

## МОДЕЛЮВАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПЛАТ ІЗ ВБУДОВАНИМИ КОМПОНЕНТАМИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ШИРОКОСМУГОВИХ ХАОТИЧНИХ СИГНАЛІВ

*Стаття присвячена аналізу електромагнітних випромінювань плат із вбудованими компонентами. Наводяться загальні принципи моделювання, порядок формування моделі, досліджується вплив на сумарне випромінювання лінії передачі із вбудованими компонентами довжини основних ділянок лінії, параметрів сигналів збудження та глибини занурення в плату вбудованого компонента.*

*Ключові слова: хаотичний сигнал, плата, лінія передачі, електромагнітна сумісність, паразитні випромінювання*

O.B. GOLEVYCH, O.S. PYVOVAR  
Khmelnitsky National University, Khmelnytsky, Ukraine

### MODELING RADIATION PLATEAU WITH BUILT-IN COMPONENTS TO TRANSMIT BROADBAND CHAOTIC SIGNAL

*Abstract - The article analyzes the electromagnetic radiation boards with embedded components. We present the general principles of modeling, formation model to investigate the influence of the total radiation transmission line with embedded components fixed length line plots, excitation signal parameters and depth of the recess in charge built-in component.*

*Keywords: chaotic signal charge, transmission line, the electromagnet compatibility, spurious radiation.*

#### Вступ

Ринковий попит широкими верствами населення засобів мобільного зв'язку вимагає розробників та виробників застосовувати новітні схеми обробки сигналів із розширеним спектром (3G,4G). В цьому аспекті дуже перспективними є використання хаотичних цифрових широкосмугових сигналів [1]. Крім того загальна тенденція до мініатюризації пристроїв і збільшення загальної щільності упаковки вимагає застосування нових конструкцій просторової реалізації апаратури на основі плат із вбудованими компонентами.

Вбудовування компонентів дозволяє поліпшити електричні характеристики плат завдяки скороченню довжини зв'язків, збільшити надійність за рахунок зменшення числа паяних з'єднань, зменшити масу і габарити виробів. З іншого боку, підвищується складність виготовлення плати, а також обмежується їх ремонтпридатність та тестопридатність.

Щоб мати хоча б мінімальні гарантії працездатності та електромагнітної сумісності (ЕМС) багатошарових плат на частотах вище 100МГц, слід обов'язково провести попереднє електромагнітне моделювання ліній передач та плати загалом у різних аспектах та з різних боків. Особливо актуально це для широкосмугових надвисокочастотних багатошарових плат, де лінії передачі розглядаються як лінії із розподіленими параметрами та обов'язково враховується частотна залежність матеріалів плати та компонент.

**Метою статті** є порівняння паразитних випромінювань широкосмугових хаотичних сигналів ліній передач плат із планарними та вбудованими компонентами на основі комп'ютерного моделювання у спеціалізованому середовищі багатомірного аналізу електромагнітних полів ліній передач, подання рекомендацій щодо проектування плат із використанням вбудованих компонент.

#### Сутність та можливості програм моделювання вбудованих компонент

Як правило, програмна симуляція виявляється набагато дешевшою і ефективнішою за переробку проекту по декілька разів. Цей напрямок у розробці плат називається – аналіз цілісності сигналів. Моделі для електромагнітної симуляції поділяють на моделі драйверів (приймачів та передавачів), моделі ліній передачі, моделі перетинок, теплові моделі тощо. У всіх програмах електродинамічного моделювання є можливість і побудови власних моделей, що не дають повністю адекватних результатів, але за їх допомогою можливо визначити "вузькі місця" де виникають проблеми із перехресними завадами, цілісністю сигналів та небажаним стороннім випромінюванням.

