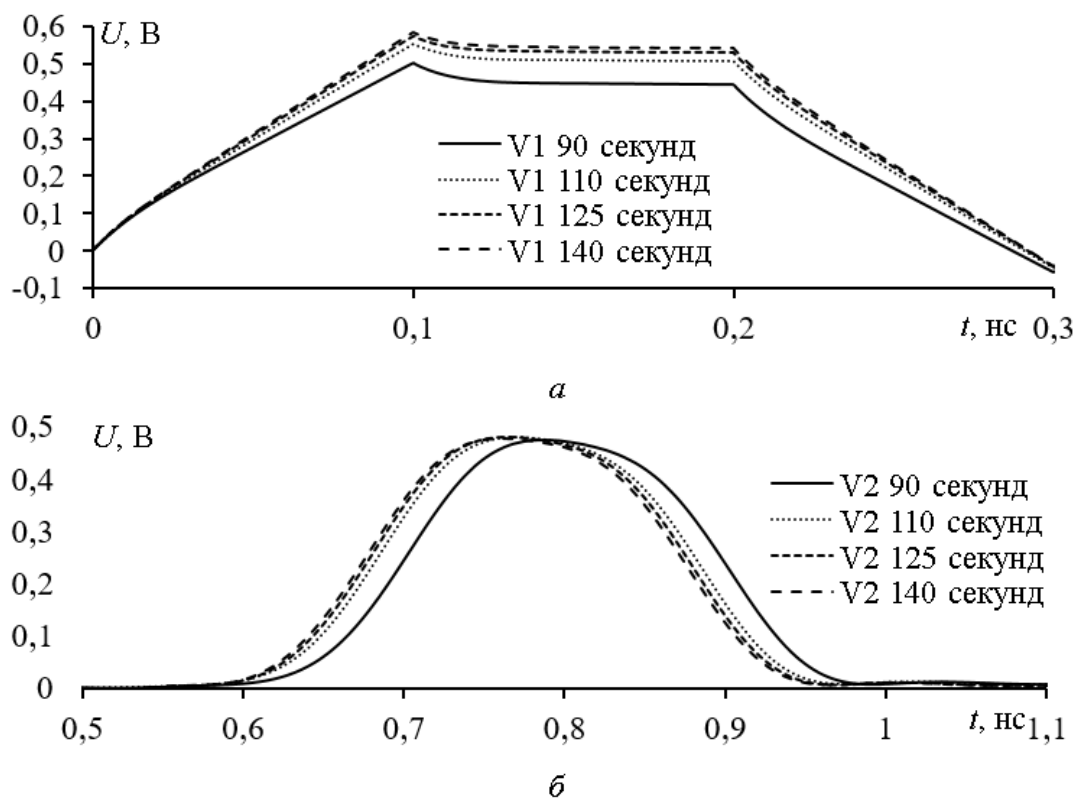


Рис. 15. Зависимости входных (а) и выходных (б) напряжений для одиночной МПЛ при различном t при $U - 34\%$.

