Система проєктування Advanced Design System

Посібник з проєктування схем 2.0*

Переклад: Вадим Потапенко
Редагування: Віктор Бутирін, директор, Юнітест
E-mail: Victor_Butyrin@unitest.com

РОЗРОБКА МІКРОСМУЖКОВОГО ДІЛЬНИКА ПОТУЖНОСТІ ТА ДІЛЬНИКА ПОТУЖНОСТІ НА КОПЛАНАРНИХ ХВИЛЕВОДАХ**

Теорія

Дільник потужності — це НВЧ пристрій із трьома портами, який використовується для розподілу або підсумовування потужності. В ідеальному дільнику потужності сигнал, що подається на порт 1, порівну розділяється між двома вихідними портами при розподілі потужності й навпаки — при підсумовуванні потужності, як показано на рисунку 164. Дільник потужності знаходить застосування при когерентному відгалуженні потужності гетеродина, контурах зворотного зв'язку антен радарів із фазованими антенними решітками, зовнішньому регулюванні рівня та радіовимірюваннях, підсумовуванні потужності кількох вхідних сигналів, а також підсилювачів високої потужності.

Т-подібний дільник потужності

Різні типи дільників потужності включають Т-подібний дільник потужності, резистивний дільник та дільник потужності Вілкінсона (гібридний відгалужувач). Т-подібний дільник потужності — це проста схема з трьома портами. Він може застосовуватися в середовищі передачі будь-якого типу, наприклад мікросмужковому, смужковому, копланарних хвилеводах тощо. Оскільки схема з 3 портами не може не мати втрат, бути оберненою та узгодженою на всіх портах, Т-подібний дільник потужності, бувши оберненою схемою без втрат, не може бути ідеально узгоджений на всіх портах. Т-подібний дільник потужності можна представити у вигляді моделі, що є з'єднанням трьох ліній передачі, як показано на рисунку 165.

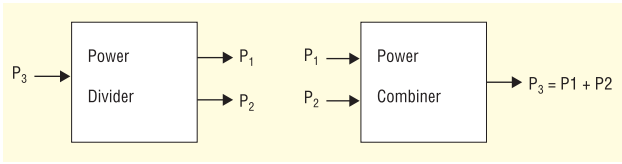

Рис. 164

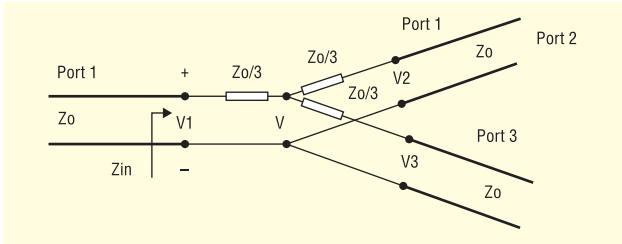

Рис. 165

Мета

Розробити дільники потужності різних типів для частоти 3 ГГц і виконати симуляцію їхніх робочих характеристик за допомогою ADS.

Розробка Т-подібного дільника потужності з розподіленими параметрами

- Для проєту дільника потужності виберіть відповідну підкладку з товщиною (h) та діелектричною проникністю (ε_r).
- Розрахуйте довжину хвилі λ_g із заданих параметрів частоти наступним чином:

$$\lambda_g = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}\, f},$$

де c — швидкість світла в повітрі; f — робоча частота відгалужувача; ε_r — діелектрична проникність підкладки.
- Синтезуйте геометричні параметри (довжину та ширину) чвертьхвильових ліній з імпедансами Z_0 та $\sqrt{2}\,Z_0$ (Z_0 — характеристичний імпеданс мікросмужкової лінії, що дорівнює 50 Ом).

Топологічна симуляція в ADS

- Розрахуйте геометричні параметри Т-подібного дільника потужності, виходячи з електричних параметрів, таких як Z_0 та електрична довжина, за наведеною вище процедурою розробки дільника потужності. Геометричні параметри можуть бути синтезовані за допомогою засобу Linecalc. Геометричні параметри мікросмужкової лінії для імпедансів 50 Ом (Z_0) та 70.7 Ом ($\sqrt{2}\,Z_0$) наведені далі.
- Діелектричні властивості: Er (Діелектрична проникність) = 4.6, Height (Висота) = 1.6 mm, Loss Tangent (Тангенс кута

* Продовження. Початок див. CHIP NEWS, № 6–10, 2025, № 1, 2026.
** Використовувані ліцензії ADS: Linear Simulation, Momentum (EM) Simulation, Layout.

