

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ГЛОБАЛЬНОГО ПЕРЕКОСУ ШАРОВОЇ СТРУКТУРИ ДІЕЛЕКТРИКА БАГАТОШАРОВИХ ПЛАТ НА ПЕРЕДАЧУ СИГНАЛІВ UWB

У статті розглядається побудова та аналіз моделі передачі UWB сигналів за допомогою смужкових диференційних ліній передачі багатошарових печатних плат. Розглянуто вплив технологічної деформації діелектричних шарів на інтегральну цілісність передачі над ширококугових імпульсних сигналів UWB. Визначено порядок застосування та обмеження під час аналізу моделі лінії передачі. За допомогою САПР електродинамічного аналізу проведено моделювання впливу глобального перекосу шарової структури на передачу сигналів. Подані рекомендації щодо проектування печатних плат, та технології їх виготовлення.

The article deals with the construction and analysis of model transfer UWB signals using differential transmission lines multilayer printed circuit boards. Described effect of technological deformation of dielectric layers on integrated integrity transmission over broadband pulse UWB. Also, described an order of application and limitations of the analysis model of transmission line. Using CAD electrodynamic analysis carried out modelling of global bias layer structure on the signals. Article also consists of recommendations for designing printed circuit boards, and their production technology.

Ключові слова: багатошарова печатна плата, диференційна лінія передачі, диференційний опір, UWB.

Вступ

Надшвидкісне зростання інформаційних потоків у різноманітних галузях людської діяльності сьогодні є основним фактором розвитку суспільства. Широке впровадження інформаційних технологій призвело до різкого зростання кількості абонентів, що потребують якісних каналів зв'язку реального часу. Якість каналів, відповідно теорії Шенона, також вимагає збільшення пропускної спроможності каналів, а останню найбільш доцільно покращувати за рахунок збільшення ширини смуги частот, що займає система. Розширення спектру діючого сигналу еквівалентне зменшенню протяжності імпульсів, що є носіями повідомлень, або знаменує перехід від класичних радіосистем до над ширококугових – UWB систем.

Теорія UWB систем передбачає застосування специфічних вузлів та методів обробки сигналів, але з технологічної точки зору реалізація UWB пристроїв виконується на основі печатної технології виготовлення носійних елементів конструкції – плат та технології поверхневого монтажу компонентів, аналогічно високопродуктивним послідовним інтерфейсам сучасних обчислювальних засобів. Частотні властивості UWB плат на даному етапі розвитку технологій переважно визначаються застосовуваними діелектричними матеріалами [1]. Тому дослідження, спрямовані на покращення частотних властивостей печатних плат через удосконалення діелектричної структури, в рамках застосування у системах максимальної швидкодії, залишаються актуальним завданням.

Основна частина

Реалізація трактів UWB на печатних платах, відповідно стандарту 802.15, вимагає застосування інтерфейсних схем із бітовим інтервалом по одиночній лінії менше 1нс. Для забезпечення умов мікромініатюризації та великої кількості наявних електричних кіл у вигляді мідних (металевих) провідників печатної технології, печатна плата виконується багатошаровою (БПП). Найбільш поширеною і технологічною структурою БПП для побудови надширококугових ліній передач високошвидкісних інтерфейсів є диференційна лінія передачі (рис.1) у вигляді структури мідних провідників (Copper) із електромагнітним зв'язком між короткими боками печатних планарних провідників [1]. За визначенням, така лінія розташовується між двома шарами діелектрику і для печатних плат широкого застосування один шар діелектрику має однорідну структуру (Prepreg), а інший являє собою армований скловолокном органічний діелектрик (Core).

Електромагнітне поле кожного провідника із пари диференційної лінії замикається на потенційні шари, що обмежують діелектрики зверху та знизу (див.рис.1). Рівень електромагнітної взаємодії між двома провідниками навмисно обирається незначним, тому таку диференційну лінію можна розглядати як пару смужкових ліній передачі, по яких рухаються протифазні сигнали [1]. Незначний рівень електромагнітної взаємодії припускає використання більших технологічних допусків під час формування топологічних елементів, що в кінцевому рахунку здешевлює виробництво та сприяє широкому застосуванню UWB систем в аспекті виготовлення металевих ділянок БПП.

