

Секция 2

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

УДК 621.3

Л.К. БОЛАТОВА, магистрант, ТУСУР, Томск

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА ДЛЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НЕРЕГУЛЯРНОЙ СБАЛАНСИРОВАННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЛИНИИ В ВОЗДУХЕ

Рассматривается математическая модель для анализа дифференциальной линии. Разработан алгоритм для квазистатического анализа нерегулярной сбалансированной дифференциальной линии в воздухе. По этому алгоритму произведены вычисления и представлены его результаты. Выполнена их оценка и сделаны выводы.

Проектирование аппаратуры с дифференциальными парами является одним из наиболее перспективных направлений в развитии цифровой техники. Устройства на основе дифференциальной передачи сигналов отличаются высокими показателями по быстродействию, параметрам электромагнитной совместимости и целостности сигнала. В этой связи важна точность при изготовлении цепей дифференциальной линии (ДЛ). Зачастую на реальные ДЛ могут влиять незначительные асимметрии и нерегулярности, влияние которых может существенно ухудшить ожидаемую работу. Для учета возникающих асимметрий и нерегулярностей необходимы эффективные математические модели и алгоритмы на их основе, для программной реализации.

Предложена новая математическая модель для квазистатического анализа ДЛ, в которой учтены как асимметрии, так и нерегулярности [1]. На основе этой модели разработаны алгоритм и программа для эталонной ДЛ, без асимметрии и нерегулярности [2], и для регулярной разбалансированной ДЛ [3]. Однако осталась невыполненной аналогичная работа для структуры сбалансированной, но подвергшейся нерегулярности

путем горизонтального вращения второго провода вокруг его середины (рисунок 1).

Цель работы – разработать алгоритм для квазистатического анализа нерегулярной сбалансированной ДЛ в воздухе на основе модели из [1].

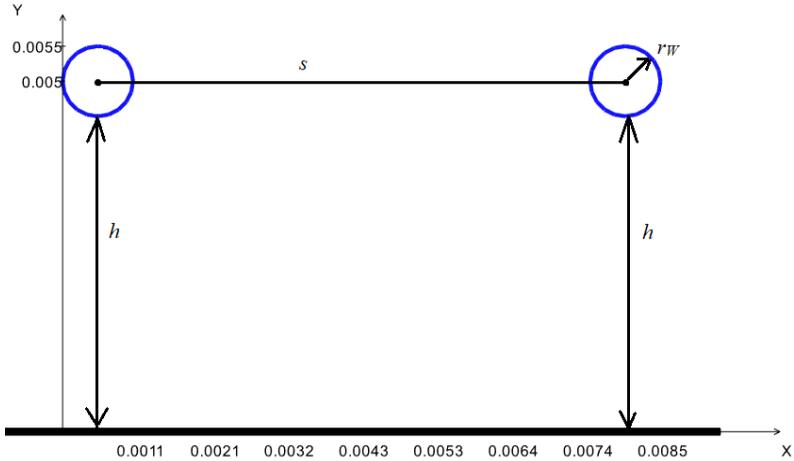


Рисунок 1. Поперечное сечение анализируемой дифференциальной линии

Алгоритм:

1. Вычисление текущего расстояния между проводами

$$d(z) = s + \Delta d(z), \quad (1)$$

$$\Delta d(z) = \Delta s \left(\frac{2z}{L} - 1 \right), \quad (2)$$

где s – исходное расстояние между проводами; L – длина проводов; Δs – значение сдвига расстояния между проводами.

2. Вычисление погонных индуктивностей, которые записываются как возмущение тех, что относятся к эталонной структуре:

$$l_m(z) = \tilde{l}_m + \Delta l_m(z), \quad (3)$$

где

$$\tilde{l}_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2h}{s} \right), \quad (4)$$

$$\Delta l_m(z) \approx -\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{\Delta s}{s} \left(\frac{2z}{L} - 1 \right) \right]. \quad (5)$$

3. Вычисление матрицы возмущений

$$\Delta L_m(z) = \begin{bmatrix} \Delta l_{CM}(z) & 0 \\ 0 & \Delta l_{DM}(z) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где

$$\Delta l_{DM}(z) \approx -\frac{2\mu_0}{\pi} \frac{\Delta s}{sL} \left(\frac{L}{2} - z \right), \quad (7)$$

$$\Delta l_{CM}(z) \approx -\frac{1}{4} \Delta l_{DM}(z). \quad (8)$$

4. Вычисление модальной матрицы погонных индуктивностей

$$L_m(z) = \tilde{L}_m + \Delta L_m(z) = \begin{bmatrix} \tilde{l}_{CM} & 0 \\ 0 & \tilde{l}_{DM} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta l_{CM}(z) & 0 \\ 0 & \Delta l_{DM}(z) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где

$$\Delta l_{CM}(z) \approx -\frac{1}{4} \Delta l_{DM}(z), \quad (10)$$

$$\Delta l_{DM}(z) \approx -\frac{2\mu_0}{\pi} \frac{\Delta s}{sL} \left(\frac{L}{2} - z \right). \quad (11)$$

5. Аналогично вычисляется матрица модальных погонных емкостей

$$C_m = \tilde{C}_m + \Delta C_m(z) = \begin{bmatrix} \tilde{c}_{CM} & 0 \\ 0 & \tilde{c}_{DM} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta c_{CM}(z) & 0 \\ 0 & \Delta c_{DM}(z) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где

$$\Delta c_{DM}(z) = -\frac{\Delta l_{DM}(z)}{\tilde{Z}_{DM}^2}, \quad (13)$$

$$\Delta c(z) = -\frac{\Delta l_m(z)}{\tilde{Z}_{DM}^2}, \quad (14)$$

$$\tilde{Z}_{DM} = c_0 \tilde{l}_{DM}, \quad (15)$$

где c_0 – скорость света.

