

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

ВИКОРИСТАННЯ СИМУЛЯТОРА FEM В ADS**

Симулятор FEM (*Finite Element Method* — метод кінцевих елементів) надає повнофункціональне рішення для електромагнітної симуляції пасивних тривимірних структур довільної форми. Симулятор FEM створює повноцінну 3D-симуляцію електромагнітних полів і є привабливим варіантом для розробників, що працюють з РЧ-схемами, монолітними інтегральними схемами НВЧ (MMIC), друкованими платами, модулями та застосунками, пов'язаними з цілісністю сигналів. Він забезпечує повністю автоматизоване створення сітки й можливості збіжності результатів моделювання довільних тривимірних об'єктів, таких як з'єднувальні проводи та діелектричні підкладки кінцевих розмірів. Поряд із симулятором Momentum, симулятор FEM в системі ADS надає інженерам в області РЧ і НВЧ техніки доступ до одного з найбільш повнофункціональних засобів електромагнітного моделювання в галузі.

Розроблений з урахуванням потреб розробників високо-частотних/високошвидкісних схем, симулятор FEM є потужним інструментом для моделювання електромагнітних полів на основі кінцевих елементів, який вирішує широкий спектр завдань з дивовижною точністю і швидкістю.

Метод кінцевих елементів

Для отримання рішення електромагнітного поля, з якого можуть бути обчислені S-параметри, симулятор FEM використовує метод кінцевих елементів. У загальному вигляді метод кінцевих елементів ділить всю область задачі на тисячі менших областей і представляє поле в кожній підобласті (елементі) за допомогою локальної функції.

У симуляторі FEM геометрична модель автоматично розбивається на велику кількість тетраедрів, де один тетраедр утворений чотирма рівносторонніми трикутниками.

Представлення величини поля

Значення векторної величини поля (такої як H-поле або E-поле) в точках всередині кожного тетраедра інтерполюється за значеннями у вершинах тетраедра. У кожній вершині симулятор FEM зберігає компоненти поля, які є тангенціаль-

ними (дотичними) до трьох ребер тетраедра. Крім того, може також зберігатися компонента векторного поля в середній точці вибраних ребер, яка є тангенціальною до грані та нормальною до ребра. Поле всередині кожного тетраедра інтерполюється за цими вузловими значеннями.

Базисні функції

Базисна функція тангенціального елемента першого порядку інтерполює значення поля як за вузловими значеннями у вершинах, так і за значеннями на ребрах. Тангенціальні елементи першого порядку мають 20 невідомих на тетраедр.

Залежність точності від розміру сітки

Існує компроміс між розміром сітки, необхідним рівнем точності та обсягом доступних обчислювальних ресурсів.

З одного боку, точність рішення залежить від кількості окремих елементів (тетраедрів). Рішення на основі сіток з великою кількістю елементів точніші, ніж рішення на грубих сітках з відносно невеликою кількістю елементів. Щоб отримати точний опис величини поля, кожен тетраедр повинен займати область досить малого розміру, щоб поле адекватно інтерполювалося за вузловими значеннями.

Однак обчислення поля для сіток з великою кількістю елементів вимагає значної обчислювальної потужності та пам'яті. Тому бажано використовувати сітку, яка є досить дрібною, щоб отримати точне рішення поля, але не настільки дрібною, щоб перевантажувати доступну пам'ять і обчислювальну потужність комп'ютера.

Для отримання оптимальної сітки симулятор FEM використовує ітераційний процес, в якому сітка автоматично уточнюється в критичних областях. Спочатку він генерує рішення на основі грубої початкової сітки. Потім він уточнює сітку на основі відповідних критеріїв похибки й генерує нове рішення. При увімкненій опції перевіряється збіжність S-параметрів до заданої межі, після чого ітераційний процес завершується.

Рішення полів

В ході ітераційного процесу рішення S-параметри зазвичай стабілізуються раніше, ніж досягається повне рішення поля. Тому при аналізі рішення поля, пов'язаного зі структурою, іноді доцільно використовувати суворіший критерій збіжності, ніж зазвичай.

* Продовження. Початок див. CHIP NEWS, № 6–7, 2025.

** Використовувати ліцензії ADS: Layout, FEM Simulator.

Крім того, для будь-якого заданого числа адаптивних ітерацій магнітне поле (H-поле) менш точне, ніж рішення для електричного поля (E-поле), оскільки H-поле обчислюється з E-поля за наступним співвідношенням:

$$H = \frac{\Delta \times E}{-j\omega\mu}$$

Таким чином, поліноміальна інтерполяційна функція стає на порядок нижчою, ніж функції, що використовуються для електричного поля.

