

## Секция 13

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Председатель секции – Газизов Тальгат Рашитович, д.т.н., зав. каф. ТУ

УДК 621.3

Л.К. Болатова

### Алгоритм и программа для квазистатического анализа регулярной разбалансированной дифференциальной линии в воздухе

Рассматривается математическая модель дифференциальной линии. Разработан алгоритм для квазистатического анализа регулярной разбалансированной дифференциальной линии в воздухе. Выполнено вычисление по предложенному алгоритму и представлены его результаты. Произведена оценка полученных результатов и сделаны соответствующие выводы.

**Ключевые слова:** дифференциальная линия, дифференциальная мода, синфазная мода, регулярность, разбалансировка.

Проектирование аппаратуры с дифференциальными парами ведется с середины 90-х гг., однако существующие методики проектирования не всегда оказываются эффективными. В целях обеспечения целостности сигнала на стадии проектирования необходим анализ влияния конструкторско-технологических параметров. Поэтому преимущества дифференциальной передачи сигнала раскрываются в полном объеме только при правильном проектировании и качественном изготовлении электронных модулей с дифференциальными парами. Поскольку на реальные дифференциальные линии (ДЛ) влияют незначительные асимметрии и нерегулярности, для более качественного проектирования ДЛ необходимо учитывать влияние нежелательных асимметрий и нерегулярностей. Для этого важна разработка эффективных математических моделей и алгоритмов на их основе для программной реализации.

Предложена математическая модель, в которой рассматривается ДЛ с учетом асимметрии и нерегулярности [1]. На ее основе разработаны алгоритм и программа для эталонной ДЛ без асимметрии и нерегулярности [2]. Структура, рассматриваемая в данной работе, является регулярной, но разбалансированной. Она получается как возмущение эталонной ДЛ путем небольшого изменения высоты проводов относительно их номинальной высоты  $h$ . Для разработки алгоритма подходят исходные данные из работы [2].

Цель работы – разработать алгоритм для квазистатического анализа регулярной разбалансированной ДЛ в воздухе.

Алгоритм:

1. Ввод новых значений высоты проводов.

$$h_1 = h - \Delta h, \quad (1)$$

$$h_2 = h + \Delta h, \quad (2)$$

где  $h_1$  – высота, на которой расположен первый провод,  $h$  – номинальная высота проводов,  $\Delta h$  – значение сдвига высоты,  $h_2$  – высота, на которой расположен второй провод.

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

$$l_{1,2} = \tilde{l} + \Delta l_{1,2}, \quad (3)$$

$$l_m = \tilde{l}_m + \Delta l_m, \quad (4)$$

где

$$\Delta l_{1,2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( 1 \mp \frac{\Delta h}{h} \right), \quad (5)$$

$$\tilde{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{2h}{r_w} \right), \quad (6)$$

$$\Delta l_m \approx -\frac{\mu_0}{4\pi} \ln \left( 1 + \frac{\Delta d^2}{s^2} \right), \quad (7)$$

$$\tilde{l}_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{2h}{s} \right), \quad (8)$$

$$\Delta d = 2\Delta h, \quad (9)$$

при выполнении условия  $\Delta h^2 \ll h^2$ .

3. Вычисление матрицы модальных погонных индуктивностей

$$L_m = \tilde{L}_m + \Delta L_m = \begin{bmatrix} \tilde{l}_{CM} & 0 \\ 0 & \tilde{l}_{DM} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta l_{CM} & \\ & \Delta l_{DM} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где

$$\Delta l_{DM} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{\Delta d^2}{s^2} \right), \quad (11)$$

$$\Delta l_{CM} \approx -\frac{1}{4} \Delta l_{DM}, \quad (12)$$

$$\Delta l \approx -\frac{\mu_0}{4\pi} \ln\left(1 + \frac{2\Delta h}{h}\right) \approx -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\Delta h}{h}. \quad (13)$$

4. Аналогичным образом вычисляется матрица модальных погонных емкостей

$$C_m = \tilde{C}_m + \Delta C_m = \begin{bmatrix} \tilde{c}_{CM} & 0 \\ 0 & \tilde{c}_{DM} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta c_{CM} & \Delta c \\ \Delta c & \Delta c_{DM} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где, при соблюдении условия  $\Delta l^2 \ll l_{CM} l_{DM}$ ,

$$\Delta c_{DM} = -\frac{\Delta l_{DM} / \tilde{Z}_{DM}^2}{1 + \Delta l_{DM} / \tilde{l}_{DM}}, \quad (15)$$

$$\Delta c_{CM} = -\frac{\Delta l_{CM} / \tilde{Z}_{CM}^2}{1 + \Delta l_{CM} / \tilde{l}_{CM}}, \quad (16)$$

$$\Delta c = -\frac{\Delta l}{\tilde{Z}_{CM} \tilde{Z}_{DM}}, \quad (17)$$

где  $\tilde{l}_{DM}$ ,  $\tilde{l}_{CM}$ ,  $\tilde{c}_{DM}$ ,  $\tilde{c}_{CM}$  взяты из работы [2].