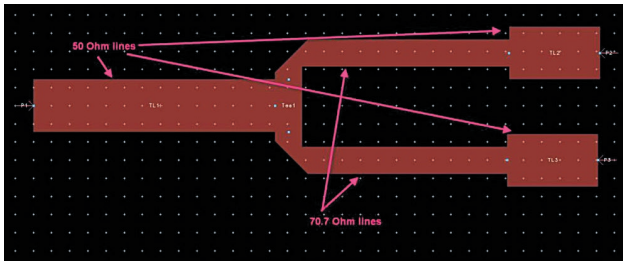

Рис. 166

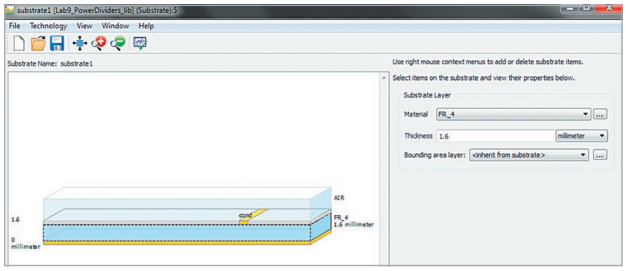

Рис. 167

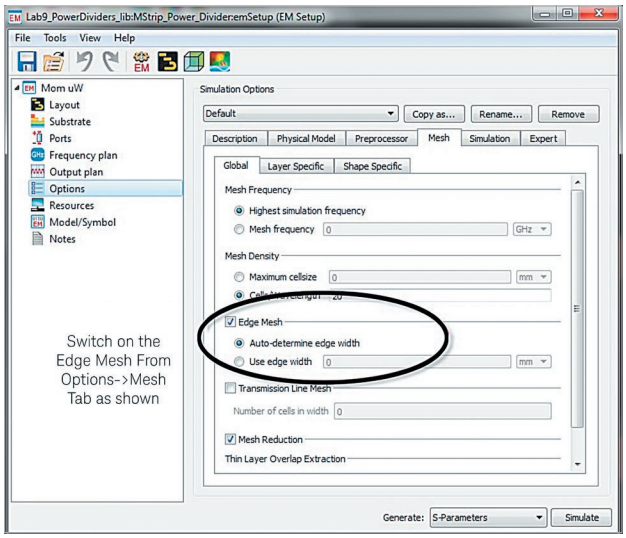

Рис. 168

втрат) = 0.0023, Metal Height (Висота металу) = 0.035 mm, Metal Conductivity (Провідність металу) = 5.8E7.

Лінія 50 Ом:

ширина — 2.9 мм;

довжина — 13.3 мм.

Лінія 70.7 Ом:

ширина — 1.5 мм;

довжина — 13.6 мм.

- Створіть модель Т-подібного дільника потужності у вікні топології ADS. Модель можна створити, скориставшись доступними компонентами з бібліотеки мікросмужкових компонентів або намалювавши прямокутники.
- Для створення моделі із застосуванням бібліотечних компонентів виберіть бібліотеку TLines (Лінії передачі) — Microstrip (Мікросмужкові). Виберіть із бібліотеки відповідну мікросмужкову лінію та вставте її у вікно топології, як показано на рисунку 166.
  - Під'єднайте виводи (Pin) на вході та виході та налаштуйте ЕМ симуляцію відповідно до наведеного раніше опису в розділі з електромагнітної симуляції. Після завершення зображення має виглядати, як на рисунку 167.