Для проведення симуляції роботи плат можуть використовуватися інструментальні засоби аналізу електромагнітної сумісності (ЕМС): Omega Plus, Signal Integrity Analyzer, BoardSim, ХТК та ін. Одна з найуспішніших, на сьогоднішній день на ринку, є пакет програм моделювання друкованих плат фірми Mentor Graphics – Hyperlynx. Подібні спеціалізовані САПР структурно можна розділити (рис. 1) на три групи: і калькулятори, програми 2D аналізу та 3D аналізу.

Калькулятори використовують емпіричні або напівемпіричні співвідношення уже завантажені в вигляді формул для обрахунку параметрів окремих ділянок лінії передачі за її геометрією та електричними характеристиками матеріалів. Під 2D аналізом розуміється технологія використання аналізу електромагнітного поля ліній передачі лише у перетині (двох розмірностях) вважаючи що у наступній ділянці лінії поле аналогічне. На початку та наприкінці лінії передачі розраховуються інтегральні параметри за якими лінії або моделі поєднуються та розрахунково зв'язуються одна з одною. За допомогою 2D аналізу можна розроблювати перед- і пост-аналіз ЕМС плати. Під 3D аналізом розуміють аналіз передаючих структур у трьох вимірах, що вимагає від ядра САПР проведення надзвичайно великої кількості розрахунків за тривалий час, але адекватність отриманих результатів наближається до 100%.

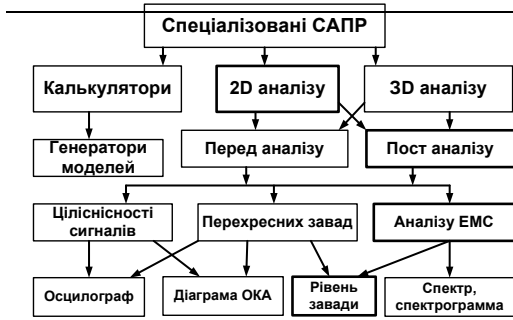


Рис 1. Класифікація програмних засобів електродинамічного моделювання плат

Результати аналізу програмами симуляції можуть надходити в текстовому або графічному вигляді. Найбільш популярний формат текстового вигляду – файли електронних таблиць EXCEL. Найбільш поширений формат графічного вигляду – електронний осцилограф або спектроаналізатор.

**Моделі та порядок дослідження EMC плат**

Для аналізу EMC необхідно визначити випромінювання пристрою, що на етапі проектування зробити практично не можливо, але можливо провести оцінювання завдяки виділенню

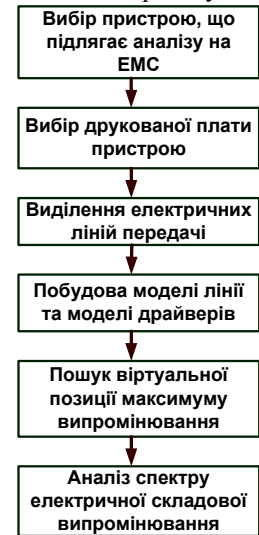


Рис 2. Порядок дослідження плат на EMC

опосередненої лінії передачі та аналізу напруженості поля віртуальною антеною у програмах симуляторів. Для цього пристрій, що розробляється розбивається на функціональні модулі (рис.2) з друкованими платами, обирається певна друкована плата. З друкованої плати екстрагується електрична лінія передачі, для лінії передачі будуються моделі усіх ділянок, призначаються моделі драйверів, перехідних отворів та усіх компонент.

Стимулом тестової цифрової лінії передачі є імпульсний сигнал прямокутної форми, де частоту, порядок імпульсів та коефіцієнт заповнення імпульсів можливо змінювати. Ці параметри, разом із параметрами лінії передачі є вхідними змінним для дослідження EMC за різних обставин. Під час проведення аналізу випромінювання віртуальна антена розташовується на умовній відстані у 3м від плати із лінією передачі. При цьому автоматично плата або антена обертається по усім координатам та проводить пошук максимуму випромінювання. Максимальне значення може порівнюватись або із аналогічним випромінюванням плати прототипу для порівняння, або із нормативними документами, що обмежують рівень цього випромінювання певними значеннями.