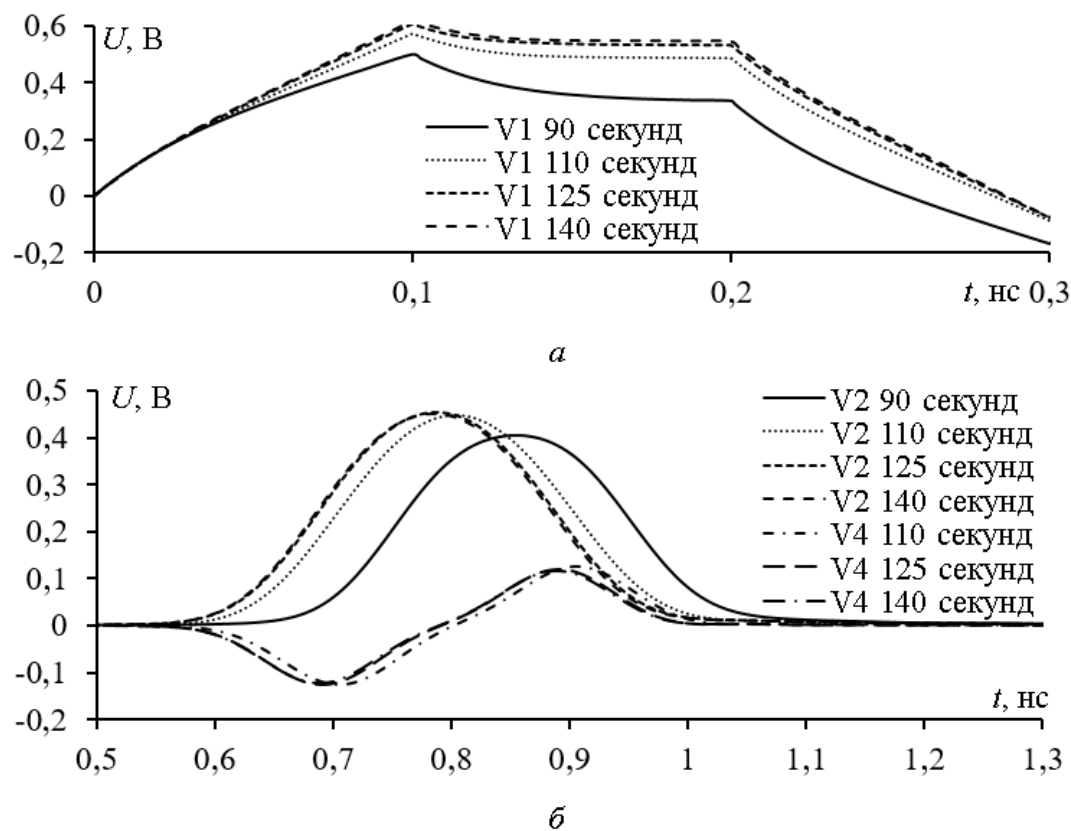


Рис. 16. Зависимости входных (а) и выходных (б) напряжений для связанной МПЛ при различном t при $U - 34\%$.

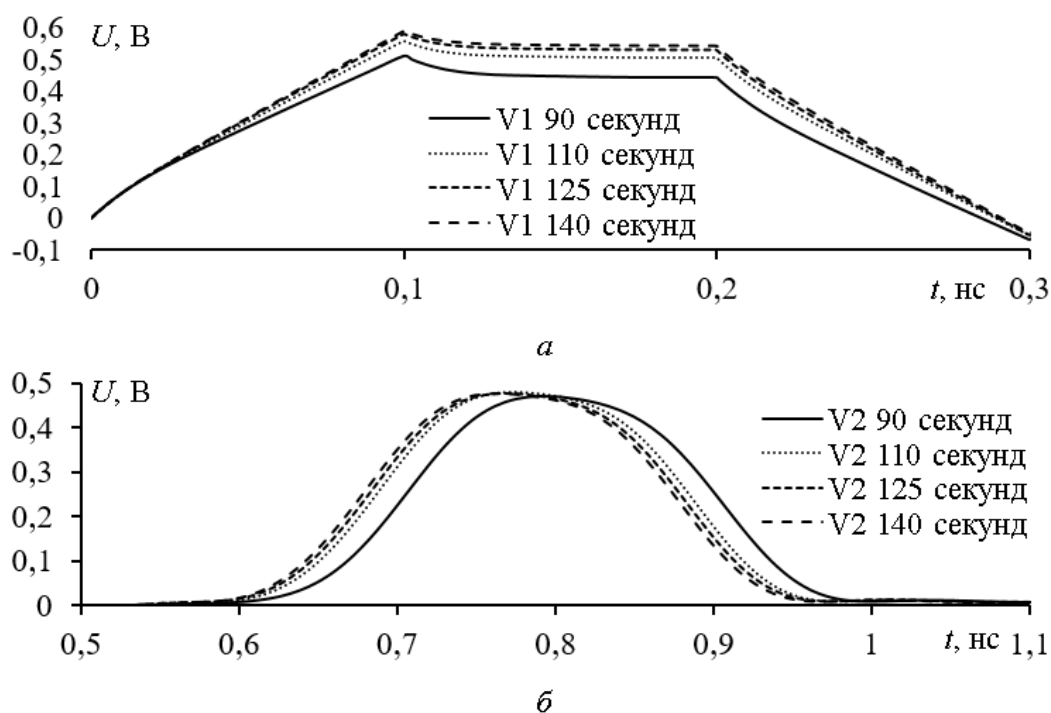


Рис. 17. Зависимости входных (а) и выходных (б) напряжений для одиночной МПЛ при различном t при $U + 34\%$.