Огляд реалізації

Для розрахунку S-матриці, що належить до структури, виконуються наступні кроки:

- Структура розбивається на сітку кінцевих елементів.
- Обчислюються хвилі на кожному порту структури, підтримувані лінією передачі з таким же поперечним перерізом, що і порт.
- Обчислюється повна картина електромагнітного поля всередині структури при збудженні кожного порту однією з хвиль.
- Узагальнена S-матриця обчислюється за величинами відбиття і передачі.

В результаті отримуємо S-матрицю, яка дає змогу безпосередньо обчислювати амплітуди переданих і відбитих сигналів за заданим набором вхідних сигналів, зводячи повну тривимірну електромагнітну поведінку структури до набору параметрів високочастотної схеми.

Налаштування симуляції FEM

Ключові кроки для успішної симуляції FEM в системі ADS:

- створення фізичного проєкту (топології);
- задання підкладок;
- налаштування симуляції FEM:
 - призначення властивостей портів;
 - задання плану співування частот;
 - задання опцій симуляції, наприклад, створення сітки, вибір вирішувача (прямий або ітераційний) тощо;
 - запуск симуляції FEM;
- перегляд результатів, полів у дальній зоні тощо.

Приклад: мікросмужковий фільтр низьких частот

Давайте розглянемо симуляцію FEM в системі ADS, створивши просту схему фільтра нижніх частот, як показано нижче, з використанням компонентів MLIN з палітри бібліотеки TLines-Microstrip (Лінії передачі — Мікросмужкові) в редакторі топології ADS.

Крок 1. Створення фізичного проєкту (топології)

- Створіть нове робоче середовище Lab20_FEM_Simulations_wrk і виберіть як одиниці вимірювання mm (мм) в майстрі створення робочого середовища.
- З палітри бібліотеки TLines-Microstrip вставте 5 компонентів MLIN з наступними розмірами:
 - лінії 1, 3, 5: ширина = 0.2 мм, довжина = 2.5 мм;
 - лінії 2, 4: ширина = 4.5 мм, довжина = 2.5 мм (рис. 88).

Крок 2. Задання підкладки

- Натисніть на значок **Substrate**, щоб задати потрібну підкладку для нашої симуляції.
- У вікні, що відкрилося, виберіть шаблон підкладки 25 mil Alumina, і буде відображена підкладка за замовчуванням, як показано на рисунку 89.