5. Вычисление значения сопротивлений на концах ДЛ для дифференциальной моды (ДМ) и синфазной моды (СМ) как

$$\tilde{Z}_{DM} = c_0 \tilde{l}_{DM}, \quad (18)$$

$$\tilde{Z}_{CM} = c_0 \tilde{l}_{CM}, \quad (19)$$

где  $c_0$  – скорость света в вакууме, а  $\tilde{l}_{DM}$  и  $\tilde{l}_{CM}$  взяты из работы [2].

6. Вычисление напряжения и тока ДМ регулярной разбалансированной ДЛ

$$V_{DM}(z) \approx \tilde{V}_{DM}(z) + V_{\Delta T, DM}(z), \quad (20)$$

$$I_{DM}(z) \approx \tilde{I}_{DM}(z) + I_{\Delta T, DM}(z), \quad (21)$$

где

$$\tilde{V}_{DM}(z) = \frac{V_S}{2} e^{-\gamma_0 z}, \quad (22)$$

$$V_{\Delta T, DM} = -\frac{\eta_0}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{\Delta d^2}{s^2}\right) \sinh(\gamma_0 L) \tilde{I}_{DM}(0), \quad (23)$$

$$\tilde{I}_{DM}(z) = \frac{V_S}{2\tilde{Z}_{DM}} e^{-\gamma_0 z}, \quad (24)$$

$$I_{\Delta T, DM}(z) = \frac{-V_{\Delta T, DM}}{\tilde{Z}_{DM}}, \quad (25)$$

$$\tilde{I}_{DM}(0) = V_S / (2\tilde{Z}_{DM}), \quad (26)$$

$$\eta_0 = \mu_0 c_0. \quad (27)$$

7. Вычисление напряжения и тока СМ на конце ДЛ

$$V_{\Delta T, CM} \approx \frac{\eta_0}{4\pi} \ln\left(1 + \frac{2\Delta h}{h}\right) \sinh(\gamma_0 L) \tilde{I}_{DM}(0), \quad (28)$$

$$I_{\Delta T, CM} \approx -\frac{\eta_0}{4\pi} \ln\left(1 + \frac{2\Delta h}{h}\right) \sinh(\gamma_0 L) \frac{V_{DM}(0)}{\tilde{Z}_{CM} \tilde{Z}_{DM}}, \quad (29)$$

где значение  $\tilde{I}_{DM}(0)$  взято из формулы (26), а  $V_{DM}(0)$  из формулы (20).

На основе математической модели [1] и работы [2] разработан алгоритм, который реализован в MathCad. Исходные данные для реализации алгорит-

ма взяты из работы [1]:  $r_W = 0,5$  мм,  $s = 5$  мм,  $h = 50$  мм,  $\Delta h_1 = 0,5$  мм,  $\Delta h_2 = 1$  мм,  $\Delta h_3 = 2,5$  мм,  $V_S = 1$  В.

На рис. 1 представлено поперечное сечение регулярной разбалансированной ДЛ, где  $r_W$  – радиус проводов;  $s$  – расстояние между проводами;  $h_1$  – высота, на которой расположен первый провод;  $h_2$  – высота, на которой расположен второй провод.

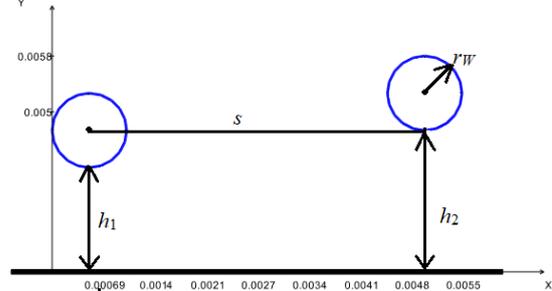


Рис. 1. Поперечное сечение анализируемой ДЛ

По разработанному алгоритму выполнены вычисления, на основе которых построены частотные зависимости напряжений для ДМ и СМ на конце ДЛ. Их сравнение с опубликованными в [1] показывает хорошее совпадение (рис. 2).

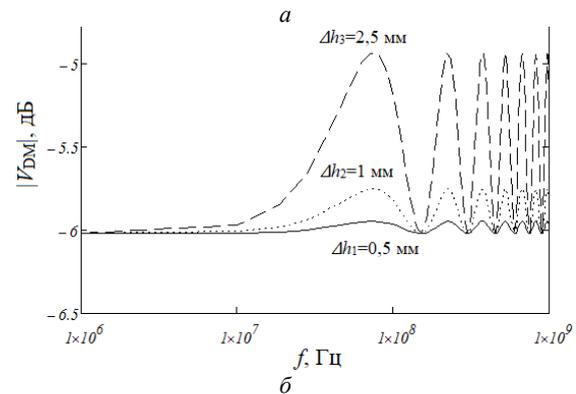
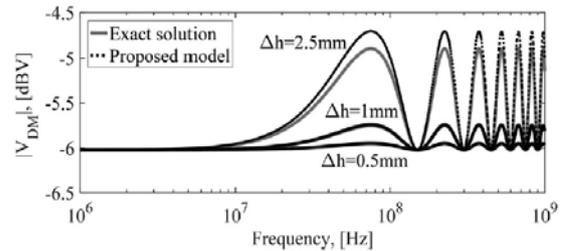