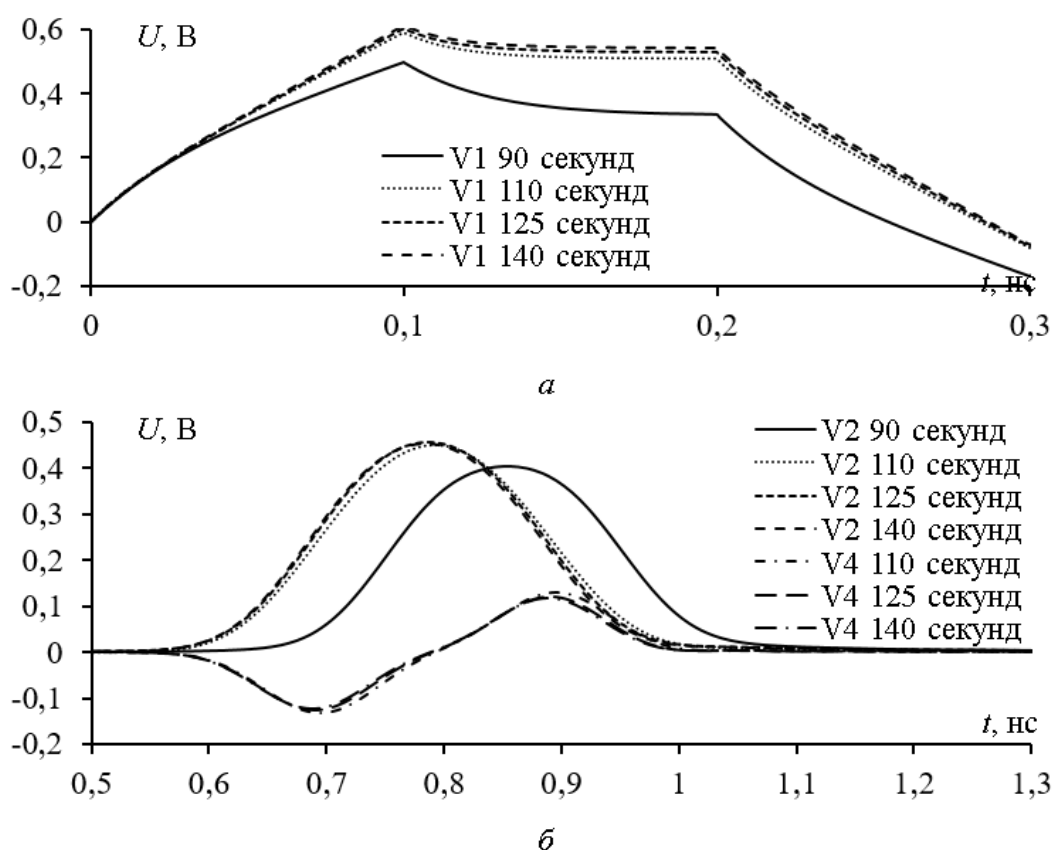


Рис. 18. Зависимости входных (а) и выходных (б) напряжений для связанной МПЛ при различном t при $U + 34\%$.

