

# 10 рекомендацій щодо забезпечення цілісності сигналу у високошвидкісних лініях передавання даних

**Мохаммед Азадифар (Mohammad Azadifar), Fischer Connectors**  
**Переклад та редагування: Роман Прокопєць, Microdis Electronics**  
 E-mail: Roman.Prokopets@microdis.net

**Складність конструкції та попит на ширину смуги пропускання зростають у міру того, як до систем під'єднують дедалі більше датчиків і потрібне швидке, надійне та безпечне передавання більшої кількості даних. При цьому головною вимогою до таких систем є забезпечення високої якості переданого сигналу. У статті розглядаються 10 ключових завдань, які потрібно вирішити для оптимізації виробів у складі високошвидкісних ліній передачі даних.**

Забезпечення цілісності сигналу має вирішальне значення для реалізації проєктів з передачею великих обсягів даних, наприклад Інтернету речей, Індустрії 4.0 і взаємопов'язаних екосистем. Насамперед, за високих швидкостей передавання даних і на великих відстанях такі ефекти як шум, спотворення, внесені та зворотні втрати, а також перехресні завади спотворюють електричні сигнали настільки, що виникають помилки та відбувається відмова пристроїв або всієї системи.

З одного боку, за під'єднання пристроїв без завад і високу якість передавання сигналу відповідає роз'єм. Іншими ключовими факторами, що визначають успішне передавання даних, є якість і робочі характеристики кабелю, інтерфейс між з'єднувальним кабелем і під'єднаними пристроями, а також характеристики передавача і приймача. Працездатність збалансованої кабельної системи визначається кількома параметрами. Найважливішими з них є: загасання (втрати, що вносяться), відбиття (зворотні втрати), перехресні завади на ближньому (*Near End Cross Talk, NEXT*) і дальньому (*Far End Cross Talk, FEXT*) кінцях. Насправді, кожне окремо рішення в кабельно-з'єднувальному вузлі, що збирається, може в кінцевому підсумку вплинути на цілісність сигналу.

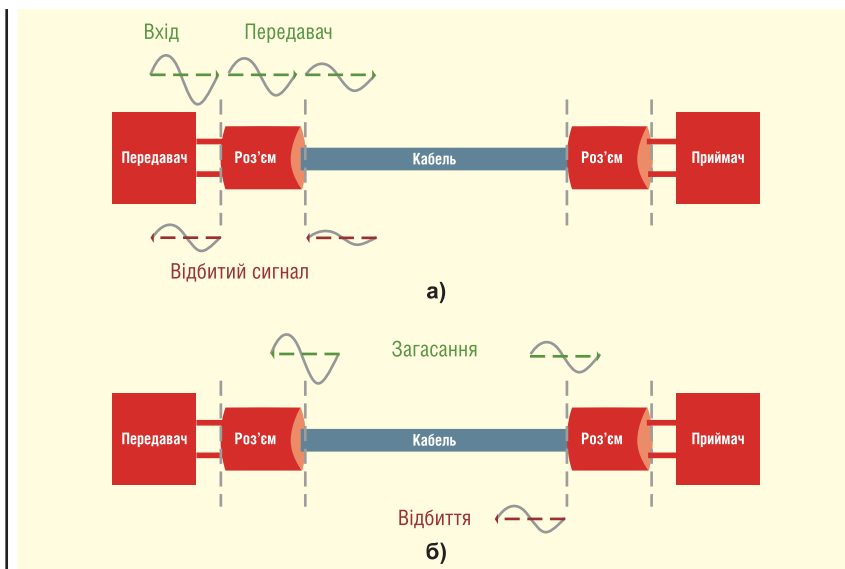
## ЛІНІЯ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

На передання сигналу в лінії впливають втрати в кабельному з'єднанні. Що вища частота сигналу, то більші втрати. Оскільки максимальна необхідна частота сигналу зростає, зменшується довжина лінії, за якої ще застосовуються спрощені моделі схеми із зосередженими

параметрами, — необхідно використовувати їхні ВЧ-аналоги, наприклад, математичний апарат, що описує протяжну лінію передачі, або навіть рівняння Максвелла.