Рис. 2. Частотные зависимости ДМ на конце ДЛ из [1] (а) и по разработанному алгоритму (б) для  $\Delta h = 2,5$  (пунктирные кривые);  $\Delta h = 1$  (пунктирно-точечные кривые);  $\Delta h = 0,5$  (сплошные кривые) мм

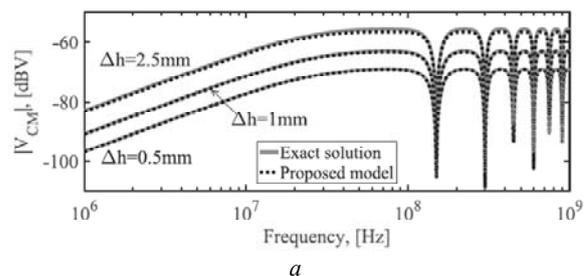


Рис. 3 (начало)

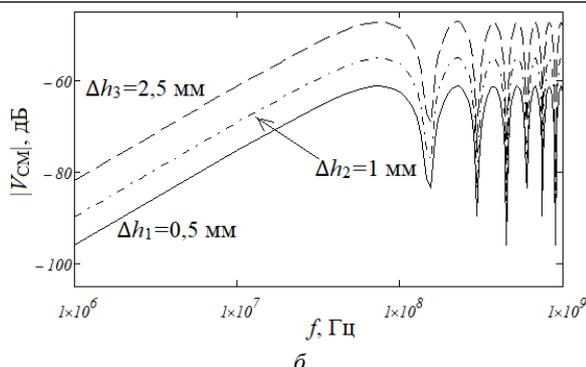


Рис. 3. (окончание). Частотные зависимости СМ на конце ДЛ из [1] (а) и по разработанному алгоритму (б) для  $\Delta h = 2,5$  (пунктирные кривые),  $\Delta h = 1$  (пунктирно-точечные кривые),  $\Delta h = 0,5$  (сплошные кривые) мм

Аналогичные сравнения выполнены и для СМ (рис. 3). Как видно, отличаются минимальные значения напряжений в диапазоне частот от  $10^7$  до  $10^9$  Гц. Такое различие объясним разными вычислительными погрешностями при получении малых значений.

Таким образом, полученный алгоритм целесообразно реализовать в программных продуктах, таких как система TALGAT, для оценки влияния разбалансировки в ДЛ с меньшими вычислительными затратами.

#### Литература

1. Grassi F. Effects of undesired asymmetries and non-uniformities in differential lines / F. Grassi, P. Manfredi, X. Liu et al. // 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–2018». Томск, 16–18 мая 2018 г. – Т. 2. – С. 238–240.

Болатова Ляйла Кайратовна  
Магистрант каф. ТУ ТУСУРа  
Эл. почта: lai\_95@bk.ru

УДК 621.391.825

Е.Б. Черникова, А.О. Белоусов

## Особенности модальных фильтров на основе зеркально-симметричных структур

Выполнен анализ двух-, четырех- и шестипроводных зеркально-симметричных структур. Представлены особенности структур с зеркальной симметрией, характеризующие их геометрию и свойства.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, сверхкороткий импульс, модальный фильтр, зеркальная симметрия.

В настоящее время наблюдается массовое внедрение радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) практически во все отрасли жизнедеятельности человека. Как результат возникает необходимость решения задачи защиты РЭА от электромагнитных помех. Для защиты РЭА от сверхкороткого импульса (СКИ) предложена технология модальной фильтрации, основанная на явлении модального разложения импульса на импульсы меньшей амплитуды [1].

Предложен новый подход к совершенствованию модальной фильтрации за счет зеркально-симметричного модального фильтра (МФ) [2]. Рассмотрена четырехпроводная зеркально-симметричная структура. Выполнена ее оптимизация по трем критериям для сигнала на выходе [3]. Также проведен вычислительный эксперимент для подтверждения достоверности результатов, а именно проведено сравнение квазистатического и электродинамического анализа зеркально-симметричного МФ при воздействии СКИ, без учета и с учетом потерь в проводниках и диэлектриках [4].

Однако необходимо более детально исследовать свойства модальных фильтров на основе зеркально-симметричных структур. Таким образом, цель данной работы – выполнить такое исследование.

### Поперечные сечения зеркально-симметричных структур

Зеркальная симметрия – это отображение пространства на себя, при котором любая точка переходит в симметричную ей точку относительно плоскости. Зеркально симметричным считается объект, состоящий из двух половинок, которые являются зеркальными двойниками по отношению друг к другу [5].

Из данного определения ясно, что зеркально-симметричной структурой можно называть структуру, в которой: проводники и диэлектрики зеркально повторяют друг друга; в зеркально-симметричной структуре проводники находятся на одинаковом расстоянии в одной плоскости относительно оси симметрии; количество проводников (помимо опорного) является четным и одинаковым по количеству относительно земли.