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

Мета цієї статті — допомогти розробникам опанувати просту методику розробки та створення підсилювачів. Існує безліч підручників з теорії та проєктування підсилювачів, проте в них часто залишається розрив між теорією та практичними аспектами, які розробник повинен враховувати, щоб створити якісну схему підсилювача, характеристики якої добре узгоджуються з результатами моделювання, що зводить до мінімуму або практично виключає необхідність підстроювання підсилювача після виготовлення. У цій статті зроблено спробу об'єднати основи теорії проєктування підсилювачів із практичними рекомендаціями, які дозволяють отримати коректний проєкт із першого разу і тим самим заощадити час і зусилля розробників.

Основна увага приділяється процедурам проєктування з використанням систем автоматизованого проєктування (САПР), оскільки програмне забезпечення САПР стало необхідною умовою для забезпечення точності розробки та скорочення термінів виведення виробів на ринок.

ПРОЄКТУВАННЯ НВЧ-ПІДСИЛЮВАЧІВ**

Вступ

Підсилювачі є неодмінною частиною будь-якої системи зв'язку. Призначення підсилювача в системі полягає в підвищенні рівня сигналу до необхідного значення. Це також допомагає підтримувати рівень сигналу значно вище рівня шуму, що забезпечує легкість і точність його аналізу. Вибір топології підсилювача визначається вимогами конкретної системи; підсилювачі можуть проєктуватися для низько-, середньо- та високочастотних діапазонів, для міліметрових хвиль тощо. Залежно від системи, в якій вони використовуються, підсилювачі можуть мати різні схемотехнічні топології та застосовуватися в різних каскадах тракту, відповідно до чого вони класифікуються як малошумні підсилювачі (МШП), підсилювачі середньої потужності, підсилювачі потужності тощо. Найбільш поширеною структурою, яка досі знаходить застосування в багатьох системах, є гібридний інтегральний НВЧ-підсилювач (*Hybrid microwave integrated circuit*). Основні принципи проєктування підсилювачів залишаються незмінними незалежно від частоти та типу системи, і розробники повинні чітко їх розуміти. Конкретні частотні діапазони висувають свої специфічні вимоги при проєктуванні, які необхідно враховувати відповідним чином. Дана стаття присвячена проєктуванню гібридного інтегрального НВЧ-підсилювача малих сигналів С-діапазону. Описана методика з незначними змінами може бути застосована і до підсилювачів, що працюють в інших діапазонах частот.

Теорія підсилювачів

Перед початком проєктування підсилювача необхідно розібратися в ряді ключових питань, таких як умови стійкості та узгодження. Ці питання розглядаються нижче. Існує безліч джерел, присвячених базовим принципам і процедурам проєктування підсилювачів; наведені в статті формули запозичені з одного з таких джерел [1].

Умова стійкості

Аналіз стійкості — це перший крок при проєктуванні будь-якого підсилювача. Стійкість підсилювача або його здатність протистояти виникненню автоколивань є важливим фактором при проєктуванні й може бути визначена на основі S-параметрів, узгоджувальних кіл та імпедансів навантажень. У чотириполюснику виникнення автоколивань можливе в тому випадку, якщо на вхідному або вихідному порту виникає негативний опір [1]. Це відбувається, коли $|\Gamma_{IN}| > 1$ або $|\Gamma_{OUT}| > 1$, що для односпрямованого пристрою трапляється при $|S_{11}| > 1$ або $|S_{22}| > 1$.

Метою розробника підсилювача є забезпечення безумовної стійкості схеми. Безумовна стійкість означає, що при будь-якому пасивному навантаженні, підключеному до входу або виходу пристрою, схема залишається стійкою і не переходить у режим генерації, тобто в ній не виникають автоколивання. Загалом для лінійного чотириполюсника, що характеризується S-параметрами, двома необхідними та достатніми умовами забезпечення безумовної стійкості є: $K > 1$ і $|\Delta| < 1$, де:

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12},$$

$$K = (1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|2)/(2|S_{21}\ S_{12}|).$$

Умови узгодження

Узгодження підсилювача може виконуватися для різних умов, таких як низький рівень шуму, а також для випадків односпрямованого або двоспрямованого пристрою. Формули для кожного випадку наведені нижче [1].

* Продовження. Початок див. CHIP NEWS, № 6–10, 2025, № 1–2, 2026.