Видно, что с увеличением t увеличиваются входные напряжения для одиночной и связанной МПЛ. В случае при $U - 34\%$ у выходных напряжений для одиночной МПЛ наблюдается совпадение амплитуд напряжений, однако различается время задержек импульсов τ . Так, отношение $U_{1\max}$ к $U_{1\min}$ для однопроводной МПЛ составило 1,16. Отношение τ_{\max} к τ_{\min} составило 1,12. Для двухпроводной МПЛ в отношении $U_{1\max}$ к $U_{1\min}$ составило 1,23. На выходе активной линии (узел $V2$) отношение $U_{2\max}$ к $U_{2\min}$ составило 1,15. Отношение τ_{\max} к τ_{\min} составило 1,22. Амплитуды напряжений на выходе пассивной линии отличаются тысячными долями, время задержек совпадает. Изменение τ вызвано изменением значений LC , а малое изменение U на выходе пассивной линии связано с малым изменением характеристического сопротивления линии Z .

При $U + 34\%$ у выходных напряжений для одиночной МПЛ наблюдается совпадение амплитуд напряжений, однако различается время задержек импульсов τ . Так, отношение $U_{1\max}$ к $U_{1\min}$ для однопроводной МПЛ составило 1,15. Отношение τ_{\max} к τ_{\min} составило 1,11. Для двухпроводной МПЛ отношение $U_{1\max}$ к $U_{1\min}$ составило 1,23. На выходе активной линии (узел $V2$) отношение $U_{2\max}$ к $U_{2\min}$ составило 1,12. Отношение τ_{\max} к меньшему τ_{\min} составило 1,24. Амплитуды напряжений на выходе пассивной линии отличаются тысячными долями, время задержек совпадает.

4. Оценка влияния травления на характеристики полосковых микросборок

Рассмотренные ранее структуры обладают большими габаритами. Так, в данной работе проведен анализ влияния параметров травления на характеристики микрополосковой структуры, входящей в состав микросборки по своим массогабаритным параметрам. Рассматриваемая структура связанной МПЛ и соответствующая ей эквивалентная схема представлены на рисунке 19.

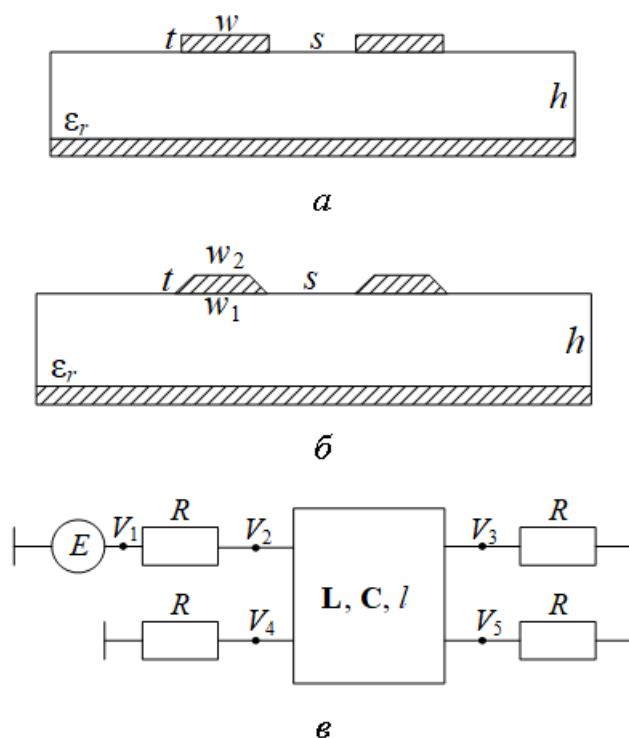


Рис. 19. Рассматриваемые структуры связанной МПЛ с проводниками прямоугольной (а), трапециевидной (б) форм и соответствующая им эквивалентная схема включения (в).

У исследуемых структур следующие параметры: толщина проводника $t = 0,005$ мм, ширина проводника $w = 0,03$ мм, толщина диэлектрической основы $h = 0,1$ мм, диэлектрическая проницаемость основания $\epsilon_r = 10,2$, расстояние между проводниками $s = 0,03$ мм, общая ширина структуры составила $0,39$ мм, длина $l = 5$ см. Рассматриваемые структуры строились как диэлектрическая подложка с равнобедренными трапецеидальными проводниками. Задана ширина фоторезиста $R = 0,03$ мм. На исследуемые структуры подавались сигналы трапециевидной формы с амплитудой напряжения 1 В, с общей длительностью в 150 пс, временем нарастания, спада и плоской вершины по 50 пс.