Прототипом для порівняння багатшарових друкованих плат із вбудованими компонентами є також багатшарові плати, але тільки із планарними компонентами, що розташовані із одного або іншого боку.

Критерієм для порівняння може бути або максимальне значення випромінювання, або сукупне значення випромінювання, можуть також встановлюватись певні обмеження на випромінювання певних частот [2]. В рамках використання плат із вбудованими компонентами для отримання та обробки хаотичних широкосмугових сигналах доцільніше за критерій обрати сумарну потужність випромінювання у простір сигналу :

$$P_{\Sigma} = S_A \sum_{l=1}^N E_l^2; \quad S_A = 1m^2$$

де  $P_{\Sigma}$  - сумарна потужність прийнятого випромінювання на еквівалентній антені із вхідним умовним опором у 10м; де  $S_A$  - ефективна площа поверхні антени, що приймає випромінювання лінії передачі;  $E_l$  – напруженість електромагнітного поля у точці прийому для l-ї складової спектру (В/м).

Сумарна потужність випромінювання фронту хаотичного широкосмугового сигналу, що рухається від передавача до приймача і назад, випромінюючи по дорозі електромагнітну енергію, може привести до порушення норм EMC та спричинити інші негативні явища, наприклад, несанкціоноване витікання інформації.

Для проведення досліджень найбільш наближених до реальності модель лінії передачі була екстрагована із проекту вже працездатної печатної плати пристрою, який являє собою спеціалізований процесор для керування системою передачі даних та цифровим телефонним зв'язком. Ядром пристрою є системна плата, що здалеку нагадує структуру системної плати побутової ПЕОМ. На платі встановлені стандартні інтерфейси обміну даними, такі як FSB, PCI, AGP, USB та інші, завдяки чому вона може бути чудовим джерелом екстракції тестових ліній передачі для проведення всебічного аналізу.

Модель тестової лінії (рис.3) складається із двох частин варіативної та стаціонарної. Стаціонарна частина являє собою високошвидкісну лінію передачі занурену у 3 шар печатної плати. Довжина лінії у типовому варіанті сягає близько 15см (бдюйм). Крім неї присутні також ділянки ліній до 1см, що є моделями контактних майданчиків та перетинок. Модель драйверу передавача являє собою користувацьку модель, що формує лінійні фронти під час живлення віртуального логічного елемента напругою PCI рівнів у 3,3В. Модель стеку шарів багатшарової плати для тестової лінії передачі відповідає стеку шарів вже виготовленої плати та запущеної у масове виробництво. Тому такий стек шарів є актуальним. Плата має у своєму складі 14 металевих шарів і більше двох десятків діелектричних, на платі присутні контактні майданчики та отвори, мікросмужкові та смужкові лінії передачі, шари суцільної металізації та шари захисту.

Всі результати моделювання були отримані на основі обробки даних спектрального аналізу сигналу антени на відстані 3м у середовищі Hyperlynx. Така відстань відповідає середній зоні випромінювання та враховує середню відстань електромагнітного впливу одних виробів на інші. Відстань до тестової антени у 3м є типовим і, як правило, не охоплює ближню зону, значення потужності поля в якій є важко контрольованим та передбачуваним.