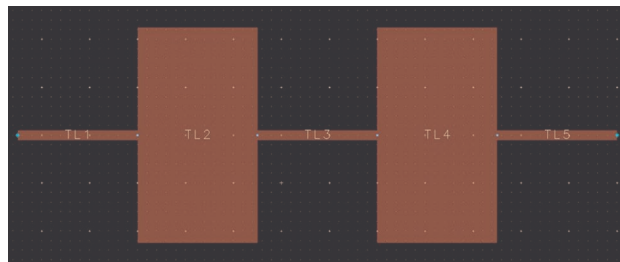


Рис. 88

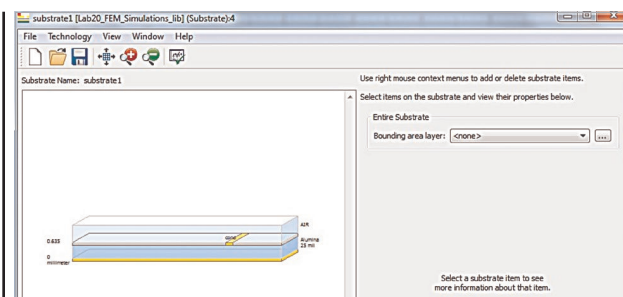


Рис. 89

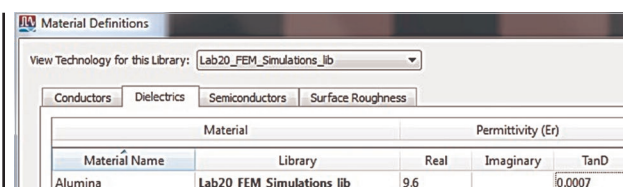


Рис. 90

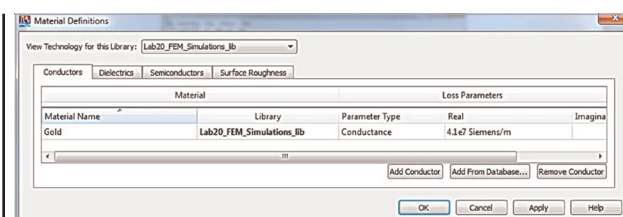


Рис. 91

- Перейдіть в меню **Technology** (Технологія) > **Material Definition** (Задання матеріалу) і на вкладці **Dielectric** (Діелектрик) змініть значення TanD (тангенс кута втрат) для Alumina на 0.0007. Також можна додати діелектрик за допомогою опції **Add from Database** (Додати з бази даних) (рис. 90).
- Перейдіть на вкладку **Conductors** (Провідники), натисніть **Add from Database** (Додати з бази даних), виберіть із наявного списку провідник **Gold** (Золото) і натисніть **OK** (рис. 91).
- У графічному інтерфейсі налаштування підкладки натисніть на **cond strip**, змініть **Material** (Матеріал) на Gold (Золото) і введіть товщину 8 мікрон (рис. 92).
- Натисніть **Save** (Зберегти) і закрийте редактор підкладки.
- Під'єднайте 2 виводи, по одному на вході та виході за допомогою значка Pin.

Крок 3. Налаштування симуляції FEM

- Натисніть на значок **EM Setup**, щоб відкрити вікно налаштування електромагнітної симуляції. Виберіть симулятор FEM.
- Виберіть опцію **Frequency Plan** (План співування частот) і введіть Fstart = 0.1 GHz; Fstop = 8 GHz (рис. 93).

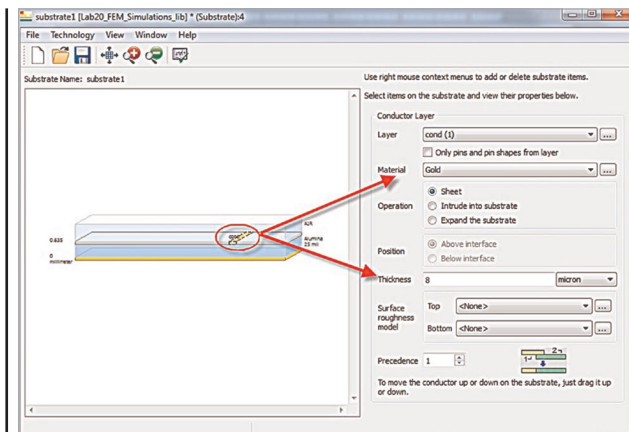


Рис. 92

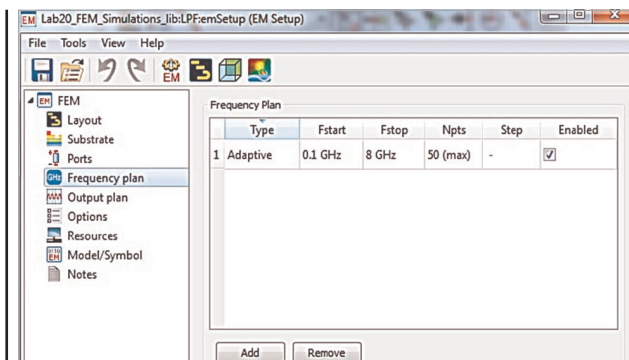


Рис. 93

- Перейдіть на вкладку **Options** (Опції), що є одним з найважливіших кроків у налаштуванні симуляції FEM. Давайте детально розглянемо кожну опцію.
 - **Physical Model** (Фізична модель). Оскільки в системі ADS є 2D-редактор топології, нам необхідно задати 3D-атрибути структури, які будуть використовуватися для симуляції FEM, на цій вкладці:
 - Substrate LATERAL extension (Бічне розширення підкладки). Ця опція дає змогу користувачеві задати, наскільки далеко від краю топології додавати додатковий діелектрик (для моделювання кінцевого розміру підкладки) у всіх напрямках, де не підключені калібровані порти (TML (*Thru Microstrip Line*) або TML з нульовою довжиною).
 - Substrate VERTICAL extension (Вертикальне розширення підкладки). Ця опція дає змогу користувачеві задати висоту повітряного шару над поверхнею діелектрика. Як загальна рекомендація, вертикальне розширення повинно бути в 5–10 разів більше висоти підкладки.
Для нашого проекту ми залишимо налаштування за замовчуванням, як показано на рисунку 94. На рисунках 95 і 96 показані 3D-зображення структури фільтра з двома значеннями бічного розширення.
 - **Mesh** (Сітка). Для симуляції FEM сітка має різні налаштування, розуміння яких важливе для отримання точних результатів.

