

наблюдаются при воздействии ЭСР на ЛМAMc при использовании СШЭП с коаксиальным и спиральным поперечными сечениями соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проект № 19-37-51017.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов А.В. Обеспечение стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов: дис. ...д-ра техн. наук. – М., 2009. – 238 с.
2. Ehrich M. Electrical properties and magnetic fields of a coaxial bus bar // Proc. Asia-Pacific conf. on environmental electromagnetics, Shanghai, China. – 2000. – P. 11–16.
3. Komnatnov M.E. Electrical modeling of the spiral bus bar / M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // IEEE 21th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2020, Chemal, Russia. – 29 June. – 3 July 2020. – 5 p.
4. ГОСТ Р 51317.4.2–2010 (МЭК 61000-4-2:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний, 2010. – 26 с.

УДК 621.37

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕАНДРОВОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ИЗ ДВУХ ВИТКОВ, СОЕДИНЕННЫХ КАСКАДНО

***А.Ю. Фидирко, магистрант; А.В. Носов, к.т.н., ст. преп.**
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, fidirko94@mail.ru*

Выполнен анализ влияния изменения температуры от –150 до 150 °С на характеристики меандровой микрополосковой линии из двух витков соединенных каскадно. Выявлено, что ее изменение оказывает слабое влияние на изменение элементов матриц **C**, **L**, **Z** и погонные задержки мод (не более 0,21%), а также амплитуды импульсов в конце линии (не более 4,79%).

Ключевые слова: меандровая микрополосковая линия, температурное воздействие, сверхкороткий импульс, электромагнитная совместимость.

В зависимости от сферы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) проводятся климатические испытания в соответствующей среде и производится выбор материалов, удовлетворяющих техническим требованиям [1]. Так, изменение температуры окружающей среды может приводить к изменению химико-физических и механических свойств материалов [2]. Проведение натуральных климатических

испытаний требует больших временных и финансовых затрат, поэтому учет климатических факторов на раннем этапе проектирования устройства минимизирует эти затраты. Для этого необходимо математическое моделирование влияния климатических факторов на изменение параметров материалов, которое может быть реализовано на основе математических моделей.

Сегодня предъявляются жесткие требования к электромагнитной совместимости РЭА. Особенно актуальна защита РЭА от СКИ. Для этого зачастую используются печатные устройства на основе полосковых линий. В этой связи анализ влияния климатических условий на защитные свойства устройств является важной и актуальной задачей, поскольку они имеют сложную конфигурацию и изменение параметров может привести к изменению их характеристик. Цель работы – выполнить исследование влияния температуры на характеристики защитной меандровой микрополосковой линии (МПЛ) из двух витков, соединенных каскадно.

Чтобы выполнить анализ влияния температуры на характеристики линии, воспользуемся математической температурной моделью из [3], которая имеет общий вид $P(T)$, где P – характеристика конструкции, T – температура окружающей среды. Для этого использована модель термического расширения, представленная известной формулой

$$x = x_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (1)$$

где x – значение параметра проводника с учетом термического расширения; x_0 – исходное значение параметра; α – коэффициент линейного термического расширения материала; ΔT – разница температур. На языке TALGAT script с помощью этой модели описан каждый из параметров проводников линии.

Поперечное сечение исследуемой линии и её схема соединения представлены на рис. 1. В качестве воздействия выбран СКИ в форме трапеции с амплитудой ЭДС 1 В, длительностью плоской вершины 100 пс, а фронта и спада – по 50 пс. $R1$ и $R2$ приняты равными $(Z_e Z_o)^{0.5}$ первого и второго витка соответственно.

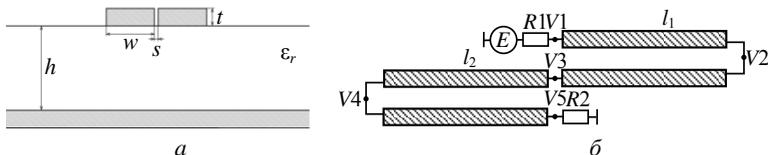


Рис. 1. Поперечное сечение витков (а) и схема соединений линии (б)

Геометрические параметры витков (индексы 1 и 2) взяты из [4]: $w_1=100$ мкм, $w_2=200$ мкм; $t_1=160$ мкм, $t_2=600$ мкм; $s_1=19,78$ мкм,

$s_2=20,25921$ мкм; $h_1=h_2=2000$ мкм; $l_1=45$ мм, $l_2=25$ мм; $\varepsilon_{r1}=480$, $\varepsilon_{r2}=120$. Отметим, что данный набор параметров обеспечивает разложение СКИ на 9 импульсов.

