

УДК 621.372.8

К РАСЧЕТУ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКРАНИРОВАННОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

© 2024 г. А. Н. Коваленко, А. Д. Ярлыков*

МИРЭА – Российский технологический университет,
просп. Вернадского, 78, Москва, 119454 Российская Федерация

*E-mail: yarlykov@mirea.ru

Поступила в редакцию 20.09.2023 г.

После доработки 20.09.2023 г.

Принята к публикации 27.10.2023 г.

Предложены простые формулы, позволяющие быстро и с достаточно высокой точностью рассчитать дисперсионные характеристики микрополосковой линии. Аналитические выражения, из которых определяются коэффициент замедления и волновое сопротивление линии, представлены в виде быстросходящихся рядов. Исследована погрешность расчета дисперсионных характеристик в широком диапазоне изменения геометрических и физических параметров линии. Определены значения параметров, при которых погрешность не превышает 1%.

Ключевые слова: микрополосковая линия, дисперсионные характеристики, коэффициент замедления, волновое сопротивление, квазистатическое приближение

DOI: 10.31857/S0033849424080111, EDN: HNRIAK

ВВЕДЕНИЕ

Дисперсионные характеристики микрополосковой линии (МПЛ) представляют частотные зависимости различных электродинамических параметров, основными из которых являются коэффициент замедления и волновое сопротивление. Дисперсионные характеристики МПЛ можно рассчитать теоретически с любой степенью точности, используя проекционный метод построения электродинамических моделей полосковых линий [1]. Однако алгоритм расчета и его реализация в виде быстросходящейся компьютерной программы требуют достаточно высокой квалификации. Поэтому актуальна разработка упрощенных математических моделей МПЛ в виде аналитических выражений, позволяющих рассчитать дисперсионные характеристики с достаточно высокой точностью в ограниченном диапазоне изменения размеров линии, диэлектрической проницаемости подложки и частоты. Такая модель для МПЛ с узким полосковым проводником (ширина проводника не превышает удвоенной толщины подложки) разработана [2].

В данной статье, с использованием аналитических выражений, полученных в [2, 3], предложены простые формулы, позволяющие рассчитать частотные зависимости коэффициента замедления и волнового сопротивления с достаточной для целей инженерной практики точностью в широком диапазоне изменения параметров линии.

1. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Поперечное сечение микрополосковой линии представлено на рис. 1.

В результате численного анализа частотных зависимостей коэффициента замедления $n(f)$ и волнового сопротивления $Z(f)$ МПЛ, рассчитанных проекционным методом с использованием «чебышевского» базиса [1], установлено, что они слабо зависят от числа базисных функций

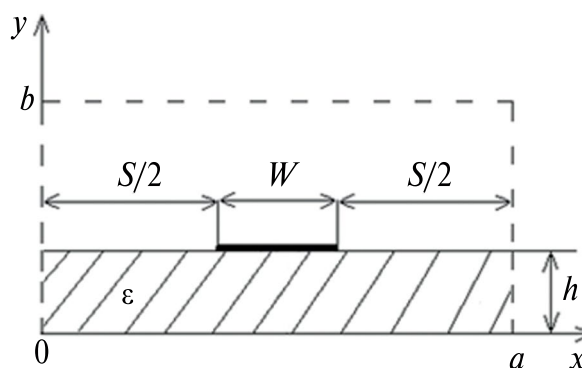


Рис. 1. Поперечное сечение микрополосковой линии: W – ширина полоскового проводника; $S/2$ – расстояние от края проводящей полоски до боковых стенок экрана; h – толщина подложки; a, b – размеры экрана; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость подложки.

и незначительно отличаются от значений $n_0(f)$ и $Z_0(f)$, рассчитанных при учете только одной базисной функции. Из анализа численных результатов, представленных в [1], следует, что отношения

$$\frac{n(f)}{n_0(f)} \text{ и } \frac{Z(f)}{Z_0(f)}$$

слабо зависят от частоты f и их можно представить в виде

$$\frac{n(f)}{n_0(f)} = \xi_n(f) \approx \frac{n(0)}{n_0(0)}, \quad \frac{Z(f)}{Z_0(f)} = \xi_Z(f) \approx \frac{Z(0)}{Z_0(0)}. \quad (1)$$

Таким образом, для расчета дисперсионных характеристик предлагаются следующие приближенные формулы:

$$n(f) \approx \frac{n(0)}{n_0(0)} n_0(f), \quad Z(f) \approx \frac{Z(0)}{Z_0(0)} Z_0(f), \quad (2)$$

которые переходят в точные при $f \rightarrow 0$.