## СПОТВОРЕННЯ СИГНАЛУ

Відбиття і загасання — два основні механізми деградації сигналу. Сигнал може спотворюватися в місці підключення кабельного роз'єму до передавача (рис. 1). Якщо вхідний імпеданс передавача відрізняється від вхідного імпедансу роз'єму, частина енергії, що надходить, відбивається в бік передавача. Частина енергії, що залишилася, втрачається в з'єднувачі через розсіювання в металевих елементах конструкції або діелектрику, перш ніж сигнал



**Рис. 1. Деградація сигналу через неузгоджений імпеданс і загасання на стороні: передавача (а); кабелю і приймача (б)**

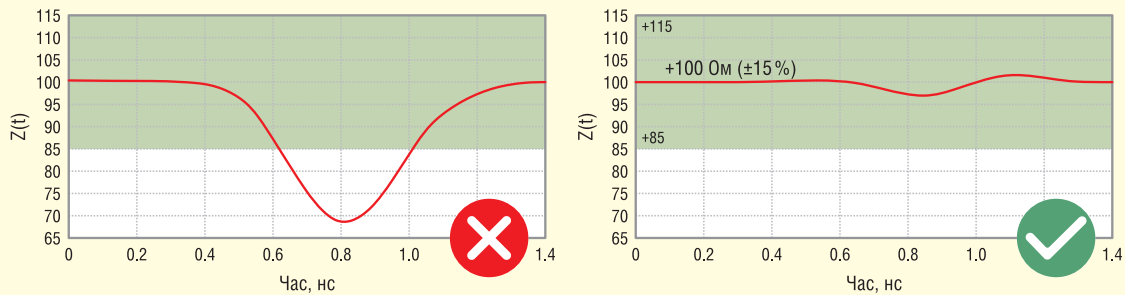


Рис. 2. Відмінності між характеристиками роз'єму з неузгодженим і узгодженим імпедансами

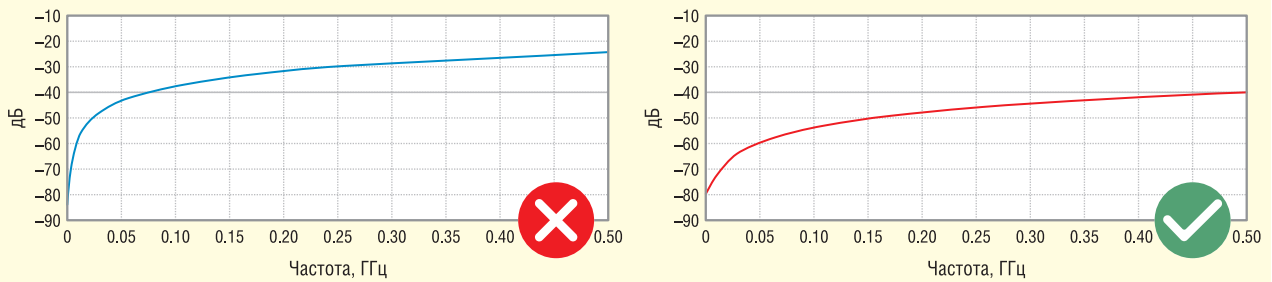


Рис. 3. Порівняння рівнів двох перехресних завад за різних способів призначення сигнальних виводів в одному і тому ж роз'ємі

досягає іншого боку роз'єму. Відбиття є найголовнішою причиною втрати сигналу в роз'ємі, а загасання — основною причиною втрат у кабелі. Крім цих двох ефектів на якість сигналу впливають шум і зовнішні перехресні завади.

відстань між контактами та їхнє розташування один відносно одного, а також тип матеріалів для всіх компонентів (рис. 2). Оскільки на характеристики NEXT і FEXT може впливати конструкція роз'єму, його необхідно оптимізувати з урахуванням цих обмежувальних факторів.

