

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ С БОКОВЫМИ  
ЗАЗЕМЛЕННЫМИ ПРОВОДНИКАМИ  
У ГРАНИЦЫ ВОЗДУХ–ПОДЛОЖКА**

*И.Е. Сагиева, аспирант*

*г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, [indira\\_sagieva@mail.ru](mailto:indira_sagieva@mail.ru)*

Печатные платы (ПП) в том или ином виде являются основой большинства электронных средств и приборов. Расположение печатных проводников на ПП играет решающую роль для получения стабильных значений характеристик линии передачи, таких как погонная задержка ( $\tau$ ) и волновое сопротивление ( $Z$ ). В связи с этим исследование этих характеристик актуальны.

Одной из основных линий, реализуемых на ПП, является микрополосковая линия (МПЛ) [1]. Важной задачей является получение стабильных характеристик линий. В этой связи актуальна минимизация чувствительности характеристик линий к изменению их параметров. Между тем возможности такой минимизации ограничены простотой конструкции классической МПЛ. Поэтому предметом повышенного интереса становятся различные модификации МПЛ, например подвешенная и обращенная полосковые линии, позволяющие получить нулевую чувствительность погонной задержки и волнового сопротивления к изменению толщины диэлектрических слоев [2]. В многослойных печатных платах используются разновидности МПЛ, например МПЛ с полигонами на различных слоях, позволяющая получить стабильное значение погонной задержки [3]. Подобная закономерность обнаружена в МПЛ с боковыми заземленными проводниками сверху [4] и углубленными в подложку [5]. Возможность минимизации чувствительности появляется за счет перераспределения электрического поля в слоях воздуха и подложки. Также выявлено, что боковые заземленные проводники оказывают особое влияние вблизи границы раздела двух сред. В связи с этим полезно более детальное исследование характеристик  $\tau$  и  $Z$  МПЛ с заземленными боковыми проводниками, расположенными у границы воздух–подложка.

Цель работы – исследовать зависимости  $\tau$  и  $Z$  МПЛ от расположения боковых заземленных проводников, в частности, непосредственной близости от границы воздух–подложка.

Для достижения указанной цели исследованы три вида МПЛ (рис. 1). Строгий электродинамический анализ полей в исследуемых линиях довольно сложен. Параметры заполняющей среды в линиях неоднородны по сечению, так что лишь часть поля концентрируется в

диэлектрической подложке, а остальная – в воздухе. Поэтому в линиях распространяется не чистая ТЕМ-мода, а квази-ТЕМ. Тем не менее для таких линий применяют квазистатический анализ на основе вычисления погонной ёмкости.

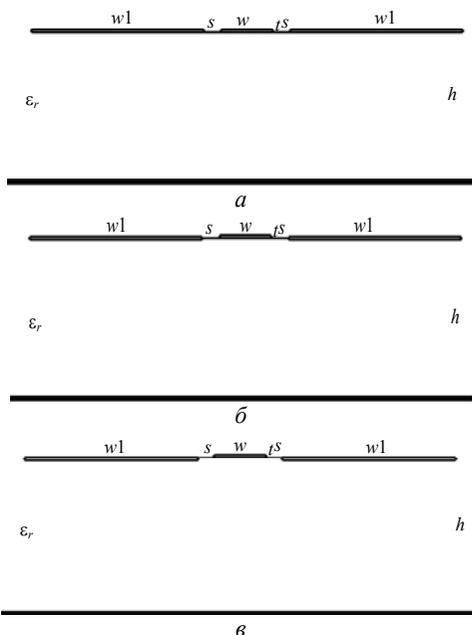


Рис. 1. Поперечное сечение МПЛ с боковыми заземленными проводниками, над (а), посреди (б) и под (в) границей воздух–подложка

В системе TALGAT построены геометрические модели поперечного сечения линии (см. рис. 1) и методом моментов вычислены матрицы (порядка  $3 \times 3$ ) погонных коэффициентов электростатической индукции с учетом диэлектрика и без него. Значения ряда параметров выбраны типовыми и не менялись: толщина сигнального и заземленных проводников  $t = 18$  мкм, толщина подложки  $h = 1$  мм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r = 4,5$ . Из матриц брались значения (обозначаемые далее  $C$  и  $C_0$ ) диагонального элемента, соответствующего сигнальному проводнику, и вычислялись значения  $\tau$  и  $Z$  ( $v_0$  – скорость света в вакууме):

$$\tau = (C/C_0)^{0,5}/v_0, \quad Z = 1/(v_0(CC_0)^{0,5}).$$

Выполнены вычисления при изменении разнота проводников  $s$  (рис. 2). При увеличении  $s$  значения  $\tau$  и  $Z$  плавно увеличиваются. Однако изменение  $\tau$  гораздо меньше. Углубление заземленных провод-

ников уменьшает чувствительность  $\tau$  к изменению  $s$ . Изменение  $\tau$  во всем диапазоне  $s$  менее 2%. Можно предположить, что при определенных параметрах МПЛ чувствительность может быть снижена до нуля. Тем самым появляется возможность выбором параметров линии получить требуемое значение  $Z$  при минимальной чувствительности  $\tau$  к изменению  $s$ .

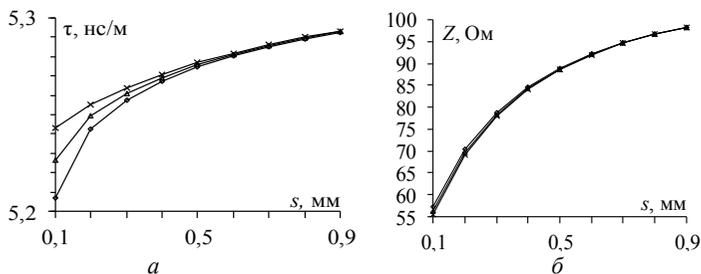


Рис. 2. Зависимости  $\tau$  ( $a$ ) и  $Z$  ( $\bar{b}$ ) от  $s$  для рис. 1  $a$  ( $\diamond$ );  $\bar{b}$  ( $\Delta$ ),  $\epsilon$  ( $\times$ )

Таким образом, в работе исследованы характеристики МПЛ с боковыми заземленными проводниками у границы воздух–подложка и показана возможность минимизации чувствительности погонной задержки к разнесу проводников при расположении в непосредственной близости от границы воздух–подложка. Результаты работы могут быть использованы для проектирования линий передачи со стабильной задержкой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Maloratsky L.G. Using modified microstrip lines to improve circuit performance // High Frequency Electronics. – 2011. – Vol. 10, No. 5. – P. 38–52.
2. Газизов Т.Р. Характеристики подвешенной и обращенной полосковых линий // Известия вузов. Физика. – 1995. – Т. 39, №2. – С. 126–128.
3. Gazizov T.R., Salov V.K., Kuksenko S.P. Stable delay of microstrip line with side grounded conductors // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2017. – P. 1–5.
4. Сагиева И.Е. Моделирование характеристик микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками, углубленными в подложку // Сборник тезисов науч.-техн. конф. молодых специалистов АО «ИСС». – Железнодорожск, Россия, 23–25 августа, 2017. – С. 89–91.
5. Сагиева И.Е. Моделирование характеристик микрополосковой линии с боковыми заземленными проводниками сверху // Матер. XIII Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», посвященной 55-летию ТУСУРа. – Томск, Россия, 29 ноября – 1 декабря, 2017. – Ч. 2. – С. 19–20.