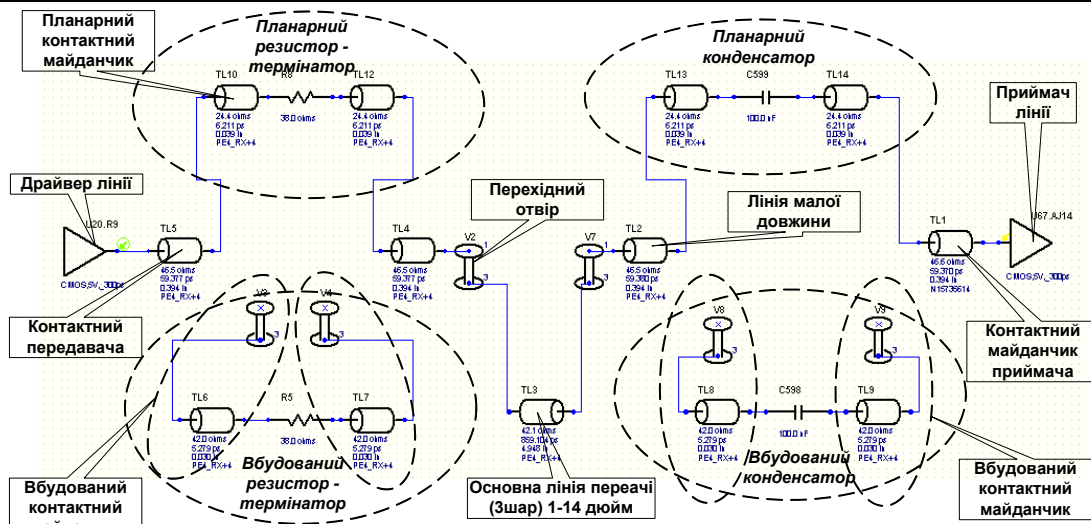


Рис 3. Модель тестової лінії передачі для проведення порівняльного аналізу та досліджень

**Результати моделювання ЕМС плат із вбудованими компонентами**

Сигналом стимулу драйвера обрано імпульсний сигнал із частотою 133МГц, шпаруватість якого можна змінювати від 5% до 50%. Значення окремих спектральних складових оброблялися у середовищі MS EXCEL для обчислення сумарної енергії та представлено у вигляді графіків залежностей.

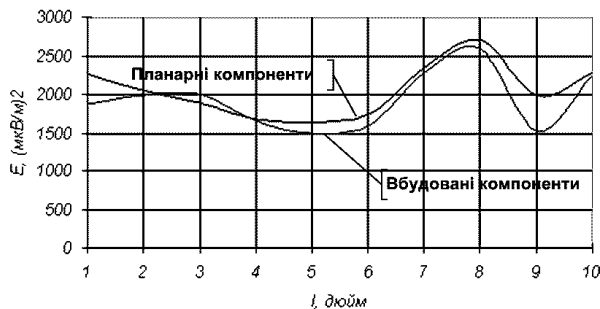


Рис 4. Залежність сумарної потужності складових спектру від довжини основної ділянки узгодженої тестової лінії передачі

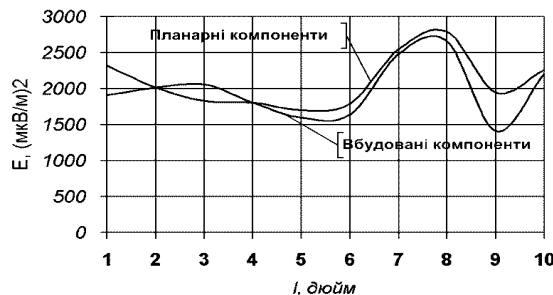


Рис 5. Залежність сумарної потужності складових спектру від довжини основної ділянки неузгодженої тестової лінії передачі

Найбільш впливовим фактором, що викликає різноманітні проблеми із ЕМС є довжина лінії передачі. Із збільшенням довжини лінії передачі збільшуються втрати високочастотного сигналу, змінюється АЧХ та ФЧХ лінії передачі, що приводить до лінійних спотворень у сигналі, збільшується кількість паразитних ефектів та збільшується кількість агресорів, що "переливають" електромагнітну енергію в лінію – жертву, спотворюючи сигнал. Тому в першу чергу проводилось дослідження впливу довжини узгодженої та неузгодженої лінії передачі на випромінювану потужність (рис. 4,5).

