

Аналіз цілісності живлення за допомогою програмного забезпечення для проєктування друкованих плат

Закарайа Петерсон (Zachariah Peterson)

Переклад та технічне редагування: Олександр Соколовський, ДП «Гальванотехніка»

Деякі проєктувальники можуть поставити запитання, що таке аналіз цілісності живлення. Аналіз цілісності живлення — це набір методів для розуміння того, як ваші компоненти споживають енергію і як структура плати впливає на стабільну подачу живлення. Altium Designer пропонує кілька важливих інструментів для аналізу цілісності живлення, у тому числі нове розширення Power Analyzer від Keysight. У цій статті ми розповімо про те, як виконати аналіз цілісності живлення на друкованій платі, а також де отримати доступ до цих функцій в Altium Designer.

Проблеми цілісності живлення можуть виникати в сучасних друкованих платах, особливо в високошвидкісних, які працюють з високими швидкостями зміни фронту сигналу. Ці системи вимагають точного розрахунку імпедансу PDN (Power Delivery Network), щоб забезпечити постійну подачу стабілізованого живлення по всій системі. Без належного розрахунку імпедансу PDN ви ризикуєте створити пульсації та шум у системі розподілу електроенергії під час перемикання стану сигналу. Оскільки у великих мікросхемах перемикається велика кількість сигналів, це призводить до зростання нестабільності живлення та збоїв у роботі системи.

ПРОБЛЕМИ ЦІЛІСНОСТІ ЖИВЛЕННЯ ЗА ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМІВ

Деякі виробники працюють за високої напруги, високої швидкості, сильного струму, високої частоти або всіх перерахованих вище параметрів, і під час роботи вони можуть зіткнутися з цілим рядом проблем з цілісністю сигналу та цілісністю живлення. Аналіз ці-

лісності живлення спрямований на виявлення проблем в подальшій роботі з двох точок зору: постійного та змінного струмів. Крім того, аналіз цілісності живлення може виконуватися у два етапи: на схемі та на макеті друкованої плати. Іноді для оцінки проєкту перед створенням прототипу або виробництвом залучають експертів з моделювання, щоб виявити потенційні проблеми цілісності живлення як для постійного, так і для змінного струмів.

Аналіз цілісності живлення передбачає аналіз структури та електричних параметрів PDN в друкованій платі. Якщо бути більш конкретним, він передбачає обчислення певних електричних величин, які можуть вказувати на проблеми цілісності живлення. Зокрема, є кілька величин, які можна обчислити в PDN за допомогою інструментів моделювання, які потім можна пов'язати з певними проблемами цілісності живлення, що спостерігаються в друкованій платі під час роботи. Величини для обчислення включають (але не обмежуються ними):

- Z-параметри PDN (власний опір і перехідний опір) при змінному і постійному струмах, або S-параметри;

- опір постійному струму і густина струму в шинах і площинах живлення;
- розподіл напруги і струму по всій схемі друкованої плати;
- перехідний процес на силових шинах, що спостерігається протягом певного проміжку часу.

Ці важливі математичні величини при аналізі цілісності живлення можуть бути обчислені на схемах за допомогою моделей SPICE або IBIS, або ж вони можуть бути обчислені на друкованій платі за допомогою програми для розрахунку електромагнітного поля. Після обчислення величин, що нас цікавлять, їх слід порівняти з заданими значеннями, щоб переконатися, що вони відповідають технічним характеристикам вашого продукту.

ЯКІ ПРОБЛЕМИ ЦІЛІСНОСТІ ЖИВЛЕННЯ МОЖУТЬ ВИНИКнути В ДРУКОВАНІЙ ПЛАТІ?

