

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ МЕТОДОМ ПРОДОЛЬНОГО РАЗБИЕНИЯ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА

А.Ж. Абденов, А.С. Мальцев, М.Г. Рубанович

Полосковые линии передачи являются отличительной особенностью интегральных гибридно-пленочных микросхем. Такая линия представляет собой проводящую пленку, напыленную на диэлектрик с металлизированным основанием. Потребность в расчетах индуктивности полосковых линий очень высока. Предлагается способ расчета индуктивности полосковой линии методом продольного разбиения [1] и оценка погрешности данного метода.

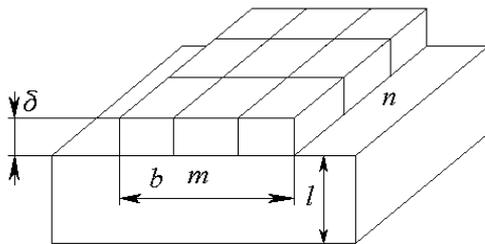


Рисунок 1 – Отрезок полосковой линии

Процедуру расчета индуктивности при весьма высокой частоте можно представить следующим образом:

1) разделение отрезка линии в поперечном сечении на m полос (рисунок 1), определение собственной индуктивности каждой полосы

$$L_k = \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ \frac{(2l \cdot m)^2}{b^2} \ln \frac{2l}{\sqrt{(2l)^2 + \left(\frac{b}{m}\right)^2}} + \ln \frac{r}{0.223 \left(\frac{b}{m} + \delta\right)} + \frac{2l \cdot m}{b} \cdot \varphi - \frac{3}{2} \right\} \quad (1)$$

где: $\varphi = 2 \arctan \frac{b}{l \cdot m}$; $r = 2 \sqrt{\left(\frac{b}{m}\right)^2 + (2 \cdot l)^2}$;

2) определение величины взаимной индуктивности между полосами по формуле

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{g_{ad}}{g_{ac}}, \quad (2)$$

где $\ln g_{ac} = \ln \frac{b \cdot k}{m} + \frac{1}{2} \cdot (k+1)^2 \ln \left(\frac{1}{k} + 1\right) + \frac{1}{2} \cdot (k-1)^2 \ln \left(1 - \frac{1}{k}\right) - \frac{3}{2}$,

$$\ln g_{ad} = m^2 \cdot \frac{A1 - A2}{b^2},$$

$$A1 = l^2 \ln \frac{r_1^2}{r_2 \cdot r_3} - \frac{1}{2} (2r_1^2 \ln r_1 - r_2^2 \ln r_2 - r_3^2 \ln r_3),$$

$$A2 = l \left[\left(\frac{b \cdot k}{m} + \frac{b}{m}\right) (\varphi_1 + \varphi_2) - \frac{b \cdot k \cdot \varphi_3}{m} - \left(\frac{b \cdot k}{m} + \frac{2b}{m}\right) \cdot \varphi_4 \right] \frac{3 \cdot b^2}{2 \cdot m^2},$$

$$r_1 = \sqrt{l^2 + \left(\frac{b(k+1)}{m}\right)^2}; \quad r_2 = \sqrt{l^2 + \left(\frac{b \cdot k}{m}\right)^2}; \quad r_3 = \sqrt{l^2 + \left(\frac{b(k+2)}{m}\right)^2}.$$

Основные параметры приведенных формул соответствуют обозначениям на рисунке 2. Значения углов $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ определяется в соответствии с рисунком 3.