каналів, унаслідок якої виникають перехресні завади. Одним із параметрів збірки кабель-з'єднувач, що дають змогу встановити прийнятну частоту бітових помилок (*Bit Error Rate, BER*), як правило, рівну 10–12, є рівень перехресних завад NEXT і FEXT, тобто польового міжканального зв'язку в кабелі. Щоб звести до мінімуму перехресні завади, вирішальне значення має не тільки розташування виводів, а й коректне призначення сигнальних контактів (рис. 3).

## УЗГОДЖЕННЯ ІМПЕДАНСУ

Для оптимізації узгодження імпедансу (відношення  $V/I$  або  $E/H$ ) слід врахувати такі чинники, як діаметр контакту,

## ПЕРЕХРЕСНІ ЗАВАДИ

Необхідно встановити інтенсивність взаємодії сигналів у паралельних

**MICRODIS**  
www.microdis.net

Мікродіс Електронікс ГмБХ —  
офіційний дистриб'ютор u-blox  
та Fischer Connectors в Україні

**Роман Прокопець**  
Менеджер з продажу

Microdis Electronics GmbH  
Rheinauer Straße 1  
68766 Hockenheim  
Germany

М +380 67 475 81 86  
Roman.Prokopets@microdis.net

**u-blox**  
**fischer**  
CONNECTORS



**Рис. 4.** Векторний аналізатор кіл для вимірювання параметрів зв'язку у частотній області

### ВЕКТОРНИЙ АНАЛІЗАТОР КІЛ

Протоколи даних забезпечують нормативні значення параметрів передавання даних (внесені та зворотні втрати, перехресні завади, шум) для забезпечення сумісності компонентів системи — передавача, приймача, кабелю, роз'єму для успішного спільного функціонування. До типових протоколів належать Ethernet, USB, SDI, DP і HDMI. Після оптимізації застосування відповідно до протоколу фізичний прототип збірки роз'єм-кабель тестується для підтвердження заданої характеристики за допомогою векторного аналізатора кіл (*Vector Network Analyzer, VNA*) (рис. 4). При цьому вимірюються хвильові параметри відбиття і проходження сигналу в електричних з'єднаннях компонентів залежно від частоти,

або так звані параметри розсіювання (S-параметри).

Оскільки у типових пристроїв, що тестуються, відсутні коаксіальні інтерфейси для вимірювання, часто доводиться встановлювати спеціальні пристосування між коаксіальним інтерфейсом приладу та пристроєм, що тестується (ПТ) (*Device Under Test, DUT*), наприклад, друкованою платою, корпусом, роз'ємом або кабелем (рис. 5). Щоб під'єднати кабель із роз'ємом до аналізатора кіл, потрібна високошвидкісна прецизійна друкована плата із заданою смугою пропускання.

### ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ

Багато особливостей конструкції, а також чинники можуть покращити або порушити потік енергії під час його поши-

рення з одного боку з'єднувача на інший. Отже, кожну конструкцію, пов'язану з високошвидкісними пристроями, необхідно перехресно оптимізувати з урахуванням механічних, електричних характеристик, цілісності сигналу, електромагнітної сумісності та завад. Визначальними факторами є геометрія роз'єму, зокрема згадане вище розташування виводів і коректне призначення сигнальних контактів (рис. 6), довжина кабелю і втрати в ньому, контрольованість і відтворюваність кабельної збірки, а також способи герметизації збірок, які працюють на швидкостях, вищих за 1 Гбіт/с.

### ВИМІРЮВАННЯ ІМПЕДАНСУ

Забезпечивши керування поперечною модою електромагнітної хвилі (*Transverse Electromagnetic, TEM*) і розподіл поля в поздовжньому напрямі, слід переконатися, що діаметри виводів і їхнє місце розташування розраховані правильно з урахуванням заданого імпедансу. Оскільки конструкція роз'єму може вплинути на характеристики NEXT і FEXT, його необхідно оптимізувати, взявши до уваги ці обмеження. Для вимірювання імпедансу застосовується рефлектометр (*Time Domain Reflectometry, TDR*).

