

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
1. УКЛАДАННЯ ШАРІВ У БАГАТОШАРОВИХ ДРУКОВАНИХ ПЛАТАХ.....	9
1.1 Проектування шарів живлення і землі.....	9
1.2 Вибір геометричних розмірів друкованих доріжок	10
1.3 Зв'язок між щільністю трасування і кількістю необхідних шарів друкованих провідників.....	12
1.4 Класичні варіанти укладання шарів.....	15
1.5 Технологія виготовлення друкованих плат.....	18
2. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ТОПОЛОГІЇ ДБП.....	20
2.1 Параметри топології блоку комбінованого БК-2075	20
2.2 Структура і функції систем аналізу EMC PEA	22
2.3 Комп'ютерний аналіз EMC багатошарових планарних топологій PEA	25
2.4 Аналіз перехідних процесів у ланцюзі UN000008 блоку БК-2075	28
2.5 Аналіз взаємних перехідних процесів у ланцюгах UN000009 та UN000010 блоку БК-2075.....	32
3. МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ	38
3.1 Системи моделювання параметрів	38
3.2 Моделювання довгих ланцюгів	40
3.3 Перехресні перешкоди у разі суцільних шарів землі.....	44
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	46
4.1 Аналіз потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів проектованого об'єкта, які впливають на персонал.....	46
4.2 Заходи щодо техніки безпеки	48
4.3 Заходи, які забезпечують виробничу санітарію і гігієну праці.....	48
4.4 Рекомендації з пожежної безпеки	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	60
ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА	61

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- ЕА – електронна апаратура;
- НМО – навісний елемент, який монтується в отвір на ДП;
- ІМС – інтегральна мікросхема;
- ІФК – інфрачервоний ;
- УФ – ультра фіолетовий;
- ГВС – гнучка виробнича система;
- САПР – система автоматизованого проектування;
- АЛ – автоматична лінія ;
- СМС – світло монтажний стіл;
- ДП - друкована плата;
- НЕ – навісний елемент;
- ГПМ – гнучкий виробничий модуль;
- ТП – технологічний процес.

ВСТУП

В останні роки проблема електромагнітної сумісності різних пристроїв РЕА перетворилася на самостійний науково-технічний напрям, що охоплює численні аспекти радіотехніки, електроніки і електротехніки. ЕМС повинна враховуватися на кожному етапі розробки і виготовлення технічних засобів : системотехнічному, конструкторсько-технологічному і виробничому, а також на етапі експлуатації.

Практичне рішення проблеми ЕМС приводить до підвищення якості РЕА. Пристрій не можна вважати якісним, якщо він, виконуючи своє призначення, створює електромагнітні перешкоди, які не дають іншим пристроям виконувати своє призначення. Також не можна вважати якісним будь-який пристрій, якщо він у відсутності перешкод виконує своє призначення і не виконує його за наявності перешкод навіть допустимого рівня.

Для РЕА проблема ЕМС розглядається в двох аспектах:

- захист від зовнішніх перешкод;
- захист від внутрішніх перешкод (електронне конструювання).

У даному дипломному проекті досліджуються сучасні методи захисту пристроїв від внутрішніх перешкод за допомогою введення додаткових шарів металізації у друковані плати. У якості досліджуємого об'єкту було обрано блок комбінований БК-2075, що призначений для перетворення сигналу від первинного або нормуючого перетворювача в уніфікований вихідний електричний сигнал постійного струму або напруги і цифровий сигнал. Необхідно проаналізувати найбільш чутливі лінії зв'язку цього блоку на предмет наявності неузгодженості та запропонувати методи подолання небажаних перешкод виникаючих при протіканні струмів через задані лінії зв'язку.

1 УКЛАДАННЯ ШАРІВ У БАГАТОШАРОВИХ ДРУКОВАНИХ ПЛАТАХ

1.1 Проектування шарів живлення і землі

Укладання шарів друкованої плати встановлює послідовність розташування шарів друкованих доріжок, які з них повинні бути суцільними шарами живлення та землі, величину діелектричної проникності підкладки і відстань між друкованими шарами. При проектуванні укладання шарів також розраховуються необхідні розміри друкованих доріжок і мінімальна ширина проміжків між ними.

На конструкцію багатошарової друкованої плати сильно впливає технологія її виготовлення. Як правило, чим вище щільність розміщення друкованих доріжок, тим вище питома вартість виготовлення друкованої плати (у перерахунку на одиницю площі плати). Нижче розглянуті основні правила проектування багатошарових друкованих плат.

Для того щоб спроектувати систему живлення і прив'язки до землі необхідно перш за все задати такі параметри, як тривалість фронтів сигналів, кількість сигнальних ліній і геометричні розміри друкованої плати [8, 9].

Задамо, в числі інших геометричних параметрів, і орієнтовну ширину друкованих доріжок. На першому етапі проектування плати точне значення ширини друкованих доріжок не має особливого значення.

Далі оцінимо величини власної та взаємної індуктивності друкованих сигнальних ліній для варіантів суцільного шару землі, а також решітчастої і гребінчастої структури шин землі. На цьому етапі, як правило, з'ясовується, який з типів системи прив'язки до землі задовольняє технічним вимогами. Нагадаємо, що у разі гребінчастої структури шин землі всі сигнальні лінії роблять вплив один на одного. У разі решітчастої структури шин землі взаємний вплив один на одного надають тільки ті сигнальні лінії, які проходять в одному проміжку між координатними друкованими доріжками решітчастої структури, а в разі суцільного шару тільки сусідні сигнальні лінії роблять взаємний вплив один на одного.

Якщо потрібно закласти в конструкцію друкованої плати суцільний шар землі, необхідно закладати суцільні опорні шари парами, симетрично розташованими по товщині укладання плати. Симетричні пари суцільних металізованих шарів в багатошаровій друкованій платі перешкоджають викривленню друкованої плати. У

разі одиночного суцільного шару металізації, розміщеного не по центру укладання шарів, виникає значне викривлення друкованої плати.

Шари живлення, аналогічно шарам землі, можуть використовуватися в якості шляху найменшої індуктивності для зворотних струмів сигналів. При включенні між шарами землі та живлення достатньої кількості блокувальних конденсаторів лінії передачі, прокладені над шаром живлення, працюють так само добре, як і лінії, прокладені над шаром землі. Полоскові лінії передачі, прокладені між шарами живлення та землі або між двома шарами живлення, також працюють нормально.

1.2 Вибір геометричних розмірів друкованих доріжок

Підвищення щільності компонування схеми забезпечується, як правило, за рахунок підвищення щільності трасування доріжок на друкованій платі. При дуже щільному компонуванні знижується кількість необхідних шарів плати. Оскільки вартість друкованої плати пропорційна кількості шарів і площі плати [10], необхідно прагнути розробити надійно функціонуючу друковану плату з мінімально можливою кількістю шарів.

Але зменшення ширини друкованих доріжок і ширини проміжку між ними призводить також до зростання перехресних перешкод і зниженню допустимого струмового навантаження друкованих доріжок. Для зниження вартості друкованої плати надзвичайно важливо знайти правильне компромісне рішення між рівнем перехресних перешкод, щільністю трасування і допустимого струмового навантаженням.

У першу чергу розберемося з допустимим струмовим навантаженням друкованих доріжок, оскільки це обмеження є самим явним і зрозумілим. Допустиме струмове навантаження друкованої доріжки залежить головним чином від площі її поперечного перерізу і допустимого перевищення температури друкованого провідника щодо температури навколишнього середовища. При заданій площі поперечного перерізу величина перевищення температури друкованій доріжки щодо температури навколишнього середовища зростає приблизно пропорційно величині розсіюється нею потужності. Значне нагрівання друкованих доріжок викликає зниження надійності і нагрівання сусідніх ланцюгів цифрової схеми. Безпечним, з точки зору надійності роботи схеми, гранично допустимим

перевищенням температури друкованої доріжки щодо температури навколишнього середовища в цифровій апаратурі є 10°C .

На рисунку 1.1 наведені графіки для розрахунку температури нагріву друкованої ріжки залежно від прикладеної до неї струмового навантаження. По горизонтальній осі координат відкладена площа поперечного перерізу друкованої доріжки, виражена в квадратних дюймах. По вертикальній - сила струму в амперах.

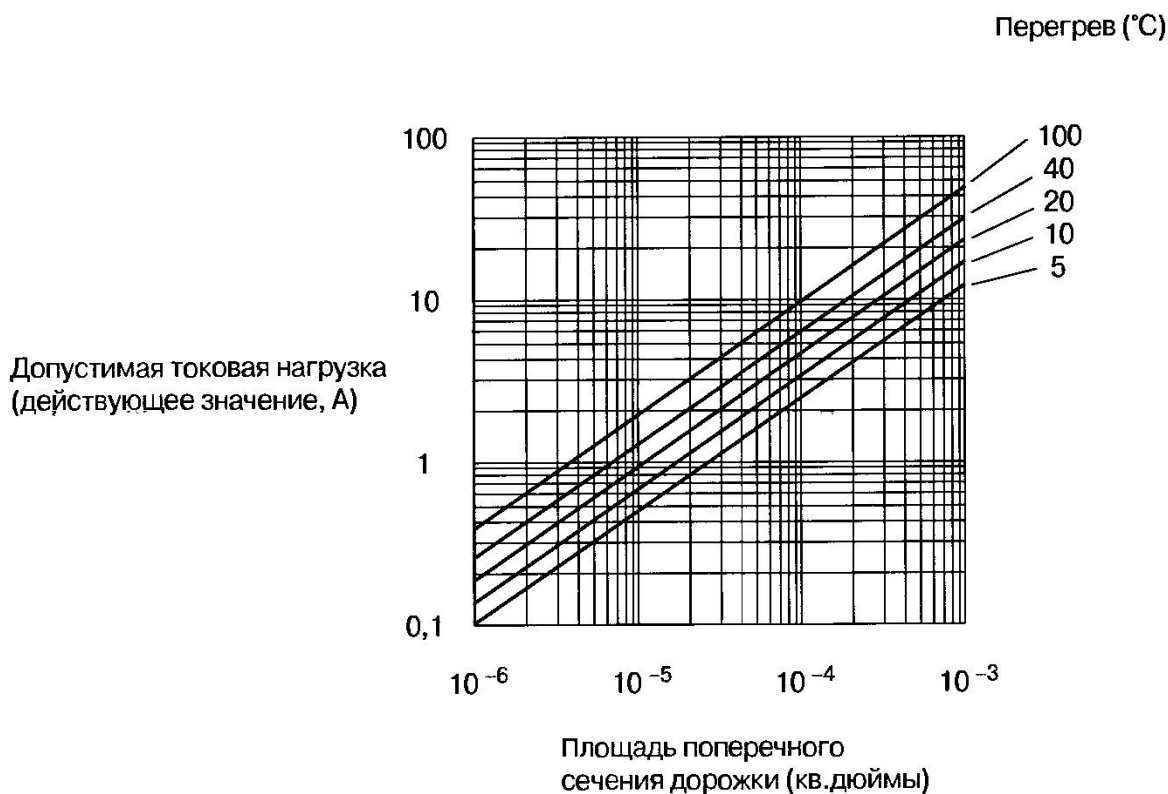


Рисунок 1.1 – Допустиме струмове навантаження залежно від площі поперечного перерізу друкованого провідника

За винятком шин розподілу живлення, які повинні витримувати великі струми, потужність рідко виявляється серйозною перешкодою. Однак у міру розширення застосування тонкоплівкової технології, що дозволяє виготовляти друковані провідники надзвичайно малого поперечного перерізу, обмеження по струмового навантаження можуть перетворитися на більш серйозну проблему. Другим нижнім обмеженням на допустиму ширину друкованих доріжок є технологічні можливості виробництва. Незалежно від використовуваної технології виготовлення друкованих плат, у міру зменшення ширини друкованих провідників до гранично допустимого значення відсоток виходу придатних виробів знижується, а вартість виготовлення - зростає. Цей фактор, в більшості випадків, утримує розробників від використання друкованих доріжок гранично допустимої мінімальної ширини.