Існує кілька проблем цілісності живлення, які можуть виникнути в друкованій платі, і всі вони пов'язані з наведеним вище переліком величин. Деякі з найпоширеніших проблем цілісності живлення, які можуть виникнути в друкованій платі, містять в собі наступні:

- великий колапс шини живлення (пульсація, що розглядається як перехідний процес) і брязкіт «землі»;
 - випромінювання через слабку гальванічну розв'язку та пульсації;
 - шумовий зв'язок між різними областями друкованої плати;
 - надмірне розсіювання потужності, що призводить до нагрівання.
- Метою побудови PDN є забезпечення живленням компонентів на друкова-

ній платі з мінімальною нестабільністю. Деякі з перерахованих вище проблем цілісності живлення спостерігаються як проблеми цілісності сигналу (зокрема, електромагнітні завади) і проблеми ЕМЗ/ЕМС (електромагнітні завади і сумісність). У таблиці 1 показано які проблеми цілісності живлення пов'язані з перерахованими вище математичними величинами.

Щоб дізнатися більше про ці фактори в PDN і про те, як вони впливають на стабільність постачання живлення, прочитайте наступні матеріали для повного розуміння аналізу цілісності енергосистеми [1].

МОДЕЛЮВАННЯ ЦІЛІСНОСТІ ЖИВЛЕННЯ В СХЕМАХ ЗІ ЗМІННИМ СТРУМОМ

Схеми — це гарне місце для початку моделювання цілісності живлення змінного струму перед переходом до трасування друкованої плати. У цій області можна використовувати SPICE-симуляції або симуляції на основі IBIS для моделювання стратегії розв'язки і визначення того, чи зможе ваша ідеалізована схема друкованої плати підтримувати стабільну подачу живлення, особливо для швидких цифрових інтегральних схем.

Цілісність живлення на рівні схеми не враховує важливі фізичні фактори в трасуванні друкованої плати, які впливають на цілісність живлення. Натомість дослідження цілісності живлення в схемах допомагає проектувальнику розробити цілі проектування для PDN, щоб забезпечити максимально стабільну подачу живлення. Це вимагає моделювання реакції PDN з використанням загальних компонентів для представлення фізичних аспектів трасування друкованої плати. Деякі з цих фізичних аспектів містять:

- моделі розв'язувальних/обхідних конденсаторів, які містять значення ESR та ESL;
- площинна ємність, яка зазвичай має значення порядку пФ [2];
- індуктивність розповсюдження, або індуктивність області, де існує струм в шарах живлення/землі [3];
- через індуктивність, хоча вона зазвичай включається в моделі розв'язувальних/обхідних конденсаторів;
- топологія з декількома шинами в PDN;
- комутаційний елемент, який імітує бітовий потік, щоб можна було спостерігати періодичних перехідний процес.

Таблиця 1. Зв'язок проблем цілісності живлення з перерахованими вище математичними величинами

Проблеми цілісності живлення	Власний опір PDN	Перехідний опір PDN	Опір постійному струму
Пулсація шини живлення	Високий опір PDN	В/Д	В/Д
Надмірне тепловиділення або втрати потужності	В/Д	В/Д	Високий опір постійному струму
Брязкіт «землі»	Відсутність малих шунтувальних конденсаторів або надмірна індуктивність	В/Д	В/Д
Випромінювання	Надмірні пульсації на шинах живлення (див. вище)	В/Д	В/Д
Спостерігається пульсація між портами	В/Д	Низький опір передачі PDN	В/Д

Примітка. В/Д — відсутні дані.

Відносно проста модель, яка включає лише RLC-елементи, показана на рисунку 1. Цей приклад можна використовувати для обчислення імпедансу PDN та індуктивного зміщення спектру імпедансу PDN на частотах до декількох сотень МГц. Модель також може бути використана для безпосередньої візуалізації пульсацій на PDN шляхом запуску симуляції аналізу перехідних процесів.

Наведені на рисунку 1 блоки RLC-схем використовуються для моделювання розділового конденсаторного контуру, який може бути розміщений на платі. У нижній частині схеми показано з'єднання між плоскими шарами та компонентами. Нарешті, транзистор використовується з імпульсним джерелом для моделювання струму, що протікає в мережі. Вимірювання струму й напруги на вихідних точках можна використовувати для визначення імпедансу PDN за допомогою закону Ома.