** Використовувані ліцензії ADS: Linear Simulation.

Оптимальне узгодження за шумами

Для досягнення мінімально можливого рівня шуму в заданому діапазоні частот потрібно, щоб на вході транзистора було певне значення імпедансу джерела. Оптимальний за шумом імпеданс джерела позначається як Γ та береться з технічної документації виробника. Відповідний імпеданс навантаження визначається за формулою імпедансу навантаження для каскадного з'єднання:

$$\Gamma_L = \left(\frac{S_{22} - \Gamma_{opt}\Delta}{1 - \Gamma_{opt} S_{11}}\right)^*.$$

Випадок односпрямованого пристрою:

$$\Gamma_{IN} = S_{11} + \left(\frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L}\right),$$

$$\Gamma_{OUT} = S_{22} + \left(\frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S}\right).$$

Випадок двоспрямованого пристрою (коли $S_{12} \neq 0$):

$$\Gamma_{Ms} = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1},$$

$$\Gamma_{ML} = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2},$$

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2,$$

$$B_2 = 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |\Delta|^2,$$

$$C_1 = S11 - \Delta S_{22}^*,$$

$$C_2 = S_{22} - \Delta S_{11}^*.$$

Для отримання максимального підсилення на каскад зазвичай обирається конфігурація зі спільним витоком. Якщо коефіцієнт стійкості $K > 1$, схема забезпечує максимально досяжний коефіцієнт підсилення. Якщо ж $K < 1$, схема може перейти в режим генерації коливань, тобто Gmax прагне до нескінченності та визначається як:

$$G_{max} = \frac{S_{21}}{S_{12}}\left(k - \sqrt{(k^2 - 1)}\right).$$

Такий режим слід виключити, визначивши області нестійкості на площинах Γ_S та ΓL.

Процедура проєктування з використанням САПР

Процедура проєктування з використанням САПР складається з наступних кроків:

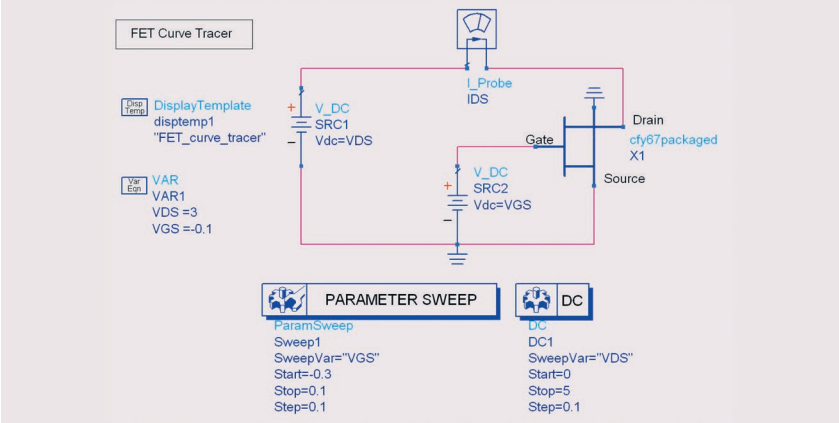

Рис. 187

- аналіз за постійним струмом;
- проєктування кіл зміщення;
- аналіз стійкості;
- проєктування вхідного та вихідного узгоджувальних кіл;
- оптимізація характеристик підсилювача в цілому.

Технічні характеристики підсилювача:

- діапазон частот: 5.3–5.5 ГГц;
- коефіцієнт підсилення: 12 дБ або більше;
- нерівномірність підсилення: ±0.25 дБ (макс.);
- зворотні втрати на вході/виході: < –15 дБ;
- споживана потужність за постійним струмом: 50 мВт (макс.).

Аналіз за постійним струмом

Виходячи з частотного діапазону та вимог до підсилення, для проєктування підсилювача був обраний транзистор з високою рухливістю електронів (HEMT) CFY67-08. Першим видом аналізу, який необхідно виконати, є аналіз за постійним струмом для визначення оптимальних робочих точок зміщення підсилювача. На рисунку 187 представлена схема аналізу за постійним струмом, а на рисунку 188 — результати цього аналізу. Виходячи з обмежень по споживаній потужності та вимог до крутизни (gm), були обрані точки зміщення Vgs = –0.1 В і Vds = 3 В. Щоб отримати схему для зняття вольт-амперних характеристик (ВАХ), виберіть **Insert** (Вставити) **> Template** (Шаблон) **> FET Curve Tracer** (Прилад для побудови кривих польового транзистора), додайте активний компонент (польовий транзистор), виконайте необхідні з'єднання та змініть параметри свіпування відповідно до обраного пристрою.