Є й інші чинники, які змушують збільшувати ширину друкованих провідників. Нестабільність технологічних параметрів процесу травлення призводить до значної нерівномірності ширини друкованих доріжки по довжині. У разі вузьких друкованих доріжок допуск на відносний розкид ширини по довжині друкованої доріжки, який визначає відносний розкид хвильового опору друкованої лінії по її довжині, може виявитися недосяжним. Необхідність забезпечення високої рівномірності хвильового опору змушує використовувати друковані доріжки шириною, що набагато перевершує гранично досяжне мінімальне значення.

Для визначення співвідношення між шириною і висотою підйому друкованої доріжки над опорним шаром, досить високого для забезпечення заданої точності дотримання хвильового опору, при встановлених допусках на ширину друкованої доріжки і товщину підкладки, можна використовувати методики, наведені в [10]. При розрахунку допуску на хвильовий опір друкованої лінії необхідно обов'язково враховувати розкид за величиною діелектричної проникності підкладки.

Обмеження по струмовому навантаженню, вартості та точності дотримання хвильового опору визначають, як правило, конкретне значення ширини друкованих доріжок. При обраної ширині друкованих доріжок, товщина підкладки визначається, виходячи з заданого значення хвильового опору друкованих ліній передачі.

1.3 Зв'язок між щільністю трасування і кількістю необхідних шарів друкованих провідників

Чим більше кількість шарів друкованих провідників, тим ширше можна рознести друковані доріжки один від одного. Це полегшує трасування і знижує ризик виникнення проблеми перехресних перешкод. На жаль, вартість багат шарової друкованої плати зростає пропорційно добутку кількості шарів площу плати. Чим більше шарів, тим вище вартість друкованої плати.

При зменшенні кількості шарів доводиться звужувати крок друкованих доріжок що також викликає підвищення вартості виготовлення друкованої плати. Але крім цього, при досить вузькому кроці друкованих доріжок зростає небезпека того, що рівень перехресних перешкод виявиться занадто високим.

Визначити ту мінімальну кількість шарів, при якому вартість виготовлення друкованої плати виявиться мінімальною, можна, тільки спираючись на досвід і

міркування якісного характеру. Головним питанням є правильна оцінка кроку доріжок, що вимагається для прокладки N з'єднань на платі певних розмірів, що складається з M шарів друкованих провідників. Знаючи крок друкованих доріжок, можна оцінити вартість виготовлення друкованої плати і одночасно розрахунковий рівень перехресних перешкод.

Крок друкованих доріжок визначається щільністю трасування. Одна з корисних моделей для розрахунку щільності трасування носить назву правила Рента (Rent) [1] - по імені інженера компанії IBM, вперше сформулювавши його Рент звернув увагу на те, що в більшості випадків для друкованих плат великої площі характерно наступне: якщо розбити, друковану плату навхрест на чотири рівні частини, то тільки половина друкованих з'єднань проходять в даному квадранті, переходить через його кордон в інші квадранти, а половина - ні. При подальшому розподілі частин друкованої плати на менші частини така особливість зберігається. Гелі припустити, що довжина друкованих провідників у середньому дорівнює відстані між квадрантами, на які розбита друкована плата, то з цього вельми уможливого припущення можна отримати наступну оцінку середньої довжини друкованих провідників, усередненої по всій друкованій платі - вона становить три восьмих розміру плати.

Знаючи середню довжину друкованих провідників і їх кількість, можна розрахувати загальну площу поверхні, що покривається ними для будь-якого значення кроку друкованих доріжок. Формула 1.1, отримана виходячи з правила Рента, дозволяє розрахувати крок друкованих провідників, необхідний для трасування N з'єднувальних провідників на платі заданого розміру, що складається з M шарів друкованих провідників.

$$\rho_{avg} = \frac{(XY)^{1/2}}{N} 2,7M, \quad (1.1)$$

де N — кількість друкованих з'єднань (передбачається, що їх розподіл підкоряється правилу Рента);

ρ_{avg} — середній крок друкованих доріжок, дюйми;

X — ширина плати, дюйми;

Y — висота плати, дюйми;

M — кількість шарів друкованих провідників.

Звичайно, якщо є яка-небудь конкретна інформація, що стосується технічних вимог на трасування, наприклад, інформація про великі шини або інших структурах, її потрібно використовувати, У відсутність будь-якої конкретної інформації про особливості схеми для оцінки необхідного кроку доріжок можна скористатися ідеєю Рента.

Для плат з скрізними отворами оцінка середнього кроку, отримана за формулою 1.1, і необхідний мінімальний крок друкованих доріжок дуже сильно відрізняються. Необхідність використання дводоріжкового або трьодоріжкового трасування друкованих провідників у просторі між выводами мікросхем визначається, виходячи з мінімально допустимого кроку друкованих доріжок, отриманого за результатами аналізу рівня перехресних перешкод. Для оцінки необхідного запасу вільних друкованих доріжок потрібно використовувати величину середнього кроку друкованих доріжок, отриману за формулою 1.1.

У внутрішніх шарах друкованих провідників плат поверхневого монтажу може бути більше вільного місця для прокладки друкованих доріжок, в порівнянні з платами під DIP-корпуси. Загальна кількість міжшарових перемичок в обох варіантах плат буде приблизно однакова, але розміри скрізних металізованих отворів міжшарових перемичок в платах поверхневого монтажу менше, оскільки вони не призначені для установки выводів мікросхем. У плат поверхневого монтажу середній і мінімальний крок друкованих доріжок у внутрішніх шарах можуть мати близькі значення.

У внутрішніх шарах друкованих плат з підкладками з склотекстоліта між отворами під выводами елементів можна, в принципі, умістити до чотирьох друкованих доріжок, але це може привести до серйозних проблем, викликаним високим рівнем перехресних перешкод.

Додатковий простір на платі для прокладки друкованих з'єднань може бути забезпечено за рахунок менш щільного компонування мікросхем на платі, але при цьому зросте загальна площа друкованої плати. Розробники вважають за краще, як правило, нарощувати кількість шарів.

Якщо виникає проблема перехресних перешкод, потрібно використовувати такий варіант трасування, щоб друковані доріжки щільно зближувалися один з одним тільки в просторі між выводами мікросхем, а потім відразу ж розходилися в

сторони, поки їм не зустрінеться наступна мікросхема. Для цього доведеться виконати великий обсяг ручної корекції, але навіть невелике розширення проміжків між друкованими доріжками забезпечує ослаблення перехресних перешкод.

1.4 Класичні варіанти укладання шарів

На рисунках 1.2 - 1.4 наведені три класичні варіанти укладання шарів для 4, 6 і 10 шарів. Ці варіанти укладання розроблені під стандартну технологію виготовлення багат шарових друкованих плат з склотекстоліту, опис якої наводиться нижче. При кількості шарів більше 10 розробники зазвичай закладають в плату додаткові опорні шари землі з метою екранування груп шарів друкованих провідників один від одного.

Наведені варіанти укладання шарів підходять для друкованих плат швидкодіючих комп'ютерних вузлів, що розміщуються в екранованих корпусах. Для друкованих плат пристроїв, які гарантовано повинні відповідати за рівнем електромагнітного випромінювання нормам FCC, VDE, Tempest чи іншим законодавчо встановленим нормам, без використання добре екрануючих корпусів, ці прості варіанти укладання шарів не підходять.

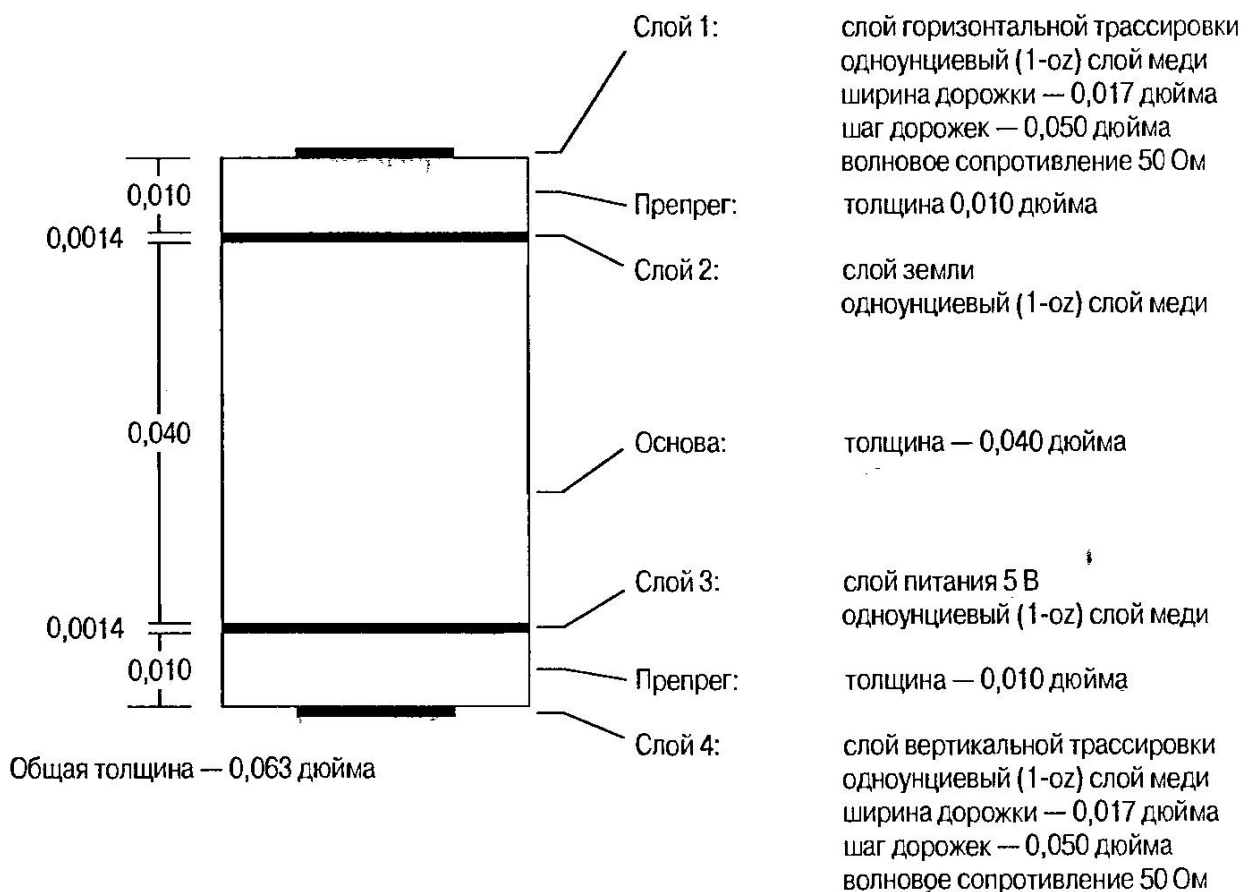


Рисунок 1.2 – Укладання шарів чотиришаровій друкованій платі

Позначення «горизонтальне трасування» і «вертикальне трасування» на всіх рисунках означають, відповідно, вертикальну або горизонтальну орієнтацію друкованих доріжок в конкретному шарі друкованих провідників. Традиційно прийнято прокладати друковані доріжки в одному шарі паралельно один одному. У кожному наступному шарі друковані доріжки повернені під прямим кутом по відношенню до орієнтації друкованих доріжок у нижньому шарі. Тільки деякі доріжки прокладаються по діагоналі шару плати або мають довгі вигини під прямим кутом.