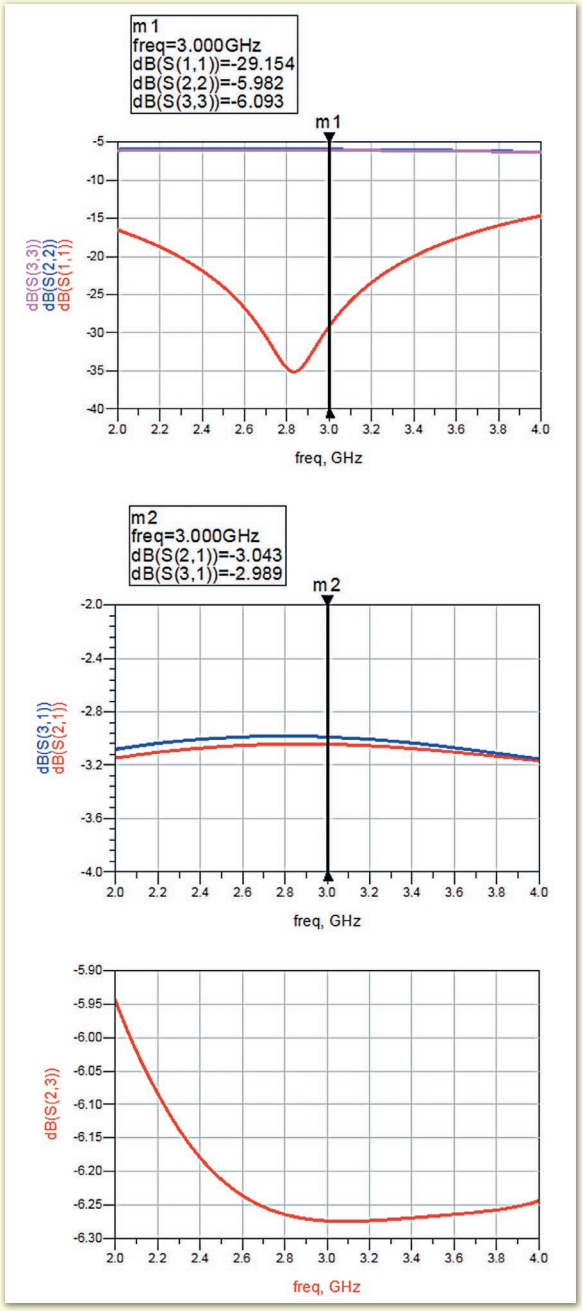

Рис. 169

- Задайте частоти симуляції від 2 до 3 ГГц і увімкніть опцію Edge Mesh (Крайова сітка) на вкладці **Options** (Опції) > **Mes**h (Сітка) вікна налаштування електромагнітної симуляції (рис. 168).
- Натисніть на значок **Simulate** (Симулювати) та побудуйте графік результатів для перегляду характеристики Т-подібного дільника потужності, як показано на рисунку 169.

В результаті топологічної симуляції було визначено, що Т-подібний дільник потужності має внесені втрати (S12 та S13) 3.0 дБ та зворотні втрати (S11) близько 29 дБ, але, як очікувалося, розв'язка між двома вихідними гілками становить лише 6 дБ, відображаючи реальні характеристики Т-подібного дільника потужності.

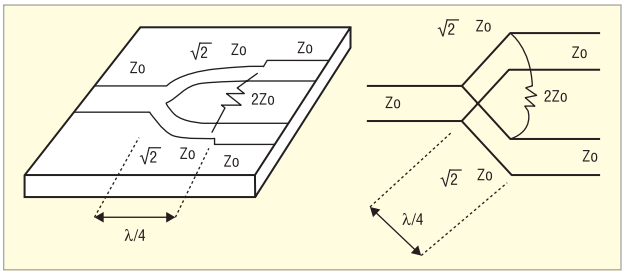

Рис. 170

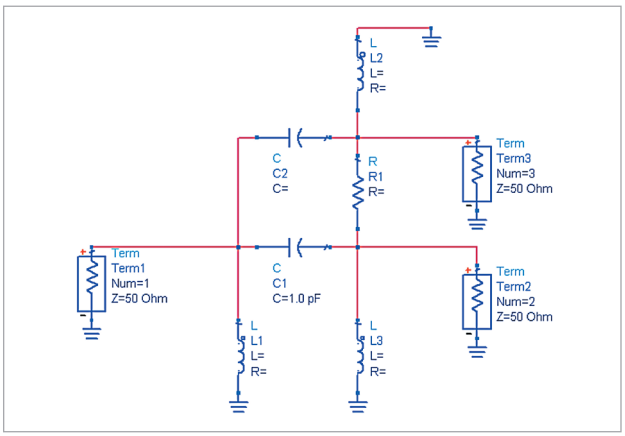

Рис. 171

Дільник потужності Вілкінсона

Дільник потужності Вілкінсона є надійним дільником потужності, у якого всі порти узгоджені та розсіюється лише відбита потужність. Дільник потужності Вілкінсона забезпечує кращу розв'язку між вихідними портами в порівнянні з Т-подібним дільником потужності. Також дільник потужності Вілкінсона може застосовуватися для довільного поділу потужності.

Геометрія дільника потужності Вілкінсона та його еквівалентна лінія передачі показані на рисунку 170.

Розробка моделі дільника потужності Вілкінсона з зосередженими параметрами

За наведеними формулами розрахуйте значення ємностей (C_1 та C_2), індуктивностей (L_1, L_2 та L_3) і опору (R_1), необхідних для моделі із зосередженими параметрами дільника, що показаний на рисунку 171.

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{\sqrt{2R_a\sqrt{R_bR_c}\,\omega^2}},$$

$$L_3 = L_2 = \sqrt{\frac{2R_a\sqrt{R_bR_c}}{\omega^2}},$$

$$L_1 = \sqrt{\frac{R_a\sqrt{R_bR_c}}{2\omega^2}},$$

$$R = 2\sqrt{R_aR_b},$$

де для довільного імпедансу $Z_0 = R_a = R_b = R_c = 50$ Ом; ω — кругова частота.

