Система проєктування Advanced Design System

Посібник з проєктування схем 2.0*

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

СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ (АНАЛІЗ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ТА АНАЛІЗ ВИХОДУ ПРИДАТНИХ)**

Вступ

Забезпечення високих і передбачуваних характеристик схеми з урахуванням усіх можливих варіацій допусків може стати вкрай складним завданням. Ці допуски можуть бути зумовлені особливостями використовуваного технологічного процесу або параметрами дискретних компонентів, що застосовуються у схемі; для створення надійних пристроїв та систем ці варіації необхідно враховувати й досліджувати на етапах моделювання, щоб підтвердити коректність проєкту. Такий вид моделювання зазвичай називають статистичним аналізом. У даній роботі описуються особливості статистичного аналізу, і розробники знайомляться з різними його видами, які можна виконувати для підвищення впевненості в результатах упроцесі проєктування.

Для ілюстрації різних видів статистичного моделювання використовується проєкт гібридного інтегрального НВЧ-підсилювача (MIC) С-діапазону [1].

Технологічні варіації та допуски дискретних компонентів

У реальних НВЧ-пристроях існує багато джерел варіацій, пов'язаних із діелектриками, процесами травлення, дискретними компонентами та іншими факторами:

- **Діелектрики.** Діелектрики можуть мати відхилення за висотою, тангенсом кута діелектричних втрат та діелектричною проникністю (*Er*); ці дані можна отримати безпосередньо з технічного опису виробника.
- **Травлення.** Допуск на точність травлення в процесі виробництва друкованих плат залежить від використовуваної технології й переважно впливає на ширину провідників ліній передачі:
  - При хімічному травленні допуск може сягати ± товщин и металевого провідника (максимум).
  - Реактивне іонне травлення дозволяє досягти чудового допуску на рівні ±1 мкм.
  - Методи осадження металів також можуть забезпечувати допуск у межах ±1–2 мкм.
- **Дискретні компоненти.** Дискретні компоненти, такі як котушки індуктивності, конденсатори, резистори тощо, мають власні допуски, які можуть впливати на характеристики схеми. Різні допуски для дискретних компонентів наведені в таблиці 2.

Усі перелічені допуски за можливості мають враховуватися в процесі проєктування схеми, щоб забезпечити її аналіз та оптимізацію з урахуванням цих варіацій. У даному тексті для статистичного моделювання використовується типова схема гібридного НВЧ-підсилювача, а як варіації, що враховуються, для спрощення викладу обрані допуски на травлення та допуски дискретних компонентів. Розробник може поширити даний підхід на інші варіації, наприклад, на допуски параметрів діелектрика, характерні для конкретного технологічного процесу.

Таблиця 2. Типові допуски дискретних компонентів

Клас компонента	Допуск
B	±0.1 (абсолютне значення)
C	±0.25 (абсолютне значення)
D	±0.5 (абсолютне значення)
F	1%
G	2%
J	5%
K	10%
M	20%

Підкладка, що використовується для проєктування підсилювача в даному прикладі, має такі характеристики:

- висота діелектрика: 25 міл;
- діелектрична проникність: 9.9;
- тангенс кута діелектричних втрат: 7×10^{-4};
- товщина провідника: 8 мкм;
- питома електропровідність: 4.1E+7 (золотий провідник).

Типові допуски дискретних компонентів наведені в таблиці 2.

Статистичне проєктування

Для виконання симуляції, що враховує реальні відхилення допусків, розробнику необхідно розуміти основи статистичного аналізу, описані нижче.

Статистичний аналіз є процесом, що включає:

- врахування випадкових (статистичних) варіацій параметрів проєкту;
- оцінку впливу цих варіацій;
- модифікацію проєкту для мінімізації цього впливу.

Аналіз виходу придатних (*Yield Analysis*) — це процес зміни набору значень параметрів із використанням заданих розподілів імовірності для ви-

* Продовження. Початок див. CHIP NEWS, № 6–10, 2025, № 1–3, 2026.
** Використовувані ліцензії ADS: Linear Simulation, Statistical Design Package.