Проєктування кіл зміщення

Проєктування кіл зміщення підсилювачів залежить від робочого діапазону

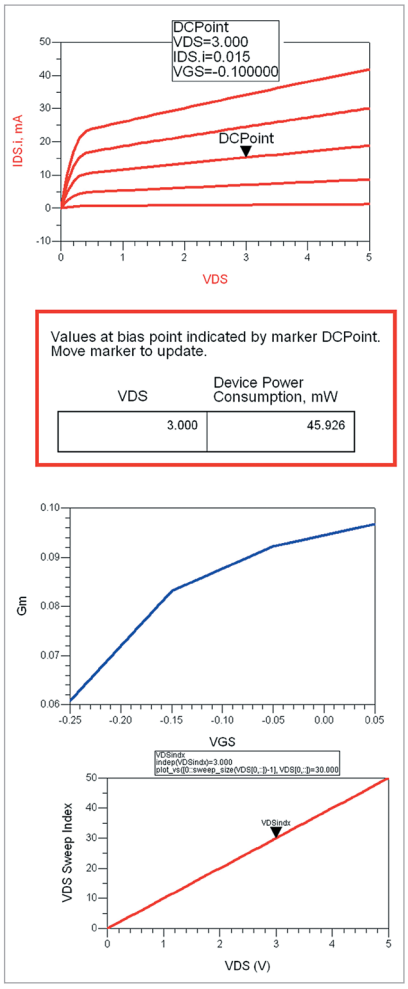

Рис. 188

частот підсилювача; наприклад, якщо підсилювач проєктується для роботи на низьких частотах, то використовується дросель (індуктивність). Однак у мікрохвильовому діапазоні використання дискретних індуктивностей є складним, тому найкращим вибором для кола зміщення є чвертьхвильова лінія (λ/4) з високим хвильовим опором на центральній частоті. При проєктуванні кіл

