

УДК 621.37

Е.С. Варзин, А.В. Носов, Р.С. Суворцев

Влияние температуры на характеристики одиночных и связанных копланарной с опорным проводником и микрополосковой линий передачи

Выполнена оценка влияния изменения температуры на характеристики линий передачи. Выявлено, что основное влияние на характеристики линий передачи оказывает температурное изменение ϵ_r . При этом линии передачи с опорным проводником менее подвержены влиянию изменения температуры, чем микрополосковые. Максимальные изменения характеристик одиночных копланарной с опорным проводником и микрополосковой линий при изменении температуры от -150 до 150 °С составили 11,9 и 16,23% соответственно, а связанных – 12,7 и 13% соответственно.

Ключевые слова: температурное воздействие, матрицы погонных параметров, микрополосковая и линия с опорным проводником.

Важными областями применения радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) являются аэрокосмическая и военная. В таких сферах РЭА работает в жестких климатических условиях, которые оказывают на нее негативное воздействие. Например, на околоземной орбите металл под прямыми лучами солнца прогревается до 160 °С, а в тени остывает до минус 100 °С. Изменение температуры окружающей среды может приводить к изменению химико-физических и механических свойств материалов [1].

При повышении температуры ускоряется развитие различных дефектов материалов. Такие дефекты приводят к понижению прочности соединений, а также элементов конструкции аппаратуры. Поэтому необходимо иметь представление, как будут изменяться характеристики РЭА под воздействием температуры. Однако для начала целесообразно выполнить анализ более простых структур с использованием более простых климатических моделей. Для этого будет использована климатическая модель, которая апробирована ранее на примере одиночной микрополосковой линии передачи [2]. Следующим шагом целесообразно исследовать влияние температуры на характеристики как одиночных, так и связанных копланарной с опорным проводником и микрополосковой линий передачи. Цель работы – выполнить такое исследование.

Математическая модель

Для оценки влияния температурного воздействия использовалась математическая температурная модель, которая имеет общий вид $P(T)$, где P – характеристика конструкции, T – температура окружающей среды. На языке TALGAT_script описана модель термического расширения каждого из параметров линии, представленная известной формулой

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

где x – значение параметра линии с учетом термического расширения; x_0 – исходное значение параметра линии; α – коэффициент линейного термического расширения материала; ΔT – разница температур. Диапазон изменения температуры составляет от -150 до 150 °С с шагом 25 °С. Разница температур

вычислялась от температуры 25 °С. Значение α для меди принято равным $17 \cdot 10^{-6}$, а для диэлектрической подложки – $70 \cdot 10^{-6}$.

Аналогично учтена температурная зависимость относительной диэлектрической проницаемости. Коэффициент α получен следующим образом. На основе данных из работы [3] вычислен абсолютный коэффициент изменения ϵ_r от T как

$$\alpha_0 = \frac{\epsilon_{r \max} - \epsilon_{r \min}}{T_{\max} - T_{\min}}, \quad (2)$$

где T_{\max} и T_{\min} – максимальное и минимальное из значений диапазона температур, а $\epsilon_{r \max}$ и $\epsilon_{r \min}$ – максимальное и минимальное из значений диэлектрической проницаемости для крайних точек диапазона T . На рис. 1 приведены зависимости ϵ_r от T при изменении частоты, из которых следует, что $\alpha_0 = -0,003$. Тогда, разделив α_0 на среднее значение $\epsilon_r = 5,6$, получим $\alpha = -5,35 \cdot 10^{-4}$ [2].

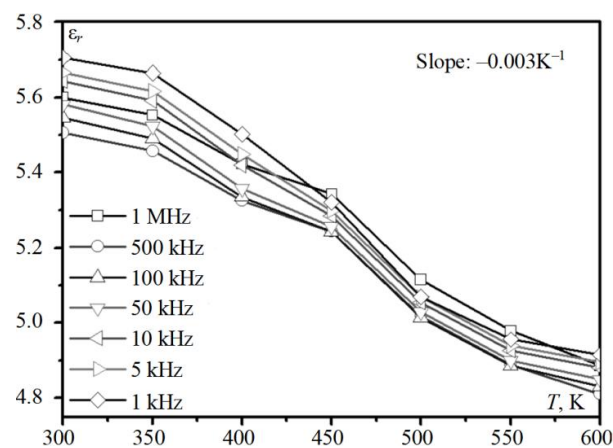


Рис. 1. Зависимость $\epsilon_r(T)$ для разных частот из [3]

Исходные данные

Для исследования выбраны следующие линии передачи: одиночная микрополосковая, одиночная копланарная с опорным проводником, связанная микрополосковая и связанная копланарная с опорным проводником. Их поперечные сечения представлены на рис. 2.