Используя расчетные соотношения, полученные в [2], приведем выражения, из которых определяются $n_0(f)$ и $Z_0(f)$. Коэффициент замедления $n_0(f)$ определяется из численного решения дисперсионного уравнения

$$\frac{\pi}{k_0 a} \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{n_0^2 G_m^{\mathcal{D}} + \alpha_m^2 G_m^M}{\chi_m^2} - \frac{0.5 - n_0^2/(\varepsilon + 1)}{\alpha_m} \right] J_0^2(m\alpha) \sin^2\left(m \frac{\pi}{2}\right) + \left(0.5 - \frac{n_0^2}{\varepsilon + 1}\right) S(\alpha) = 0, \quad (3)$$

где

$$G_m^{\mathcal{D}} = \left(\frac{\varepsilon}{\beta_m^I} \operatorname{ctg}(k_0 \beta_m^I h) + \frac{1}{\beta_m^{II}} \operatorname{ctg}[k_0 \beta_m^{II} (b - h)] \right)^{-1},$$

$$G_m^M = \left(\beta_m^I \operatorname{ctg}(k_0 \beta_m^I h) + \beta_m^{II} \operatorname{ctg}[k_0 \beta_m^{II} (b - h)] \right)^{-1},$$

$$\beta_m^I = \sqrt{\varepsilon - \chi_m^2}, \quad \beta_m^{II} = \sqrt{1 - \chi_m^2}, \quad \chi_m^2 = \alpha_m^2 + n_0^2,$$

$$\alpha_m = \frac{\pi}{k_0 a} m, \quad \alpha = \frac{\pi W}{2 a}, \quad k_0 = \frac{2\pi f}{c} -$$

волновое число свободного пространства, c — скорость света в вакууме,

$$S(\alpha) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} J_0^2(m\alpha) \sin^2\left(m \frac{\pi}{2}\right).$$

Волновое сопротивление $Z_0(f)$, определяемое через мощность, переносимую через поперечное сечение линии, и ток в полосковом проводнике, представляются в виде

$$Z_0 = \frac{240\pi}{k_0 a} n_0 \sum_{m=1}^{\infty} \left[-\frac{1}{\chi_m^2} \left(n_0^2 (G_m^{\mathcal{D}})' + \alpha_m^2 (G_m^M)' \right) + \frac{\alpha_m^2}{\chi_m^4} G_m^M - \left(\frac{\alpha_m^2}{\chi_m^4} G_m^{\mathcal{D}} + \frac{1}{\alpha_m (\varepsilon + 1)} \right) \right] \times \\ \times J_0^2(m\alpha) \sin^2\left(m \frac{\pi}{2}\right) + \frac{240}{\varepsilon + 1} n_0 S(\alpha), \quad (4)$$

где $(G_m^{\mathcal{D},M})'$ — производная функции $G_m^{\mathcal{D},M}$ по n_0^2 .

Бесконечные ряды в (3), (4) быстро сходятся (члены в квадратных скобках при $m \rightarrow \infty$ убывают как $1/m^3$), а функцию $S(\alpha)$ можно представить в виде быстросходящегося степенного ряда [1]:

$$S(\alpha) = \frac{1}{2} \ln \frac{4}{\alpha} + \\ + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{S_{2k}}{k} \left(2^{-2k} - \frac{1}{2} \right) \left[\frac{(2k-1)!!}{(2k)!!} \right]^2 \left(\frac{2\alpha}{\pi} \right)^{2k}, \quad (5)$$

где

$$S_{2k} = \sum_{p=1}^{\infty} p^{-2k}, \quad S_2 = \frac{\pi^2}{6}, \quad S_4 = \frac{\pi^4}{90}, \quad S_6 = \frac{\pi^6}{945}, \dots,$$

при $k \geq 4$: $S_{2k} \approx 1$.