Для рассматриваемых структур проведены квазистатическое и электродинамическое моделирования по предложенной прогрессии травления. Полученные результаты сравнивались с результатами для структуры с прямоугольными проводниками. Таким образом результаты квазистатического моделирования МПЛ для микросборок представлены в таблице 6 и на рис. 20.

Таблица 6. Вычисленные коэффициенты матриц **LC** для рассматриваемых структур.

Форма проводника	Трапецевидная					
	110		125		140	
$t, \text{с}$						
$C, \text{пФ/м}$	0,1420	-0,0536	0,1271	-0,0431	0,1211	-0,0393
	-0,0536	0,1420	-0,0431	0,1271	-0,0393	0,1211
$L, \text{мкГн/м}$	0,5700	0,2659	0,6088	0,2607	0,6273	0,2590
	0,2659	0,5700	0,2607	0,6088	0,2590	0,6273
Форма проводника	Прямоугольная					
$C, \text{пФ/м}$	0,1226			-0,0404		
	-0,0404			0,1226		
$L, \text{мкГн/м}$	0,6019			0,2623		
	0,2623			0,6019		

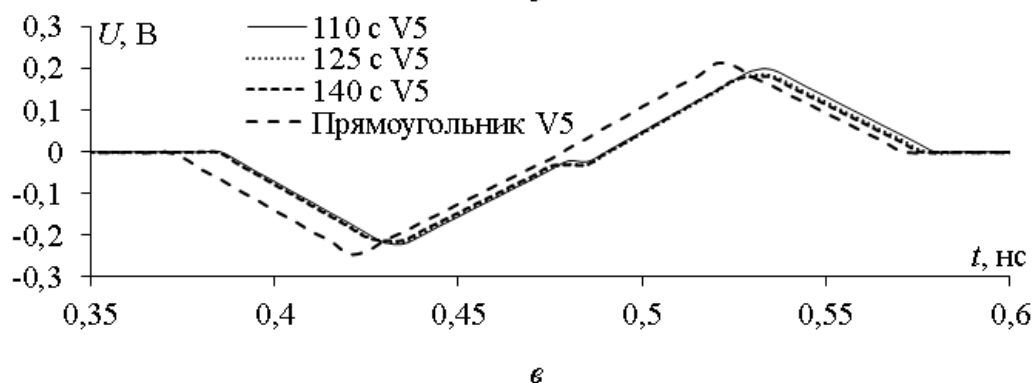
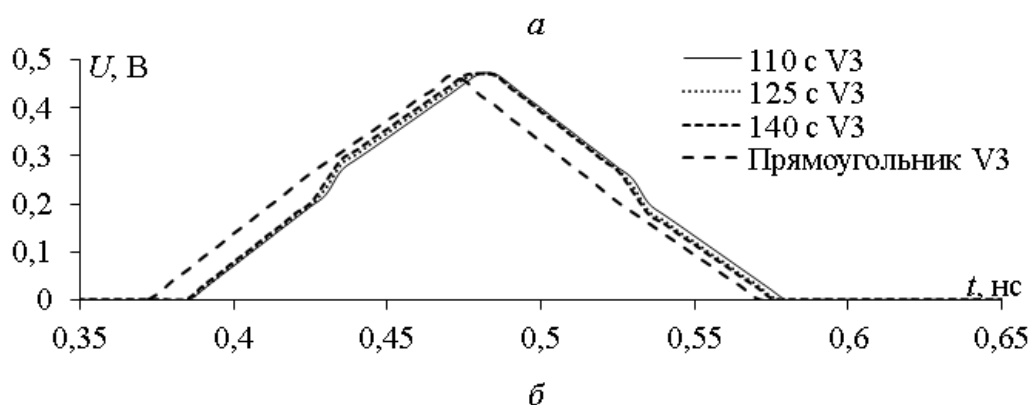


Рис. 20. Зависимости входных (а) и выходных напряжений на активном (б) и на пассивном (в) проводниках для связанной МПЛ при различном t .