Під час виготовлення БПП через неідеальність технологічних процесів і технологічного

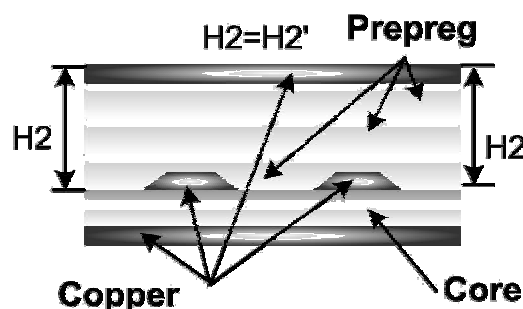


Рис. 1. Багатошарова структура смужкової лінії передачі UWB

устаткування проектна структура лінії передачі може порушитись, навіть якщо дотримано заданих допусків на розміри мідних елементів конструкції. Одним із таких випадків є зміна навантаження на протилежні сторони БПП, яке призводить до перекосу шарів напівтвердого пластику (prepreg), що входить до структури усіх смужкових ліній зв'язку. Це може виникнути за рахунок потрапляння сторонніх матеріалів у зону пресування або неправильного калібрування механізму, технологічних збоїв, а також аварійних ситуацій (рис.2).

Особливо негативно це явище впливає на структури ліній зв'язку, які мають у своєму складі не один, а декілька суміжних шарів препрегу. В цьому випадку може виникнути не лише перекося шарів, але і їх зсув один відносно одного. Наявність поздовжніх та поперечних зсувів призводить до потрапляння у зону полімеризації бульбашок повітря, що перетворюють гомогенну структуру діелектриків в гетерогенну із непередбачуваним градієнтом значення діелектричної проникності.

Наслідком подібного негативного явища є втрата однорідності лінії передачі у напрямку поширення сигналу, що призводить до неоднаковості як повного, так і диференційного опору на початку та наприкінці лінії передачі. А це в свою чергу погіршує умову узгодження лінії за допомогою внутрішніх або зовнішніх паралельних або послідовних схем термінації. В цьому випадку утворюється відбитий сигнал (зворотна хвиля), що інтерферує із прямою хвилею, спотворюючи її форму. Спотворення форми можна оцінити за допомогою око-діаграми та визначити, які припустимі значення кута перекосу можуть виникати для забезпечення дотримання наперед заданих спотворень сигналу).

Сучасні САПР у якості первинної вхідної інформації вимагають наявності параметрів моделювання, що не змінюються на протязі аналізу конкретної БПП тобто, задати градієнт зміни висоти шарів препрегу (рис.2) не є можливим. Тому для аналізу ситуації перекосу пропонується використати модель лінії передачі (рис.3), що складається з деякої кількості дискретних ділянок, у кожній із яких висота препрегу поступово збільшується або зменшується. Для коректності використання такої моделі кожна із дискретних ділянок має відповідати умові лінії передачі із зосередженими параметрами. В такому випадку їхня кількість буде визначатися рівнянням:

$$N_{\text{ЛП}} \approx \frac{6L_{\text{ЛП}} \sqrt{\epsilon}}{cT_{\text{БИТ}}} \quad (1')$$

де $L_{\text{ЛП}}$ – довжина печатного провідника;
 ϵ – середня діелектрична проникність вздовж траси провідника;
 c – швидкість світла у вакуумі;
 $T_{\text{БИТ}}$ – бітовий інтервал або протяжність імпульсу UWB.

В якості прикладу інтерфейсів, які наближаються за своїми властивостями до UWB, кількість ділянок за (1) для поширеного швидкісного інтерфейсу PCI Express із бітовим інтервалом 400 пс, що розташовано на діелектрику FR4 з діелектричною проникністю 4,3 і довжини лінії передачі 1 м, кількість дискретних ділянок для побудови моделі складатиме близько 100. Таке значення є верхньою межею, а для реальної ситуації доцільно використати значення кількості ділянок, що підлягають аналізу від 20 до 40. Така кількість ділянок у лінії передачі може бути оброблена САПР Hyperlynx 2008 із швидкістю близько 20 хв/аналіз.