значення кількості комбінацій, що забезпечують виконання встановлених вимог до технічних характеристик.

Вихід придатних є одиницею вимірювання при статистичному проєктуванні. Він визначається як відношення кількості проєктів, що відповідають технічним вимогам, до загальної кількості створених варіантів проєкту. Його також можна розглядати як імовірність того, що даний екземпляр проєкту буде відповідати технічним вимогам.

Оскільки загальна кількість потенційних варіантів може бути дуже великою або невідомою, вихід придатних зазвичай вимірюється на кінцевій кількості зразків або ітерацій у ході процесу, що називається оцінкою виходу придатних. У міру збільшення кількості ітерацій розрахункова оцінка виходу придатних наближається до істинного значення виходу придатних для даного проєкту. Значення параметрів, що мають статистичні варіації, називаються змінними виходу придатних.

Для аналізу схем в ADS можна використовувати три варіанти статистичного проєктування.

Аналіз методом Монте-Карло

Методи аналізу виходу придатних за допомогою моделювання Монте-Карло традиційно широко використовуються та визнані як засіб оцінки виходу придатних. Цей метод полягає у виконанні серії випробувань (ітерацій). Кожне випробування є результатом випадкової генерації значень змінних виходу придатних відповідно до статистичного розподілу, після чого виконуються симуляція та оцінка результату на відповідність заданим технічним характеристикам.

Перевага методу Монте-Карло полягає в тому, що точність отриманої оцінки не залежить від кількості статистичних змінних і не потребує спрощувальних припущень про розподіл імовірностей як для параметрів компонентів, так і для характеристик схеми.

Недоліком цього методу є необхідність повної симуляції схеми для кожного випробування, а також потреба у великій кількості ітерацій для отримання високого ступеня вірогідності та точної оцінки виходу придатних.

Випробування Монте-Карло та довірчі рівні

У наведеному нижче тексті розглядається спосіб розрахунку кількості випробувань, необхідних для забезпечення заданого довірчого рівня та похибки оцінки. Довірчий рівень — це площа під кривою нормального (гаусівського) розподілу в межах заданої кількості стандартних відхилень. Типові значення довірчого рівня наведені в таблиці 3.

Похибка — це абсолютна різниця між фактичним виходом придатних Y і розрахунковою оцінкою виходу придатних $\tilde{Y}$, що визначається як

$$E = |Y - \tilde{Y}|,$$

де E — похибка у відсотках.

Нижню межу значення $\tilde{Y}$ визначають як

$$\tilde{Y} = Y - E.$$

Обсяг вибірки або кількість випробувань N розраховується за формулою:

$$N = \left(\frac{C\sigma}{E}\right)^2 \times Y(1 - Y),$$

де $C\sigma$ — довірчий рівень, виражений кількістю стандартних відхилень.

Приклад

Для довірчого рівня 95.4% (тобто стандартне відхилення = 2), похибки $E = \pm 2\%$ та виходу придатних виробів 80%:

$$N = \left(\frac{2}{0.02}\right)^2 \times 0.8(1 - 0.8),$$

$N = 1600$ випробувань.

Аналіз виходу придатних

Цей процес включає симуляцію проєкту в ході заданої кількості випробувань, у яких змінні виходу придатних набувають випадкових значень навколо своїх номінальних величин відповідно до заданих функцій розподілу ймовірностей.

Кількість успішних та неуспішних випробувань фіксується, і ці дані використовуються для розрахунку оцінки виходу придатних. По суті, вихід придатних означає відсоток схем, що відповідають необхідним специфікаціям, які розробник встановив як цільові (*Goal*).

Аналіз виходу придатних виробів базується на методі Монте-Карло. Виконується серія випробувань, під час яких усім статистичним змінним проєкту присвоюються випадкові значення, потім проводиться симуляція, і отримані результати порівнюються з встановленими вимогами щодо виходу придатних. Кількість успішних та неуспішних симуляцій накопичується за всю серію випробувань і використовується для розрахунку оцінки виходу придатних.