Полученные результаты повторяют форму поведения прошлых результатов – с увеличением t – увеличивается $U_{ВХ}$, а также уменьшается τ . Также видно уменьшение значений матриц \mathbf{C} (главной и побочной диагоналей) и увеличение значений матриц \mathbf{L} (увеличивается главная диагональ, побочная – уменьшается). Такой результат вызван изменением геометрии проводника и изменением особенностей распространения электромагнитных волн по рассматриваемой структуре. Стоит отметить, что наиболее схожие результаты моделирования со структурой с прямоугольными проводниками имеет структура при $t = 125$ с. Что можно считать временем «Идеального травления». Разница амплитуд входных напряжений между структурой с прямоугольными проводниками и структурой при $t = 125$ с составляет 0,028 В. На выходах активной и пассивных линий для τ это значение составило 0,01 нс. Таким образом, видно, что травление оказывает влияние на амплитуды входных напряжений, а также на время задержки импульса на выходе активного и пассивного проводников, что является потенциально опасным для связанных микрополосковых устройств. Перетрав или недотрав могут негативно сказаться на работе устройства, в состав которого входит изготовленный макет. Далее проводилось электродинамическое моделирование исследуемых структур. В ходе моделирования получены зависимости входных и выходных напряжений на входе активной и выходах активной и пассивной линий, представленные на рисунке 21.