Узгодження лінії передачі із розподіленими параметрами важливий фактор, в усіх рекомендаціях фахівців із автоматичного трасування плат та нормативної галузевої літератури, навіть для ліній, що можливо вважати лініями із зосередженими параметрами рекомендується встановлювати узгоджуючі термінатори. Тому проведено дослідження впливу неузгодження близько 30% , що в нашому випадку відповідає зміні значення терміную чога резистора з 38 Ом до 28 Ом.

Параметром дослідження (рис. 4,5) є довжина основної ділянки лінії передачі. За результатами дослідження можливо зробити висновки, що для узгодженої та неузгодженої лінії передачі випромінювання лінії передачі із вбудованими компонентами є меншим за випромінювання лінії передачі із планарними компонентами в середньому на 15%. Із збільшенням довжини лінії передачі ця різниця збільшується. В початковій ділянці, що відповідає лініям передачі із зосередженими параметрами планарні компоненти реалізують у моделі дещо меншу випромінювану потужність, це пояснюється тим, що отвори, необхідні для підключення вбудованих компонент вносять відносно великі реактивності та нерегулярності в короткі лінії передачі та обумовлюють погіршення ситуації. Для ділянок середньої та великої довжини ефект від впровадження вбудованих компонент більш значущий, та зростає із зростанням довжини лінії передачі.

Наступний параметр, який може вплинути на випромінювану потужність та спотворити ситуацію із ЕМС є частота імпульсів стимулу (рис.6). Залежність випромінюваної потужності від частоти не викликає сумніву, при чому, ця залежність носить резонансний характер, завдяки тому, що, як вже повідомлялось, на високих частотах для ліній передачі із розподіленими параметрами різко проявляється вплив частото залежних реактивностей.

За результатами дослідження (рис.8) загальна залежність сумарної випромінюваної потужності має аналогічний характер як для лінії із вбудованими компонентами так і для лінії прототипу. При цьому спостерігається близько 7% в середньому зменшення сумарного рівня випромінювання для плат із вбудованими компонентами по усьому частотному діапазону аналізу.

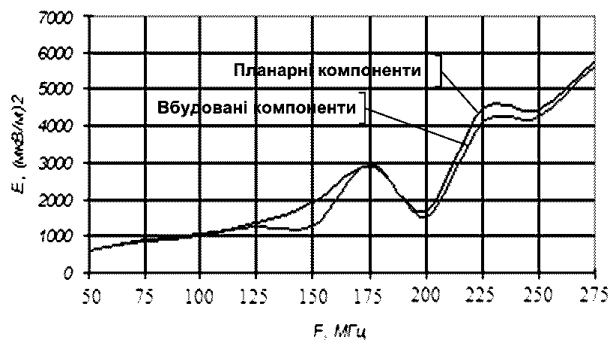


Рис 6. Залежність сумарної потужності складових спектру від частоти імпульсів стимулу

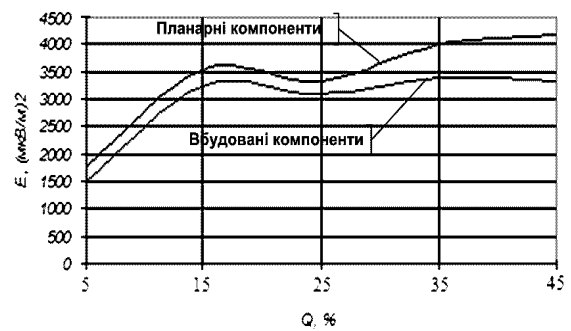


Рис 7. Залежність сумарної потужності складових спектру від коефіцієнту заповнення імпульсів стимулу

Слушним є дослідження впливу коефіцієнту заповнення імпульсів на сумарну сторонню випромінювану потужність. Коефіцієнт заповнення імпульсів із інформаційної точки зору відповідає за ефективність кодування сигналу каналними кодерами. Канальні кодери – невід’ємна частина високошвидкісних інтерфейсів. В ідеальному випадку середньостатистично інформаційний сигнал має бути близьким до меандру. Чим гірше кодування, тим менший коефіцієнт заповнення імпульсу в еквіваленті.