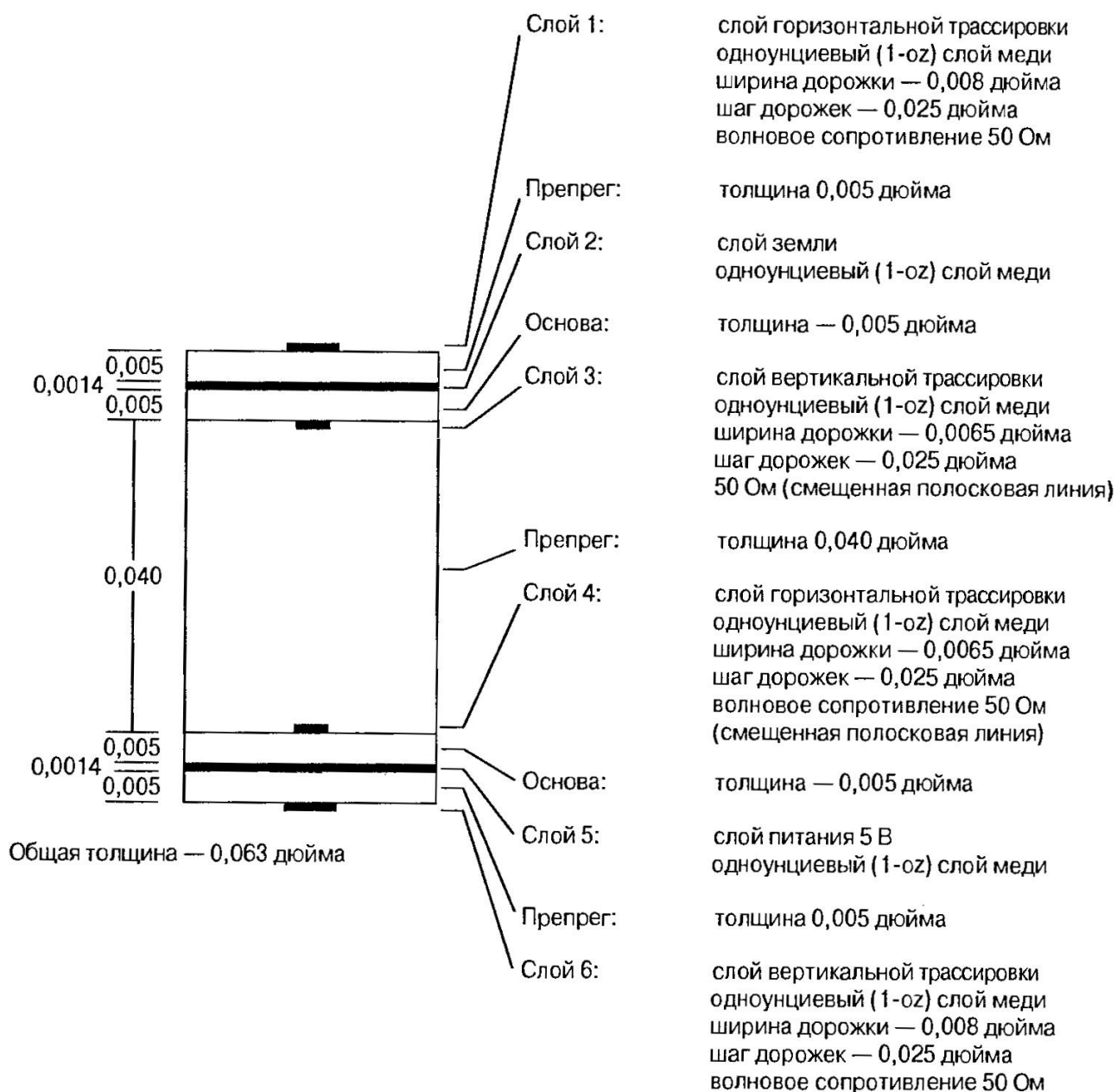


Рисунок 1.3 – Укладання шарів шестишарової друкованої плати

При такій орієнтації друкованих доріжок зростає ефективність трасування. Шари живлення та землі на рисунках 1.1 - 1.4 виділені товстими суцільними лініями. Рисунки виконані з дотриманням масштабу між шириною зображених на них друкованих доріжок і висотою їх підйому над суцільними опорними шарами.

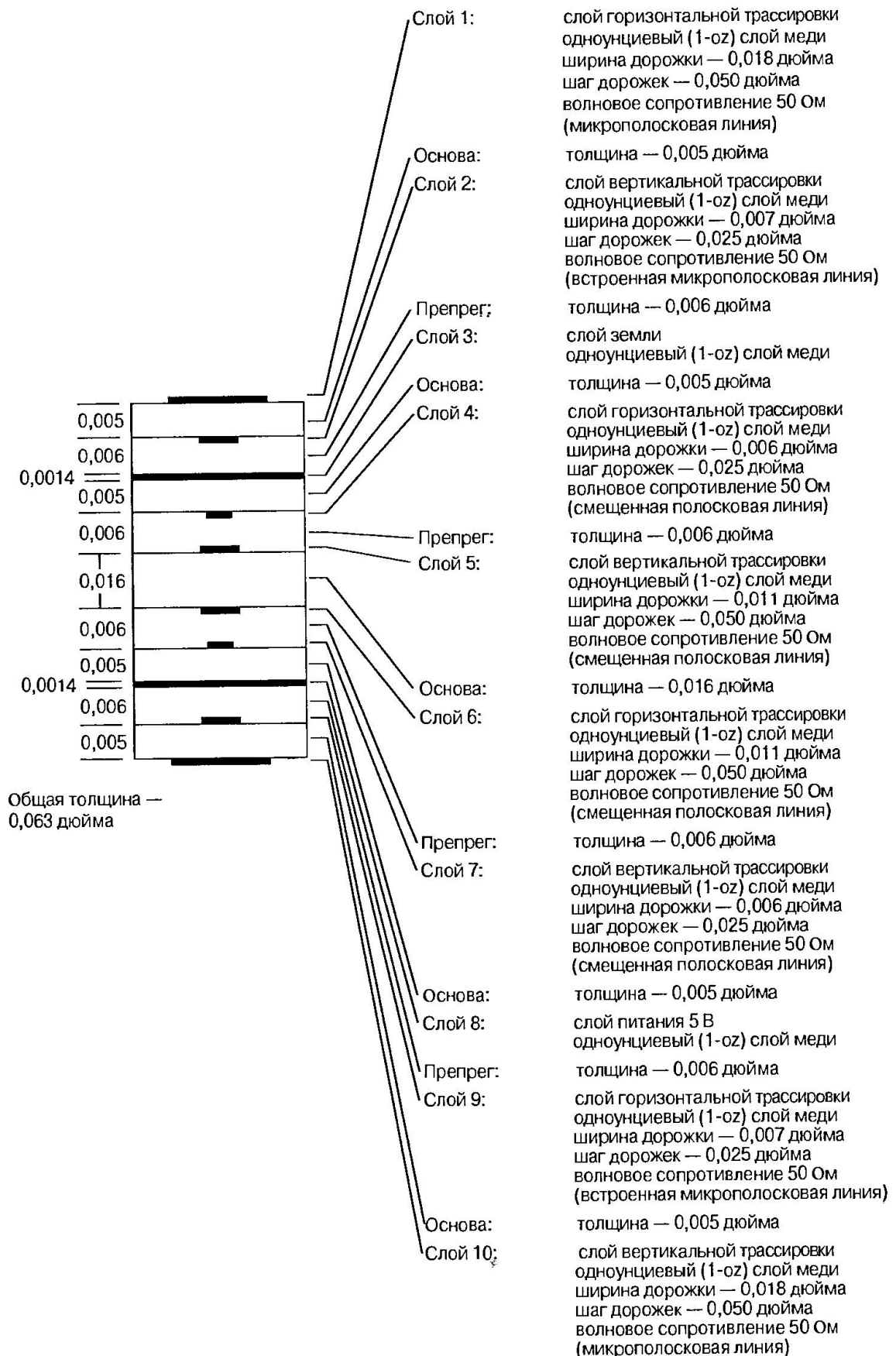


Рисунок 1.4 – Укладання шарів десятишарової друкованої плати

Терміни основа і препрега означають матеріали, використовувані в технології виготовлення багатошарової друкованої плати. Нижче наводиться короткий опис однієї з широко застосовуваних технологій виготовлення друкованих плат [10]. При необхідності жорсткого дотримання заданої висоти підйому друкованих провідників над суцільними шарами землі потрібно знати властивості матеріалів основи препрега.

1.5 Технологія виготовлення друкованих плат

Процес виготовлення багатошарової друкованої плати починається з того, що береться комплект заготовок з двостороннього фольгованого діелектрика. У шарах мідної фольги, призначених для внутрішніх шарів друкованих провідників, витравляється малюнок друкованих доріжок. Шари мідної фольги, призначені для зовнішніх шарів, залишаються недоторканими. Такі заготовки діелектрика з витравленим в покривають їх шарах міді малюнком друкованих доріжок називаються основою. Відстань між шарами друкованих доріжок, що покривають з обох сторін діелектричну підкладку основи, залежить від її товщини. Потім основи укладають в заданому порядку один на одного, прокладаючи між ними препреги, що представляє собою діелектричну основу, просочену частково знедоленою епоксидною смолою. У процесі гарячого пресування відбувається розм'якшення і полімеризація смоли, в результаті чого шари основи склеюються з препрегом. Товщина препрега після такої обробки визначає відстань між шарами друкованих провідників, між якими він прокладений. Препреги, полімеризуючись, перетворюється на твердий шар склотекстоліта, що має ту ж діелектричну проникність, що і основа. В укладанні багатошарової друкованої плати шари основи і препрега чергуються один з одним.