Емуляція зміни висоти препрегу між ділянками у рамках застосування моделі (рис.3) може бути здійснена через зміну інших незалежних параметрів лінії передачі, таких як відстань між провідниками, ширину провідника та його формою в перетині.

Методика використання такого підходу полягає у наступному:

1) для заданих параметрів інтерфейсів розраховуємо кількість дискретних складових (1) у моделі лінії передачі;

2) за заданою швидкістю зміни градієнту перекосу за допомогою спеціалізованого САПР Polaris SI9000 2009 обраховуються вторинні параметри кожної із дискретної ділянки, наприклад, хвильовий опір Z_0 ;

3) використовуючи Z_0 як вхідний параметр при сталому значенні висоти шару, визначають зміну іншого параметру;

4) використовуючи стандартну модель лінії передачі для заданого інтерфейсу у САПР Hyperlynx 2008 будують розширену модель для аналізу перекосу, змінюючи обраний варіативний параметр відповідно

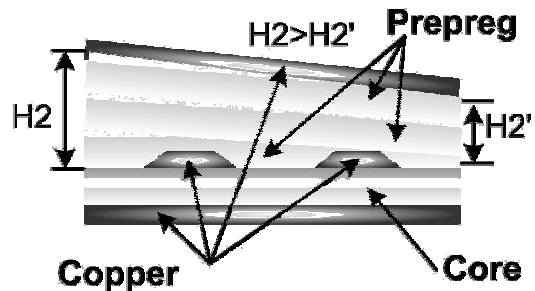


Рис.2. Деформація препрегу під час пресування шарів багатшарової плати

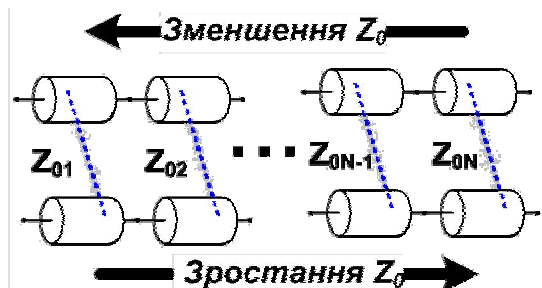


Рис.3. Модель лінії передачі з урахуванням перекосу шарової структури

до розрахунків, проведених у Polaris SI9000 2009;

5) аналізують побудовану модель з точки зору отримання око-діаграм і роблять висновки щодо впливу перекосу на інтегральну цілісність сигналів.

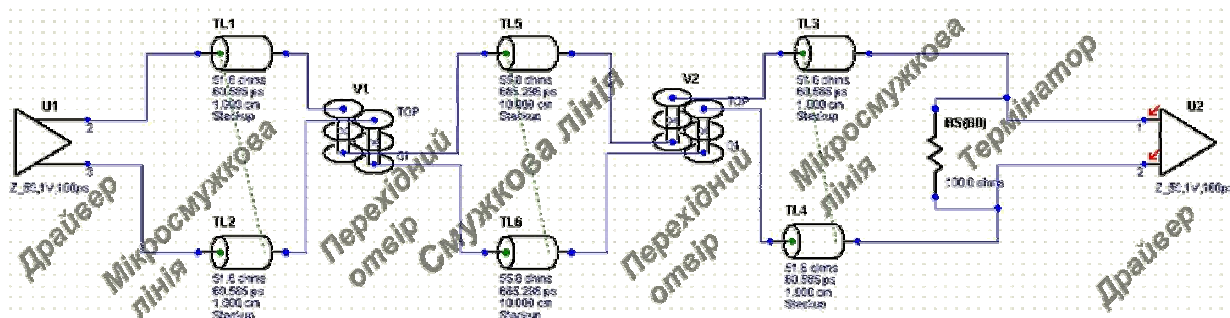


Рис.4. Електродинамічна модель диференційної лінії передачі багатшарової печатної плати САПР Hyperlynx 2008