Номінальні характеристики проєкту:

номінальна частота = 3 ГГц;

кругова частота в радіанах = 1.88×10^{10};

$C_1 = C_2 = 0.75$ пФ; $L_2 = L_3 = 3.75$ нГн;

$L_1 = 1.87$ нГн; $R = 100$ Ом.

Порядок дій під час схемотехнічної симуляції

- Відкрийте вікно схеми.
- З бібліотеки компонентів із зосередженими параметрами виберіть відповідні компоненти, необхідні для моделі із зосередженими параметрами. Натисніть на необхідні компоненти та вставте їх у вікно схеми, як показано на рисунку 172.
- Налаштуйте симуляцію S-параметрів для частот від 2.5 до 3.5 ГГц із кроком 0.01 ГГц. Виконайте симуляцію та перегляньте характеристики параметрів, як показано на рисунку 173.

В результаті схемотехнічної симуляції було визначено, що модель із зосередженими параметрами дільника потужності Вілкінсона має внесені втрати (S_{12} та S_{13}) 3 дБ та зворотні втрати (S_{11}) менше ніж 30 дБ.

Розробка дільника потужності Вілкінсона з розподіленими параметрами

Топологічна симуляція в ADS

- Розрахуйте геометричні параметри дільника потужності Вілкінсона, виходячи з електричних параметрів, таких як Z_0 та електрична довжина, так само, як це робилося для Т-подібного дільника потужності. Геометричні параметри можуть бути синтезовані за допомогою засобу Linecalc. Геометричні параметри мікросмужкової лінії для імпедансів 50 Ом (Z_0) та 70.7 Ом ($\sqrt{2}\,Z_0$) на діелектрику, обраному при розробці Т-подібного дільника потужності, наступні:

  Лінія 50 Ом:

  ширина — 2.9 мм; довжина — 13.3 мм.

  Лінія 70.7 Ом:

  ширина — 1.5 мм; довжина — 13.6 мм.
- Топологія дільника потужності Вілкінсона виконується аналогічно тому, як ми це робили раніше, за винятком того, що ми будемо використовувати розділовий резистор опором $2 \cdot Z_0$, який в нашому випадку дорівнює 100 Ом, оскільки характеристичний імпеданс становить 50 Ом.
- Для створення структури дільника потужності скористайтеся компонентами бібліотеки TLines-Microstrip або значком прямокутника/полігона. Зверніть увагу, що в дільнику потужності Вілкінсона нам потрібно буде застосувати два додаткових виводи в тих місцях, де ми пізніше під'єднаємо резистор 100 Ом (рис. 174).
- Задайте нову підкладку або використовуйте ту, яка була задана раніше у вправі з Т-подібним дільником потужності. Задайте співпування частоти від 2.5 до 3.5 ГГц і на опції Model/Symbol (Модель/Символ) у вікні налаштування електромагнітної симуляції натисніть кнопку **Create Now** (Створити зараз) у полях EM Model (EM модель) та Symbol (Символ) для створення контейнера даних EM моделі та символу, що імітує топологію, так щоб ми могли використовувати цей топологічний компонент для виконання спільної EM симуляції зі встановленим резистором (рис. 175). Детальний порядок дій для цього наведено в розділі, присвяченому електромагнітній симуляції.
- Відкрийте нову схемотехнічну комірку, перетягніть у неї створений раніше символ, що імітує топологію, і під'єднайте навантаження та резистор, як показано на рисунку 176. Налаштуйте симуляцію S-параметрів для частот від 2.5 до 3.5 ГГц із кроком 0.01 ГГц.
- Натисніть на значок **Simulate** і потім побудуйте графіки на дисплеї даних, як показано на рисунках 177 й 178.