Оскільки препреги частково розм'якшується в процесі гарячого пресування, шари друкованих доріжок, прилеглі до нього з обох сторін, вдавлюються в розм'якшений матеріал препрега, що володіє клеючими властивостями. При точному аналізі відстані між шарами друкованих доріжок і шарами землі необхідно враховувати, що, з урахуванням вдавнення шарів друкованих доріжок у препрег, відстань між зверненими один до одного сторонами доріжок, прилеглими до

препрега з обох сторін, стає менше товщини препрега на подвоєну товщину доріжок. Суцільні опорні шари металізації у матеріалі препрегу не вдавлюються. Залежно від особливостей використовуваної технології виготовлення друкованої плати в якості зовнішнього шару друку використовується шар мідної фольга з одного боку основи, який був залишений недоторканим при травленні, або ж шар фольги, що приклеюється до зовнішньої сторони препрегу в процесі пресування друкованої плати. У будь-якому випадку зовнішній шар являє собою суцільний шар міді (що ще не піддавався операції травлення).

Після полімеризації препрега в отриманій багат шаровій структурі свердлять отвори. Через просвердлені отвори відкривається доступ до друкованих провідників, розташованих у внутрішніх шарах плати, і контактним майданчикам, крізь які проходять отвори, але вони поки ще залишаються електрично ізольованими один від одного.

Далі проводиться хімічне осадження шару міді на стінки отворів і одночасно на зовнішню поверхню друкованої плати. З метою скорочення витрати матеріалу та тривалість цієї операції, перед її виконанням на зовнішню поверхню друкованої плати, як правило, наноситься захисна маска, що покриває всю поверхню плати за винятком малюнка друкованих доріжок закладених в трасування плати, і майданчиків навколо отворів, просвердлених в платі. Після цієї операції товщина друкованих доріжок у зовнішньому шарі фольги стає дещо більше вихідної товщини мідної фольги. Саме цей приріст товщини служить причиною збільшення нерівномірності ширини друкованих провідників, виконаних у зовнішніх шарах, в порівнянні з внутрішніми шарами.

Завершує процес виготовлення друкованої плати травлення малюнка друкованих провідників в зовнішніх шарах металізації. Після цього провідники зовнішніх шарів плати покриваються припоєм (якщо це закладено в технічні вимоги паяльною маскою і на поверхню з обох сторін плати методом шовкографії наноситься маркування).

2 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ТОПОЛОГІЇ ДБП

2.1 Параметри топології блоку комбінованого БК-2075

Блок комбінований БК-2075 призначений для перетворення сигналу від первинного або нормуючого перетворювача в уніфікований вихідний електричний сигнал постійного струму або напруги і цифровий сигнал.

Для аналізу перехідних процесів у ланцюгах блоку БК-2075 використаємо лінії UN000008, UN000009 та UN000010. Топологія ланцюга UN000008 представлена на рисунку 2.1. Даний ланцюг з'єднує мікросхеми D1, D4 та D10. Топології ланцюгів UN000009 та UN000010 представлені на рисунку 2.2. Ланцюг UN000009 з'єднує мікросхеми D1 та D10, а ланцюг UN000010 мікросхеми D4 та D10. Параметри та призначення з'єднаних мікросхем:

- D1 та D4 однакові – ADG621 [12] здвоєні монолітні CMOS перемикачі. Кожен вимикач ADG621 проводить однаково добре в обох напрямках. У ADG621 обидва вимикачі нормально відкриті. Параметри ADG621 представлені у таблиці 2.1;

- D10 MSC1210 [13] 24-бітний прецизійний АЦП з 8051 мікроконтролерним ядром і Flash пам'яттю. Параметри MSC1210 представлені у таблиці 2.2.

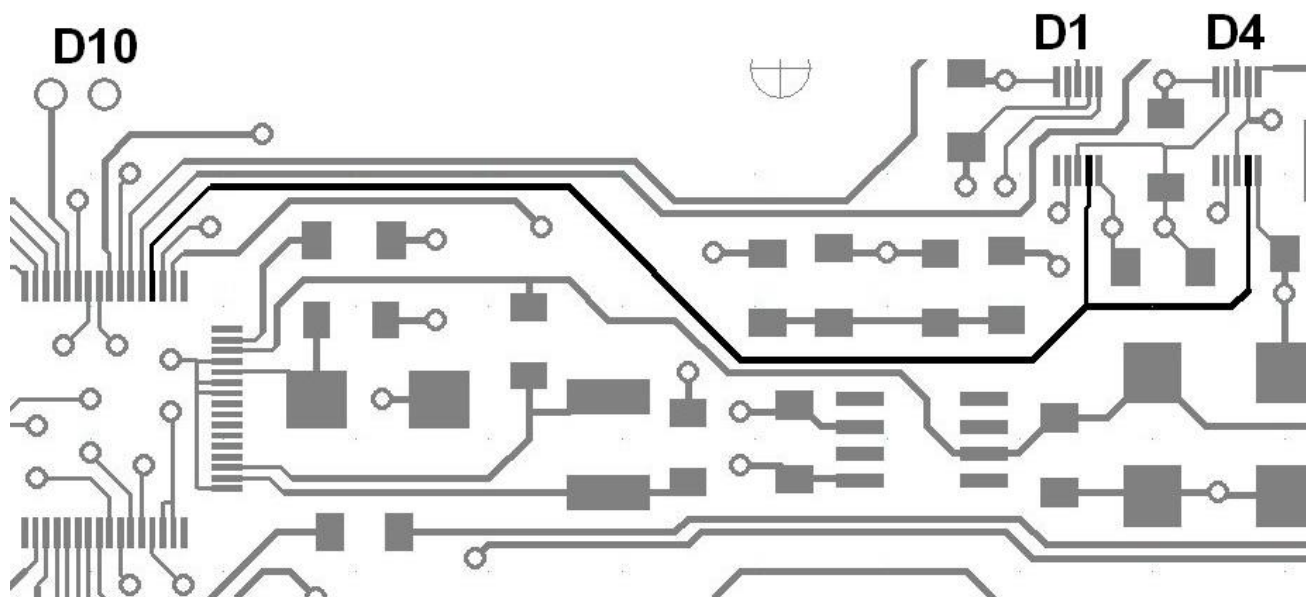


Рисунок 2.1 – Топологія ланцюга UN000008

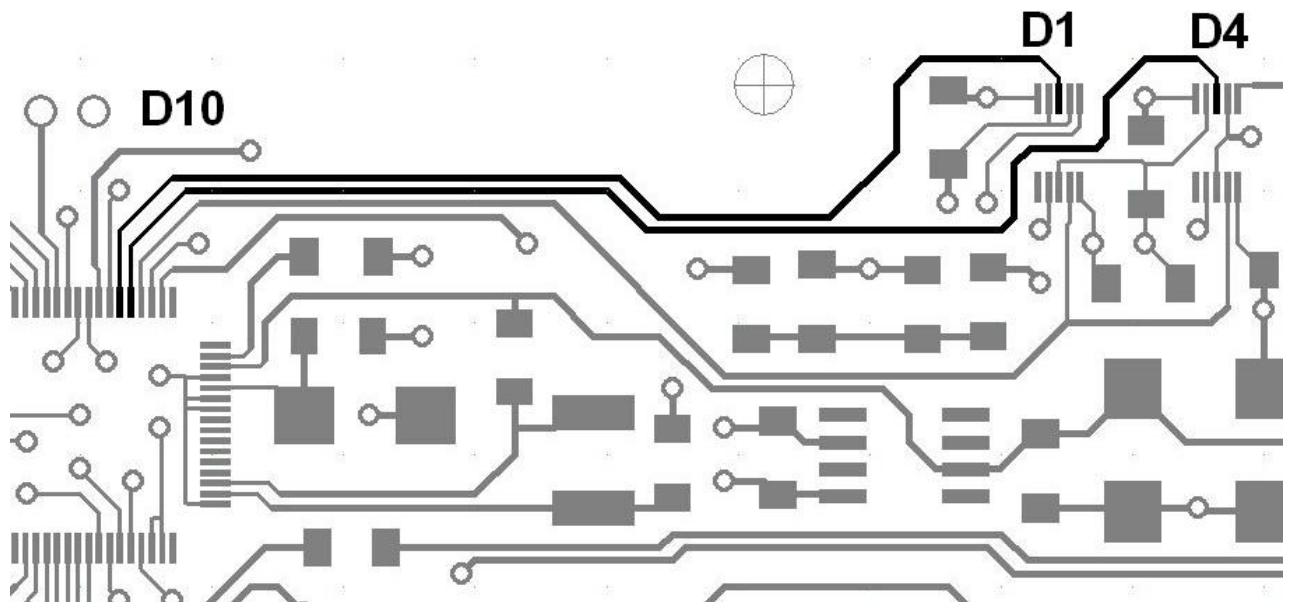


Рисунок 2.1 – Топології ланцюгів UN000009 та UN000010

Таблиця 2.1 – Електричні характеристики мікросхеми ADG621 (D1, D4)

Параметр	Значення
Вхідна напруга логічного нуля, $U_{0вх}$, В	0,8 max
Вхідна напруга логічної одиниці, $U_{1вх}$, В	2,4 min
Вхідна ємність C_{in} , пф	2
Вхідний опір, $R_{вх}$, Ом	$3 \cdot 10^8$

Таблиця 2.2 - Електричні характеристики мікросхеми MSC1210 (D10)

Назва параметра	Значення
Вихідна напруга логічного нуля, $U_{0вих}$, В	1,5 max
Вихідна напруга логічної одиниці, $U_{1вих}$, В	3,5 min
Вихідна ємність C_{out} , пф	8
Вихідний опір, $R_{вих}$, Ом	200

Мікросхеми D1 та D4 у досліджуваних ланцюгах працюють лише як приймачі сигналів тому у таблиці 2.1 зазначені лише вхідні параметри, а мікросхема D10 відповідно працює, як передавач сигналів тому у таблиці 2.2 зазначені вихідні параметри.

2.2 Структура і функції систем аналізу EMC PEA

Для проведення аналізу електромагнітної сумісності багатошарових планарних топологій (багатошарові друковані, об'єднувальні панелі, мікрозбірки і полоскові лінії) широкого поширення набув пакет SIX (Signal Integrity + Xtalk) [11].

