Посібник для початківців з цілісності живлення друкованих плат: від плати до корпусу

Закарайа Петерсон (Zachariah Peterson)

У цій статті зроблено спробу дати комплексний концептуальний аналіз проблеми цілісності живлення для розробників друкованих плат. Хоча розробники, як правило, не контролюють особливості розташування плат в корпусі, вони можуть докласти зусиль, щоб забезпечити спільну роботу друкованих плат і компонентів для стабільного живлення. Я опишу низку основних підходів до забезпечення цілісності живлення в цих сферах, від проєктування структури шарів до вибору оптимального конденсатора.

Хоч би якою нудною справою це здавалося, подавання живлення на друковані плати та в системи зі складним компонуванням залишається однією з головних проблем, що постають перед розробниками, особливо у сфері розроблення ЦОД, периферійних обчислювальних систем, мобільних і мережевих пристроїв. У цих середовищах великі обсяги даних передаються каналами з дуже високою швидкістю, і навіть при найпильнішій увазі, яку приділяють цілісності сигналу, жодна з цих систем не працюватиме без стабільного живлення.

Цілісність живлення забезпечується на рівні компонентів і на рівні друкованих плат, причому, як уже згадувалося раніше, проблеми цілісності живлення можуть створювати проблеми цілісності сигналу (тремтіння (*jitter*), недостатньо низький імпеданс кола живлення/заземлення, електромагнітні завади). Більшість посібників із забезпечення цілісності живлення фокусують увагу тільки на рівні друкованої плати, однак розташування елементів на платі та в корпусі повинні проєктуватися разом, щоб забезпечити стабільне живлення роз'ємних з'єднань.

ВІД ЧОГО ЗАЛЕЖИТЬ ЦІЛІСНІСТЬ ЖИВЛЕННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ?

Концепція цілісності живлення може застосовуватися як до змінного, так і до постійного струму. Коли струм постійний, необхідно правильно підібрати типорозмір мідних шин, щоб забезпечити низьке падіння напруги. Якщо під час проєктування друкованої плати не враховано аспект цілісності живлення, напруга на шині живлення може мати такий вигляд, як показано на рисунку 1. На фазі комутації входів/виходів імпульси струму, що отримують із кола живлення друкованої плати, збуджують перехідні процеси на шині живлення. Приклад із багаторазовою комутацією логічних схем приведено нижче.

Найчастіше це відбувається на високошвидкісних компонентах з дуже швидкою комутацією. Більша кількість одночасних комутацій входів/виходів підвищує вимоги до потужності, у зв'язку з чим на шинах живлення може виникати більше шуму. Якщо збільшити масштаб одного з цих перехідних відгуків, видно, що перехідний процес загасає з кількома константами часу. Основною є довга низькочастотна константа часу, що створює найбільший обсяг шумів на шині живлення.

Загалом, коли час наростання сигналу для цієї структури кола живлення короткий, пульсації (*ripple*), що виникають, можуть давати більший викид або множинні константи часу, пов'язані зі слабкозатухаючими коливаннями вищої частоти. Ці коливання небажані з двох причин:

- вони відображаються як шум (часовий і на рівні сигналу) на вихідних сигналах, що може призводити до неправильної інтерпретації логічних рівнів;
- вони створюють випромінювані електромагнітні завади, які можна виміряти з боку плати, як правило від краю.

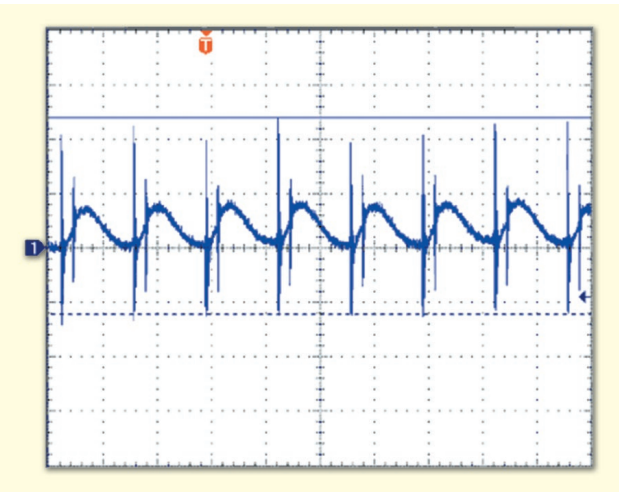


Рис. 1. Напруга на шині живлення, якщо під час проєктування друкованої плати не враховано аспект цілісності живлення