У стандартній електродинамічній моделі (рис.4) протяжність смужкової лінії передачі складає 85 - 95 % від загальної її довжини [2]. Це пов'язано із тим, що провідники високошвидкісних інтерфейсів намагаються якнайшвидше заглибити у внутрішні шари БПП для забезпечення від захисту внутрішніх та зовнішніх завод. Тому перекош препрегу у цих лініях в першу чергу впливає на смужкові ділянки, а його впливом на кінцеві ділянки у вигляді мікросмужок невеликої протяжності (до 5 мм), можна знехтувати. Крім того, у запропонованій моделі розгляду ситуації перекошу діелектричних шарів, вважатимемо, що розміри та геометрія перехідних отворів під час перекошу шарів препрегу практично не змінюються завдяки малим розмірам топологічних елементів металізації отворів та їх переважному розташуванню між шарами ядер (core), які армовані скляними волокнами та практично не підлягають перекошу.

Слід зазначити, що правильний вибір параметрів та характеристик драйверів важливий для отримання результатів у реальних ділянках часу, завдяки надзвичайно великому обсягу електродинамічних розрахунків, що проводяться під час роботи САПР. Параметри драйверів (табл.1), що розташовані з обох боків лінії передачі (рис.4) обрані відповідно узагальненим значенням найбільш поширених серій інтерфейсних схем для передачі надширокосмугових сигналів. Середній час аналізу за запропонованою методикою сягає від 8 до 20 годин, залежно від продуктивності апаратних засобів. Результати аналізу найгіршого випадку – розташування смужкової лінії передачі вздовж глобального перекошу (табл.2), свідчать про значний вплив перекошу однорідного діелектрика - препрегу на інтегральну цілісність сигналів та неприпустимість появи таких дефектів під час виробництва високочастотних БПП для систем UWB.

Таблиця 1
Параметри тестового стимулу диференційної лінії високошвидкісного інтерфейсу у середовищі HyperLynx 2008

Бітовий інтервал	800,400пс
Довжина фронту	100 пс +/- 1%
Вих. опір драйвера	50 Ом
Вхідний опір приймача	100 кОм
Вх./вих. ємність	1пф
Вх./вих. індуктивність	1нГ
Напруга живлення	1 В
Тестовий стимул	16.розр М-посл

Результати моделювання перекошу діелектрику у широкосмуговій лінії передачі у вигляді параметрів ОКО-діаграми

Параметр H2/H2'	Розм.	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
ОКО-ширина	пс	380	373	371	366	354	330
ОКО- висота	мВ	523	517	502	498	483	475
ОКО- розкрив	%	0	+1,2	+1,9	+2,6	+4	+9
ОКО- амплітуда	мВ	690	695	705	712	730	752
Розмах джитеру	пс	11	11,4	12,7	13,5	13,7	14,6
Сер. хвилевий опір	Ом	100	98	96	93	91	87
Відносна затримка	пс	0	-0,41	-0,61	-0,83	-1,42	-2,2

Зрозуміло, що глобальний перекош діелектрику для траверсних смужкових ліній відносно напрямку перекошу практично не призведе до втрати якості доставки сигналів по таким лініям, якщо ця диференційна лінія передачі виконана за схемою електродинамічного зв'язку вздовж коротких боків перетину провідників, навіть якщо використовується високий рівень електродинамічного зв'язку у диференційній парі. Для диференційної лінії що у парі провідників використовує електродинамічний зв'язок між широкими боками перетину провідників перекош діелектричних шарів може привести до зменшення зони взаємодії, що більш сильно відіб'ється на вторинних параметрах такої лінії із розподіленими параметрами.