Результаты анализа влияния изменения температуры на характеристики первого витка меандровой МПЛ представлены в табл. 1, а на характеристики второго – в табл. 2.

Таблица 1

Элементы матриц С, L, Z и значения погонных задержек первого витка при изменении температуры от –150 до +150 °С

$T, ^\circ\text{C}$	C_{11} , пФ/м	C_{21} , пФ/м	L_{11} , нГн/м	L_{21} , нГн/м	Z_{11} , Ом	Z_{21} , Ом	τ_e , нс/м	τ_o , нс/м
-150	7073,78	-2982,57	347,714	289,758	7,44163	5,04097	51,0689	24,1418
-125	7074,88	-2982,73	347,645	289,708	7,44004	5,03995	51,07	24,1392
-100	7075,97	-2982,88	347,575	289,659	7,43846	5,03893	51,0711	24,136
-75	7077,07	-2983,04	347,506	289,609	7,43688	5,0379	51,0722	24,1339
-50	7078,17	-2983,2	347,436	289,56	7,4353	5,03689	51,0733	24,1312
-25	7079,27	-2983,35	347,367	289,51	7,43372	5,03587	51,0744	24,1286
0	7080,36	-2983,51	347,297	289,46	7,43214	5,03485	51,0755	24,126
25	7081,46	-2983,66	347,228	289,411	7,43056	5,03384	51,0766	24,1233
50	7082,56	-2983,82	347,158	289,361	7,42898	5,03282	51,0777	24,1207
75	7083,65	-2983,97	347,089	289,312	7,42741	5,0318	51,0788	24,1181
100	7084,75	-2984,13	347,02	289,267	7,42583	5,03078	51,0798	24,1154
125	7085,84	-2984,28	346,951	289,213	7,4242	5,02977	51,0809	24,1128
150	7086,94	-2984,44	346,888	289,163	7,42268	5,02875	51,082	24,1102

Таблица 2

Элементы матриц С, L, Z и значения погонных задержек второго витка при изменении температуры от –150 до +150 °С

$T, ^\circ\text{C}$	C_{11} , пФ/м	C_{21} , пФ/м	L_{11} , нГн/м	L_{21} , нГн/м	Z_{11} , Ом	Z_{21} , Ом	τ_e , нс/м	τ_o , нс/м
-150	3695,07	-1057,67	163,841	145,224	6,40218	4,42304	28,5505	9,40631
-125	3696,07	-1057,77	163,645	145,188	6,40023	4,42171	28,5516	9,40556
-100	3697,08	-1057,86	163,752	145,151	6,39829	4,42039	28,5528	9,40481
-75	3698,08	-1057,96	163,708	145,114	6,39634	4,41906	28,5539	9,40406
-50	3699,08	-1058,06	163,664	145,077	6,3944	4,41773	28,555	9,40331
-25	3700,08	-1058,16	163,62	145,04	6,39246	4,4164	28,5562	9,40256
0	3701,09	-1058,26	163,576	145,003	6,39052	4,41508	28,5573	9,40181
25	3702,09	-1058,36	163,532	144,966	6,38858	4,41375	28,5584	9,40106
50	3703,09	-1058,46	163,487	144,929	6,38664	4,41243	28,5596	9,40032
75	3704,09	-1058,56	163,443	144,892	6,38471	4,41111	28,5607	9,39957
100	3705,1	-1058,66	163,399	144,856	6,38277	4,40979	28,5618	9,39882
125	3706,1	-1058,76	163,355	144,819	6,38084	4,40847	28,5629	9,39808
150	3707,1	-1058,86	163,311	144,782	6,37891	4,40715	28,564	9,39733

Из табл. 1 видно, что изменение C_{11} при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,113\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,0141\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,0706\%$. Изменение C_{21} составило при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,0335\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,0005\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,0335\%$. Изменение L_{11} при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,13\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,019\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,02\%$. Изменение L_{21} при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,11\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,016\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,085\%$. Изменение Z_{11} при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,15\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,02\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,11\%$. Изменение Z_{21} при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,14\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,02\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,1\%$. Изменение τ_c при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,01\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,002\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,01\%$. Изменение τ_o при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,08\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,01\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,05\%$.