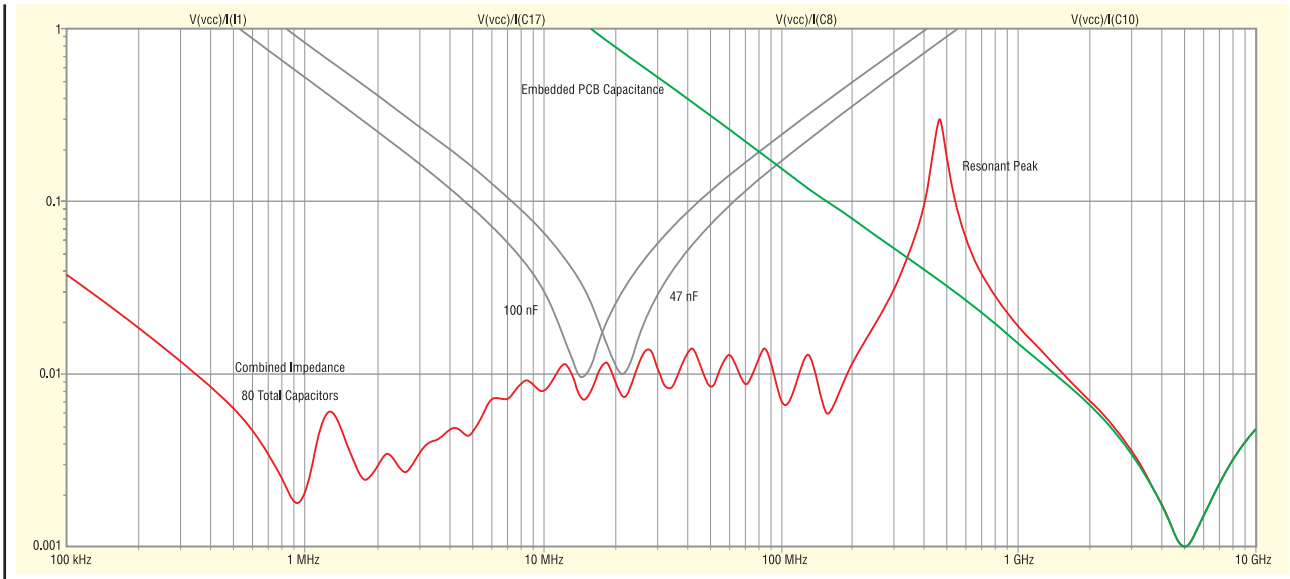


Рис. 2. Елементи, що впливають на коло живлення

Таблиця 1. Імпеданс кола живлення

Елемент	Вплив на цілісність живлення
Пари площин живлення та заземлення	Зберігає заряд, який може бути звільнений для живлення на високих частотах
	Визначає розсіювальну індукцію, спрямовану до корпусу
Дискретні конденсатори	Забезпечують живлення на низьких і середніх частотах
Індукція корпусу конденсатора і наскрізного отвору	Обмежує швидкість, з якою може розряджатися конденсатор для живлення сигналів
	Визначає частоти перехідних коливань, показані вище
Вбудована ємність	Стосується ємності, яку забезпечує діелектричний матеріал між площинами живлення і заземлення
Паразитні явища в корпусі	Визначають здатність корпусу забезпечувати живлення на високих частотах, що досягають діапазону ГГц

З обох причин проєктувальники повинні вжити заходів, щоб гарантувати максимальну стабільність вихідної напруги постійного струму від регуляторів.

ІМПЕДАНС, ІНДУКТИВНІСТЬ І ЄМНІСТЬ КОЛА ЖИВЛЕННЯ

Імпеданс кола живлення на друкованій платі буде основним фактором, що визначає цілісність живлення. Регулятори також відіграють певну роль через петлі зворотного зв'язку (про це йтиметься нижче), однак за імпеданс кола живлення відповідає саме проєктувальник друкованої плати. Мета полягає в тому, щоб забезпечити найменший досяжний імпеданс кола живлення, як правило, на рівні нижче 100 мОм.

Імпеданс кола живлення визначається наявністю декількох елементів, узагальнений опис яких наведено в таблиці 1.

Разом ці елементи визначатимуть спектр значень імпедансу кола живлення. Елементи, що впливають на коло живлення, показано на рисунку 2. Їхній вплив грубо позначено частотним діапазоном. Показаний тут спектр значень імпедансу складено з великої кількості конденсаторів, що характерно для цифрових процесорів з великою кількістю входів/виходів, які працюють на високих швидкостях.