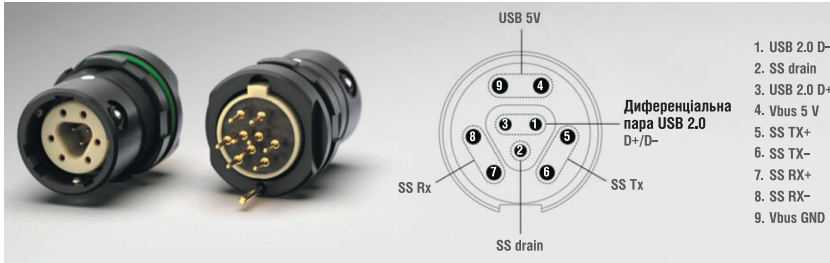
### ДЕЕМБЕДІНГ

Вплив оснащення друкованих плат необхідно виключити з результатів вимірювань методом деємбеддингу. Рекомендується скористатися стандар-



**Рис. 5.** Приклади пристосувань для друкованих плат, що використовуються для вимірювання за допомогою векторного аналізатора кіл

Майкл О'Коннор (*Michael O'Connor*), співробітник компанії *Hubbell Premise Wiring* і член робочої групи *TR-42.7.1 Connecting Hardware Working Group* асоціації *ТІА*, вважає, що для визначення перехресних наведень, які вносяться штекером, потрібно використовувати нову, спеціально розроблену методику тестування на основі залишкового (*de-embedded*) принципу визначення параметрів, що дасть змогу врахувати і ємнісні, і індуктивні складові перехресних завад штекера. За цією методикою, що отримала назву «*de-embedding*», рівень перехресних завад, що вносяться штекером, визначають шляхом віднімання отриманого для гнізда значення параметра NEXT від попереднього вимірюваного значення цього параметра в спареній конфігурації «штекер-гніздо».



**Рис. 6. Роз'єми серії MiniMax від Fischer Connectors з дев'ятьма контактами, спеціально розроблені для високошвидкісного передавання даних за допомогою єдиного протоколу (USB 3.2)**

том IEEE 370-2020, щоб забезпечити оптимальний процес виготовлення плат і деємбеддингу.

**СИМУЛЯЦІЯ SERD**

Сумарна швидкість системи зв'язку на фізичному рівні залежить від архітектури цього рівня, а також характеристик передавача і приймача. У багатьох застосуваннях спеціальна конфігурація каналу зв'язку може відрізнятись від вимог стандартів. Для вимірювання швидкості передачі даних збірки кабель-з'єднувач

застосовується симуляція серіалізатора/десеріалізатора (Serializer/Deserializer, SerDes) на системному рівні. Її результати відображаються у вигляді вічкоподібної діаграми, яка дає наочне уявлення про систему і найважливіші параметри з'єднання (рис. 7). Діаграма дає змогу встановити наявність необхідної швидкості передавання сигналу та вплив перешкод.