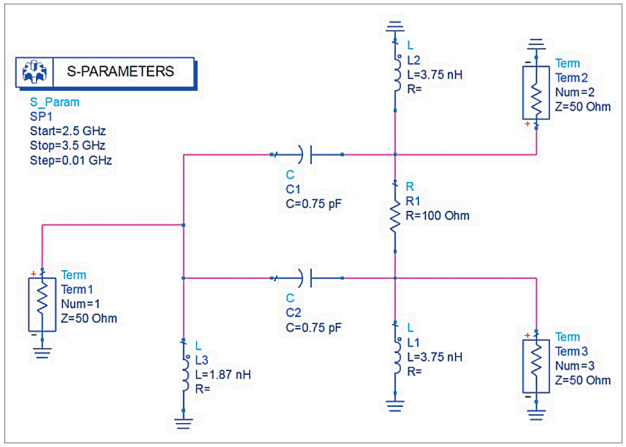

Рис. 172

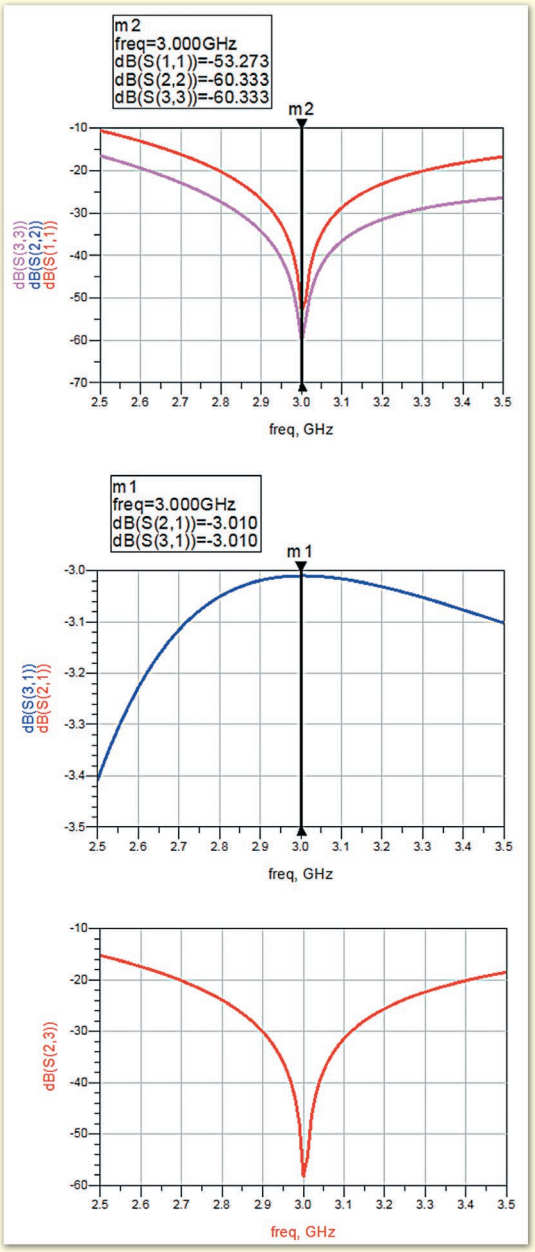

Рис. 173

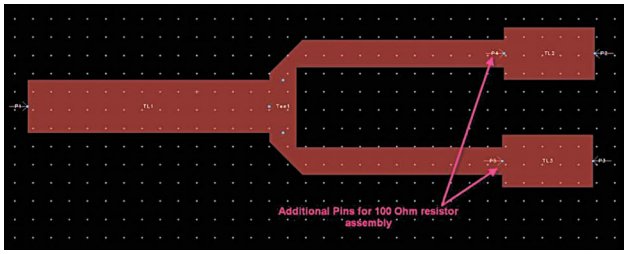

Рис. 174

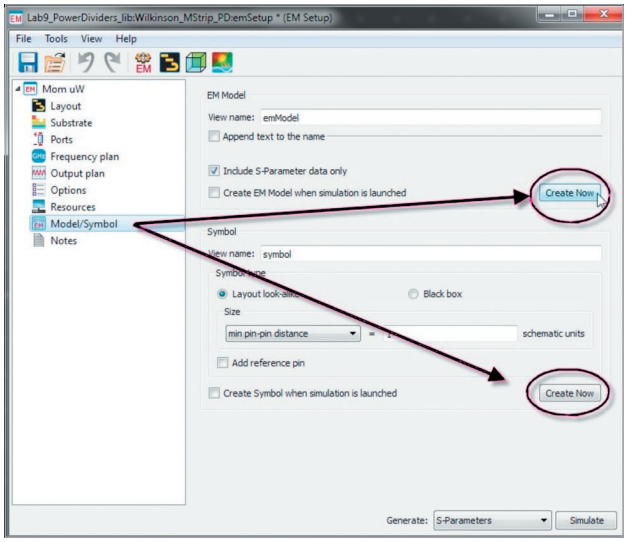

Рис. 175

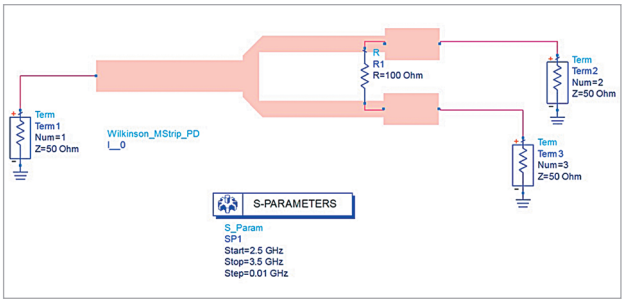

Рис. 176

В результаті топологічної симуляції було визначено, що дільник потужності Вілкінсона має внесені втрати (S_{12} та S_{13}) 3.0 дБ та зворотні втрати (S_{11}, S_{22}, S_{33}) менше як –25 дБ.