Stop Criterion (Критерій зупинки):

- **Delta Error** (Дельта-похибка). Цей параметр визначає коефіцієнт збіжності сітки для отримання стабілізованих

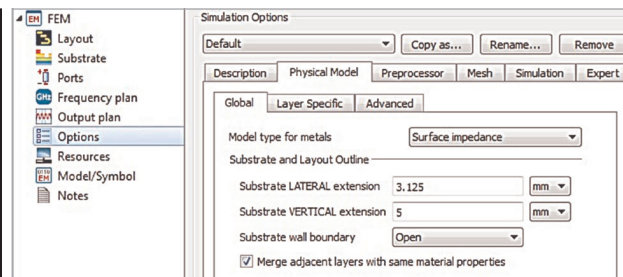
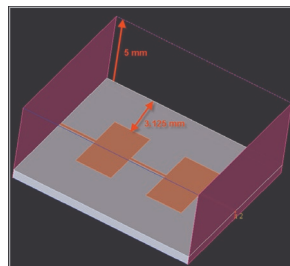
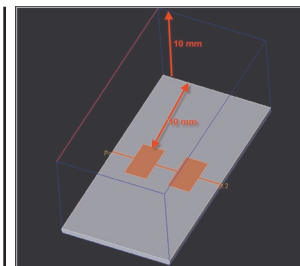


Рис. 94



Бічне розширення = 3.125 мм
Вертикальне розширення = 5 мм

Рис. 95



Бічне розширення = 10 мм
Вертикальне розширення = 10 мм

Рис. 96

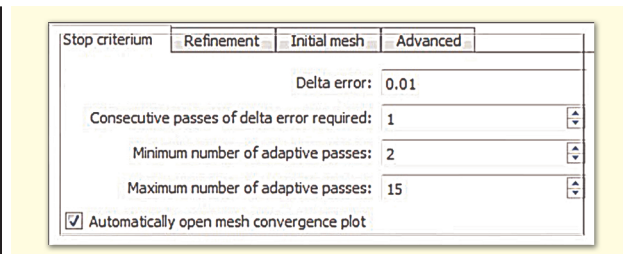


Рис. 97

- полів, як описано в розділі «Залежність точності від розміру сітки». Це величина, за якою перевіряється розбіжність S-матриці при переході від одного розміру сітки до іншого. Як тільки різниця стає меншою за вказане значення дельта-похибки, запускається процедура розв'язання матриці.
- **Consecutive passes of delta error required** (Необхідна кількість послідовних проходів з дельта-похибкою). Ця опція дає змогу перевірити, чи було перше досягнення збіжності сітки реальним або випадковим.
- **Minimum number of adaptive passes** (Мінімальна кількість адаптивних проходів). Кількість ітерацій сітки, яка буде виконана, навіть якщо збіжність досягнута раніше, ніж через задану кількість адаптивних проходів.
- **Maximum number of adaptive passes** (Максимальна кількість адаптивних проходів). Максимальна кількість ітерацій сітки для досягнення критерію дельта-похибки.
Встановіть параметри, як показано на знімку екрана на рисунку 97.

Refinement (Уточнення)

На вкладці Refinement розробники можуть вказати частоту, на якій буде генеруватися сітка для розв'язання структури. Як загальне правило для кращої та швидкої збіжності сітки рекомендується створювати сітку на частоті, де структура містить більшу частину енергії. Для структур фільтрів рекомендується вибирати частоту сітки в смузі пропускання. Для нашого ФНЧ виберіть Manual selection (Ручний вибір) і введіть значення 1 ГГц (рис. 98).