**ОПТИМІЗАЦІЯ КАНАЛІВ**

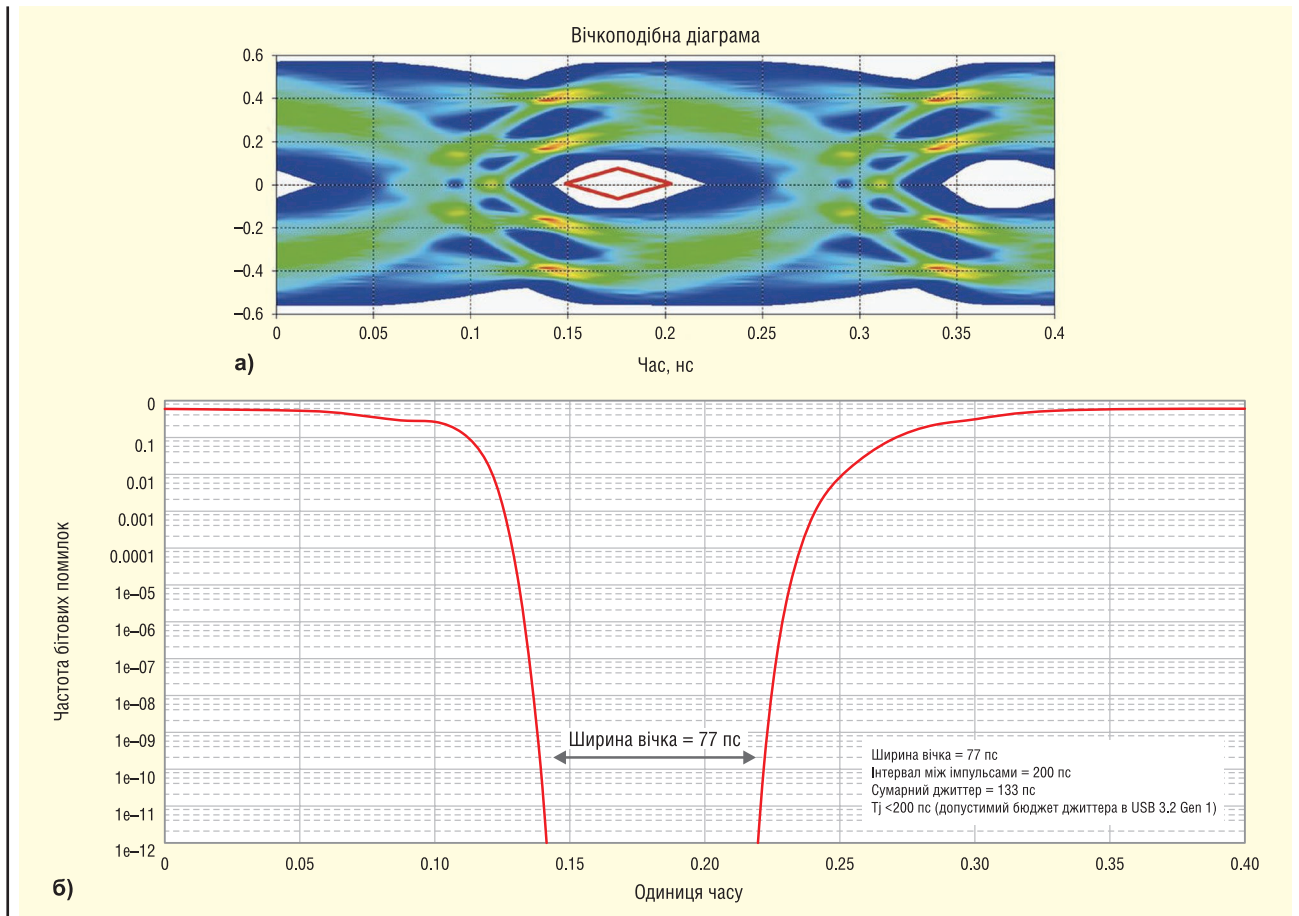
Існує безліч ситуацій, у яких вічко на діаграмі каналу закрите. Відкрити його

можна шляхом обробки сигналів, наприклад методами лінійної корекції з безперервним часом (Continuous Time Linear Equalization, CTLE), компенсації з вирівняльним зворотним зв'язком (Transmitter Feed-Forward Equalization, DFE) тощо.

Щоб оптимізувати систему для високошвидкісного передавання даних і запобігти спотворенню сигналу, інженери мають на початкових етапах розроблення забезпечити цілісність сигналу. Єдиний підхід до встановлення зв'язку між передавачем і приймачем на всіх проміжних ланках дає змогу уникнути поширених помилок, описаних вище. Крім того, необхідно протестувати відповідну технологію зв'язку не тільки на рівні компонентів, а й системи в цілому.

**Додаткову інформацію щодо продукції компанії Fischer Connectors, що була представлена в цій статті, можна отримати в офіційного дистриб'ютора в Україні — Мікродіс Електронікс ГмБХ: тел.: (067) 475-81-86, Roman.Prokopets@microdis.net, www.microdis.net**

CN



**Рис. 6. Симуляція SerDes-каналу роз'єму серії MiniMax на швидкості 5 Гбіт/с: мінімальне розкриття вічка на діаграмі під час використання USB 3.2 Gen 1 (а); часова ваннообразна крива і розрахунок джиттера на портах приймача (б)**