На основі цих результатів можна визначити цільові значення для елементів RLC у вашій SPICE-моделі. Основним фізичним аспектом, який при цьому визначається, є ємність площини, а також кількість розв'язувальних конденсаторів. Ці значення потім стають проектними цілями в трасуванні друкованої плати, і вони впливатимуть на такі речі, як вибір конденсаторів і тип стека.

Існує два способи оцінити цілісність живлення за допомогою наведеної вище імітаційної моделі:

- у часовій області, спостерігаючи за перехідним процесом на PDN;
- у частотній області, спостерігаючи за спектром імпедансу.

Найпоширенішим методом моніторингу проблем з цілісністю живлення змінного струму при моделюванні та вимірюванні є моніторинг у часовій області. Це пов'язано з тим, що проблеми PDN змінного струму в друкова-

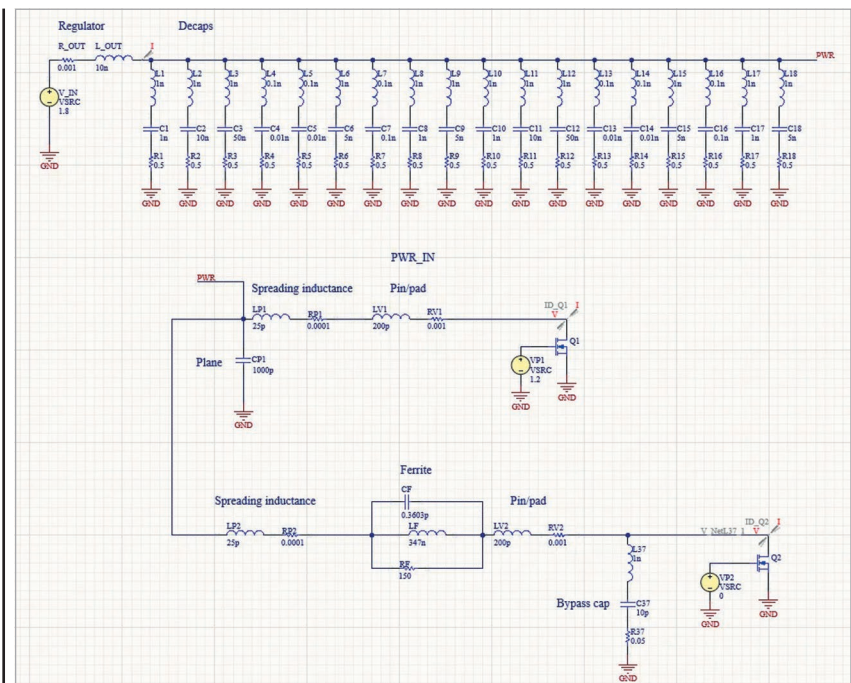


Рис. 1. Імітаційна модель живлення схеми, яка включає лише RLC-елементи



Рис. 2. Приклад результатів моделювання, що ілюструє тип коливань напруги на шинах, які можна спостерігати в часовій області