Таблиця 3. Типові значення довірчого рівня

Стандартні відхилення	Довірчий рівень
1	68.30%
2	95.40%
3	99.70%

Таблиці довірчих рівнів

Довірчі рівні, якими можна керуватися для визначення кількості випробувань, що підходить для аналізу виходу придатних при різних довірчих рівнях і виході придатних 90% наведені у таблицях 4–6. Додаткові таблиці наведені в документації програмного забезпечення [2].

Оптимізація виходу придатних

Оптимізація виходу придатних коригує номінальні значення обраних параметрів елементів для максимізації виходу придатних. Оптимізація виходу придатних, яку також називають центруванням проєкту, — це процес, під час якого номінальні значення змінних виходу придатних підлаштовуються для отримання максимально можливої оцінки виходу придатних.

Для контролю довірчого рівня і, отже, точності оцінки виходу придатних, розробнику рекомендується виконати перевірочний аналіз виходу придатних після завершення оптимізації, використовуючи номінальні значення параметрів, отримані в результаті оптимізації. Відповідна кількість випробувань може бути обрана на основі формули, наведеної вище.

Таблиця 4. Довірчий рівень = 68.3%, фактичний вихід придатних = 90%

Похибка ±%	Очікуваний % виходу придатних		Кількість випробувань
	Низький	Високий	
1	89	91	900
2	88	92	225
3	87	93	100
4	86	94	56
5	85	95	36
6	84	96	25
7	83	97	18
8	82	98	14
9	81	99	11
10	80	100	9

Таблиця 5. Довірчий рівень = 95%, фактичний вихід придатних = 90%

Похибка ±%	Очікуваний % виходу придатних		Кількість випробувань
	Низький	Високий	
1	89	91	3457
2	88	92	864
3	87	93	384
4	86	94	216
5	85	95	138
6	84	96	96
7	83	97	70
8	82	98	54
9	81	99	42
10	80	100	34

Таблиця 6. Довірчий рівень = 99% Фактичний вихід придатних = 90%

Похибка ±%:	Очікуваний % виходу придатних		Кількість випробувань
	Низький	Високий	
1	89	91	5967
2	88	92	1491
3	87	93	663
4	86	94	372
5	85	95	238
6	84	96	165
7	83	97	121
8	82	98	93
9	81	99	73
10	80	100	59

Виконання статистичного аналізу без якісного інструменту симуляції є недоцільним через велику кількість необхідних ітерацій. Інструмент симуляції повинен мати можливості виконання аналізу виходу придатних, аналізу Монте-Карло та оптимізації виходу придатних, щоб гарантувати стійкість спроєктованої схеми до реальних технологічних варіацій.

Приклад. Статистичний аналіз гібридного НВЧ-підсилювача С-діапазону

На рисунку 207 показана повна схема гібридного НВЧ-підсилювача С-діапазону.

Технічні характеристики підсилювача:

- діапазон частот: 5.3– 5.5 ГГц;
- коефіцієнт підсилення: 13 дБ (мін.);
- зворотні втрати на вході: < –15 дБ;
- зворотні втрати на виході: < –15 дБ.

На рисунках 208, 209 показані оптимізовані характеристики схеми.

Підсилювач спроєктований на підкладці з оксиду алюмінію (*Alumina*) товщиною 25 міл; з урахуванням процесу хімічного травлення максимальний допуск травлення становитиме ±8 мкм, також у схемі використовується кілька дискретних компонентів, наведених у таблиці 7.