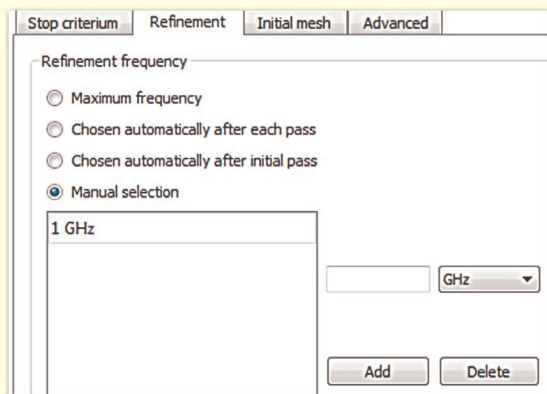


Рис. 98

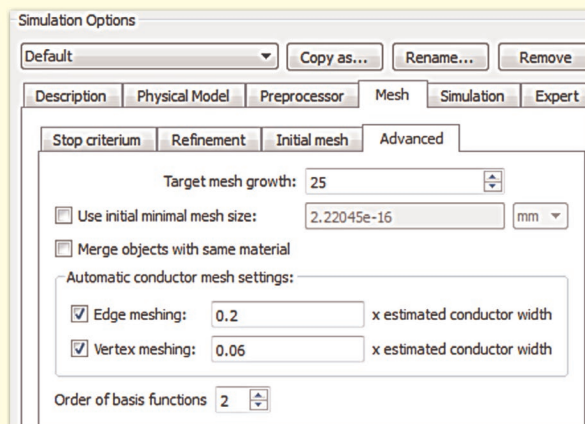


Рис. 100

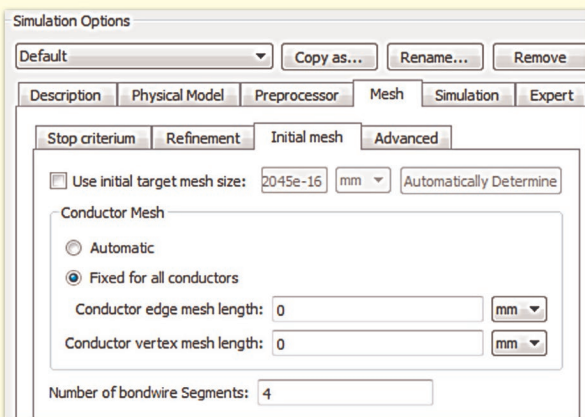


Рис. 99

Initial Mesh (Початкова сітка)

У налаштуваннях Initial Mesh розробник може вказати оптимальний початковий розмір сітки, що може допомогти швидше досягти збіжності.

Налаштування Automatic Conductor Mesh (Автоматична сітка для провідника) дає змогу генератору сітки створювати більш дрібну сітку вздовж країв провідників для підвищення точності (рис. 99). Ця функція є корисною при симуляції деяких складних, тісно пов'язаних структур.

Advanced (Додатково)

На вкладці Advanced можна задати наступні параметри:

- **Target Mesh Growth** (Зростання цільової сітки): відсоток збільшення розмірів тетраедрів при кожній ітерації.
- **Use Initial minimal mesh size** (Використовувати початковий мінімальний розмір сітки): задання мінімального розміру сітки, встановленого користувачем, для швидшої збіжності.
- **Merge objects with same material** (Об'єднати об'єкти з однаковим матеріалом): ця опція допомагає зменшити кількість невідомих в структурі для прискорення симуляції.
- **Automatic conductor mesh settings** (Налаштування автоматичної генерації сітки для провідника): якщо в розділі Initial Mesh (Початкова сітка) була обрана опція Automatic (Автоматично), то ці налаштування будуть використовуватися для побудови більш дрібної сітки (рис. 100).

Натисніть значок **Simulate**, щоб запустити симуляцію FEM і переглянути результати, як показано на рисунку 101.

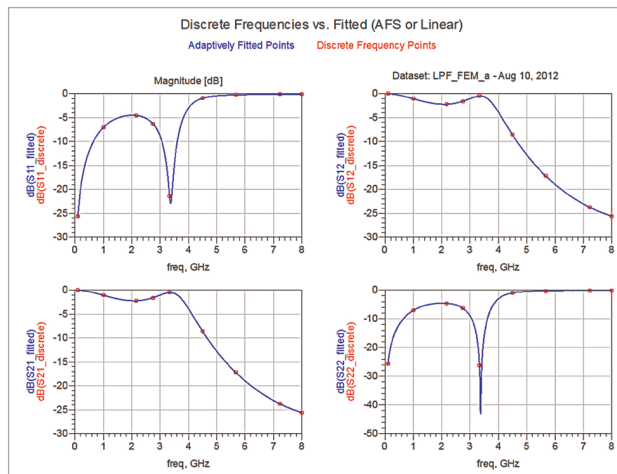


Рис. 101

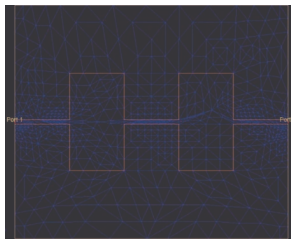


Рис. 102



Рис. 103

Крок 4. Результати

Натисніть на значок **field visualization**, щоб відкрити вікно візуалізації поля. Натисніть **View** (Вид) > **Top View** (Вид зверху), щоб побачити вигляд структури фільтра зверху.