В качестве исходных параметров для одиночной микрополосковой линии передачи выбраны следующие значения: ширина и толщина проводника $w = 2900$ мкм и $t = 35$ мкм соответственно, толщина основы платы $h = 1430$ мкм, расстояние от проводника до края структуры $d = 3w$, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r = 4$. Параметры одиночной копланарной линии с опорным проводником: $w_1 = w_3 = 1100$ мкм, $w_2 = 1200$ мкм, $t = 35$ мкм, $h = 1430$ мкм, $d = 3w$, $\epsilon_r = 4$, $s_1 = s_2 = 200$ мкм. Для связанной микрополосковой линии приняты следующие параметры: $w_1 = w_2 = 1100$ мкм, $t = 35$ мкм, $h = 1430$ мкм, $d = 3w$, $\epsilon_r = 4$, $s_1 = 1100$ мкм. Параметры поперечного сечения связанной копланарной линии с опорным проводником: $w = s = 1100$ мкм, $t = 35$ мкм, $h = 1430$ мкм, $\epsilon_r = 4$. Такой выбор обеспечивает волновое сопротивление $Z_B = 50$ Ом для одиночных линий и $Z_B = \sqrt{Z_e Z_o} = 50$ Ом для связанных линий при $T = 25$ °C, где Z_e и Z_o – волновые сопротивления четной и нечетной мод линии.

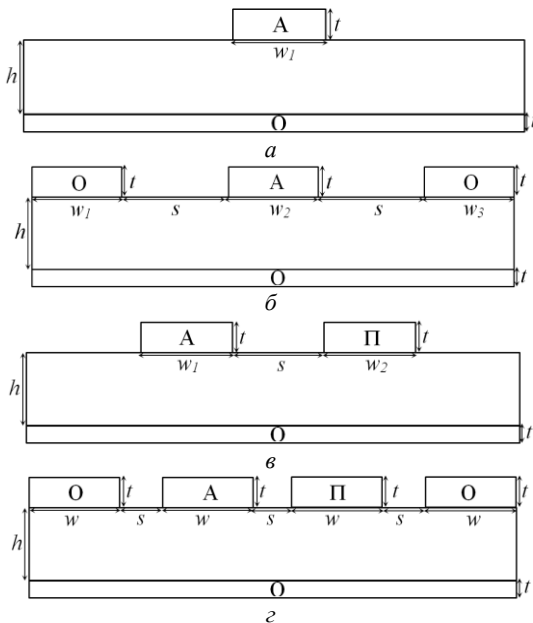


Рис. 2. Поперечные сечения исследуемых линий: одиночной микрополосковой (а), одиночной копланарной с опорным проводником (б), связанной микрополосковой (в) и связанной копланарной с опорным проводником (г)

Результаты моделирования

В системе TALGAT [7] выполнена оценка влияния изменения температуры на характеристики исследуемых линий при отдельном влиянии на каждый из параметров их поперечных сечений (рис. 3), а также при одновременном (таблица). Отметим, что на рис. 3 приведены зависимости погонных емкости (C), индуктивности (L) и волнового сопротивления (Z): только $C(T)$, $Z(T)$ при влиянии T на ϵ_r , а также $L(T)$ при влиянии T на h . При отдельном влиянии T на другие параметры поперечного сечения линий изменение характеристик линий незначительно, поэтому они не приведены. Таким образом, максимальные изменения $C(T)$ в линиях с опорным проводником и микрополосковой составили 11,68 и 14,98% соответственно, Z – 6,4 и 7,23% соответственно, а L – 0,21 и 1,25% соответственно.

В таблицу сведены значения элементов матриц C , L и Z при температуре $-150, 25, 150$ °C и её влиянии на все параметры поперечных сечений исследуемых связанных линий одновременно.

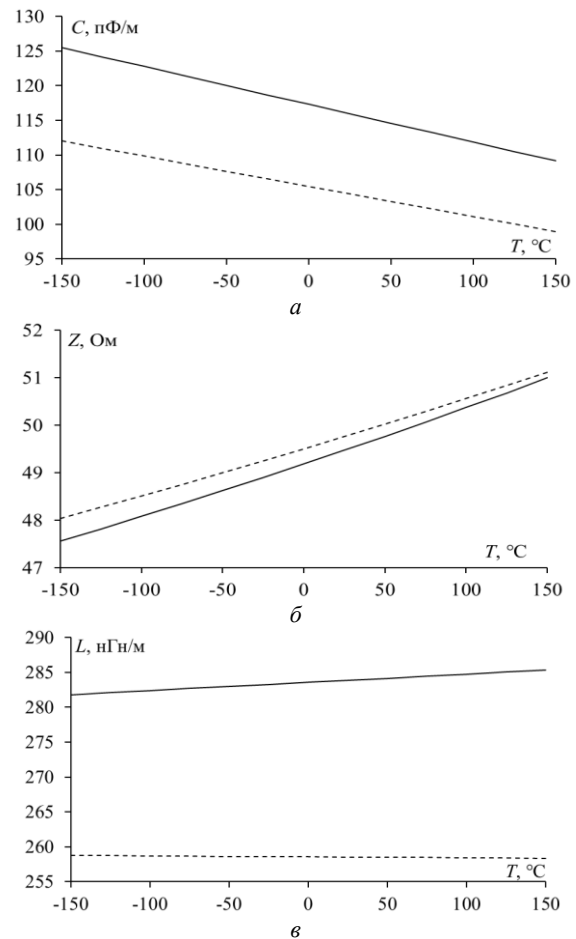


Рис. 3. Зависимости $C(T)$ и $Z(T)$ при влиянии T только на ϵ_r (а, б), и $L(T)$ (в) при влиянии T только на h линий: одиночных микрополосковой (—) и копланарной с опорным проводником (---)