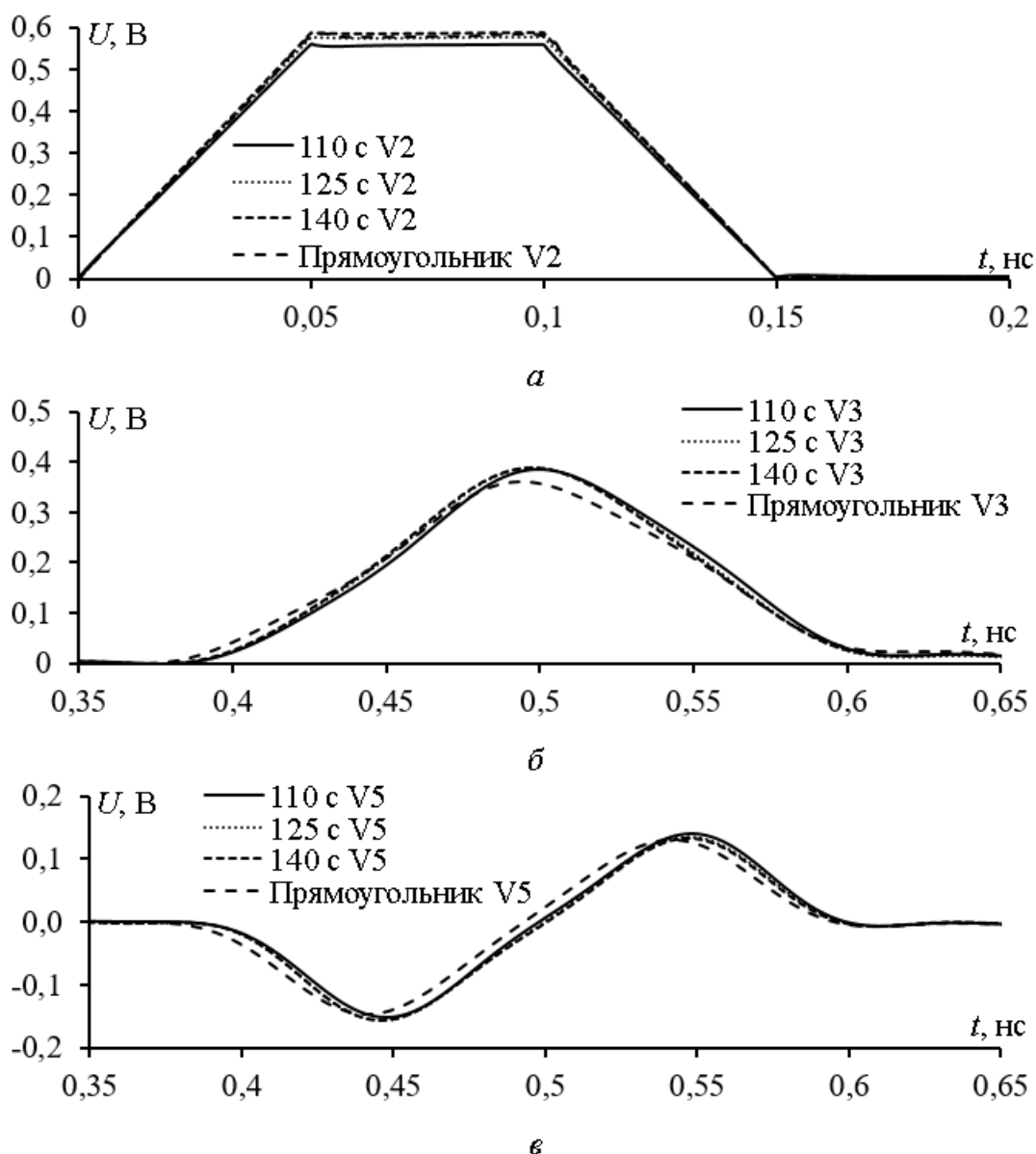


Рис. 21. Зависимости входных (*a*) и выходных напряжений на активном (*б*) и на пассивном (*в*) проводниках для связанной МПЛ при различном t .

Видно, что с увеличением t увеличивается $U_{\text{ВХ}}$, а также уменьшается τ . На выходе активной линии случай при $t = 125$ с наиболее совпадает с результатами структуры с прямоугольными проводниками, однако заметно отличие амплитуд $U_{\text{ВЫХ}}$, так их разность составила 0,027 В, для τ это значение составило 0,07 нс. Для выхода пассивной линии случай при $t = 125$ с также наиболее совпадает с результатами структуры с прямоугольными проводниками. Разница $U_{\text{ВЫХ}}$ составила 0,007 В, для τ это значение составило 0,02 нс. Заметна разница результатов на разных линиях. С большим удалением от активного проводника, разница значений будет все меньше, поскольку значения

на отдаленной линии будут уменьшаться. Данные результаты вызваны изменением формы проводника, помимо формы изменяется электромагнитная связь между проводниками, что может привести к негативным последствиям работы системы, в состав которой входит изготовленное устройство.

Заключение

По предложенной прогрессии травления проведены квазистатическое и электродинамическое моделирования структур одиночной и связанной МПЛ. В ходе квазистатического моделирования получены зависимости входных и выходных напряжений рассматриваемых структур при различном t , а также матрицы значений LC для каждой структуры. Установлено, что при увеличении t , собственные значения матрицы C уменьшаются, а L – увеличиваются. Это вызвано уменьшением площади поперечного сечения проводника. Изменяются входные и выходные напряжения, но это изменение оценивается в тысячных долях процентов. Установлено, что изменение одного из коэффициентов, описывающих процесс травления, оказывает влияние на изменение характеристик одиночной и связанной МПЛ. В ходе электродинамического моделирования подтверждены результаты, полученные при квазистатическом моделировании. Также стоит отметить, что при электродинамическом моделировании характер поведения исследуемых значений для одиночной и связанной МПЛ при изменении t , а также U отображается нагляднее, чем у квазистатического анализа. Также проведено моделирование МПЛ для микросборки. Из полученных результатов выявлено влияние t на рассматриваемые характеристики.

Данная работа открывает возможность для проведения лабораторного эксперимента с выявлением форм проводников, а также последующей экстракцией собственных коэффициентов травления и исследования их влияния на характеристики микрополосковых структур.