На вкладці **Plot Properties** (Властивості графіка) виберіть Z: 0.635 і натисніть кнопку **Show** (Показати), щоб побачити сітку, як показано на рисунку 102 (з налаштуванням Fixed for all conductors (Фіксована для всіх провідників)) і на рисунку 103 (з налаштуванням Automatic (Автоматична) для провідників).

Площини симетрії в FEM

Щоб зменшити розмір задачі та вимоги до пам'яті для прискорення симуляцій, симулятор FEM в системі ADS може використовувати умову симетрії на межі або в Е-площині, або в Н-площині, так що симулюється тільки половина структури, що вимагає менше системних ресурсів.

Додавання площини симетрії

Площина симетрії визначає межу на одній стороні підкладки схеми. До схеми одночасно можна застосувати тільки один обмежувальний об'єм (паралелепіпед), хвилевід або площину симетрії. Коли задана площина симетрії, результати симуляції будуть еквівалентні результатам симуляції більшої схеми, яка була б створена шляхом дзеркального відображення схеми відносно площини симетрії.

Для симетричних схем це дає змогу проводити швидші симуляції, що вимагають менше пам'яті, оскільки потрібно моделювати тільки половину наявної структури.

Щоб додати площину симетрії:

- Виберіть **ЕМ** (Електромагнітна симуляція) > **FEM Symmetry Plane** (Площина симетрії FEM) > **Add Symmetry Plane** (Додати площину симетрії).
- Виберіть напрямок площини симетрії. Щоб вставити площину симетрії паралельно осі X, натисніть X-axis. Щоб вставити площину симетрії паралельно осі Y, натисніть Y-axis.
- Вставте площину симетрії одним із двох наступних способів:
 - Наведіть курсор миші та клацніть, щоб задати місце розташування площини симетрії.
 - У рядку меню Layout (Топологія) виберіть **Insert** (Вставити) > **Coordinate Entry** (Введення координат) і використовуйте поля Coordinate Entry X і Coordinate Entry Y для задання точки на краю підкладки.
- Натисніть **Apply** (Застосувати).

Ця межа визначає край підкладки, до якого буде застосована площина симетрії.

Редагування площини симетрії

Після застосування площини симетрії її місцезнаходження не можна змінити. Якщо потрібно змінити місцезнаходження або орієнтацію, необхідно видалити поточну площину симетрії та додати нову.

Видалення площини симетрії

Щоб видалити площину симетрії виберіть **ЕМ** (Електромагнітна симуляція) > **FEM Symmetry Plane** (Площина симетрії FEM) > **Delete Symmetry Plane** (Видалити площину симетрії). Площина симетрії буде видалена з топології.

Приклад: проектування ФНЧ з використанням площини симетрії

Давайте зробимо симуляцію нашого проекту ФНЧ, використовуючи площину симетрії. Для цього потрібно виконати дії, наведені нижче.

Крок 1. Створення часткового проекту

При використанні площини симетрії необхідно створити тільки половину геометрії, симетричну відносно обраної осі X або осі Y.

Якщо уважно подивитися на наш проект ФНЧ, то побачимо, що він симетричний відносно осі X (рис. 104).

Використовуючи або компонент MLIN, або інструмент рисунка прямокутників, створіть половину проекту ФНЧ, як показано на рисунку 105.

Порти вводу і виводу тепер будуть підключені до краю, де структура симетрична, як показано на рисунку 106.

Крок 2. Застосування площини симетрії

Перейдіть в меню **ЕМ** (Електромагнітна симуляція) > **FEM Symmetry Plane** (Площина симетрії FEM) > **Add Symmetry Plane** (Додати площину симетрії) (рис. 107).