Для виконання статистичного аналізу необхідно виконати три кроки:

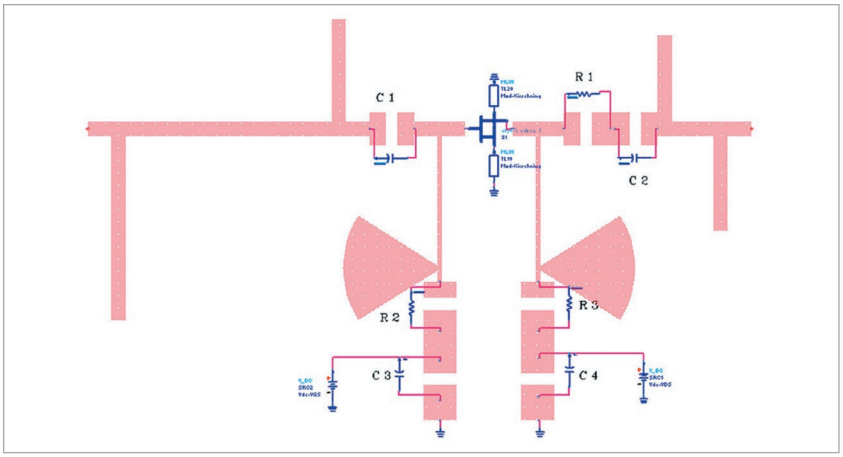

Рис. 207

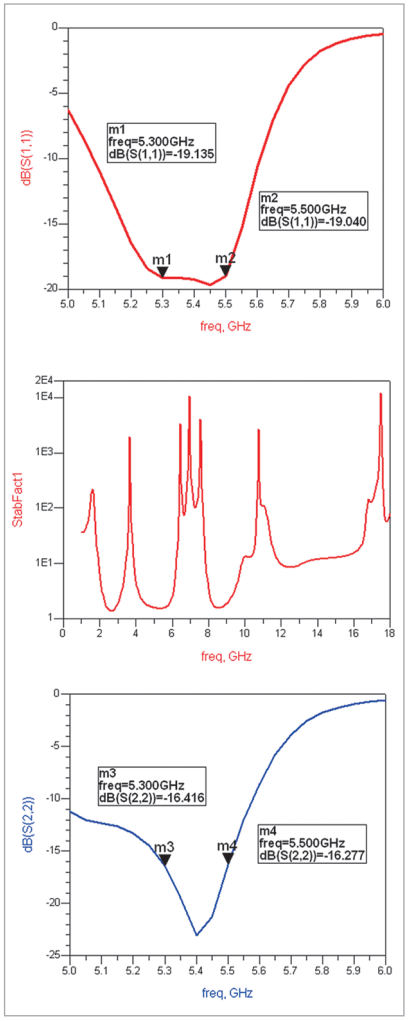

Рис. 208

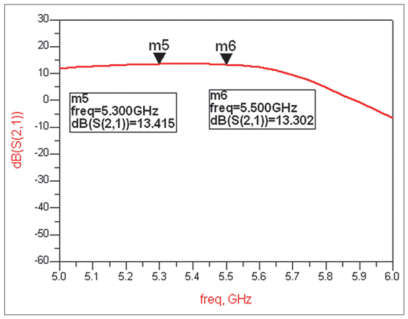

Рис. 209

- задати допуски для компонентів і ліній передачі;
- встановити критерії відповідності технічним характеристикам;
- задати кількість випробувань і обрати метод статистичного аналізу (Монте-Карло або аналіз виходу придатних).

Усім значенням ширини ліній передачі була задана статистична варіація ±8 мкм із використанням функції нормального (гаусівського) розподілу (рис. 210), а для дискретних компонен-