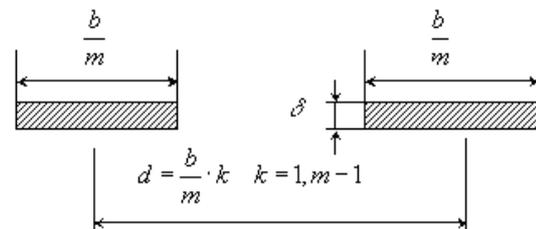


Рисунок 2 – Пояснение к обозначениям

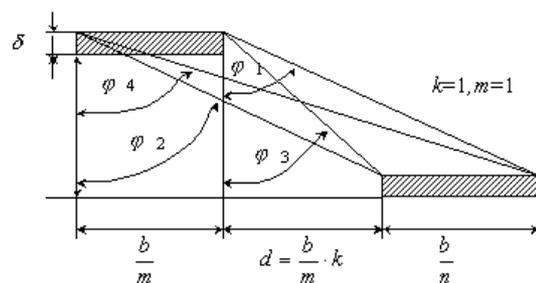


Рисунок 3 – Пояснение к расчету углов

3) индуктивности всей линии вычисляется по формуле

$$L_S = \frac{1}{\sum_{q=1}^m \sum_{p=1}^m L_{pq}^{-1}}, \quad (3)$$

где L_S - собственная индуктивность всей линии, L_{pp} - собственная индуктивность полосы p , L_{pq} - взаимная индуктивность между полосами p и q .

Очевидно, что погрешность метода зависит от числа интервалов продольного разбиения. Для исследования этой зависимости значения индуктивности, рассчитанные по представленной выше процедуре на интервале изменения параметра $b = [b_0, b_N]$, сравниваются с решениями кусочно-линейной дифференциальной модели [2]:

$$\frac{d}{db} L(b) = a_1 L(b) + a_2, \quad L(b_0) = L_0, \quad (4)$$

$$y(b_k) = L(b_k) + v(b_k), \quad k = \overline{1, N}, \quad (5)$$

где b_0 - начальное значение интервала изменения параметра b , L_0 - начальное значение индуктивности, a_1 и a_2 - неизвестные параметры дифференциальной модели, $y(b_k)$ - известный вектор измерений размера N , $v(b_k)$ - случайная погрешность измерений (предполагается $v \sim N(0, R)$).

Оценки параметров дифференциальной модели $\{\hat{a}_1 = -0.36878, \hat{a}_2 = 14.570\}$ найдены на основании экспериментальных данных с применением алгоритма регуляризирующего сплайна; численного нахождения производных и использования стандартного соотношения метода наименьших квадратов. Экспериментальные данные получены на приборе "Измеритель L,C,R цифровой Е 7-12" для отрезка линии с высотой металлизации 0.05мм, шириной диэлектрика 2.5 мм для ширины линии $b = [1.4 \quad 5.8]$ мм.

Зависимость погрешности расчета по описанному выше методу от числа интервалов продольного разбиения представлена в таблице 1 и на рисунке 4.

Таблица 1 – Зависимость погрешности расчета от числа продольных разбиений

Число разбиений	Погрешность не более, %
3	6
5	4.3
8	3.4
9	3.2
10	3.2
11	3.3
12	3.4
15	3.6
20	3.7
30	3.9

Таким образом, наименьшая погрешность метода наблюдается при 10 интервалах разбиения. Небольшое увеличение погрешности при дальнейшем увеличении числа интервалов разбиения можно объяснить накоплением ошибок приближенных формул (1) и (2).

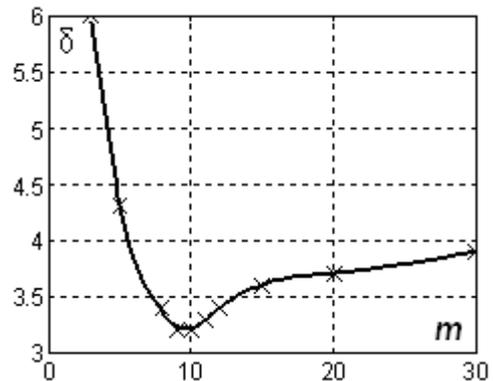


Рисунок 4 – Зависимость погрешности метода ($\delta, \%$) от числа продольных разбиений (m)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рубанович М.Г., Разинкин В.П., Востряков Ю.В., Хрусталёв В.А., Абденов А.Ж. Матричный метод расчёта индуктивных параметров эквивалентной схемы плёночного резистора. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. Санкт-Петербург (в печати).
2. Эйхофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975.