Литература

1. Ильин В.А. Технология изготовления печатных плат. – Машиностроение, 1984.
2. Постнов С., Тавризов А., Долгополов Н. Особенности технологии изготовления печатных плат для перспективных направлений электронной промышленности //Технологии в электронной промышленности. – 2010. – №. 8. – С. 46-47.
3. Уайтт К., Рентюк В. Особенности конструирования печатных плат с выполнением требований по ЭМС //Компоненты и технологии. – 2019. – №. 6. – С. 121-128.
4. Шаповалова К.И. Печатные платы. Совершенствование печатных плат //Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2018. – Т. 3. – №. 14. – С. 24-25.
5. Филипов Е.И. Исследование процессов печатной электроники в производстве прототипов печатных плат //Актуальные исследования. – 2020. – №. 8. – С. 42-46.
6. Якубович А.Д., Попкович А.И., Филонова М.И. Особенности технологии изготовления печатных плат. – 2023.
7. Ананьев А.Д. Технология быстрого создания прототипов печатных плат методом фрезеровки //Актуальные исследования. – 2021. – №. 23. – с. 40-42.
8. ГОСТ Р. 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции //Москва: Стандартинформ. – 2010.
9. Данилова Е.А. Классификация дефектов печатных плат //Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2013. – Т. 1. – С. 325-328.
10. Шнейдмиллер В.Р. Дефекты и анализ печатных плат //Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2018. – С. 176-177.

11. Жукова Ю.М., Жучкова А.Д., Жуков Я.Д. Экологические проблемы при технологических процессах в производстве печатных плат //Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ» Нацразвитие». – 2020. – С. 177-182.
12. Субтрактивные методы изготовления печатных плат [Электронный ресурс]: Сайт разработчика печатных плат.URL: <https://pcbdesigner.ru/sposobi-izgotovleniya-pechatnih-plat/subtraktivnye-metody-izgotovleniya-pechatnyx-plat.html> (дата обращения 11.02.2023)
13. Технология формирования проводящего рисунка [Электронный ресурс]: Сайт разработчика печатных плат. Url: <https://pcbdesigner.ru/travlenie-pechatnykh-plat/tehnologiya-formirovaniya-provodyashhego-risunka.html> (дата обращения 12.02.2022)
14. Газизов Т.Р. Основы автоматизации проектирования радиоэлектронных устройств. – 2004.
15. Сравнительный анализ двух способов получения временного отклика на сверхширокополосное импульсное воздействие / Кузьмин Н.О., Сурков В.А., Трубченинов В.А., Жечев Е.С., / X региональная научно-практическая конференция «наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения – 2021». // Томск, 2021. Ч. 1. С. 387 – 390.
16. Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. New approach to EMC protection //2007 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. – IEEE, 2007. – С. 273-276.
17. Белоусов А.О., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Многопроводная микрополосковая линия как модальный фильтр для защиты от сверхкоротких импульсов //Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – №. 3 (37). – С. 124-128.
18. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Модальные фильтры для защиты бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. – 2013.

19. Черникова Е. Б. Зеркально-симметричная меандровая линия, защищающая от сверхкоротких импульсов //Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – №. 2. – С. 280-293.
20. Носов А.В. и др. Меандровая линия задержки из двух витков, защищающая от сверхкоротких импульсов //Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – №. 3 (37). – С. 120-123.
21. Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р. Новый способ трехкратного резервирования межсоединений //Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2019. – Т. 22. – №. 2. – С. 26-30.
22. Алхадж Х. А., Жечев Е.С., Газизов Т.Р. Оценка излучаемых эмиссий структуры с однократным модальным резервированием //Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2020. – №. 1-1. – С. 250-253.
23. Сычев А.Н. Управляемые СВЧ устройства на многомодовых полосковых структурах. – 2001.
24. Куксенко С.П. и др. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT //Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – №. 2 (36). – С. 45-50.
25. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Орлов П.Е. Применение квазистатического моделирования для анализа и верификации результатов натурального эксперимента при исследовании модальных явлений в многопроводных структурах //Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – Т. 11. – №. 4. – С. 75-82.

26. Правило трех сигм [Электронный ресурс]: ФЕНИКС. URL: <https://wiki.fenix.help/matematika/pravilo-trekh-sigm> (дата обращения 11.02.2023).
27. Viswanadham P. Essentials of electronic packaging: a multidisciplinary approach. – American society of mechanical engineers, 2011.

Для цитирования:

Кузьмин Н.О., Жечев Е.С. Оценка влияния параметров травления на характеристики однопроводных и многопроводных линий передачи. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.1>