ТОПОЛОГІЯ КОЛА ЖИВЛЕННЯ

Усі кола живлення, що живлять сучасні процесори, є багатопортовими. Їм потрібно кілька величин регульованої напруги, від високих значень до низьких логічних рівнів. Зазвичай це напруги в діапазоні від високих логічних рівнів (5V0 або 3V3) до низьких 0V8 на процесорах з великою кількістю виводів.

Приклад дерева потужності, що описує коло живлення високотехнологічного процесора, показано на рисунку 3. Він демонструє, як можна вибудувати різні шини, що йдуть від основного джерела живлення або регулятора, який живить усю систему.

Наведений на рисунку 3 приклад не призначений для узагальненої характеристики всіх цифрових компонентів, а покликаний показати, що багато компонентів матимуть кілька шин. Цифровий процесор з вищеописаною топологією живлення може належати до будь-якого типу компонента (наприклад, велика програмована логічна інтегральна схема, мереже-

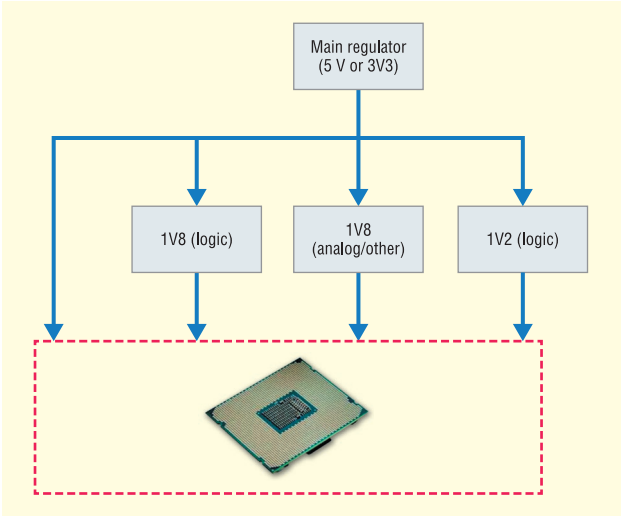


Рис. 3. Приклад топології кола живлення для процесора, якому потрібні чотири окремі шини живлення з напругою, що послідовно знижується

вий процесор, мікропроцесорний пристрій, великий основний блок керування, графічний або інший спеціалізований процесор). Входи та виходи процесора отримують живлення від шин живлення, тому саме на цих шинах у колі живлення можуть виникати суттєві шуми, що супроводжують перехідні процеси.

Наведена на рисунку 3 топологія вказує на необхідність дотримуватися двох вимог до проєктування. Ідеться про ізоляцію між шинами, зокрема між двома шинами, що живляться від одного регулятора, щоб не відбувалося взаємне перенесення шуму. Також кожна шина повинна мати власне низьке значення імпедансу, щоб забезпечити низький рівень шуму.

СТРУКТУРА ШАРІВ І МАТЕРІАЛИ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

З позицій цілісності живлення вибір матеріалів для структури шарів друкованої плати відіграє важливу роль у формуванні ємності, необхідної для стабільної подачі живлення. На додаток до цього під час компонування шарів необхідно передбачити розміщення шин живлення поруч із площинами заземлення на тонких шарах (рис. 4). Це допоможе гарантувати, що структура шарів забезпечить достатню ємність для сигналів у діапазонах частот приблизно до 1 ГГц.

Коли в шарі площини недостатньо доступної ємності й робота дискретних конденсаторів обмежується паразитними явищами, необхідна ємність може бути забезпечена вбудованим ємнісним матеріалом (*англ. Embedded Capacitance Material, ECM*). Це найтонші плівки (зокрема завтовшки менше ніж 1 міл) з високими значеннями діелектричної проникності (Dk), що досягають 30. Ці матеріали також можуть мати дуже високі втрати, які будуть поглинати електромагнітні завади, що поширюються по підкладці друкованої плати, тим самим зменшуючи електромагнітні завади, які випромінюються від краю плати.