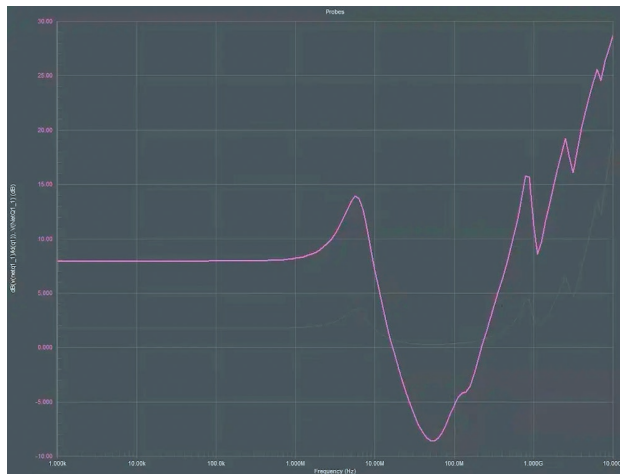


Рис. 3. Відповідний спектр імпедансу з наведеної на рисунку 2 симуляції

ній платі спостерігаються в межах діапазону вимірювання помірно дорогих осцилографів, які доступні в більшості лабораторій або в Інтернеті. Можна провести прямі вимірювання пульсацій на шинах живлення за допомогою датчика з високим вхідним опором або визначити випромінювання від надмірних пульсацій PDN у часовій області. В обох випадках результати можна дослідити на графіку залежності напруги на шині від часу або, еквівалентно, струму на шині від часу для шин, що керуються струмом.

На графіку на рисунку 2 показано приклад результатів моделювання, що ілюструє тип коливань напруги на шинах, які можна спостерігати в часовій області. Широка смуга пропускання цифрового сигналу здатна збуджувати кілька полюсів у спектрі імпедансу PDN, що потім створює складні багаточастотні коливання в часовій області.

Коли такий результат спостерігається в часовій області, для визначення потенційної головної причини можна використати відповідні вимірювання або моделювання в частотній області. У частотній області ці вимірювання важкодоступні, оскільки необхідне обладнання (векторний мережевий аналізатор) є дуже дорогим. Однак ці інструменти можна отримати в сторонніх лабораторіях, або ж імпеданс PDN можна змоделювати в SPICE чи 3D-field, щоб визначити потенційне джерело проблеми.

У прикладі на рисунку 3 показано відповідний спектр імпедансу з наведеної на рисунку 2 симуляції. Піки в спектрі імпедансу ілюструють частоти, на які можна налаштувати розв'язувальний конденсатор, а зсув спектра імпедансу до дуже високих частот показує межу смуги пропускання, яку може підтримувати поточна конструкція PDN. Вища смуга пропускання зазвичай підтримується на корпусі пристрою, який може містити дискретні конденсатори в малому корпусі або внутрішні ECM (*Electronic Control Module*), що зменшують імпеданс PDN в діапазоні частот ГГц.

Моделювання PDN також повинно відбуватися за постійного струму, як для високошвидкісних цифрових проєктів, так і для проєктів енергосистем. В обох випадках PDN повинен мати достатню товщину міді, щоб забезпечити струм до компонентів без надмірного нагрівання через резистивні втрати. Ці симуляції значною мірою залежать від форми міді в силових шинах на макеті друкованої плати, тому вони зазвичай виконуються за допомогою 3D-симулятора.

ЦІЛІСНІСТЬ ЖИВЛЕННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В ТОПОЛОГІЇ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

Опір постійному струму на друкованій платі залежить від розмірів площини живлення і з'єднань, і є відправною точкою для розуміння цілісності живлення. Після того, як цей аспект друкованої плати буде вирішено, розробник може вжити заходів, щоб забезпечити відповідність цільовому імпедансу, та запобігти проблемам цілісності сигналу, які виникають через нестабільну подачу живлення.

Найновішим розширенням для аналізу цілісності живлення в Altium Designer є *Power Analyzer* від Keysight. Ця утиліта може створити дерево живлення на основі вашого списку мереж та інформації про проєкт. Приклад дерева живлення показано на рисунку 4.

Утиліта Power Analyzer отримує дані безпосередньо з Layer Stack Manager і редактора друкованих плат для побудови потужних симуляцій і швидко надає конструкторам інформацію, необхідну для забезпечення цілісності живлення [4].

Аналіз живлення постійного струму починається з топології друкованої плати і вимагає налаштування симуляції, яка відображає розподіл живлення між різними мережами живлення в топології друкованої плати. Візуально це представлено у вигляді дерева з різними рівнями потужності, яке відображає потік живлення від входу верхнього рівня і вниз до рівня пристрою.