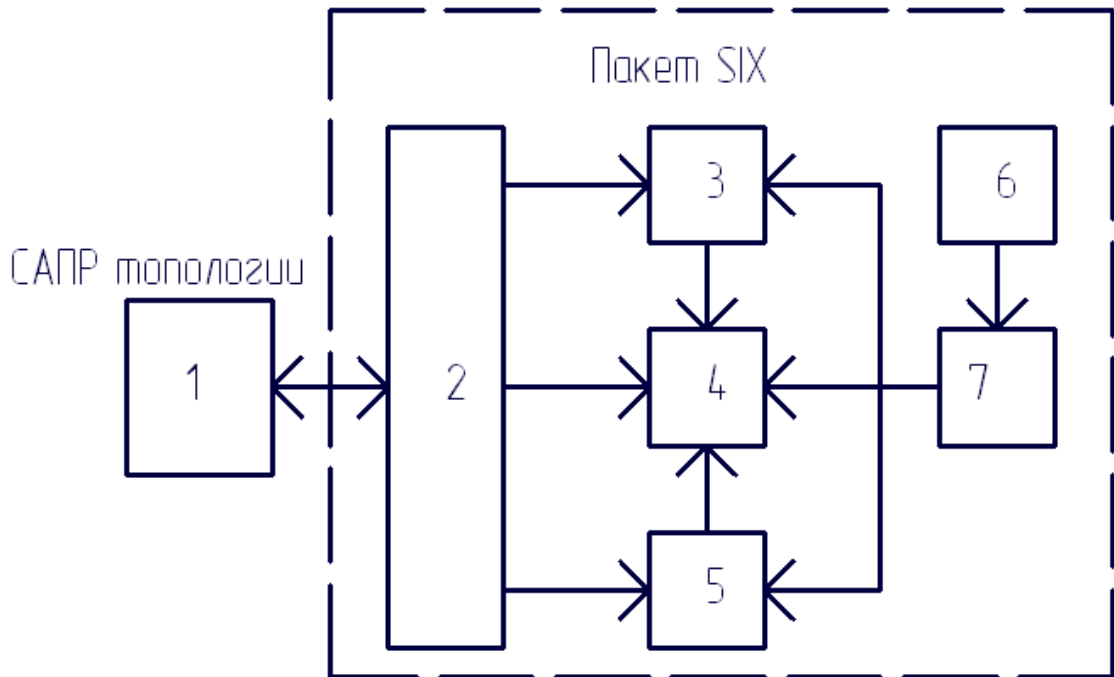


Рисунок 2.3 - Структура системи аналізу EMC багатошарових топологій.

- 1 - САПР проектування багатошарової топології (файли*.рєв);
- 2 - інтерфейс бази даних пакету SIX з файлами *.рєв САПР проектування топології;
- 3 - програмний модуль (Signal Integrity) аналізу перехідних процесів в електрично довгих ланцюгах;
- 4 - хвильовий аналізатор (Wave Analyzer) відображує результати моделювання перехідних процесів і перехресних наведень в електрично довгих ланцюгах;
- 5 - програмний модуль (Xtalk) аналізу перехресних наведень в електрично довгих ланцюгах;
- 6 - редактор бібліотеки (Macromodel Editor) IBIS - моделей EPE;
- 7 - призначена для користувача і базова бібліотека IBIS - моделей EPE.

Пакет SIX забезпечує рішення наступних завдань.

1. Інтерфейс формату даних - файл *.рєв опису багатошарової планарної топології і пакету SIX. Обчислюються для виділених ланцюгів їх хвильові характеристики, представлені на рисунку 2.4.

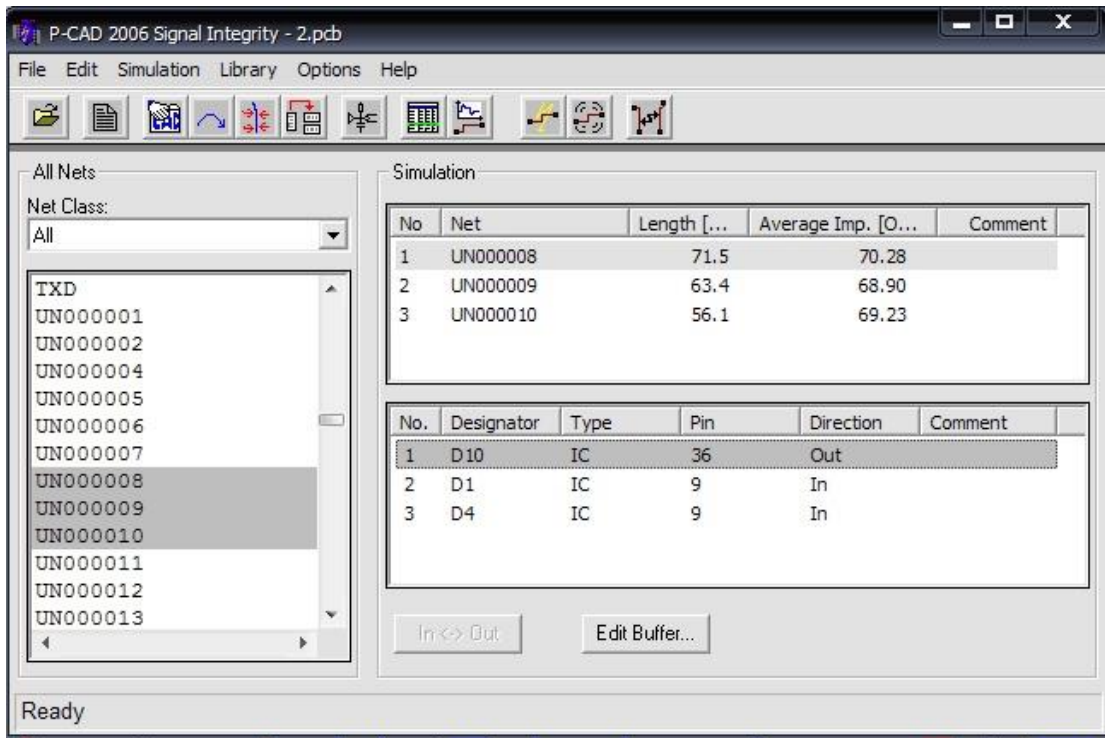


Рисунок 2.4 - Вікно моделювання довгих ланцюгів.

2. Моделювання перехідних процесів електрично довгих ланцюгів з обчисленням хвильового опору, основних параметрів імпульсних сигналів [3]. Результати моделювання перехідних процесів відображаються у вікні хвильового аналізатора (Wave Analyzer) у вигляді кольорових оцифрованих графіків і списку основних параметрів сигналів (рисунок 2.5), що характеризують перехідний процес в електрично довгих ланцюгах.

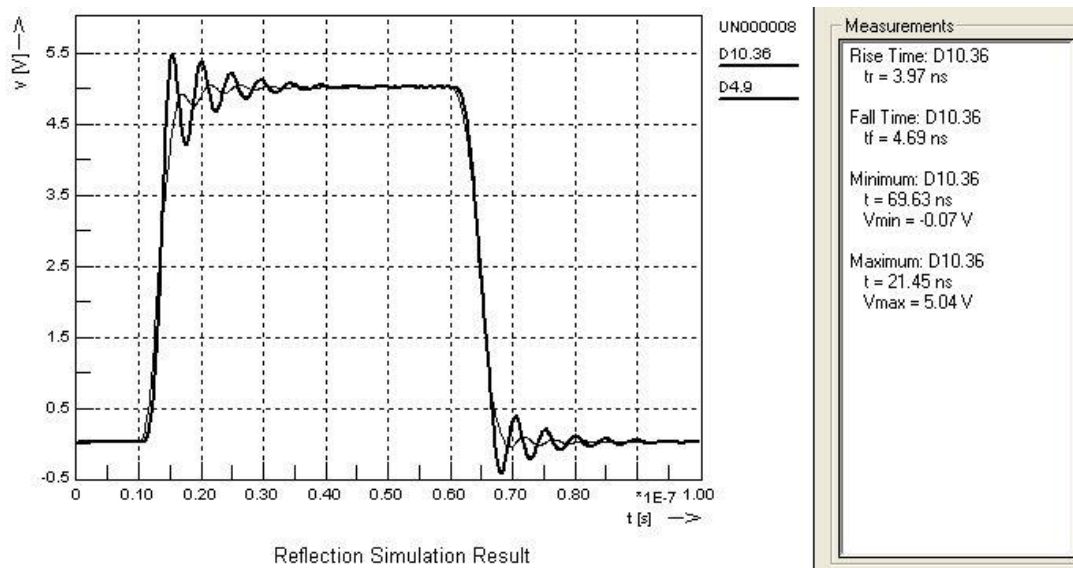


Рисунок 2.5 – Графік сигналів на вході (тонка лінія) і на виході (товста лінія) довгої лінії

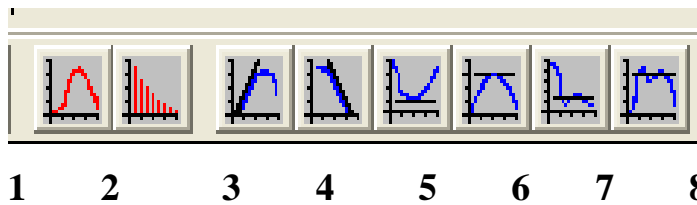


Рисунок 2.6 - Інструментальна панель виміру параметрів сигналів.

За допомогою інструментальної панелі (рисунок 2.6) можна виконати наступні команди:

- 1 – **Carts** (перемикання екрану на графік сигналу);
- 2 – **FFT** (перемикання екрану на спектральну діаграму імпульсу);
- 3 – **Rise Time** (час наростання сигналу – передній фронт імпульсу);
- 4 – **Fall Time** (час спаду сигналу – задній фронт імпульсу);
- 5 – **Minimum** (мінімальне значення сигналу);
- 6 – **Maximum** (максимальне значення сигналу);
- 7 – **Base Line** (базова нижня лінія відліку);
- 8 – **Top Line** (верхня лінія відліку).

3. Побудова спектральних діаграм, що містять постійну і гармонійні складові (гармоніки) імпульсів (розкладання сигналу в ряд Фур'є) [3], виконується командою FFT (рисунок 2.6, поз.2). Результати побудови спектральних діаграм представлені на рисунку 2.7.

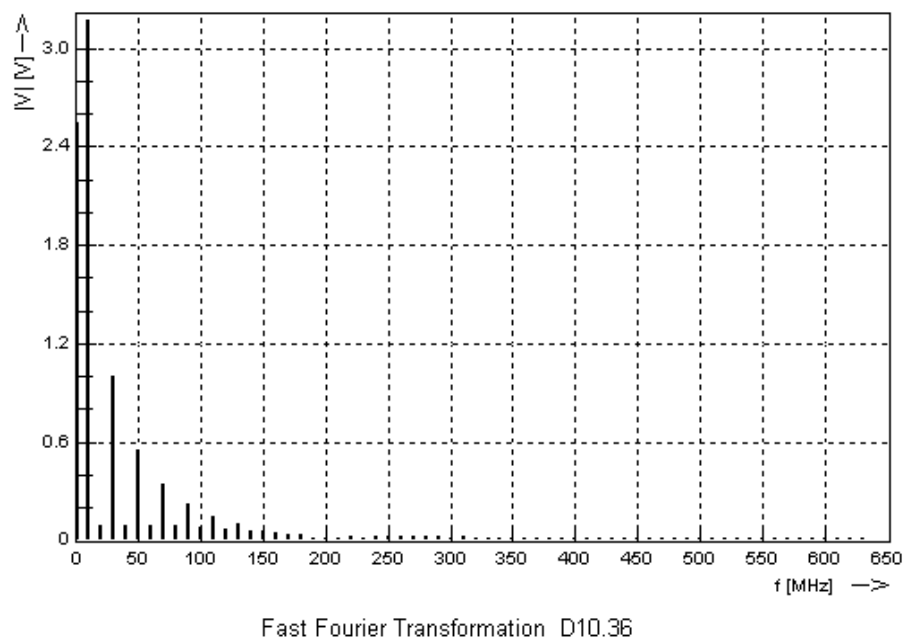


Рисунок 2.7 – Спектральна діаграма довгої лінії

4. Моделювання перехресних перешкод між двома ланцюгами - агресор (джерело перешкод) і жертва (приймач перешкод) [3]. Результати моделювання

відображуються у вікні хвильового аналізатора (Wave Analyzer) оцифрованими графіками і списком основних параметрів сигналів (рисунок 2.8), що характеризують взаємні наведення ланцюгів.