Розробка Т-подібного дільника потужності на копланарних хвилеводах

Мета

Розробити Т-подібний дільник потужності на копланарних хвилеводах для частоти 2.4 ГГц і виконати симуляцію його робочих характеристик за допомогою ADS.

Порядок дій при розробці

- Для проєкту дільника потужності виберіть відповідну підкладку з товщиною (h) та діелектричною проникністю (ε_r).
- Розрахуйте довжину хвилі λ_g із заданих параметрів частоти наступним чином:

$$\lambda_g = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}\, f},$$

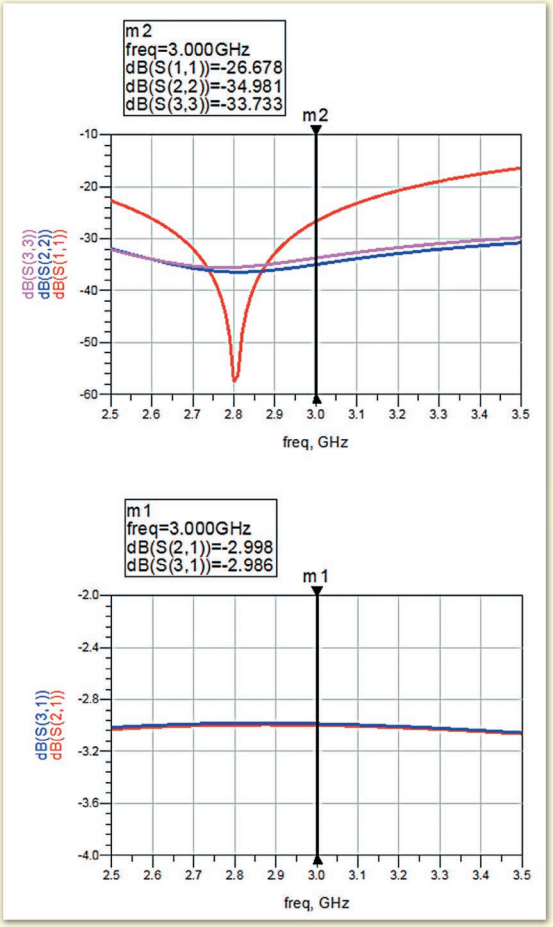

Рис. 177

Рис. 178

де c — швидкість світла в повітрі; f — робоча частота відгалужувача; ε_r — діелектрична проникність підкладки.

- Синтезуйте геометричні параметри (довжину та ширину) для чвертьхвильової лінії копланарного хвилеводу з імпедансами Z_0 та $\sqrt{2}Z_0$ (Z_0 — характеристичний імпеданс лінії копланарного хвилеводу, рівний 50 Ом).

Топологічна симуляція в ADS

- Розрахуйте геометричні параметри Т-подібного дільника потужності, виходячи з електричних параметрів, таких як Z0 та електрична довжина, за наведеною вище процедурою розробки дільника потужності. Геометричні параметри можуть бути синтезовані за допомогою засобу Linecalc, як показано на рисунку 179. Геометричні параметри ліній копланарних хвилеводів для імпедансів 50 Ом (Z_0) та 70.7 Ом ($\sqrt{2}\,Z_0$) наведені нижче:

Лінія 50 Ом:

ширина — 3 мм; довжина — 20 мм; зазор — 0.37 мм.

Лінія 70.7 Ом:

ширина — 1.5 мм; довжина — 19.6 мм; зазор — 0.69 мм.