При $f \rightarrow 0$ в [2] получены следующие выражения для расчета коэффициента замедления $n_0(0)$ и волнового сопротивления $Z_0(0)$:

$$n_0(0) = \sqrt{\frac{P(1)}{P(\varepsilon)}}, \quad Z_0(0) = \frac{240}{n_0(0)} P(1), \quad (6)$$

$$P(\varepsilon) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin^2(m \pi/2)}{\operatorname{ech}(m \pi h/a) + \operatorname{cth}[m \pi (b - h)/a]} \frac{J_0^2(m\alpha)}{m}. \quad (7)$$

Улучшая сходимость медленно сходящегося ряда (7), представим функцию $P(\varepsilon)$ в виде

$$P(\varepsilon) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin^2(m\pi/2)}{m} \left(\frac{1}{\varepsilon \operatorname{cth}(m\pi h/a) + \operatorname{cth}[m\pi(b-h)/a]} - \frac{1}{\varepsilon + 1} \right) J_0^2(m\alpha) + \frac{1}{\varepsilon + 1} S(\alpha). \quad (8)$$

Коэффициент замедления $n(0)$ и волновое сопротивление $Z(0)$ определяются из решения задачи в квазистатическом приближении с использованием расчетных соотношений, полученных в [3].

Для открытой микрополосковой линии ($a \rightarrow \infty$, $b \rightarrow \infty$), используя [2] и формулы из работы [4, (4.226(2)) и (1.515(1))], можно получить следующее выражение для функции $P(\varepsilon)$:

$$P(\varepsilon) = \frac{1}{2(\varepsilon + 1)} \left\{ \ln \frac{8h}{W} + f_1(W/h) - \sum_{v=1}^{\infty} (-1)^v (f_v(W/h) - f_{v+1}(W/h)) q^v - \Phi(\varepsilon) \right\}, \quad (9)$$

где

$$f_v(W/h) = \frac{2}{\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \ln \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \sqrt{\left(\frac{W}{v2h} \cos \theta \right)^2 + 1} \right] \right\} d\theta, \quad (10)$$

$$\Phi(\varepsilon) = \ln(1 + q) +$$

$$+ \sum_{v=1}^{\infty} (-1)^{v+1} \left[\ln \left(1 + \frac{1}{v} \right) - \frac{1}{v} \right] q^v, \quad q = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1}. \quad (11)$$

Разлагая в (10) логарифмическую функцию в степенной ряд и учитывая в нем только первый член, получим приближенное выражение для функции $P(\varepsilon)$ для МПЛ с узким полосковым проводником ($W/h \leq 2$):

$$P(\varepsilon) \approx \frac{1}{2(\varepsilon + 1)} \left\{ \ln \frac{8h}{W} + \frac{1}{8} \left(\frac{W}{2h} \right)^2 \left(1 + \sum_{v=1}^{\infty} (-1)^{v+1} \frac{2v+1}{v^2(v+1)^2} q^v \right) - \Phi(\varepsilon) \right\}. \quad (12)$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА

В результате расчетов, выполненных на персональном компьютере, исследована зависимость погрешностей расчета дисперсионных характеристик МПЛ по формуле (2) в широком диапазоне изменения параметров линии. Погрешности δn и δZ рассчитывались по формулам

$$\delta n = \frac{n_T(f) - n(f)}{n_T(f)} 100\%,$$

$$\delta Z = \frac{Z_T(f) - Z(f)}{Z_T(f)} 100\%, \quad (13)$$

где $n_T(f)$ и $Z_T(f)$ – «точные», а $n(f)$ и $Z(f)$ – приближенные значения коэффициента замедления и волнового сопротивления линии, рассчитанные по формулам (2). За точные значения принимались значения, полученные с использованием проекционного метода [1] с учетом семи базисных функций. Отметим, что при числе базисных функций $K \geq 5$ результаты расчета $n_T(f)$ и $Z_T(f)$ совпадают с точностью до пяти значащих цифр в рассматриваемом диапазоне изменения параметров линии:

$$10 \leq S/h = (a/h - W/h) \leq 250, \quad 10 \leq b/h \leq 150,$$

$$0.1 \leq W/h \leq 10, \quad 2 \leq \varepsilon \leq 20, \quad 0.1 \leq f_n \leq 15,$$

где $f_n = f[\text{ГГц}]/h[\text{мм}]$ – нормированная частота. Расчеты проводились с использованием расчетных соотношений, приведенных в данной статье, и квазистатической модели МПЛ, предложенной в [3].