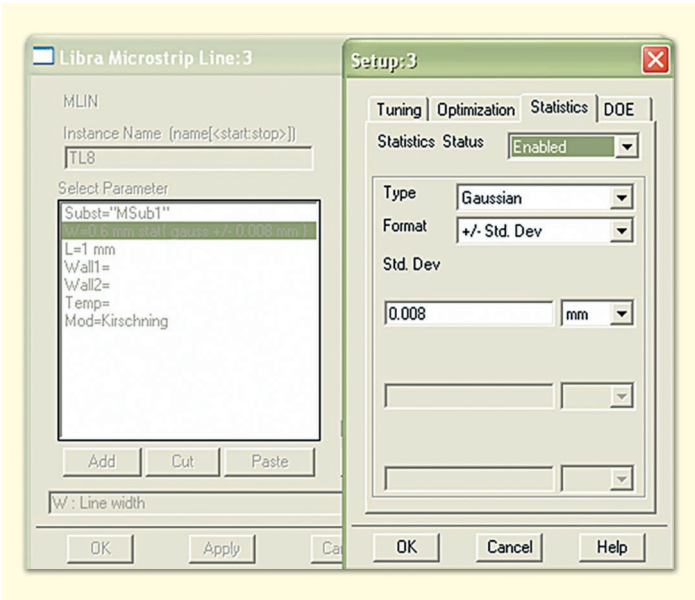

Рис. 210

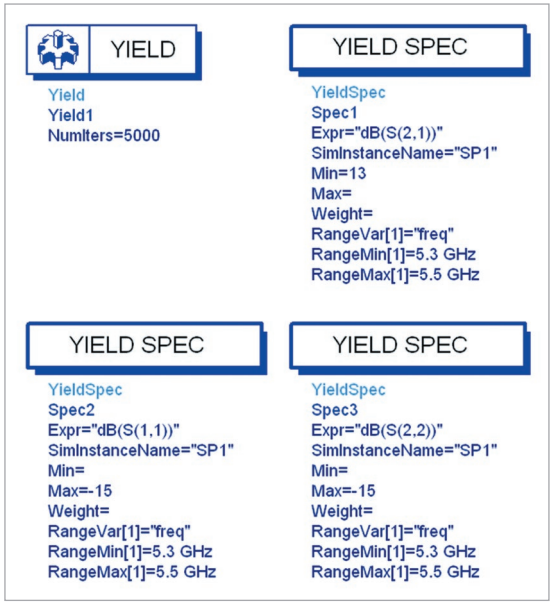

Рис. 211

Таблиця 7. Довірчий рівень = 99%, фактичний вихід придатних = 90%

Компонент	Значення	Допуск	Призначення
R1	24 Ом	5%	Стійкість
R2	300 Ом	5%	Стійкість (вхідна лінія зміщення)
R3	10 Ом	5%	Стійкість (вихідна лінія зміщення)
C1	2 пФ	±0.1 пФ	Розділовий конденсатор (вхід)
C2	2 пФ	±0.1 пФ	Розділовий конденсатор (вихід)
C3	560 пФ	10%	Шунтувальний конденсатор (вхід)
C4	560 пФ	10%	Шунтувальний конденсатор (вихід)

Таблиця 8. Результати статистичного аналізу гібридного НВЧ-підсилювача С-діапазону (5 000 ітерацій)

Вихід придатних	Кількість відмов	Кількість придатних
80.940	953.000	4047.000

Таблиця 9. Результати додаткового статистичного аналізу гібридного НВЧ-підсилювача С-діапазону (250 ітерацій)

Вихід придатних	Кількість відмов	Кількість придатних
82.000	45.000	205.000

тів були встановлені допуски, зазначені в таблиці 7.

Критерії відповідності характеристикам були встановлені відповідно до специфікацій підсилювача, як показано на рисунку 211.

Кількість випробувань була обрана рівною 5 000, а для визначення відсотка придатних виробів був обраний метод аналізу виходу придатних. Перші результати, наведені у таблиці 8, показують, що відсоток виходу придатних становить близько 81%. Це досить хороший результат для першої ітерації. У таблиці 8 також вказана кількість схем, що відповідають необхідним специфікаціям, та кількість схем, які не пройшли перевірку.

Для реального виробництва вихід придатних має становити не менше 90–95%. Після проведення попереднього аналізу виходу придатних розробник може виконати оптимізацію виходу придатних або аналіз чутливості для поліпшення показників (у цій статті не розглядається).