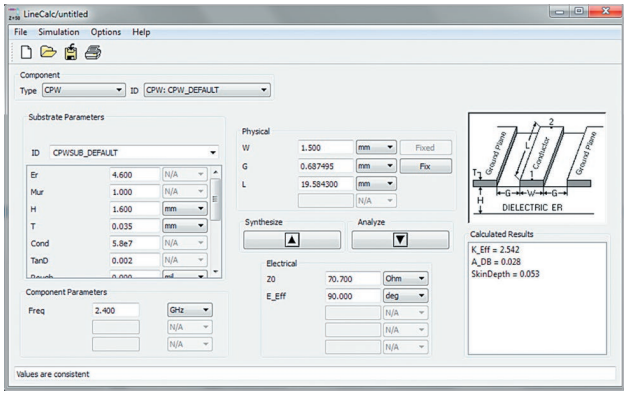

Рис. 179

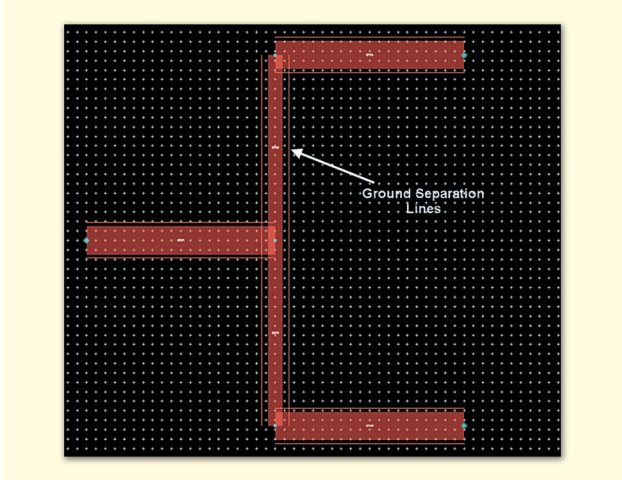

Рис. 180

- Створіть модель Т-подібного дільника потужності у вікні топології ADS. Модель може бути створена за допомогою доступних компонентів бібліотеки TLines (Лінії передачі) — Waveguide (Хвилевідні) або шляхом малювання прямокутників (рис. 180).

  Розділові лінії землі допоможуть нам як напрямні для створення областей землі, і ми зможемо створити землю для цих копланарних хвилеводів просто за допомогою значка прямокутника, як показано на рисунку 181.

- Під'єднайте на макеті виводи до ліній передачі на копланарних хвилеводах шляхом натискання значка виводу та розміщення їх на схемі: по одному порту на основній лінії та по два порти, підключених до області землі з кожного боку від основного сигнального виводу. В цьому випадку у нас має бути всього 9 виводів: 3 сигнальних виводи та 6 виводів землі. Для простоти запам'ятовування встановіть 3 сигнальних виводи, щоб вони отримали імена P1, P2 та P3, а вже потім встановлюйте виводи P4 та P5 біля виводу P1, P6 та P7 — біля виводу P2 і, нарешті, P8 та P9 — біля виводу P3. **Наполегливо рекомендується розташовувати виводи «землі» дещо вглиб області «землі».**