Значения элементов матриц C , L и Z при температуре $-150, 25, 150$ °C и её влиянии на все параметры поперечных сечений исследуемых линий одновременно

N	Структура	Элемент матрицы	T		
			-150 °C	25 °C	150 °C
1	Микрополосковая	C, пФ/м	126,30	115,96	108,66
		L, нГн/м	282,31	283,87	284,97
		Z, Ом	47,27	49,47	51,21
	Линия с опорным проводником	C, пФ/м	112,19	104,39	98,83
		L, нГн/м	258,27	258,52	258,69
		Z, Ом	47,98	49,76	51,16
2	Микрополосковая	C ₁₁ , пФ/м	75,66	69,90	65,81
		C ₁₂ , пФ/м	-10,98	-10,53	-10,20
		L ₁₁ , нГн/м	451,78	453,62	454,92
		L ₁₂ , нГн/м	104,83	106,08	106,96
		Z ₁₁ , Ом	78,02	81,41	84,08
		Z ₁₂ , Ом	14,74	15,68	16,42
	Линия с опорным проводником	C ₁₁ , пФ/м	77,82	72,017	67,90
		C ₁₂ , пФ/м	-10,77	-10,29	-9,94
		L ₁₁ , нГн/м	421,66	422,92	423,80
		L ₁₂ , нГн/м	86,57	87,39	87,97
		Z ₁₁ , Ом	74,28	77,39	79,82
		Z ₁₂ , Ом	12,78	13,54	14,14

Из таблицы видно, что при изменении T элементы матриц \mathbf{C} , \mathbf{L} и \mathbf{Z} изменяются существенно. Так, максимальное изменение элементов матрицы \mathbf{C} составило для копланарной с опорным проводником и микрополосковой 11,9 и 16,23% соответственно, а для связанных – 12,7 и 13% соответственно. При этом изменение элементов C_{12} связанных линий не превышает 8%. Максимальное изменение значений элементов матрицы \mathbf{L} составило для одиночных копланарной с опорным проводником и микрополосковой 0,16 и 0,94% соответственно, а для связанных – 0,5 и 0,695% соответственно. Максимальное изменение значений элементов матрицы \mathbf{Z} составило для одиночных копланарной с опорным проводником и микрополосковой 6,63 и 8,3% соответственно, а для связанных – 7,47 и 7,767% соответственно. Учитывая результаты, приведенные на рис. 3, основное влияние на изменение значений элементов матриц \mathbf{C} и \mathbf{Z} оказывает влияние T на ϵ_r , а на изменение элементов матрицы \mathbf{L} – влияние на h . Также отметим, что влияние изменения T на одиночную копланарную линию с опорным проводником меньше, чем на микрополосковую.

Заключение

Выполнена оценка влияния изменения температуры на характеристики линий передачи. Выявлено, что основное влияние на характеристики линий передачи оказывает температурное изменение ϵ_r , а линии передачи с опорным проводником менее подвержены влиянию температуры, чем микрополосковые.

Влияние температуры не единственное, что может ухудшить характеристики линий передачи. Также важным является учет влияния изменения влажности на их характеристики. Поэтому в дальнейшем целесообразно выполнить оценку влияния влажности на матрицы погонных параметров.

Работа выполнена при поддержке гранта № 19-19-00424 Российского научного фонда.

Литература

1. Испытательная техника: справочник / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1982. – 528 с.

2. 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.

3. Hua-Min Li, Chang-Ho Ra et al. Frequency and Temperature Dependence of the Dielectric Properties of a PCB Substrate for Advanced Packaging Applications // Journal of the Korean Physical Society. – March 2009. – No. 3. – P. 1096–1099.

4. ГОСТ Р МЭК 61620–2013. Жидкости изоляционные. Определение тангенса угла диэлектрических потерь измерением электрической проводимости и емкости // Национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2019.

5. Электропроводность диэлектриков [Электронный ресурс]. – URL: http://libraryno.ru/9-2-1-elektroprovodnost-dielektrikov-material_bashkov_2010/ (дата обращения: 07.01.2020).

6. Кухлинг Х. Справочник по физике: пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 475 с.

7. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – P. 1–7.

Варзин Евгений Сергеевич

Магистрант каф. ТУ ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-999-619-08-02

Эл. почта: woodoo2013@gmail.com

Носов Александр Вячеславович

Канд. техн. наук, с.н.с. НИЛ «ФИЭМС» ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-923-406-86-01

Эл. почта: alexns2094@gmail.com

Суровцев Роман Сергеевич

Канд. техн. наук, с.н.с. НИЛ «ФИЭМС» ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-913-858-16-12

Эл. почта: surovtssevrs@gmail.com