Погрешности расчета n и Z практически не зависят от размеров экрана a и b . Приведенные ниже численные результаты получены для открытой МПЛ, моделируемой экранированной с размерами экрана: $a = W + 250h$, $b = 150h$.

Используя (13), представим погрешность расчета дисперсионных характеристик по приближенным формулам (2) в виде

$$\delta n = \left(1 - \frac{n_T(0)/n_0(0)}{n_T(f_n)/n_0(f_n)} \right) 100\%,$$

$$\delta Z = \left(1 - \frac{Z_T(0)/Z_0(0)}{Z_T(f_n)/Z_0(f_n)} \right) 100\%. \quad (14)$$

При изменении параметров линии в указанных выше границах отношения $n_T(f_n)/n_0(f_n)$ и $Z_T(f_n)/Z_0(f_n)$ слабо зависят от частоты

и незначительно отличаются от их значений при $f_n \rightarrow 0$, что обеспечивает высокую точность формул (2). Сказанное подтверждается данными табл. 1.

Входящие в формулы (2) и (14) не зависящие от частоты коэффициенты $\xi_n = n_T(0)/n_0(0)$ и $\xi_Z = Z_T(0)/Z_0(0)$ определяются с использованием расчетных соотношений, полученных в [3]. В табл. 2 приведены значения этих коэффициентов в указанном выше диапазоне изменения отношения W/h и диэлектрической проницаемости подложки ϵ .

На рис. 2 представлены графики зависимости коэффициентов ξ_n и ξ_Z от W/h при различных значениях ϵ .

Для узких полосковых проводников ($W/h \leq 2$) $\xi_n \approx 1$ и $\xi_Z \approx 1$. При этом погрешности этих формул не превышают 0.15% и 0.25%. Для более широких проводников ($W/h > 2$) зависимости ξ_n и ξ_Z от W/h можно аппроксимировать прямыми, проходящими через точку $W/h = 2$. Вторую точку нужно выбрать таким образом, чтобы погрешности расчета в заданном интервале изменения W/h были минимальны. Если вторую точку выбрать $W/h = 6$, то для МПЛ с поликоровой подложкой ($\epsilon = 9.6$), получим следующие аппроксимационные формулы:

$$\xi_n \approx \begin{cases} 1, & \text{при } W/h < 2, \\ 1 + 3.6 \times 10^{-3} (W/h - 2), & \text{при } 2 \leq W/h \leq 10, \end{cases}$$
$$\xi_Z \approx \begin{cases} 1, & \text{при } W/h < 2, \\ 1 - 8.725 \times 10^{-3} (W/h - 2), & \text{при } 2 \leq W/h \leq 10. \end{cases}$$

(15)

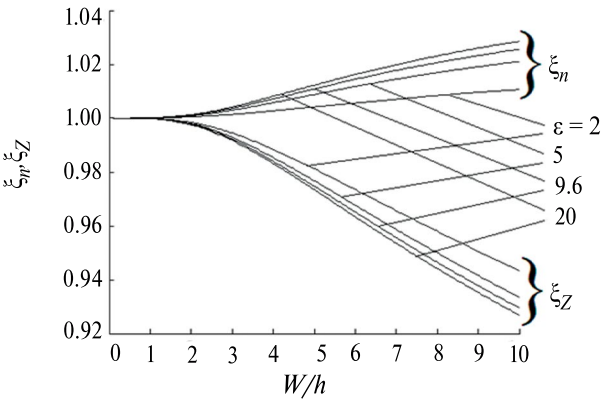


Рис. 2. Графики зависимости коэффициентов ξ_n и ξ_Z от отношения W/h при различных значениях диэлектрической проницаемости подложки ϵ .