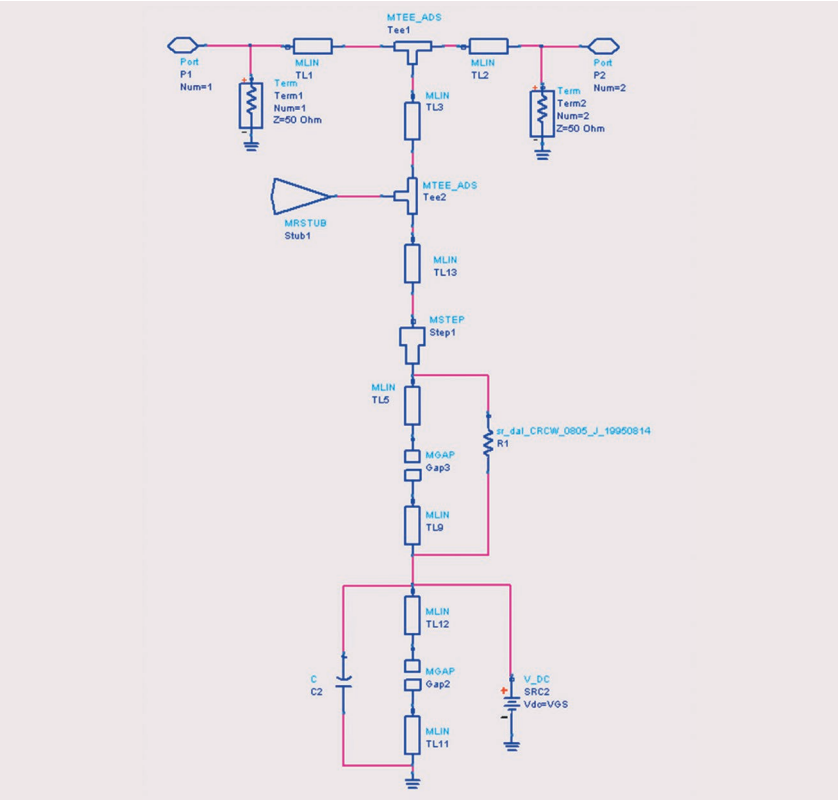

Рис. 189

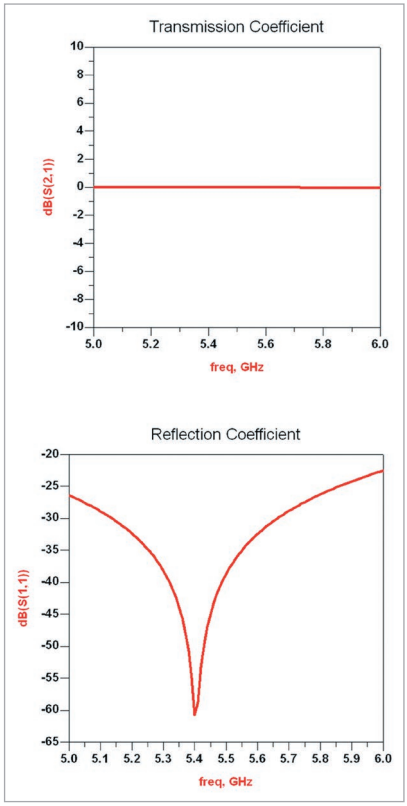

Рис. 191

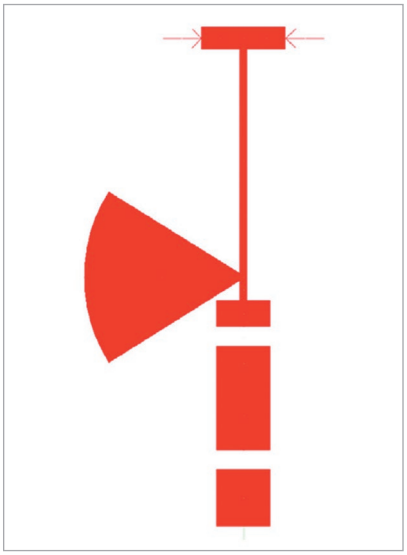

Рис. 190

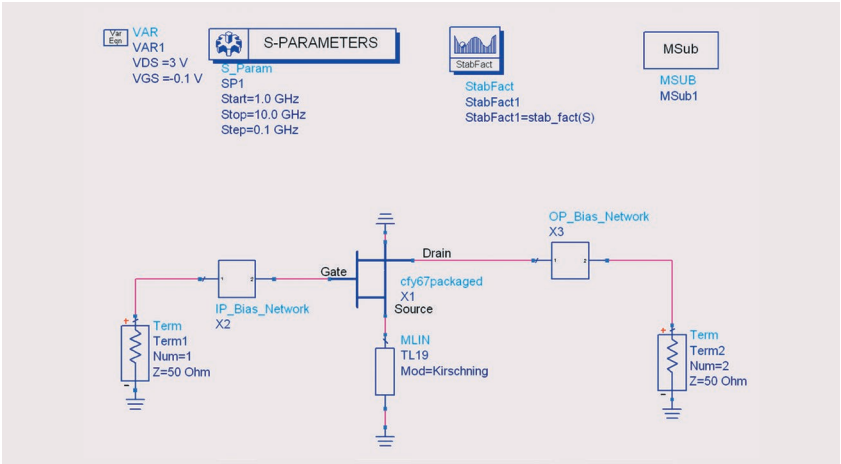

Рис. 192

зміщення слід враховувати, що часто за цією лінією λ/4 слідує резистор або шунтувальний конденсатор, і ці компоненти додають додаткову довжину до лінії λ/4, що розробники іноді ігнорують, а це може призвести до розсіювання частини корисної потужності НВЧ-сигналу в колі зміщення. Це впливає на коефіцієнт підсилення та частотну характеристику підсилювача, тому розраховану довжину лінії λ/4 необхідно скоригувати з урахуванням цих додаткових елементів та їхніх посадкових місць. Одним із поширених методів є використання радіального шлейфа відразу після високоомної чвертьхвильової (λ/4) лінії зміщення. Таке рішення забезпечує належну розв'язку на потрібній НВЧ-частоті незалежно від того, який компонент встановлений після лінії зміщення.

На схемі, наведеній на рисунку 189 показана структура кола зміщення, на якій видно, що за високоомною чвертьхвильовою лінією зміщення відразу слідує радіальний шлейф, а потім резистор і конденсатор, підключені до землі. Для наочності показана топологія кола зміщення (рис. 190).

На рисунку 191 показані результати симуляції для кола зміщення. Видно, що розроблене коло зміщення забезпечує практично ідеальну розв'язку в діапазоні 5.3–5.5 ГГц, що підтверджується коефіцієнтами передачі та відбиття.

Аналіз стійкості

Аналіз стійкості є ключовим етапом проєктування активних схем, включаючи підсилювачі. На рисунку 192 показана схема, отримана після додавання вхідного та вихідного кіл зміщення. Вставте

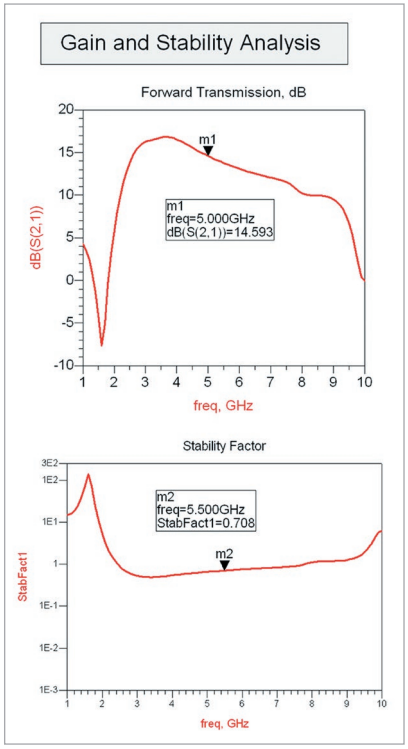

Рис. 193

компонент StabFact з палітри бібліотеки Simulation — S_Param (Симуляція — S-параметри) для розрахунку коефіцієнта стійкості підсилювача, як показано нижче.