Після того, як дерево живлення налаштоване, його можна використовувати для визначення опору постійному струму в PDN. На рисунку 5 показано приклад результату, отриманого за допомогою Power Analyzer в Altium Designer. Це розширення забезпечує обчислення цілісності живлення в редакторі друкованих плат в Altium Designer, а результати автоматично перевіряються на відповідність поставленим цілям або обмеженням при проєктуванні. Для виконання цього обчислення не потрібні додаткові інструменти аналізу, а результати не потрібно перевіряти вручну на відповідність правилам проєктування.

Наведені нижче результати показують постійний струм, відображений у вигляді теплової карти у вигляді великої доріжки, що проходить між двома отворами (рис. 6). Зокрема, інструмент показує, що розрахований струм у приєднаних отворах становить 1.785 А. Виходячи з експлуатаційних цілей проєктування та граничних значень робочого струму, визначених стандартами IPC, можна визначити, чи потрібно вносити будь-які зміни в конструкцію. Після внесення змін моделювання

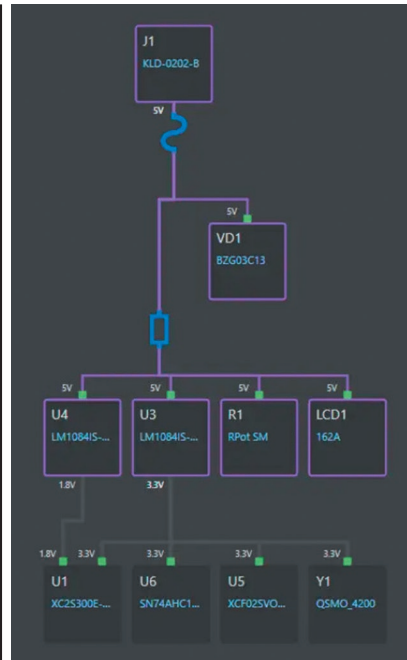


Рис. 4. Приклад дерева живлення

можна негайно перезапустити та проаналізувати результати, щоб визначити, чи були вирішені виявлені проблеми.

Якщо ми зменшимо масштаб окремих трас або шин, можна побачити розподіл струму по всьому шару площини або вздовж великих з'єднань. Можна вибрати кілька точок на шині живлення і дослідити падіння напруги або густину струму, і все це візуалізується у вигляді теплової карти. Цей вид надає простий спосіб визначити, коли опір мережі постійному струму стає занадто великим або коли є вузьке місце, яке призводить до виникнення гарячої точки.

СПІЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЦІЛІСНОСТІ ЖИВЛЕННЯ

Підтримка низького імпедансу PDN важлива для забезпечення того, щоб високошвидкісні компоненти не створювали пульсацій на шинах живлення і брязкоту землі при перемиканні. Якщо імпеданс PDN досить низький, то ці ефекти не будуть помітні в системі. Після того, як імпеданс площини в PDN розраховано, тепер можна визначити, чи призведуть пульсації та шуми на шині живлення до виходу вихідної напруги за межі допустимих значень.

Power Analyzer від Keysight та наявні інструменти моделювання в *Altium Designer*[®] допоможуть вам досягти успіху в аналізі цілісності живлення, щоб почати оцінювати функціональність ва-