Таблица 1. Отношения точных значений $n_T(f)$ и $Z_T(f)$ к их приближенным значениям $n_0(f)$ и $Z_0(f)$ соответственно

W/h	$\xi_n(f) = \frac{n_T(f)}{n_0(f)},$ $\xi_Z(f) = \frac{Z_T(f)}{Z_0(f)}$	ϵ	f_n			
			0.1	5	10	15
2	$\xi_n(f)$	2	1.0005	1.0005	1.0005	1.0005
		9.6	1.0011	1.0014	1.0021	1.0030
		20	1.0013	1.0020	1.0034	1.0049
	$\xi_Z(f)$	2	0.9984	0.9983	0.9981	0.9979
		9.6	0.9977	0.9972	0.9959	0.9937
		20	0.9975	0.9965	0.9938	0.9884
6	$\xi_n(f)$	2	1.0056	1.0060	1.0065	1.0070
		9.6	1.0144	1.0179	1.0214	1.0230
		20	1.0162	1.0223	1.0257	1.0254
	$\xi_Z(f)$	2	0.9734	0.9725	0.9707	0.9683
		9.6	0.9651	0.9624	0.9615	0.9607
		20	0.9633	0.9609	0.9620	0.9560
10	$\xi_n(f)$	2	1.0106	1.0111	1.0120	1.0128
		9.6	1.0256	1.0310	1.0332	1.0322
		20	1.0285	1.0363	1.0358	1.0320
	$\xi_Z(f)$	2	0.9433	0.9416	0.9390	0.9365
		9.6	0.9295	0.9283	0.9336	0.9375
		20	0.9268	0.9297	0.9392	0.9362

Таблица 2. Коэффициенты пропорциональности $\xi_n = n_T(0)/n_0(0)$ и $\xi_Z = Z_T(0)/Z_0(0)$ при различных ε

W/h	ξ_n, ξ_Z	ε					
		2	5	7	9.6	13	20
0.1	ξ_n	1	1	1	1	1	1
	ξ_Z	1	1	1	1	1	1
0.5	ξ_n	1	1	1	1	1	1
	ξ_Z	1	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99997
1	ξ_n	1	1.0001	1.0001	1.0001	1.0001	1.0001
	ξ_Z	0.9999	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
2	ξ_n	1.0005	1.0009	1.0010	1.0011	1.0012	1.0013
	ξ_Z	0.9984	0.9979	0.9978	0.9977	0.9976	0.9975
3	ξ_n	1.0014	1.0029	1.0033	1.0036	1.0039	1.0041
	ξ_Z	0.9944	0.9928	0.9924	0.9921	0.9919	0.9916
4	ξ_n	1.0027	1.0057	1.0065	1.0071	1.0076	1.0081
	ξ_Z	0.9883	0.9853	0.9846	0.9839	0.9835	0.9831
5	ξ_n	1.0042	1.0079	1.0099	1.0108	1.0115	1.0122
	ξ_Z	0.9811	0.9767	0.9755	0.9747	0.9740	0.9734
6	ξ_n	1.0056	1.0117	1.0133	1.0144	1.0153	1.0162
	ξ_Z	0.9734	0.9676	0.9661	0.9651	0.9642	0.9633
7	ξ_n	1.0070	1.0144	1.0163	1.0177	1.0187	1.0198
	ξ_Z	0.9656	0.9586	0.9568	0.9556	0.9546	0.9535
8	ξ_n	1.0084	1.0169	1.0191	1.0206	1.0218	1.0231
	ξ_Z	0.9579	0.9499	0.9479	0.9464	0.9453	0.9441
10	ξ_n	1.0106	1.0211	1.0236	1.0256	1.0270	1.0285
	ξ_Z	0.9433	0.9334	0.9312	0.9295	0.9282	0.9268

Погрешность этих формул не превышает 0.3% при $W/h \leq 10$. Учитывая слабую зависимость ξ_n и ξ_Z от ε , формулы (15) можно использовать в некотором интервале значений ε . При $7 \leq \varepsilon \leq 20$ погрешность (15) не превышает 0.6% для ξ_n и 0.4% для ξ_Z . Погрешность расчета n и Z с использованием формул (15) не превышает 1% при $7 \leq \varepsilon \leq 13$.

Использование аппроксимационных формул существенно упрощает разработку алгоритма расчета дисперсионных характеристик по формулам (2), что позволяет значительно снизить как трудоемкость при создании компьютерной программы, так и временные затраты при проведении расчетов.