Результати, отримані для наведеної вище схеми, представлені на рисунку 193. Зверніть увагу, що схема нестійка в діапазоні від ~2.1 до 7 ГГц, і її необхідно стабілізувати перед тим, як розпочинати узгодження вхідного та вихідного імпедансів.

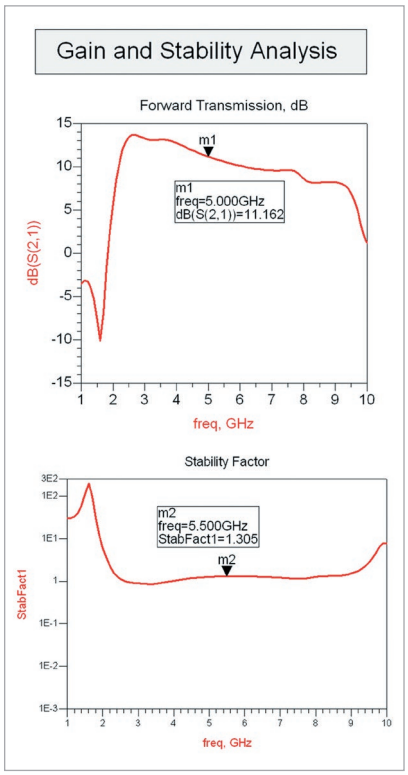

Рис. 195

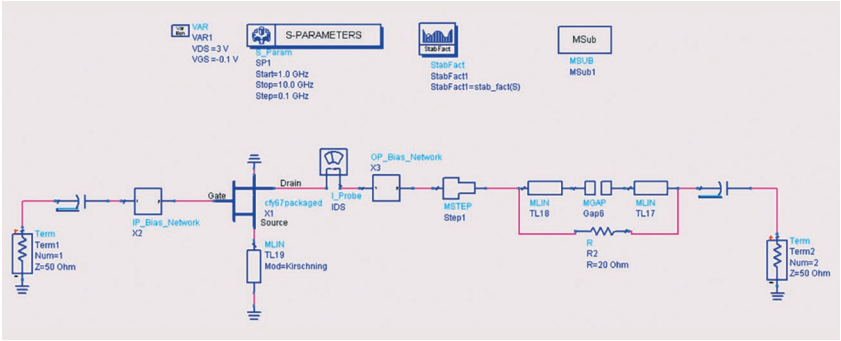

Рис. 194

Аналіз підсилення та стійкості

Для стабілізації можуть застосовуватися різні методи, найпоширенішим з яких є введення резистивного навантаження з урахуванням області нестійкості та типу підсилювача. На рисунку 194 показано один із методів стабілізації схеми.

Показана стабілізована схема з резистивним навантаженням на виході (зверніть увагу на моделювання посадкового місця резистора, яке під'єднане паралельно резистору; це дозволяє врахувати неузгодженість або спотворення, що вносяться посадковим місцем дискретного компонента).

Для досягнення належної стійкості вихід підсилювача був навантажений одним резистором, значення якого потім підбиралося шляхом налаштування. На рисунку 195 показані результати після стабілізації.

Проєктування вхідного та вихідного узгоджувальних кіл

Після забезпечення стійкості схеми в широкому діапазоні частот можна розпочинати проєктування вхідного та вихідного узгоджувальних кіл для досягнення заданих технічних характеристик підсилювача. На рисунку 196 показаний підсилювач після додавання кіл зміщення, компонентів стабілізації та вхідних і вихідних роздільних конденсаторів. Розробникам слід звернути увагу на коректне моделювання посадкових місць для зосереджених компонентів на схемі, як показано на рисунку 196, щоб врахувати неоднорідності, через які проходитиме сигнал у реальній схемі. Таке моделювання має супроводжувати кожен зосереджений компонент. Це вкрай важливо при проєктуванні підсилювачів у мікрохвильовому діапазоні.