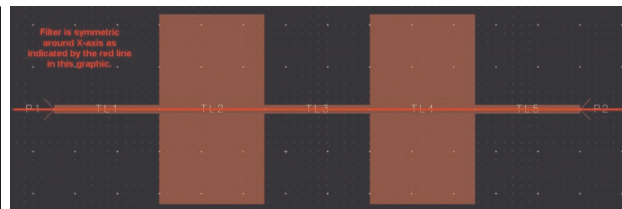


Рис. 104



Рис. 105

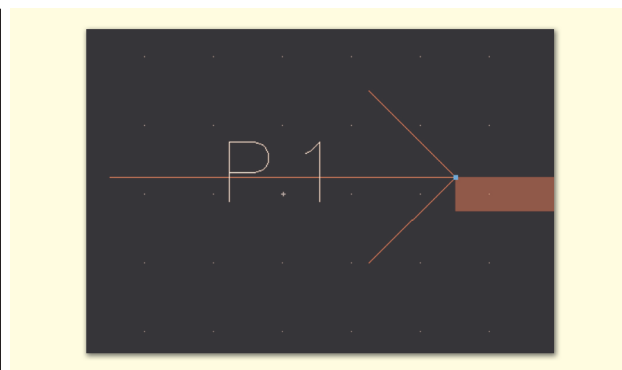


Рис. 106

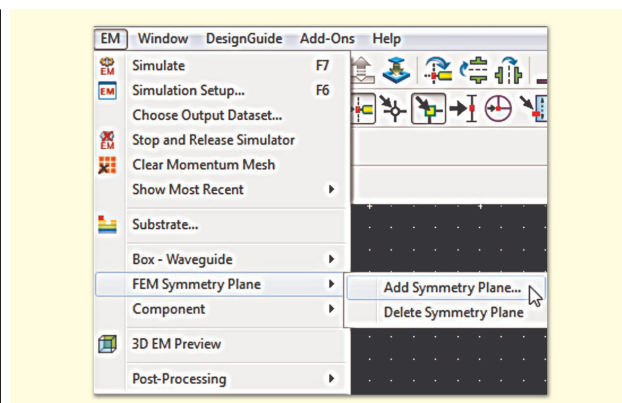


Рис. 107

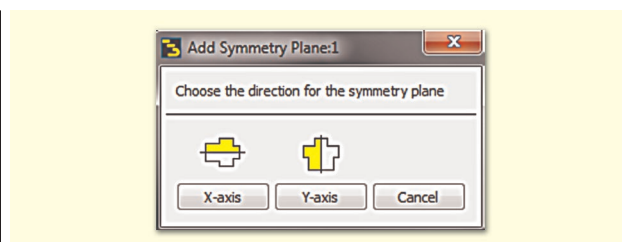


Рис. 108

Виберіть, хочете ви застосувати площину симетрії до осі X чи до осі Y у діалоговому вікні Add Symmetry Plane (Додати площину симетрії) (рис. 108).

У нашому випадку ми виберемо вісь X. Натисніть кнопку **X-axis**.

Зверніть увагу, що курсор миші тепер має вигляд перехрестя для вибору. Клацніть або по порту 1, або по порту 2,

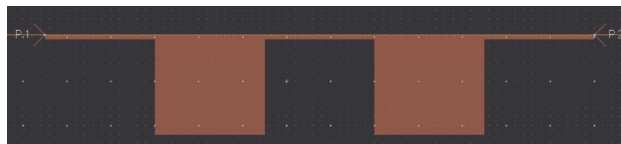


Рис. 109

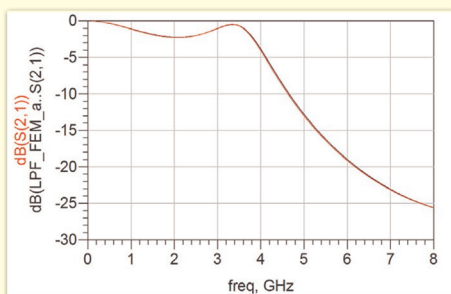


Рис. 110

Таблиця 1. Порівняння статистики симуляцій для повної симуляції FEM і симуляції FEM з використанням площини симетрії

	Повна симуляція FEM ПОЧАТКОВА СІТКА	Симуляція FEM з площиною симетрії ПОЧАТКОВА СІТКА
Кількість точок	188	144
Кількість тетраедрів	618	419
Дельта-похибка	< 0.01	< 0.01
Кількість тетраедрів	4378	2145
Час розв'язання	2 хв 39 с	1 хв 47 с

щоб застосувати площину симетрії. По завершенні результат буде виглядати, як показано на рисунку 109.