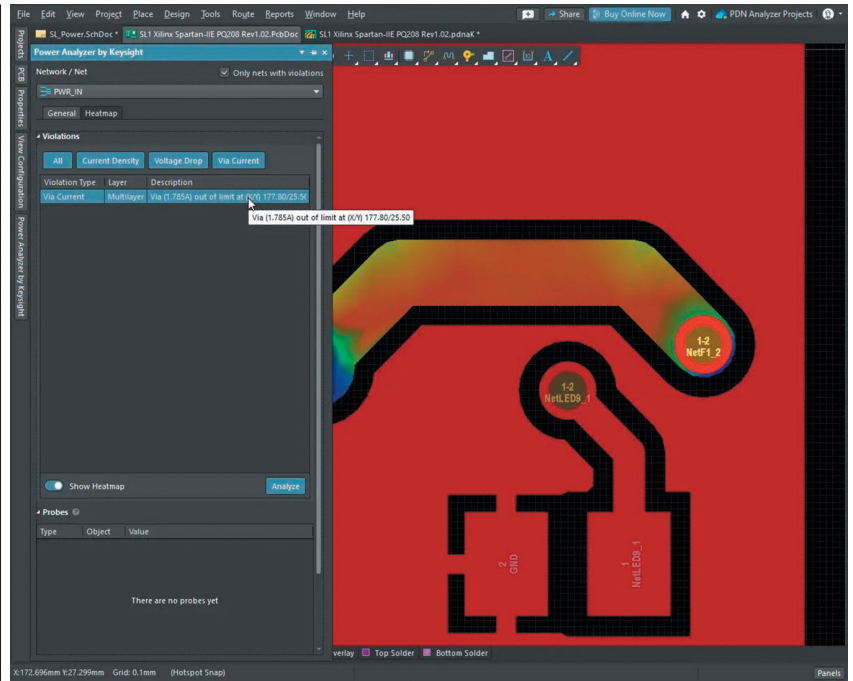


Рис. 5. Приклад результату, отриманого за допомогою Power Analyzer в Altium Designer

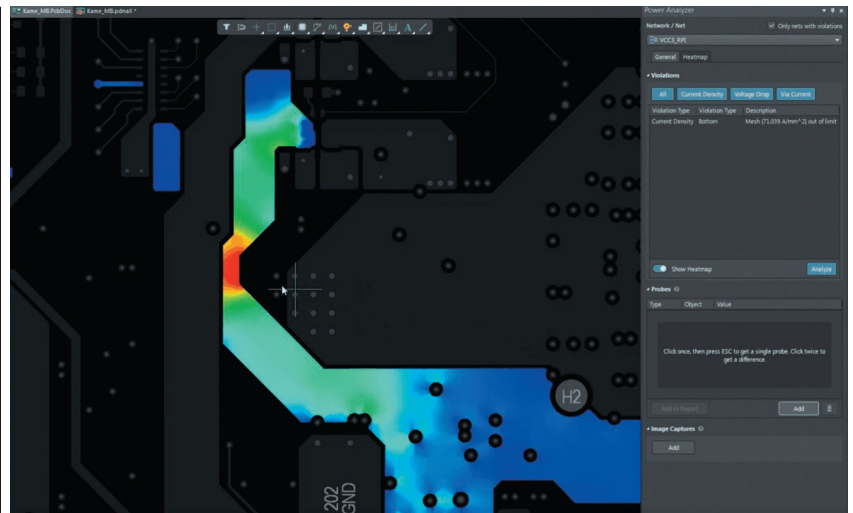


Рис. 6. Фрагмент протікання постійного струму між двома перехідними отворами

шої плати. З появою нових можливостей очікуйте оновлення розширення Power Analyzer, включаючи аналіз цілісності живлення змінного струму безпосередньо в редакторі друкованих плат.

Altium прагне постійно надавати вам найкращі інструменти для аналізу цілісності живлення, які працюють на схемі та макеті друкованої плати. У міру того, як ці можливості будуть вбудовані в програму, більш просунуте моделювання цілісності живлення стане доступним в редакторі друкованих плат. На додаток до покращень в редакторі PCB Editor, додаткові можливості будуть доступні для спільної роботи через платформу Altium 365™.

ТОВ «Софтпром Солюшнз» — дистриб'ютор компанії Altium в Україні:

**e-mail: altium@softprom.com,
https://softprom.com/ua/vendor/altium**

Література:

- <https://resources.altium.com/p/pdn-simulation-and-analysis-guide>
- <https://resources.altium.com/p/interplane-capacitance-and-pcb-stackups>
- <https://resources.altium.com/p/what-spreading-inductance>
- <https://www.altium.com/products/extensions/power-analyzer>

СН