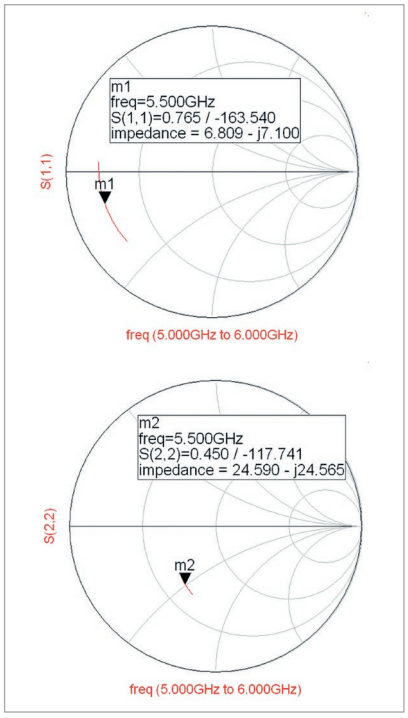

Рис. 197

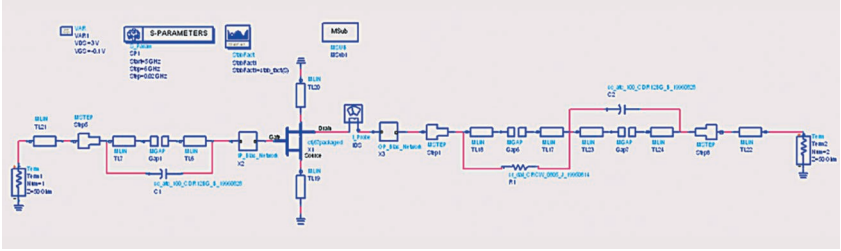

Рис. 196

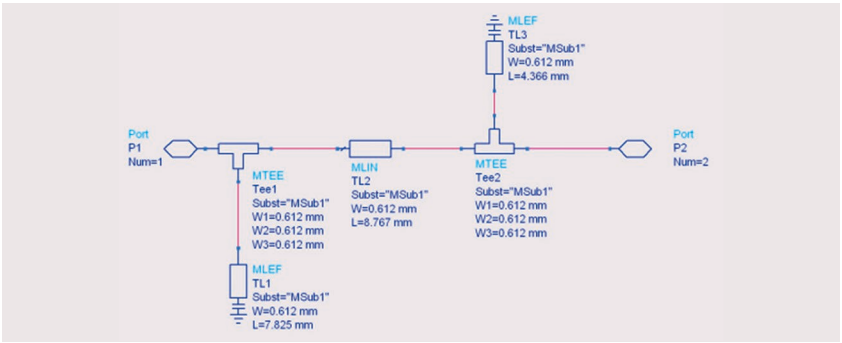

Рис. 198

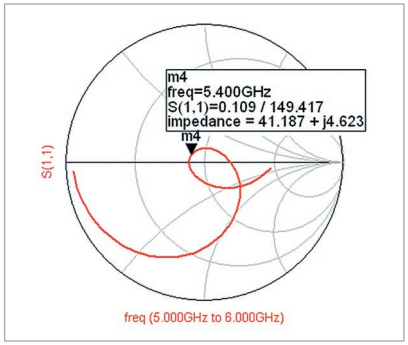

Рис. 199

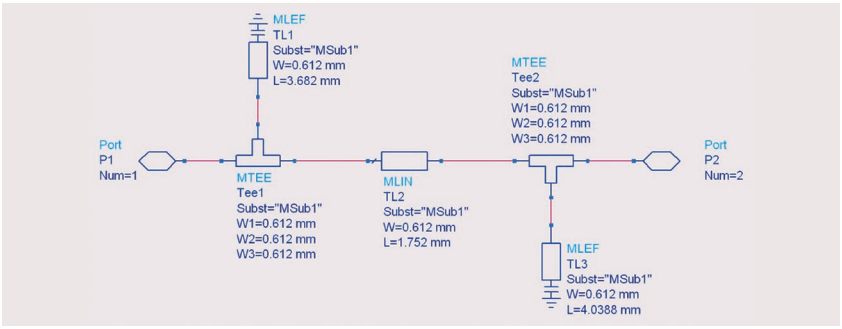

Рис. 200

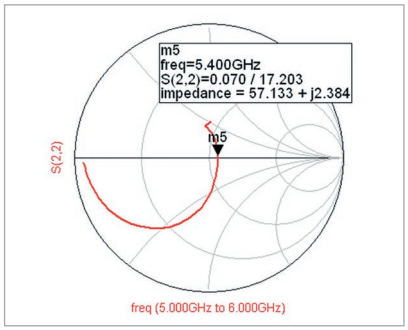

Рис. 201

Вибір топології узгоджувального кола в основному залежить від смуги пропускання підсилювача. Можуть використовуватися узгоджувальні кола з одним або двома шлейфами. На рисунку 197 наведено діаграму Сміта, на якій показані вхідний та вихідний імпеданси, які необхідно узгодити з опором 50 Ом.