Из табл. 2 видно, что изменение C_{11} при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,19\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,03\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,14\%$. Изменение C_{21} при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,07\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,01\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,05\%$. Изменение L_{11} при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,19\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,03\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,014\%$. Изменение L_{21} при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,18\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,03\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,13\%$. Изменение Z_{11} при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,21\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,03\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,15\%$. Изменение Z_{21} при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,21\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,03\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,15\%$. Изменение τ_c при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,03\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,001\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,02\%$. Изменение τ_o при $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило $0,06\%$, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,01\%$, а при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,04\%$.

Выполнена оценка максимального изменения амплитуд каждого из 9 импульсов ($I1$ – $I9$) на выходе линии: $I1$ изменяется на $1,22\%$, $I2$ – на $0,96\%$, $I3$ – на $0,85\%$, $I4$ – на $2,61\%$, $I5$ – на $0,76\%$, $I6$ – на $4,79\%$, $I7$ – на $3,23\%$, $I8$ – на $2,37\%$, а $I9$ – на $1,26\%$.

Таким образом, выполнен анализ влияния изменения температуры на характеристики меандровой МПЛ из двух витков, соединенных каскадно. Выявлено, что изменение температуры в диапазоне от -150 до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ практически не оказывает влияние на элементы матриц \mathbf{C} , \mathbf{L} , \mathbf{Z} и значения погонных задержек мод витков (максимальное изменение не более $0,21\%$). Также выявлено, что максимальное влияние изменение температуры оказывает на амплитуду 6-го импульса ($4,79\%$).

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования (проект FEWM-2020-0041).

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействиям факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие влаги. – Стандарт Р 51369-99, 1999.
2. Испытательная техника: справочник / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1982. – Кн. 1. – 528 с.

3. Sagieva I.Y. The Influence of Temperature on Microstrip Transmission Line Characteristics / I.Y. Sagieva, A.V. Nosov, R.S. Surovtsev // XXI International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Altai, Russia, 29 June – 3 July 2020. – 4 p.

4. Nosov A.V. Propagation of UWB Pulse in Two Turns of Meander Microstrip Line Connected in Cascade / A.V. Nosov, R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov // 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Tomsk, Russia, October 23–24, 2019. – P. 0288–0292.

УДК 621.391.825

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПАРАМЕТРЫ РЕЗЕРВИРОВАННОЙ ЦЕПИ

Р.Р. Газизов, аспирант НИУ ВШЭ, Москва;

А.Т. Газизов, аспирант каф. ТУ ТУСУРа, Томск;

М.Н. Калинина, студентка МГУ, Москва

gazizovtsk@yandex.ru

Приведены принципиальная схема и поперечное сечение цепи с резервированием. Исследованы зависимости характеристик цепи от температуры в диапазоне от минус 50 до 150 °С. Получено, что характеристики цепи, максимальные и минимальные значения N -норм временного отклика на воздействие сверхкороткого импульса изменяются незначительно.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, моделирование, сверхкороткий импульс, изменение температуры, N -нормы.

Компьютерное моделирование является важнейшим этапом разработки радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) [1]. Из-за постоянно возрастающих требований к работе критической РЭА в экстремальных условиях перед их разработчиками стоит задача создавать все более сложные системы, в том числе с использованием модального резервирования. При моделировании экстремальных условий широко распространено исследование влияния температуры на электронные устройства для определения изменения химико-физических и механических свойств материалов. Для поиска уязвимых мест электронной аппаратуры выявляют максимумы напряжения. Для определения влияния различных импульсов на РЭА используют N -нормы [2]. Между тем исследования по воздействию температуры на различные параметры резервированных цепей, в том числе с модальным резервированием, авторам неизвестны.