Примітка. Пунктирна лінія вказує, що використовується площина симетрії.

Крок 3. Симуляція FEM

Кроки симуляції FEM точно такі ж, як описано раніше. Виконайте ті самі дії й запустіть симуляцію FEM.

З рисунка 110 видно, що результати для повної симуляції FEM і симуляції з використанням площини симетрії ідентичні (табл. 1).

Примітка:

- У цьому випадку ми не бачимо значного покращення в часі розв'язання через простоту структури, але для складніших завдань ця різниця була б відчутною.
- Симуляції виконуються на ПК з процесором Intel Dual Core 2 ГГц і 4 ГБ оперативної пам'яті.
- Наведена тут статистика може змінитися з виходом нової версії програмного забезпечення через модифікацію внутрішнього симулятора, алгоритмів побудови сітки тощо.

Докладнішу інформацію про симулятор FEM в системі ADS дивіться в розділі «Electromagnetic» документації ADS.

Далі буде

Щоб отримати детальну інформацію щодо продукції компанії Keysight Technologies, звертайтеся 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

РОЗШИРЕННЯ ДІАПАЗОНУ ШИРОКОСМУГОВОГО ВЕКТОРНОГО МЕРЕЖЕВОГО АНАЛІЗАТОРА

По мірі того, як штучний інтелект розширює межі передачі даних, а дослідження в галузі бездротового зв'язку просуваються в субтерагерцові частоти, виникає гостра потреба в точних вимірюваннях на надвисоких частотах. Для вирішення цих завдань компанія **Keysight Technologies, Inc.** представила два модулі-розширювачі частоти — NA5305A (до 170 ГГц) і NA5307A (до 250 ГГц), а також прецизійний калібрувальний набір 85065A 0.5 мм. Нові аксесуари для VNA прискорюють розробку та валідацію компонентів для мереж 1.6/3.2 Тбіт/с та напівпровідників нового покоління.

При використанні з векторними мережевими аналізаторами (Vector Network Analyzer, VNA) Keysight PNA/PNA-X ці аксесуари дозволяють інженерам проводити повністю відкалібровані широкосмугові вимірювання S-параметрів в одному циклі свігування в діапазоні до 250 ГГц. Це критично важливо для розробників, які працюють над створенням нового покоління напівпровідників та високошвидкісних між'єднань.

Нові рішення спрощують вимірювальні установки та дозволяють інженерам охарактеризовувати різні субтерагерцеві компоненти на напівпровідниковій пластині або в корпусі, такі як оптичні ВЧ-драйвери, трансімпедансні підсилювачі, друковані плати, кабелі, корпуси та пасивні пристрої.

Ключові переваги:

- система забезпечує широкий динамічний діапазон 105 дБ на частоті 170 ГГц, що дозволяє тестувати компоненти з високими втратами та фільтри з високим рівнем придушення. Максимальна вихідна потужність становить 0 дБм на 170 ГГц і -5 дБм на 220 ГГц, що важливо для тестування активних пристроїв;
- можливість проведення диференціальних вимірювань допомагає інженерам перевіряти диференціальні активні пристрої та цілісність сигналу у високошвидкісних між'єднаннях;
- власники VNA Keysight з діапазоном до 110/120 ГГц можуть легко модернізувати свої системи, що підвищує цінність їхніх початкових інвестицій.

Для створення комплексної та готової до використання вимірювальної екосистеми Keysight співпрацювала з провідними галузевими партнерами. Компанії FormFactor Inc. та MPI Corp. розробили передові ВЧ-зонди. Крім того, компанія Spinner GmbH, провідний постачальник коаксіальних адаптерів, розробила захищені коаксіальні адаптери 0.5–0.8 мм, що підтримують частоти до 167 ГГц, а також 0.5-мм роз'єми для монтажу на друкованій платі. Компанія Junkosha Inc. представила високопродуктивні 0.5-мм тестові кабелі.

«З випуском наших широкосмугових розширювачів для VNA на 170 і 250 ГГц ми надаємо інженерам продуктивність, необхідну для валідації напівпровідників нового покоління та компонентів високошвидкісних мереж, — заявив Джо Рікерт, віцепрезидент Keysight. — Поєднуючи найкращий в галузі динамічний діапазон і вихідну потужність з повною екосистемою коаксіальних компонентів 0.5 мм, ми пропонуємо спрощений і надійний шлях для їхніх високочастотних вимірювань».

www.keysight.com