Для даного підсилювача був обраний метод із використанням двох шлейфів для проєктування вхідних та вихідних узгоджувальних кіл з метою досягнення найкращих значень зворотних втрат на вході та виході. На рисунках 198, 199 показані вхідні та вихідні узгоджувальні кола, спроєктовані за допомогою утиліти синтезу узгоджувальних кіл (*Matching networks synthesis utility*), доступної в ПЗ ADS.

На рисунках 200, 201 показані результати після підключення вхідного та вихідного узгоджувальних кіл до схеми підсилювача.

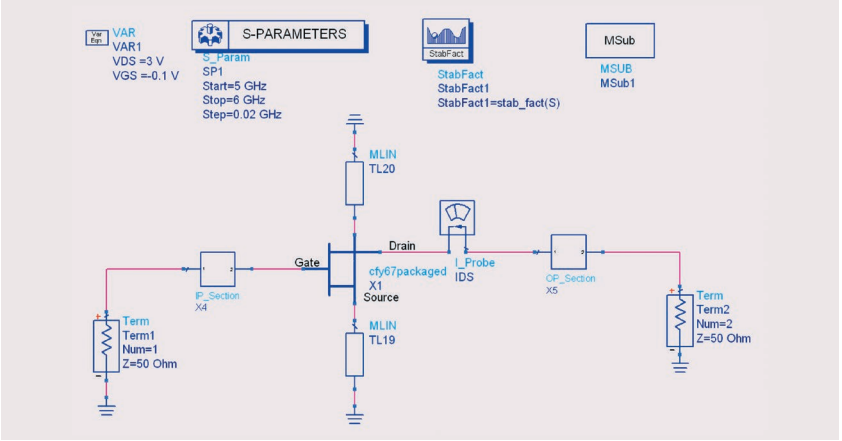

Рис. 202

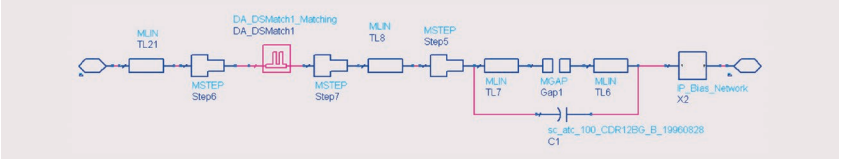

Рис. 203

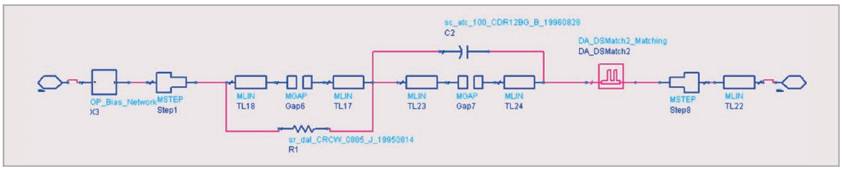

Рис. 204

Оптимізація характеристик підсилювача в цілому

На кінцевому етапі всі підсхеми об'єднуються в єдину модель для оцінки характеристик підсилювача в цілому та виконання за необхідності додаткової оптимізації. На рисунках 202–204 представлений весь підсилювач у цілому.

На рисунку 205 показана повна топологія спроєктованого підсилювача.

На рисунку 206 показані результати симуляції для підсилювача. Вони були отримані після мінімального ручного підстроювання довжин узгоджувальних шлейфів для досягнення бажаних результатів після об'єднання всіх блоків.