6. Вычисление напряжения ДМ на левом окончании нерегулярной ДЛ

$$V_{DM}(z) \approx \tilde{V}_{DM}(z) + V_{\Delta T, DM}, \quad (16)$$

где

$$V_{\Delta T, DM} = \frac{\eta_0}{\pi} \frac{\Delta s}{s} \left[\cosh(\gamma_0 L) - \frac{\sinh(\gamma_0 L)}{\gamma_0 L} \right] \tilde{I}_{DM}(0), \quad (17)$$

$$\tilde{I}_{DM}(0) = V_S / (2\tilde{Z}_{DM}), \quad (18)$$

$$\eta_0 = \mu_0 c_0, \quad (19)$$

$$\tilde{V}_{DM}(z) = \frac{V_S}{2} e^{-\gamma_0 z}. \quad (20)$$

На основе математической модели [1] и работы [2] разработан алгоритм, который реализован в MathCad. Исходные данные для его тестирования взяты из работы [1]: $r_W = 0,5$ мм, $s = 5$ мм, $h = 50$ мм, $\Delta s_1 = 0,5$ мм, $\Delta s_2 = 1$ мм, $\Delta s_3 = 3$ мм, $V_S = 1$ В. По разработанному алгоритму выполнены вычисления, на основе которых построена частотная зависимость напряжения для ДМ на конце ДЛ. Их сравнение с опубликованными в [1] показывает хорошее совпадение (рисунок 2).

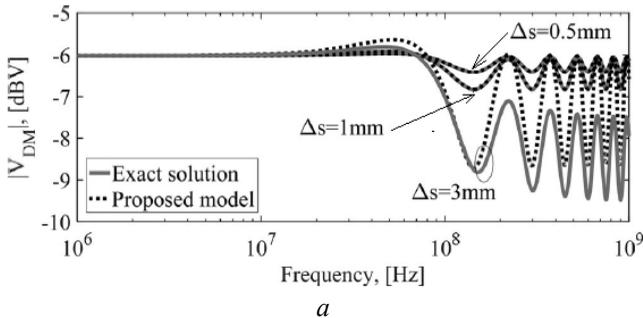


Рисунок 2. Частотные зависимости ДМ на конце ДЛ из [1] (а) и по разработанному алгоритму (б) для $\Delta s = 3$ (---), 1 (-·-·-), 0,5 (—) мм (начало, окончание см. на с. 134)

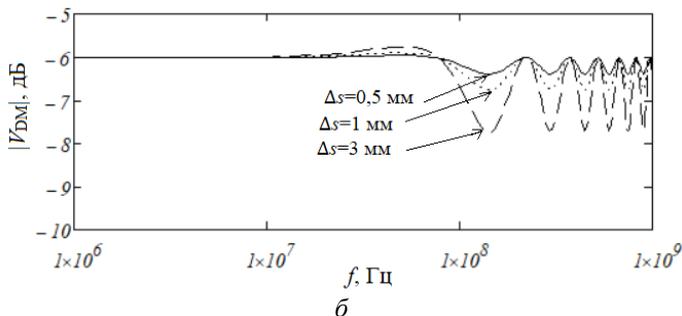


Рисунок 2. Окончание (начало см. на с. 133)

Таким образом, разработанный алгоритм можно реализовать в программных продуктах, например в системе TALGAT, для оценки влияния нерегулярности в ДЛ с минимальными затратами для вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Effects of undesired asymmetries and nonuniformities in differential lines / F. Grassi, P. Manfredi, X. Liu, J. Sun, X. Wu, D.V. Ginste, S.A. Pignari // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. October 2017. Vol. 59, No 5. P. 1613–1624.

2. Болатова Л.К. Разработка алгоритма и программы для квазистатического анализа согласованной дифференциальной линии в воздухе // 23-я Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». Томск, 16–18 мая 2018 г. Т. 2. С. 238–240.

3. Болатова Л.К. Алгоритм и программа для квазистатического анализа регулярной разбалансированной дифференциальной линии в воздухе // Материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления» Томск, Россия, 28–30 ноября, 2018, в печати.

L.K. Bolatova

Algorithm and program for quasistatic analysis of nonuniform balanced differential line in air

The mathematical model for the analysis of the differential line is considered. An algorithm for quasistatic analysis of nonuniform balanced differential line in air has been developed. According to this algorithm, calculations are made and its results are presented. Their evaluation and conclusions were made.

lai_95@bk.ru