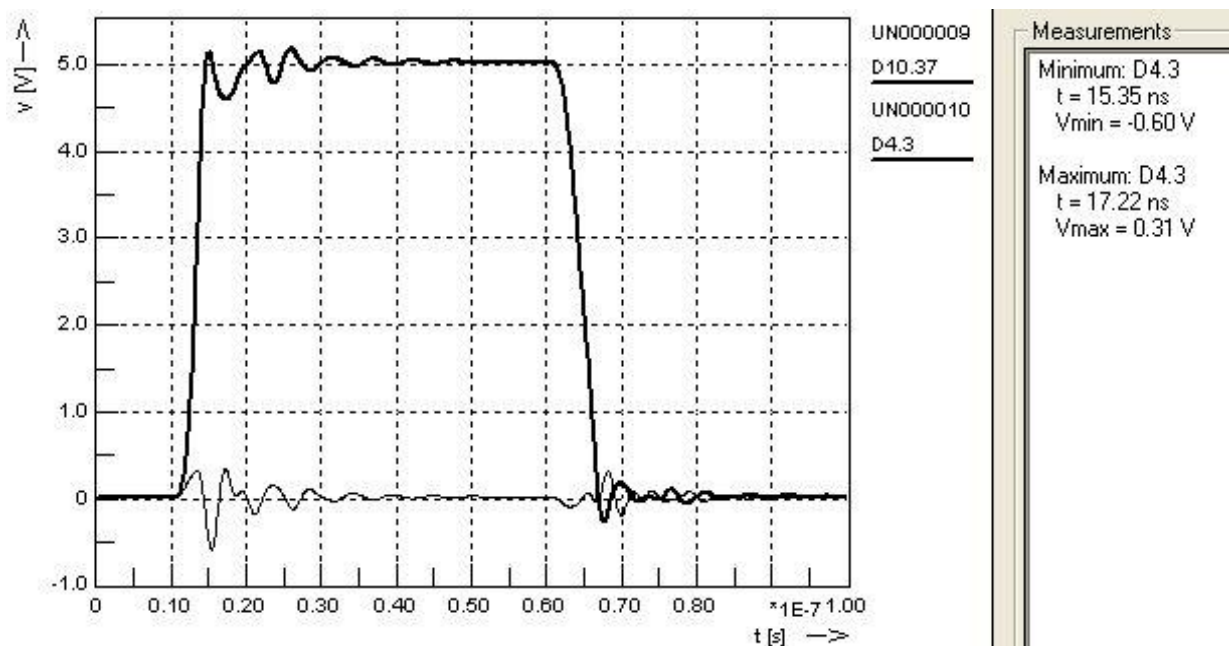


Рисунок 2.8 - Перехресна перешкода і її параметри.

5. Ведення бібліотеки IBIS моделей EPE. Активні EPE (мікросхеми, транзистори та ін.) представлені описом вхідних і вихідних комплексних опорів (імпедансу). Пасивні EPE (резистори, конденсатори, індуктивності та ін.) в бібліотеці IBIS моделей представлені своїми параметрами.

2.3 Комп'ютерний аналіз ЕМС багат шарових планарних топологій РЕА

На рисунку 2.9 представлена схема комп'ютерного аналізу ЕМС багат шарових планарних топологій РЕА.

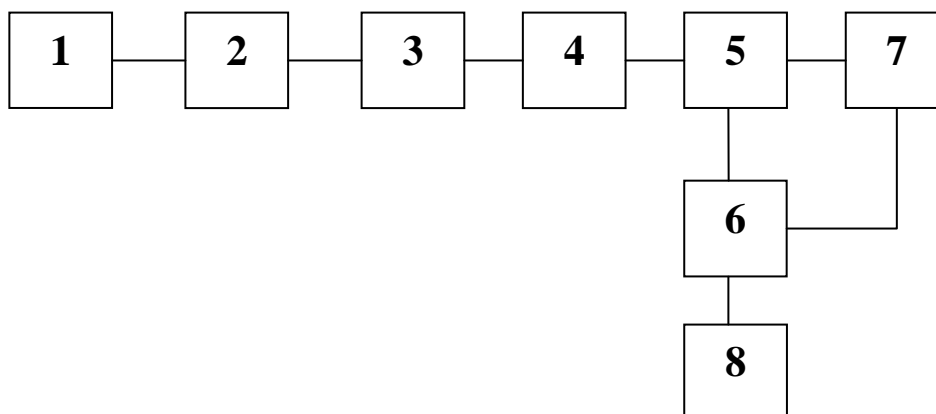


Рисунок 2.9 - Схема комп'ютерного аналізу ЕМС багат шарових планарних топологій РЕА.

Нижче перераховані назви і призначення основних процедур схеми, представленої на рисунку 2.10.

1 - аналіз багатошарової планарної топології. Вибір передбачуваних ланцюгів агресорів.

2 - розпізнавання ланцюгів жертв по відношенню до ланцюгів агресорів за наступними ознаками:

а) мінімальній довжині паралельних ділянок провідників;

б) максимальному проміжку між найближчими паралельними провідниками.

Розпізнавання найближчих паралельних ланцюгів до заданого ланцюга виконується за два етапи. На першому етапі задаємо у вікні Options Configure параметри найближчих ланцюгів до заданої (рисунок 2.11).

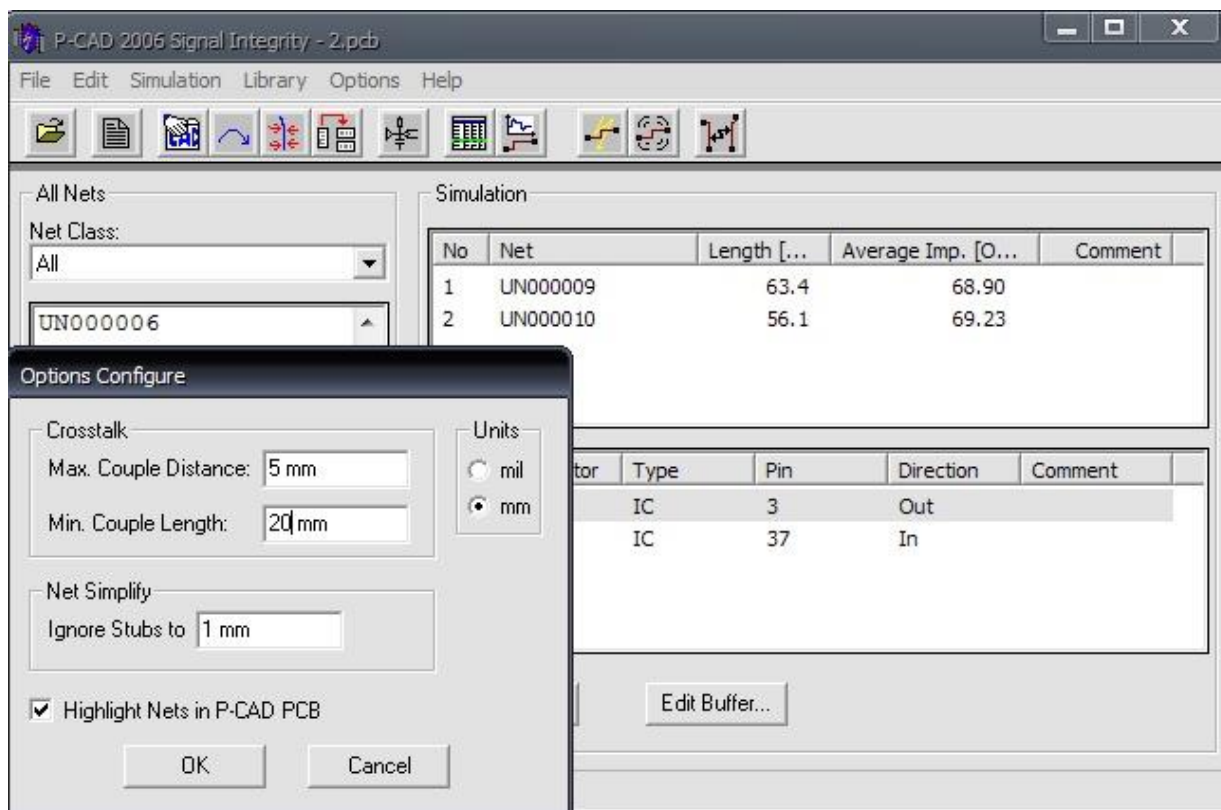


Рисунок 2.10 - Параметри налаштування програми розпізнавання найближчих паралельних ланцюгів до ланцюга агресора.

Max. Couple Distance - максимально можлива відстань між найближчими паралельними провідниками;

Min. Couple Length - мінімальна довжина паралельних ділянок провідників;

Ignore Stubs to - відведення провідників, що не враховуються.

На другому етапі командою Find Couplend Net визначаються найближчі паралельні ланцюги відповідно до параметрів, обумовлених в меню Options Configure (рисунок 2.10).

3 – визначення початкових даних (параметрів мікросхем і друкованого монтажу) для аналізу ЕМС. При аналізі багатошарової планарної топології для мікросхем, використовуваних в електрично довгих лініях як джерело або приймач сигналів, необхідно визначити по довідниках наступні параметри:

- амплітуду максимально допустимої перешкоди позитивної полярності на вході мікросхеми, $U_{+доп}$, В;
- амплітуда максимально допустимої перешкоди негативної полярності на вході мікросхеми, $U_{-доп}$, В;
- вхідна напруга логічного нуля, $U_{0вх}$, В;
- вхідна напруга логічної одиниці, $U_{1вх}$, В;
- вихідна напруга логічного нуля, $U_{0вих}$, В;
- вихідна напруга логічної одиниці, $U_{1вих}$, В;
- тривалість фронту t_f , нс;
- вхідний опір, $R_{вх}$, МОм;
- вихідний опір, $R_{вих}$, Ом.