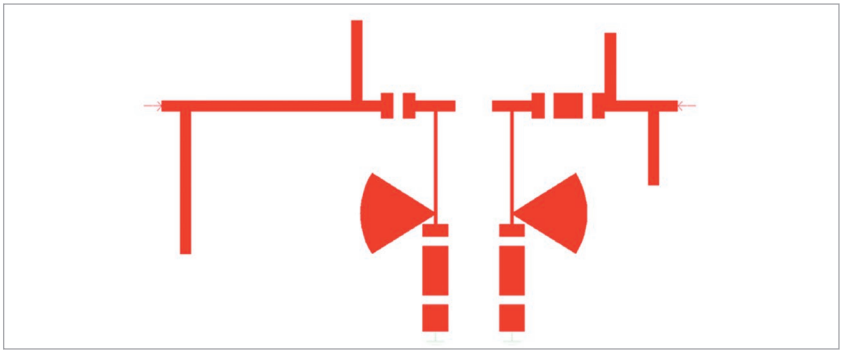

Рис. 205

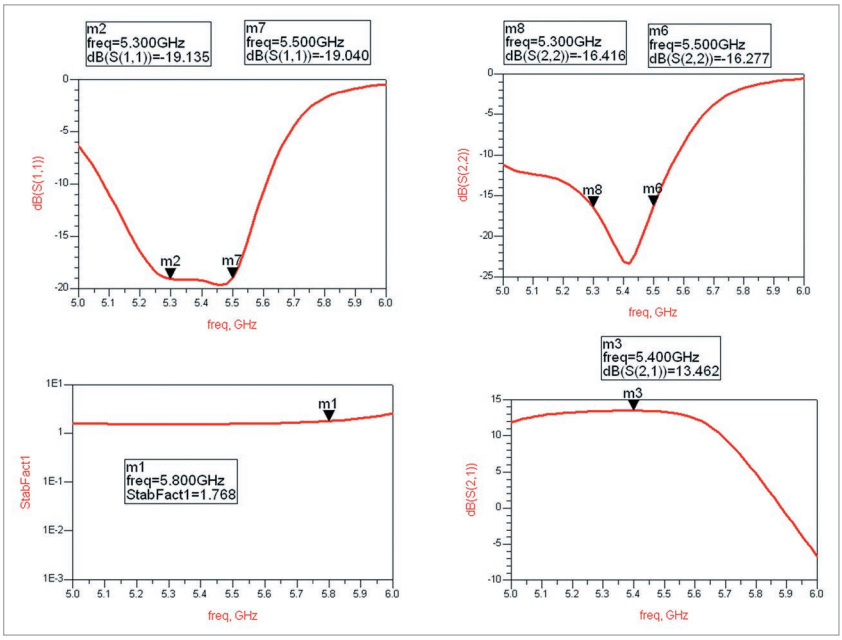

Рис. 206

Висновок

Із наведеної процедури видно, що проєктування підсилювача може бути легко виконано при дотриманні чітко визначеної послідовності дій, і що розробники можуть заощадити час, що витрачається на тонке налаштування та оптимізацію характеристик підсилювача.

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

Література:

1. Stephen A. Mass, «Nonlinear Microwave Circuits», Artech House.

CN

***Keysight Technologies** — це провідна американська компанія, що спеціалізується на розробці та виробництві високоточного електронного вимірювального обладнання та програмного забезпечення для інженерного проєктування та тестування.*

Keysight Technologies створює рішення для аерокосмічної, оборонної, автомобільної промисловості, а також для розробки бездротових мереж (5G/6G) та напівпровідників.

Компанія вважається світовим лідером у своїй галузі. Її обладнання використовується для тестування майже всіх сучасних електронних пристроїв — від смартфонів до супутникових систем зв'язку.

МОДУЛЬ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗБІРКИ

*Компанія **Keysight Technologies, Inc.** оголосила про випуск Keysight Assembly — нового програмного рішення для віртуального моделювання процесів, розробленого, щоб допомогти виробникам виявляти проблеми збірки на ранніх етапах розробки, перш ніж вони перетворяться на витратні виробничі помилки.*

Збої під час збірки на пізніх стадіях реалізації проєкту є надзвичайно витратною проблемою в автомобільному та промисловому секторах. Відкликання продукції та гарантійні претензії коштують провідним автовиробникам США мільярди доларів, оскільки багато дефектів не виявляються до моменту початку фізичного виробництва. Чим пізніше виявлено проблему, тим дорожчим є її усунення, що часто призводить до затримок із виведенням продукту на ринок та необхідності масштабної переробки виробів.

Розроблене у співпраці з партнерами з числа автовиробників (OEM), рішення Keysight Assemblyl дозволяє інженерам відтворювати реальні виробничі процеси, включаючи позиціювання деталей, фіксацію затискачами та з'єднання компонентів, використовуючи покрокові робочі інструкції та шаблони, що не потребують спеціальних навичок MCE-моделювання. Команди отримують можливість оцінювати ризики виникнення деформацій та відхилень розмірів набагато раніше етапу створення фізичних прототипів, що зменшує залежність від методу спроб і помилок, скорочує терміни запуску виробництва та покращує точність збірки.

Keysight Assembly інтегрується з наявним програмним забезпеченням компанії для моделювання штампування, що дозволяє інженерам переносити дані про штамповані деталі зі стадії формування безпосередньо в процес збірки та звіряти отримані результати з даними сканування передсерійних зразків. Це об'єднує розрізнені етапи підготовки виробництва в єдиний робочий процес, допомагаючи фахівцям раніше виявляти відхилення параметрів та покращувати кореляцію між результатами моделювання та характеристиками реальних виробів.

www.keysight.com