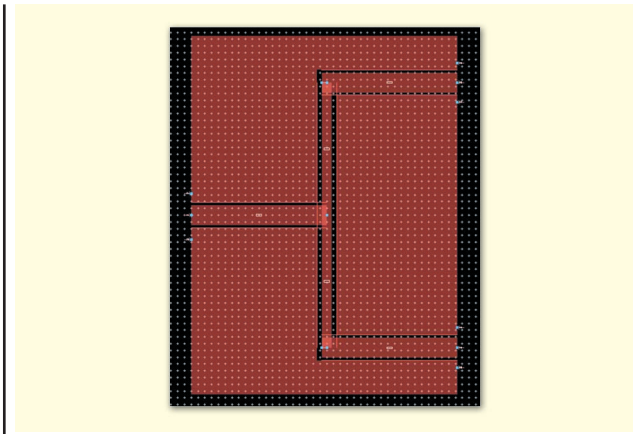

Рис. 181

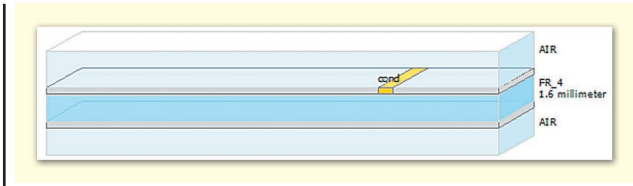

Рис. 182

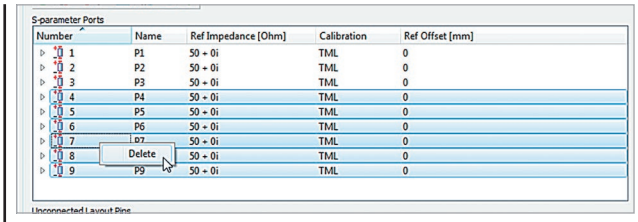

Рис. 183

- Для завдання підкладки для копланарних хвилеводів без шару землі знизу знадобиться підкладка, яка задається інакше, ніж ми це робили досі. Відкрийте вікно налаштування електромагнітної симуляції, задайте необхідний діелектрик, як це було описано в попередніх лабораторних роботах, і виконайте наступні додаткові дії:
  - Натисніть правою кнопкою миші на FR4 і виберіть Insert Substrate Layer Below (Вставити шар підкладки знизу). Натисніть правою кнопкою миші на Cover (Покривний шар) і виберіть Delete Cover (Видалити покривний шар).
  - Замініть діелектрик з нижньої сторони на AIR (який пропонується за замовчуванням у вікні завдання підкладки). Після завершення зображення має виглядати, як показано на рисунку 182.
- Перейдіть до опції **Ports** (Порти) у вікні налаштування електромагнітної симуляції та виберіть порти з 4 по 9, натисніть правою кнопкою миші та видаліть їх, щоб вони зникли зі списку та з'явилися в нижній частині (рис. 183).
- Перетягніть зі списку Unconnected Layout Pins (Непід'єднані виводи макету) виводи P4 та P5, які розміщені на топології з боків виводу P1, на –GND, так щоб вийшло, як показано на рисунку 184. Зробіть те ж саме для виводів P2 та P3 і відповідних їм непідключених виводів топології.
- Після завершення призначення виводів виглядатиме, як показано на рисунку 185.
- Задайте частоти симуляції від 2 до 2.8 ГГц і увімкніть опцію Edge Mesh (Крайова сітка) на вкладці **Options** (Опції) > **Mesh** (Сітка) вікна налаштування електромагнітної симуляції. Виконайте симуляцію та побудуйте графіки бажаних характеристик для перегляду результатів симуляції, як показано на рисунку 186: m1 freq = 2.400 GHz, dB(S(1,1)) = –20.244, dB(S(2,1)) = –3.784, dB(S(3,1)) = –3.446.

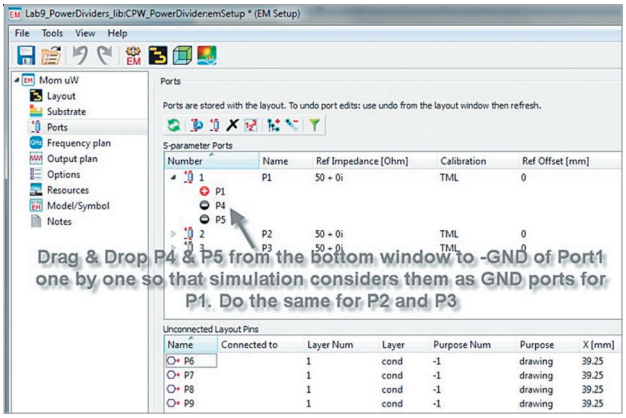

Рис. 184

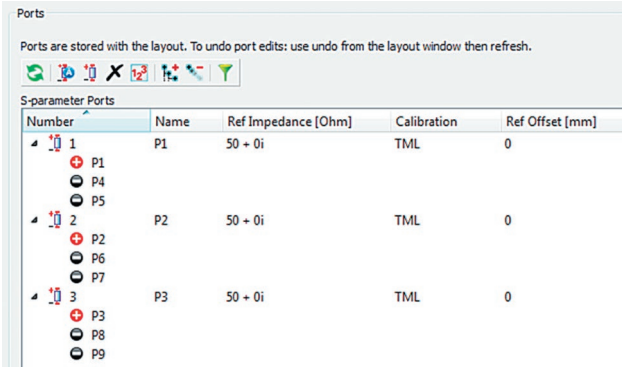

Рис. 185

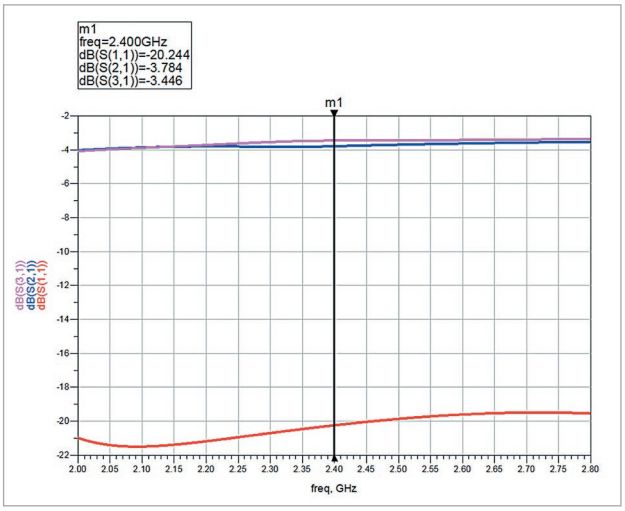

Рис. 186

Далі буде

Щоб отримати детальну інформацію щодо продукції компанії Keysight Technologies, звертайтесь до її офіційного дистриб'ютора в Україні — компанії Юнітест:

01054, м. Київ, вул. Олеся Гончара, 26,
тел.: +38 (044) 272-60-94,
e-mail: web@unitest.com, www.unitest.com

CN