Інформація про друкований монтаж поступає в пакет SIX безпосередньо з САПР топології за винятком відносної діелектричної проникності EPS матеріалу підкладки друкованого монтажу, а також товщини діелектрика і товщини шару металізації. Останні параметри вводяться в пакеті SIX командою Edit > Layer Stack.

4 - Опис IBIS - моделей досліджуваних мікросхем.

5 - аналіз перехідних процесів в поодиноких лініях зв'язку і узгодження їх по входу і по навантаженню.

6 - аналіз і оптимізація перешкод в схемах РЕА.

7 - коригування топології за результатами моделювання: установка резистора, що узгоджує на вході електрично довгої лінії, що узгоджує навантаження на виході, включення в структуру топології екранних шарів.

2.4 Аналіз перехідних процесів у ланцюзі UN000008 блоку БК-2075

На рисунку 2.11 представлений графік перехідного процесу сигналу ланцюга UN000008 до узгодження. На цьому рисунку товстою лінією представлений графік сигналу на виході ланцюга точка D1.9, а тонкою лінією - на вході точка D10.36, при подачі на вхід прямокутного імпульсу амплітудою 5 В. З рисунку 2.11 видно, що максимальне значення сигналу на виході становить 5,51 В. Ланцюг необхідно узгодити так, щоб максимальне значення сигналу на виході ланцюга UN000008 було рівним приблизно 5 В.

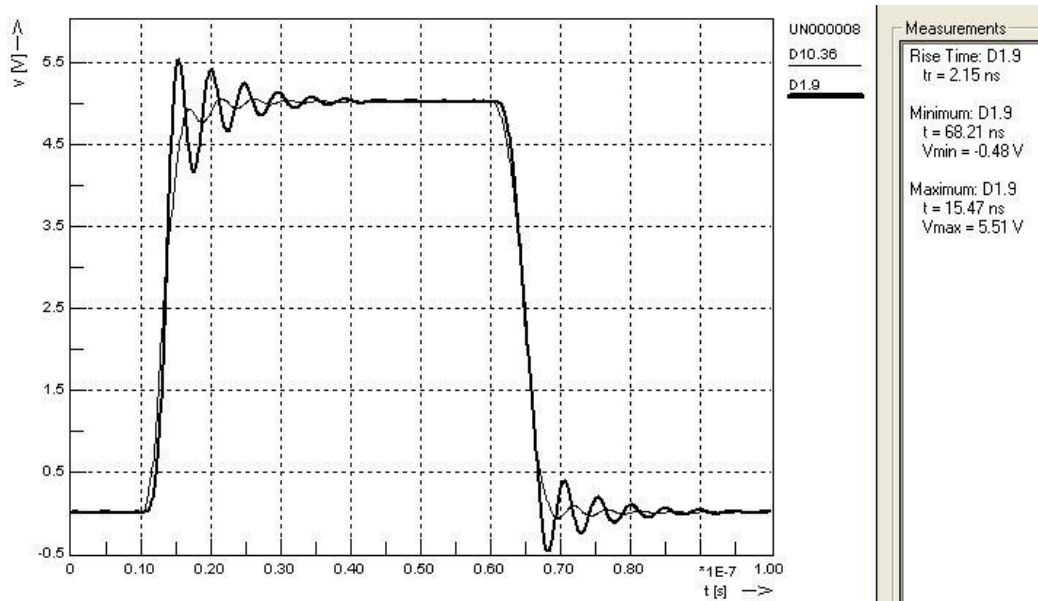


Рисунок 2.11 – Графік перехідного процесу сигналу ланцюга UN000008

Для узгодження ланцюгів зазвичай використовуються додаткові начіпні елементи навантажень на вході або на виході ланцюгів. Найбільш поширені варіанти навантажень для узгодження ланцюгів представлені на рисунку 2.12.

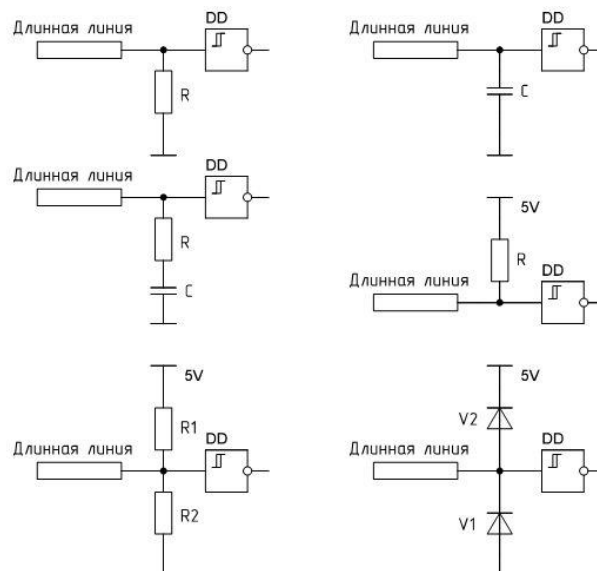


Рисунок 2.12 – Варіанти навантажень для узгодження ланцюгів

Для узгодження ланцюга UN000008 було використано два варіанти додаткових навантажень. На рисунку 2.13 а) відображено меню термінатора для узгодження по входу ланцюга UN000008 резистором номіналом 70 Ом, а на рисунку 2.13 б) меню термінатора для узгодження по виходу ланцюга UN000008 резистором номіналом 40 Ом і ємністю номіналом 60 пФ.

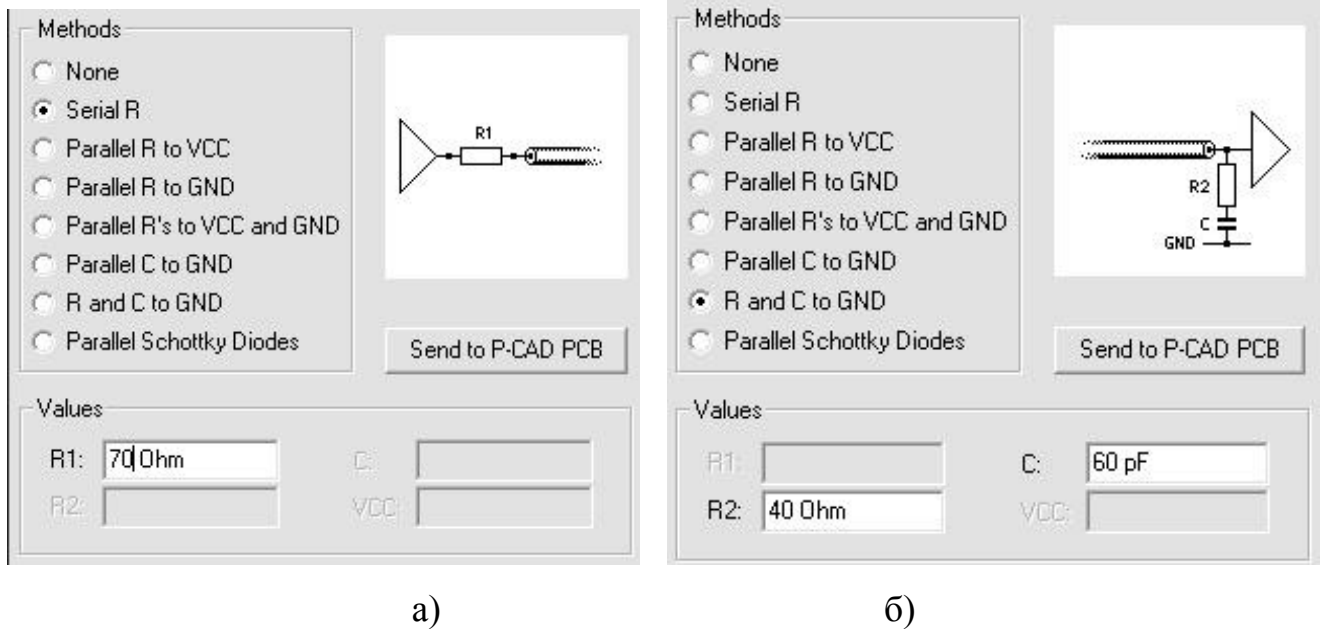


Рисунок 2.13 – Меню термінатора для узгодження ланцюга по входу а) та по виходу б)

На рисунку 2.14 представлений графік перехідного процесу сигналу ланцюга UN000008 після узгодження по входу. Товстою лінією представлений графік сигналу на виході ланцюга, а тонкою лінією - графік сигналу на вході, при подачі на вхід ланцюга прямокутного імпульсу амплітудою 5 В. Максимальне значення сигналу на виході ланцюга дорівнює 5 В.

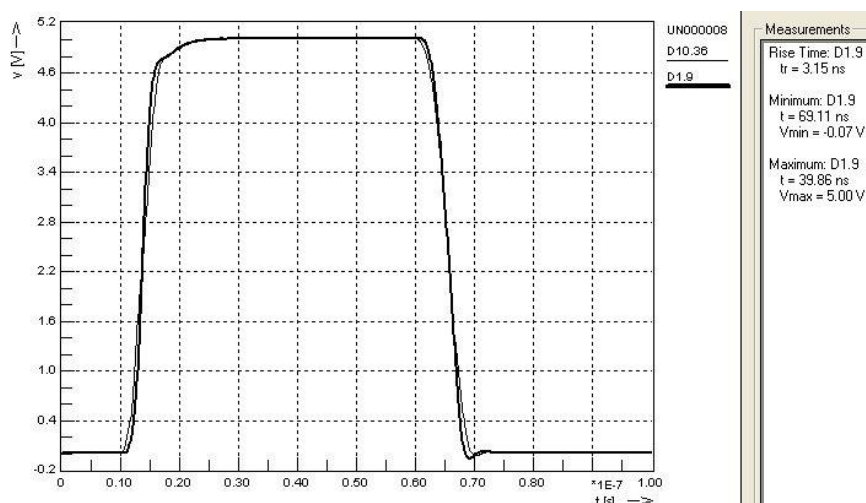


Рисунок 2.14 – Графік перехідного процесу сигналу після узгодження ланцюга по входу

На рисунку 2.15 представлений графік перехідного процесу сигналу ланцюга UN000008 після узгодження по виходу. Товстою лінією представлений графік сигналу на виході ланцюга, а тонкою лінією - графік сигналу на вході ланцюга, при подачі на вхід ланцюга прямокутного імпульсу амплітудою 5 В. Значення сигналу на виході дорівнює 5 В.