Ці матеріали впливають на імпеданс кола живлення в чотирьох аспектах:

- забезпечують вищу ємність і, отже, нижчий імпеданс на частотах середнього діапазону (до 1 ГГц);
- переміщують резонанси в колі живлення, пов'язані з парами площин живлення/заземлення, на нижчі частоти;
- гасять резонансні піки в колі живлення в діапазоні ГГц, пов'язані з парами площин живлення/заземлення;

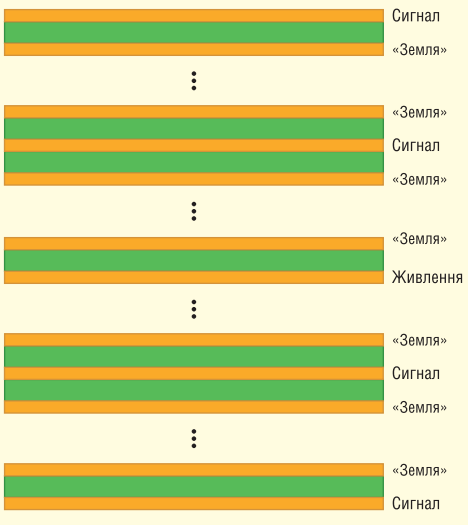


Рис. 4. Стратегія групування шарів при зростанні кількості шарів

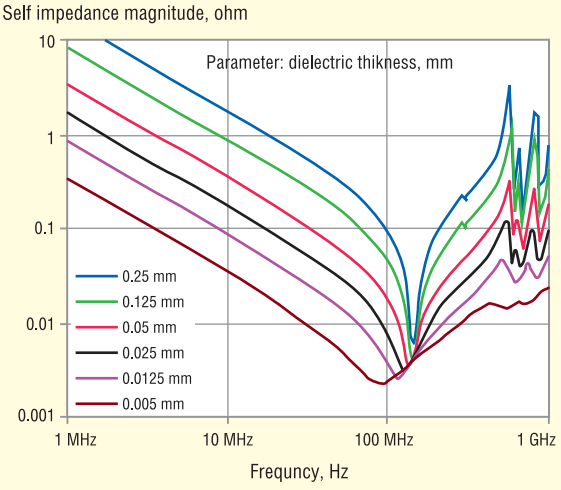


Рис. 5. Дані, що демонструють зниження імпедансу кола живлення під час використання тоншого вбудованого ємнісного матеріалу в структурі шарів друкованої плати. Наочно видно, що розмах резонансу поблизу 1 ГГц значно знижується завдяки використанню тоншого вбудованого ємнісного матеріалу. Джерело: DuPont

- переносять западину кривої імпедансу кола живлення (від 0.1 до 1 ГГц), пов'язану з ємністю площини, на нижчі частоти

Вплив цих матеріалів показано на рисунку 5. Зі зменшенням товщини діелектрика резонансні піки в колі живлення загасають і переміщуються на нижчі частоти. Аналогічні результати спостерігаються, якщо збільшити діелектричні втрати в матеріалі.

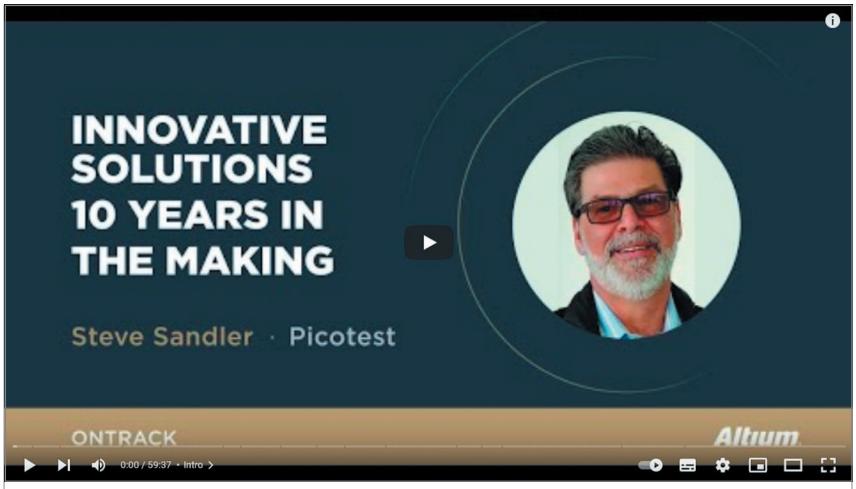
ПАРАЗИТНІ ЯВИЩА В КОРПУСІ

У корпусах компонентів присутні власні паразитні явища, пов'язані з їхньою структурою; також корпуси компонентів мають власний імпеданс кола живлення. Імпеданс корпусу об'єднується з імпедансом друкованої плати. Їхній спільний вплив визначатиме величину шуму на вході живлення в логічних схемах на напівпровідниковому кристалі. У сучасних процесорах передбачено корпусні конденсатори, які допомагають гасити перехідні збудження і розширюють корисні діапазони частот сигналу в спектрі ГГц.