Щоб з'ясувати причину низького виходу, було проведено ще один аналіз із використанням лише 250 ітерацій, при цьому дані щодо кожної ітерації зберігалися для детальнішого вивчення характеристик, що не відповідають вимогам специфікації, як показано на рисунку 212 та в таблиці 9.

Із наведених ілюстрацій видно, що характеристики вхідних зворотних втрат та коефіцієнта підсилення не впливають на зниження виходу придатних. Основною причиною низького виходу придатних є вихідні зворотні втрати, які трохи не відповідають необхідній специфікації

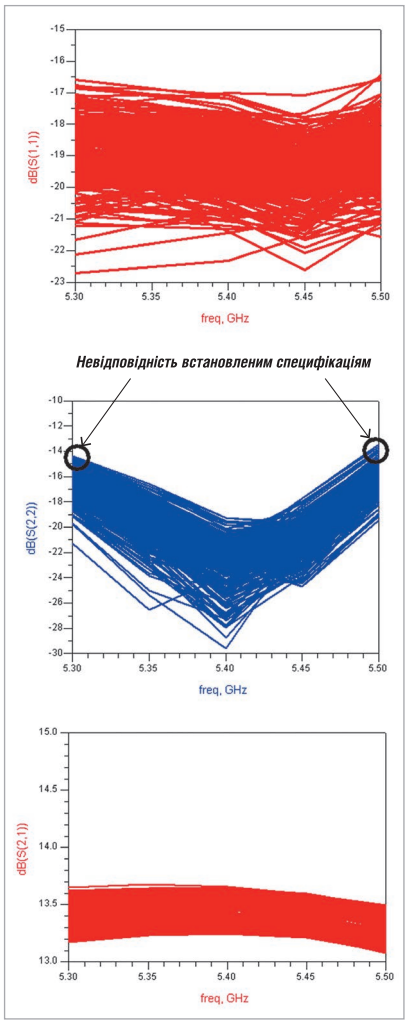

Рис. 212

на нижній та верхній межах діапазону частот. Розробники можуть виконати оптимізацію виходу придатних для цен-

Таблиця 10. Результати додаткового статистичного аналізу гібридного НВЧ-підсилювача С-діапазону (зворотні втрати на виході = −14 дБ)

Вихід придатних	Кількість відмов	Кількість придатних
98.500	75.000	4925000

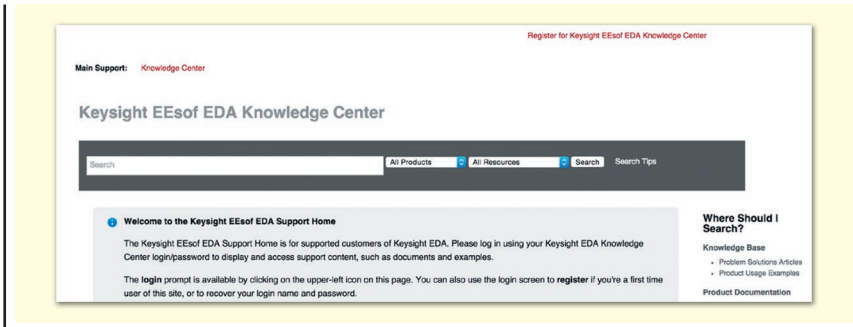

Рис. 213

трування проєкту з урахуванням цих статистичних варіацій.

Аналізуючи наведені вище результати, можна помітити, що хоча відсоток виходу придатних виглядає недостатньо високим, значення вихідних зворотних втрат лише незначно нижче необхідної специфікації. Було проведено ще один цикл аналізу виходу придатних, у якому цільова специфікація для вихідних зворотних втрат (S22) була змінена на −14 дБ. У результаті було отримано відмінний вихід придатних, що склав 98.5%, як відображено в таблиці 10.