Висновки

За результатами практичних досліджень, що проведені за допомогою сучасних САПР розробки ПП, за результатами аналізу впливу перекосу діелектрика у смужковій лінії передачі високошвидкісних інтерфейсів, встановлено:

- 1) перекош шарів найбільш сильно впливає на такі параметри око-діаграми, як око-ширини і око-висота, що обумовлено інтерференцією прямої та відбитої хвилі («дзвін»);
- 2) під час перекосу діелектрика не виникає суттєвих затримок передачі сигналу завдяки тому, що діелектрична проникність матеріалу у зонах стискання змінюється не суттєво, а основний вплив відбувається за рахунок деформації геометричних розмірів топологічних елементів та їх взаємного розташування;
- 3) розмах джитера збільшується приблизно на 20%, що обумовлено додаванням нестабільностей параметрів усєї лінії передачі у численні відбиті (перевідбиті) хвилі, що з'являється під час перекосу.
- 4) явище перекосу шарів препрегу впливає на інтегральну цілісність сигналів, що може бути оцінена, як погіршення якісних показників ліній передачі до 20% за умови величини перекосу, що сягає третини товщини препрегу у складі смужкової лінії передачі високошвидкісного інтерфейсу передачі сигналів UWB;
- 5) у лініях передачі печатних плат, що використовують UWB пристрої і сигнали глобальний перекош діелектрику вздовж печатної плати найбільш сильно впливає на диференційні лінії передачі із електромагнітним зв'язком вздовж широкого боку печатних провідників, тому останні не рекомендується використовувати у пристроях вказаного призначення.

Література

1. Джонсон Говрад В. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств: начальный курс черной магии / Джонсон Говрад В., Грэхем, Мартин. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006, – 624с.:ил. – Парал. тит. англ.
2. Джонсон Говрад В. Высокая скорость передачи цифровых данных: высший курс черной магии / Джонсон Говрад В. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005, - 1024с.:ил. – Парал. тит. англ.

Рецензент: д.т.н. Троцишин І.В.
Надійшла 6.2.2012 р.

УДК 551.501.793

В.П. РОЙЗМАН, О.В. ОМЕЛЬЯНЧУК, І.В. ГУРМАН
Хмельницький національний університет

МЕТОД СТАТИСТИЧНОЇ ОЦІНКИ СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

В статті розглядається метод оцінки надійності складних радіотехнічних систем, що базується на узагальненні статистичних оцінок надійності окремих підсистем, дає змогу більш точно екстраполювати значення показників надійності радіотехнічних систем навіть при певній невизначеності їх системних проявів.

The article of estimation of reliability of the difficult radiotechnical systems that is based on generalization of statistical estimations of reliability of separate to the subsystem gives an opportunity more exactly to extrapolate the value of reliability of the radiotechnical systems indexes even at a certain vagueness them system displays, is examined in the article. The brought methodology over.

Ключові слова: радіотехнічні системи, надійність.

Аналіз сучасних тенденцій розвитку радіотехнічних систем (РТС) свідчить про стрімке підвищення їх функціональності, що призводить до значного ускладнення їх структури, а відповідно до зниження показників надійності. Незважаючи на поліпшення якості елементної бази, підвищення надійності таких систем може бути забезпечене тільки на основі комплексного підходу. Сутність даного підходу полягає в системному урахуванні складної структури РТС, сумісному використанні методів резервування (зокрема, часового і структурного) і вдосконаленні методів організації і проведення профілактико-відновлювальних заходів з максимальним урахуванням чинників і умов реального функціонування систем [1, 2].

Одним з найрозповсюдженіших методів оцінки надійності складних технічних систем є метод статистичних випробувань. Однак для одержання статистично достовірних результатів, особливо при широкому різновиді властивостей надійності окремих елементів системи і її великої структурної надмірності, потрібні значні обсяги витрати машинного часу.

Аналіз показує, що основні витрати часу при статистичних випробуваннях складної системи обумовлені необхідністю перевірки працездатності в кожній реалізації. При високій початковій надійності p_i елементів або великій структурній надмірності, що характерно для розгалужених мереж комутації, перевірка працездатності переважної більшості реалізацій дає позитивний результат, що якісно характеризує їх