Используя численные результаты, представленные в табл. 1 и 2, можно оценить погрешность расчета дисперсионных характеристик по формулам (2) при различных значениях параметров линии. При $W/h \leq 2$ коэффициенты пропорциональности ξ_n и ξ_Z , входящие в формулу (2), с высокой точностью равны единице и дисперсионные характеристики рассчитываются по формулам

$$n(f) \approx n_0(f), Z(f) \approx Z_0(f). \quad (16)$$

Погрешности этих формул δn_0 и δZ_0 определяются следующими выражениями:

$$\delta n_0 = \left(1 - \frac{1}{n_T(f)/n_0(f)} \right) 100\%,$$

$$\delta Z_0 = \left(1 - \frac{1}{Z_T(f)/Z_0(f)} \right) 100\%. \quad (17)$$

Из данных табл. 1 следует, что погрешности δn_0 и δZ_0 при увеличении отношения W/h и ε также увеличиваются и при $\varepsilon = 20$ достигают максимальных значений, которые при $W/h = 2$ равны: $\delta n_0 = 0.5\%$, $|\delta Z_0| = 1.2\%$. При увеличении W/h погрешности увеличиваются и при $W/h = 10$ достигают значений: $\delta n_0 = 3.5\%$, $|\delta Z_0| = 7.9\%$.

При расчете дисперсионных характеристик по формулам (2) их погрешности, определяемые выражениями (14), равны: $\delta n = 0.4\%$, $|\delta Z| = 0.9\%$ при $W/h = 2$ и $\delta n = 0.8\%$, $|\delta Z| = 1.3\%$ при $W/h = 10$.

Таким образом, введение в формулы (16) коэффициентов ξ_n и ξ_Z значительно повышает точность расчета дисперсионных характеристик при $W/h > 2$.

Более детальный анализ зависимости погрешностей δn и δZ от параметров линии позволяет сделать следующие выводы. Погрешность расчета коэффициента замедления не превышает 1.0% ($\delta n \leq 1.0\%$), а волнового сопротивления – 1.5% ($|\delta Z| \leq 1.5\%$) в указанном выше диапазоне изменения параметров линии. Если $\varepsilon \leq 10$, то $|\delta Z| \leq 1.0\%$. При $f_n \leq 5$ погрешность $\delta n \leq 0.75\%$, $|\delta Z| \leq 0.35\%$. При $f_n \leq 1$ погрешности δn и $|\delta Z|$ не превышают 0.1%, а при $f_n \leq 0.1$ соответственно 0.01%.

Для МПЛ с поликоровой подложкой ($\varepsilon = 9.6$) сделанные выводы подтверждаются численными результатами (табл. 3).

Таблица 3. Дисперсионные характеристики и погрешности их расчета для микрополосковой линии с поликоровой подложкой

W/h	$n, Z, \delta n, \delta Z$	f_n						
		0.1	1	3	5	7	10	15
0.1	n	2.4121	2.4139	2.4222	2.4337	2.4470	2.4688	2.5082
	$\delta n, \%$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Z	109.01	108.99	109.05	109.34	109.92	111.45	116.12
	$\delta Z, \%$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	n	2.4811	2.4839	2.4976	2.5161	2.5371	2.5705	2.6268
	$\delta n, \%$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Z	67.23	67.21	67.23	67.44	67.90	69.06	72.36
	$\delta Z, \%$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01
1	n	2.5394	2.5432	2.5614	2.5854	2.6118	2.6523	2.7162
	$\delta n, \%$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03
	Z	49.82	49.80	49.80	49.97	50.35	51.31	53.82
	$\delta Z, \%$	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.03	-0.07