Висновок

Очевидно, що проведення аналізу виходу придатних є обов'язковим етапом перед запуском виробу у виробництво. Використовуючи сучасні інструменти моделювання, розробники отримують можливість із легкістю виконувати складний статистичний аналіз та підвищувати надійність проєктованих схем.

Додаткова інформація щодо аналізу виходу придатних

Додаткові матеріали та різні приклади статистичного моделювання можна знайти в Центрі знань Keysight EEsof EDA Knowledge Center (рис. 213). Розробники можуть зареєструватися за адресою: http://www.keysight.com/find/eesof-knowledgecenter.

Зареєстровані користувачі можуть знайти додаткові технічні нотатки та приклади щодо аналізу виходу придатних за адресою: https://docs.keysight.com/display/support/KCHome.

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.
2. Erik Boch, «A High Efficiency 40 GHz Power FET Frequency Doubler», Aug.1989, Microwave Journal.

CN

РІШЕННЯ НОВОГО ПОКОЛІННЯ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ ВНУТРІШНЬОАВТОМОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ

*Компанія **Keysight Technologies** продемонструвала нові рішення для тестування автомобільних Ethernet-приймачів на відповідність стандартам на конгресі Automotive Ethernet Congress (AEC) у Німеччині. Нові рішення призначені для підтримки валідації в діапазоні від 10BASE-T1S до 10GBASE-T1, що дозволяє автовиробникам та постачальникам прискорити перехід до високошвидкісної зональної архітектури та програмно-керованих транспортних засобів.*

Оскільки транспортні засоби стають дедалі більше залежними від програмного забезпечення та інтенсивності обміну даними, технологія автомобільного Ethernet стрімко розвивається для забезпечення вищої пропускної здатності, покращеної надійності та масштабованих мережевих архітектур. Як наслідок, тестування приймачів (Rx) стало критично важливою вимогою для забезпечення надійності та безпеки автомобільних платформ наступного покоління.

Для вирішення цих викликів Keysight представить на AEC два нові тестові рішення. Рішення для тестування приймачів 10BASE T1S підтримує нові архітектури Ethernet із багатоточковою конфігурацією (multi-drop) для застосування в зональних контролерах та контролерах периферійних пристроїв. Також Keysight продемонструє свою систему для тестування оптичного автомобільного Ethernet nGBASE AU спеціально розроблену для задоволення все більших вимог до пропускної здатності, стійкості до електромагнітних завад та передачі даних на великі відстані у внутрішньоавтомобільних мережах майбутнього.

Рішення для тестування приймачів 10BASE T1S надає наступні переваги:

- *Комплексне автоматизоване програмне забезпечення для перевірки приймачів на відповідність стандартам, що здійснює валідацію фізичного рівня (PHY) згідно зі специфікацією Open Alliance TC14 PMA Test Suite 5.2.1.*
- *Верифікація коефіцієнта бітових помилок (BER) приймача в умовах роботи у каналі з погіршеними характеристиками та при впливі наведених шумів, що стало можливим завдяки новому медіаконвертеру 10BASE-T1S, платі імітації резонансних коливань (ringing board) та адаптерам інтерфейсу MDI.*
- *Можливості тестування багатоточкових мереж дозволяють проводити валідацію масштабованих зональних архітектур.*

Переваги випробувальний стенду Keysight для тестування оптичного фізичного рівня nGBASE AU:

- *Повна відповідність специфікаціям IEEE 802.3cz Amendment 7 (2023) та вимогам випробувальних лабораторій Open Alliance TC7.*
- *Пакет вимірювань TDFOM (включаючи параметри TDFOM OMA, ER, AOP та OAR) для поглибленої оцінки якості сигналу.*
- *Підтримка моделей осцилографів серії Keysight DCA-M, зокрема N1092A та N1092C із відновленням тактової частоти за допомогою модуля Keysight N1077B.*
- *Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс автоматизації тестування на базі FlexDCA, що підтримує як стандартні конфігурації для перевірки відповідності, так і розширені налаштування для розробників.*

www.keysight.com