ПОЗА ДРУКОВАНОЮ ПЛАТОЮ І КОРПУСОМ

Ми розглянули всі аспекти, що стосуються друкованих плат і корпусів, включно з низкою найскладніших конструктивних особливостей і моделей для сучасних рішень для корпусів. Розробнику друкованої плати підконтрольні макет, структура шарів, розміщення і маршрутизація, а також у нього є певний контроль над корпусом. У розрізі стратегій регулювання потужності ми не торкнулися двох важливих тем:

- модулі регулятора напруги (*англ. Voltage Regulator Modules, VRM*) для великих високошвидкісних процесорів;
- імітаційне моделювання при побудові схем і створенні макетів друкованих плат.



Відео 1: Підкаст OnTrack зі Стівом Сендлером

МОДУЛІ VRM

З урахуванням структури кола живлення і потреби багатьох високотехнологічних компонентів у наявності декількох шин живлення необхідні кілька модулів регулятора зі взаємно паралельним розведенням. Завдання фіксованого регулятора потужності полягає в компенсації падіння напруги і підтримці цільової вихідної напруги через петлю зворотного зв'язку (вивід зворотного зв'язку на більшості регуляторів). Петля зворотного зв'язку має реагувати досить швидко і модулювати вихід, намагаючись стабілізувати вихідну напругу.

Фактори, що сприяють відповідній реакції петлі зворотного зв'язку регулятора, присутні на рівні макета і компонента. Я обговорював низку цих моментів зі Стівом Сендлером у своєму епізоді підкасту OnTrack (див. відео 1).

VRM і компонування будуть розглянуті в іншій статті. Крім проєктування VRM і побудови макетів, проєктувальники мають зосередити увагу на грамотному виборі структури шарів, конденсаторів і матеріалів, щоб забезпечити досить низький імпеданс кола живлення в межах робочої смуги частот. Як обговорювалося вище, компонування та розміщення також впливатимуть на цілісність живлення через виникнення паразитних явищ.

МОДЕЛЮВАННЯ

Моделювання можна виконувати при змінному або постійному струмі, на схемах або готових макетах друкованих плат. Для високошвидкісних друкованих плат, що працюють на частотах аж до гігагерцових, найважливіше значення має моделювання цілісності живлення змінним струмом, оскільки воно здатне виявити пульсації на шині живлення на початку комутації входів/виходів.

Моделювання живлення змінним струмом на схемах виконується на основі програми SPICE для аналізу стабільності мережі конденсаторів, яка використовується для роз'єднання/обходу. Ці моделі дають змогу оцінити відповідну реакцію шини живлення, а також визначити, чи буде ємність, включена в коло живлення, достатньою. Також оцінюється ізоляція між шинами живлення, що живляться від одного регулятора/VRM, для визначення якої можна застосувати оцінку перехідного імпедансу.

Дізнатися більше про моделювання кіл живлення на схемах, включно з використанням феритів, можна з матеріалів, перелічених нижче у відео 2.

Моделювання живлення змінним струмом також можна виконувати на макетах друкованих плат. Однак у цьому разі знадобиться аналізатор електромагнітного поля для прогнозування поведінки сигналу в просторі та часі з урахуванням структури кола живлення на друкованій платі. Ці моделі інтенсивно споживають обчислювальні ресурси та вимагають спеціалізованого ПЗ.

Хоча моделювання живлення змінним струмом відіграє важливу роль у сучасних продуктах, моделювання живлення постійним струмом, як і раніше, важливе для проєктування високошвидкісних друкованих плат. Велика кількість входів/виходів із комутацією на основному процесорі в цих друкованих платах може створювати навантаження за струмом у кілька ампер. На дуже великих високошвидкісних платах, які обслуговують безліч периферійних пристроїв, наприклад на з'єднувальних платах, доводиться підтримувати струм приблизно ~100 А в усій системі, включно з шинами живлення, що живлять входи/виходи на швидкісних процесорах. Тому важливо виявляти й усувати екстремальні струми в шинах живлення.

Інструменти САПР в *Altium Designer®* дають кожному користувачеві та інженеру можливість контролювати стратегію цілісності живлення та енергоспоживання. Altium Designer — провідна галузева платформа САПР, що забезпечує інтеграцію з передовими програмами для забезпечення цілісності сигналів і живлення, моделювання електромагнітних завад і сумісності. Коли проєктування буде завершено, а дані готові для передавання на виробництво, платформа Altium 365™ допоможе налагодити спільну роботу та доступ до проєктів.

Відео 2: Глибоке занурення в моделювання мережі електропостачання — частина 1

ТОВ «ЛТБ СОФТ» — партнер Altium в Україні:
e-mail: sales@ltbsoft.com.ua,
https://ltbsoft.com.ua/software/altium-designer CN