Результати аналізу (рис.7) впливу фактично шпаруватості імпульсів на ЕМС, що лінії передачі із вбудованими компонентами більш чутливі до способу кодування та за умови кодування, що наближається до оптимального забезпечують перевагу по мінімізації випромінювання близько 25% над прототипом із планарними компонентами.

Вбудовані компоненти на багатошаровій печатній платі можуть розташовуватись у різних шарах, *інтуїтивно* слід було б вважати, що із зростанням номеру шару відносно верхнього рівень випромінювання буде зменшуватись, але проведені дослідження (рис.8) твердять дещо іншу картину. Заглиблення компоненту у внутрішні шари має сенс для шарів із номером більше за 5. Розміщення компоненту у більш глибоких шарах не призводить до суттєвого зменшення паразитного випромінювання. Це пояснюється суттєвим зростанням екранування вбудованого компоненту шарами, що розташовано зверху та одночасним збільшенням довжини мікроотвору або отвору, який зв’язує відповідний пасивний компонент із драйверами та роз’язками, що зазвичай встановлюються на зовнішніх шарах багатошарової плати.

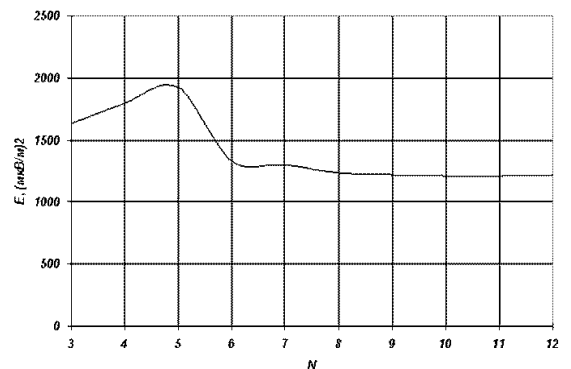


Рис 8. Залежність сумарної потужності складових спектру від номеру шару заглиблення вбудованого компоненту тестової лінії передачі

### Висновки

1. Для аналізу електродинаміки друкованих плат найбільш доцільними двовимірні аналізатори електромагнітного поля ліній передач, що розглядають ділянки однорідних ліній передач та електродинамічні моделі інших компонент з точки зору зосереджених параметрів. Такий підхід дозволяє забезпечити максимальну швидкість видачі результатів оцінкових результатів.

2. Запропонована модель для дослідження ЕМС печатних плат на основі типової лінії передачі, складається із драйверів, ділянок планарних та вбудованих компонент, ліній передачі та перехідних отворів. Подібна лінія передачі є типовою для високошвидкісних інтерфейсів багатошарових плат, тому найбільш придатна для аналізу з точки зору ЕМС.

3. Сформований критерій та проведено дослідження впливу на ЕМС таких параметрів як довжина лінії передачі, частота сигналу, шпаруватість імпульсів, рівень розузгодження лінії, глибина розташування вбудованого компоненту. За результатами досліджень плата із вбудованими компонентами за рівнем ЕМС переважає еквівалентну плату із планарними компонентами в середньому до 15%.

### Література

1. Голевич О.Б., Пивовар О.С. Використання хаотичних сигналів у багатоканальних надширококутних системах зв'язку. //ВОТТП.-2013.-№3.-С.180.  
 2. Джонсон Говрад В. Высокоскоростная передача цифровых данных: высший курс черной магии.:Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005, - 1024с.:ил. – Парал. тит. англ.

### References

1. Golevych O.B., Pyvovar O.S. Vykorystannya khaotychnykh syhnaliv u bahatokanalnykh nadshyrokosmuhovykh systemakh zv'yazku. //VOTTP.-2013.-№3.-S.180  
 2. Djonson Govrad V. Vysokoskorostnaya peredacha cifrovyyh dannyh: vysshiy kurs chernoy magii.:Per. s angl. – М.: Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2005, - 1024s.:il. – Paral. tit. angl.