Таблица 3. Окончание

W/h	$n, Z, \delta n, \delta Z$	f_n						
		0.1	1	3	5	7	10	15
2	n	2.6255	2.6310	2.6557	2.6866	2.7184	2.7636	2.8269
	$\delta n, \%$	0.00	0.00	0.01	0.03	0.06	0.10	0.19
	Z	33.93	33.91	33.91	34.07	34.40	35.15	36.89
	$\delta Z, \%$	0.00	0.00	-0.02	-0.05	-0.09	-0.18	-0.40
3	n	2.6865	2.6934	2.7224	2.7564	2.7894	2.8328	2.8882
	$\delta n, \%$	0.00	0.01	0.04	0.10	0.16	0.27	0.44
	Z	25.99	25.97	25.98	26.15	26.46	27.09	28.41
	$\delta Z, \%$	0.00	-0.01	-0.05	-0.13	-0.22	-0.38	-0.74
4	n	2.7319	2.7400	2.7718	2.8066	2.8384	2.8780	2.9259
	$\delta n, \%$	0.00	0.01	0.08	0.18	0.29	0.45	0.66
	Z	21.14	21.12	21.15	21.32	21.60	22.14	23.17
	$\delta Z, \%$	0.00	-0.01	-0.09	-0.20	-0.32	-0.48	-0.83
5	n	2.7671	2.7760	2.8094	2.8439	2.8738	2.9097	2.9516
	$\delta n, \%$	0.00	0.02	0.13	0.27	0.41	0.59	0.79
	Z	17.85	17.84	17.88	18.05	18.30	18.75	19.56
	$\delta Z, \%$	0.00	-0.03	-0.13	-0.26	-0.36	-0.48	-0.72
6	n	2.7953	2.8050	2.8395	2.8730	2.9009	2.9335	2.9715
	$\delta n, \%$	0.00	0.03	0.16	0.34	0.50	0.68	0.84
	Z	15.47	15.45	15.50	15.67	15.89	16.27	16.92
	$\delta Z, \%$	0.00	-0.04	-0.17	-0.28	-0.34	-0.37	-0.45
7	n	2.8184	2.8288	2.8637	2.8959	2.9219	2.9520	2.9875
	$\delta n, \%$	0.00	0.04	0.21	0.40	0.57	0.74	0.83
	Z	13.65	13.64	13.70	13.85	14.05	14.36	14.90
	$\delta Z, \%$	0.00	-0.04	-0.18	-0.27	-0.27	-0.20	-0.15
8	n	2.8378	2.8488	2.8838	2.9146	2.9390	2.9673	3.0009
	$\delta n, \%$	0.00	0.05	0.25	0.46	0.62	0.76	0.79
	Z	12.23	12.23	12.28	12.42	12.59	12.86	13.31
	$\delta Z, \%$	0.00	-0.05	-0.18	-0.23	-0.17	-0.01	0.21
10	n	2.8687	2.8806	2.9151	2.9434	2.9655	2.9912	3.0228
	$\delta n, \%$	0.00	0.06	0.31	0.52	0.66	0.74	0.64
	Z	10.12	10.12	10.18	10.30	10.43	10.63	10.98
	$\delta Z, \%$	0.00	-0.06	-0.18	-0.13	0.06	0.44	0.86

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные в данной статье формулы (2), в которых использована квазистатическая модель МПЛ, существенно расширяют границы применимости сверхбыстродействующей модели МПЛ с узким полосковым проводником, разработанной в [2]. Представленные расчетные соотношения позволяют быстро и с высокой точностью путем компьютерного моделирования рассчитать

дисперсионные характеристики МПЛ в широком диапазоне изменения размеров линии, диэлектрической проницаемости подложки и частоты. При этом разработка компьютерной программы не требует высоких трудозатрат. Предложенный подход к расчету дисперсионных характеристик можно распространить на другие типы полосковых линий.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко А.Н. // РЭ. 2019. Т. 64. № 2. С. 108.
2. Коваленко А.Н., Ярлыков А.Д. // Рос. технол. журн. 2021. Т. 9. № 4. С. 68.
<https://www.rtf-mirea.ru/jour/article/view/345/277>.
3. Коваленко А.Н., Ярлыков А.Д. // РЭ. 2022. Т. 67. № 11. С. 1096.
4. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Физматгиз, 1963.

TO THE CALCULATION OF DISPERSION CHARACTERISTICS OF A SHIELDED MICROSTRIP LINE

A. N. Kovalenko, A. D. Yarlykov*

*MIREA – Russian Technological University,
78 Vernadsky Avenue, Moscow, 119454 Russia*

**E-mail: yarlykov@mirea.ru*

Received September 20, 2023, revised September 20, 2023, accepted 27 October 2023

Simple formulas are proposed that make it possible to calculate the dispersion characteristics of a microstrip line quickly and with high enough accuracy. The analytical expressions from which the deceleration coefficient and the wave resistance of the line are determined are presented in the form of rapidly converging series. The error in calculating the dispersion characteristics in a wide range of changes in the geometric and physical parameters of the line is investigated. The values of the parameters at which the error does not exceed 1% are determined.

Keywords: microstrip line, dispersion characteristics, deceleration coefficient, wave resistance, quasi-static approximation