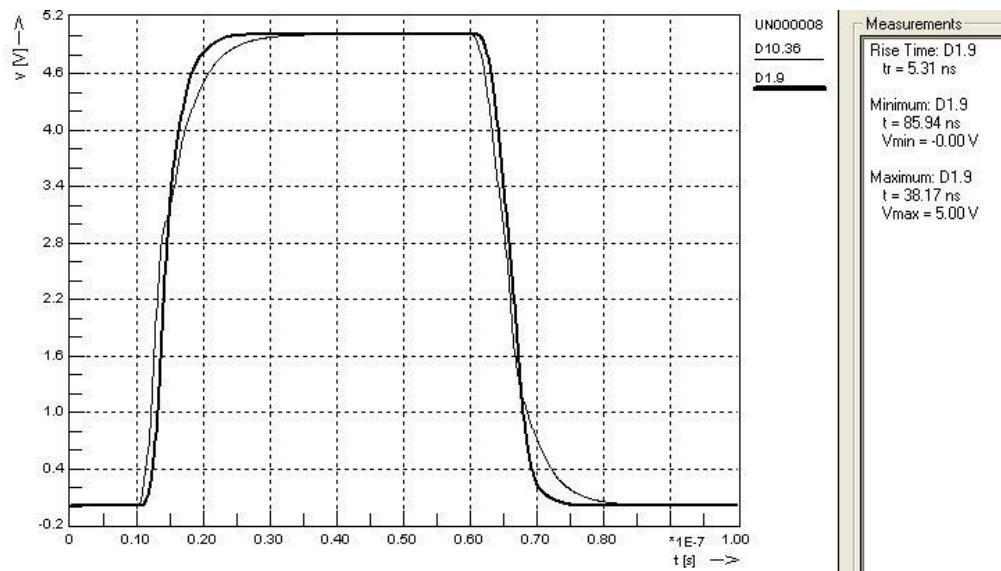


Рисунок 2.15 – Графік перехідного процесу сигналу після узгодження ланцюга по виходу

Існує можливість не використовувати додаткові навантажувальні елементи для узгодження ланцюгів, в цьому випадку для узгодження використовують окремі металізовані екранні шари землі та живлення. На рисунку 2.16 представлений графік перехідного процесу сигналу ланцюга UN000008 після підключення екранних шарів. Товстою лінією представлений графік сигналу на виході ланцюга, а тонкою лінією - графік сигналу на вході ланцюга, при подачі на вхід ланцюга прямокутного імпульсу амплітудою 5 В. Максимальне значення сигналу на виході ланцюга дорівнює 5 В.

На рисунках 2.17 – 2.18 зображені спектральні діаграми перехідних процесів до узгодження і після узгодження екранними шарами. При детальному розгляді можна помітити що після узгодження значно починають знизатися складові гармоніки сигналу після 100 МГц. Вже дванадцята гармоніка майже в два рази менша за амплітудою після узгодження екранними шарами ніж до узгодження ланцюга.

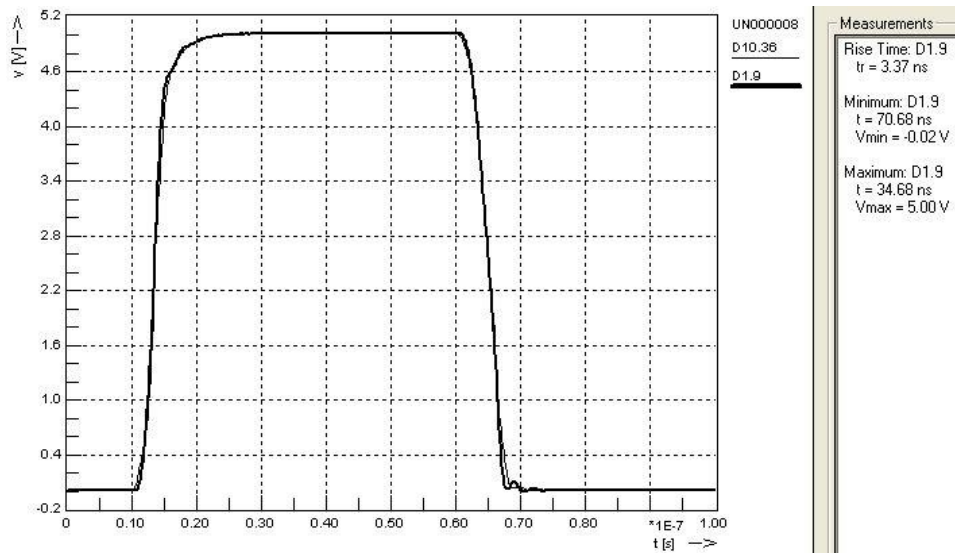


Рисунок 2.16 – Графік перехідного процесу сигналу після підключення екранних шарів

Загальна інформація отримана по результатах комп'ютерного моделювання ланцюга UN000008 приведена в таблиці 2.3.

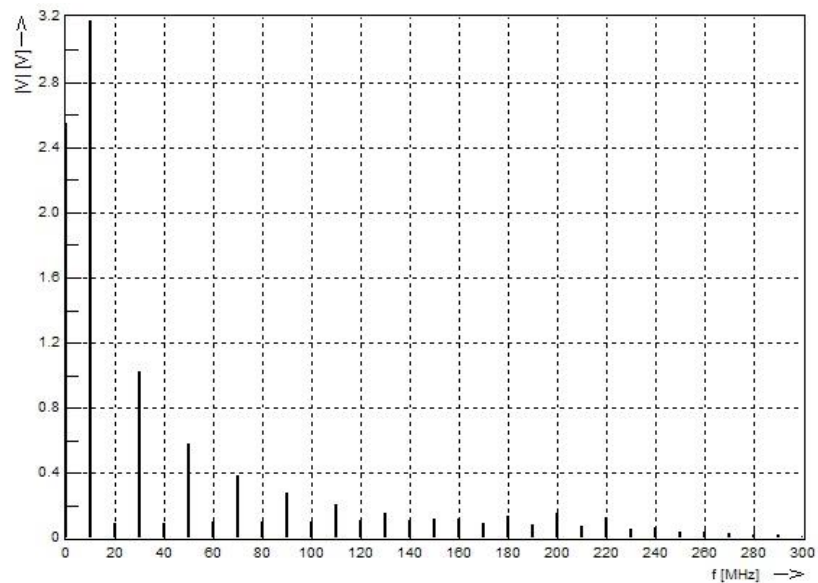


Рисунок 2.17 – Спектральна діаграма перехідного процесу до узгодження

Таблиця 2.3 Аналіз перехідних процесів в ланцюзі UN000008

Назва параметра	Значення параметра до узгодження	Значення параметра після узгодження по входу	Значення параметра після узгодження по виходу	Значення параметра після підключення екранних шарів	Значення заданого параметра
Rise Time (Час наростання сигналу - передній фронт імпульсу), нс	2,15	3,15	3,37	3,31	3,5
Minimum (Мінімальне значення сигналу), В	-0,48	-0,07	0,00	-0,02	-0,1
Maximum (Максимальне значення сигналу), В	5,51	5	5	5	5,1

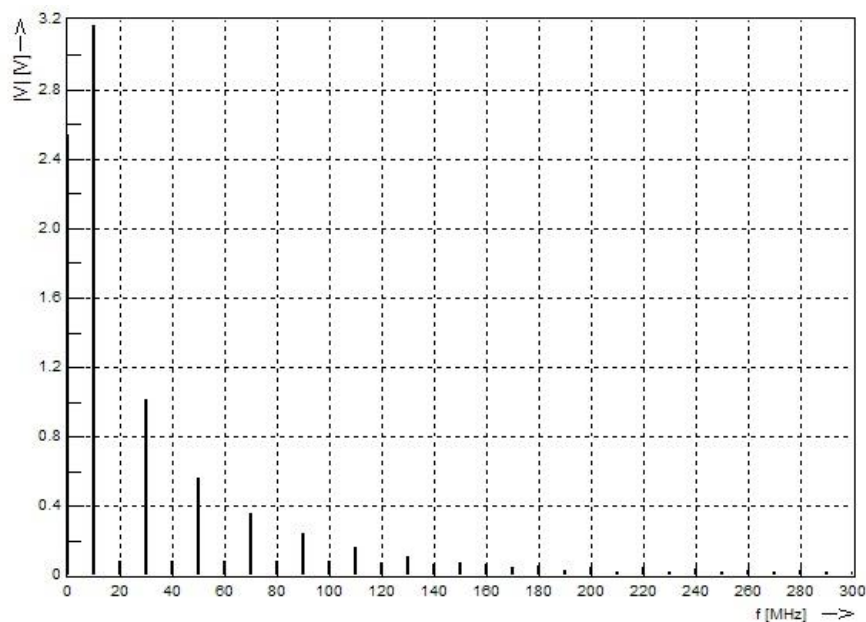


Рисунок 2.18 – Спектральна діаграма перехідного процесу після узгодження

2.5 Аналіз взаємних перехідних процесів у ланцюгах UN000009 та UN000010 блоку БК-2075

На рисунку 2.19 представлений графік перехресних перешкод ланцюга агресора UN000009 на ланцюг жертву UN000010 до узгодження. Тонкою лінією представлений графік сигналу на виході ланцюга UN000009 агресора, а товстою лінією - графік сигналу на виході ланцюга UN000010 жертви, при подачі на вхід ланцюга UN000009 прямокутного імпульсу амплітудою 5 В.

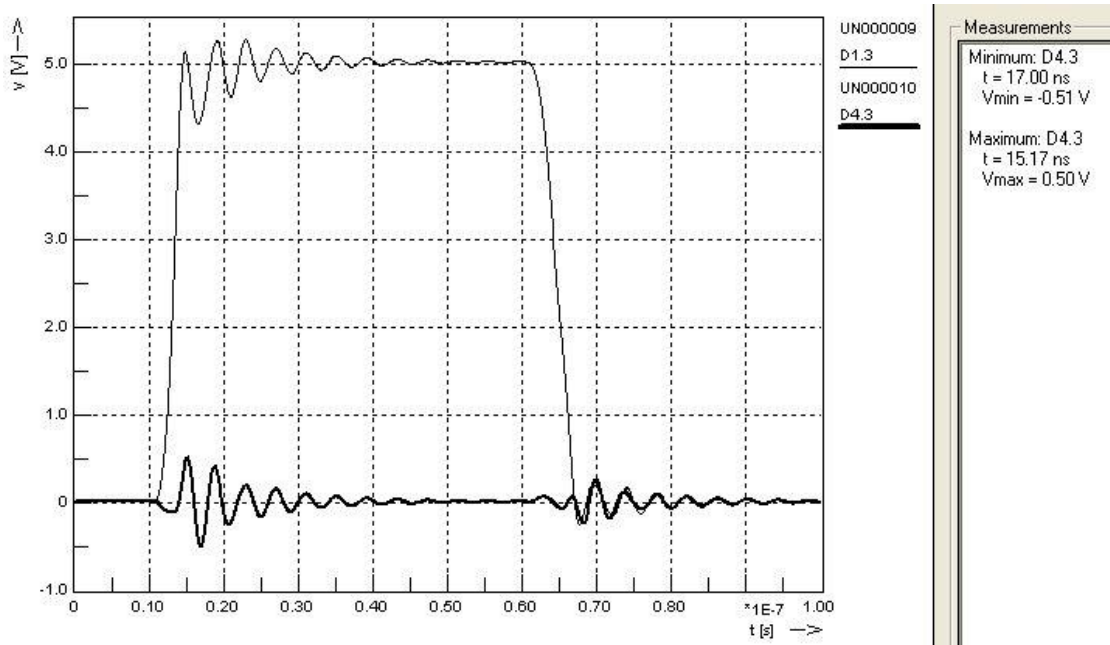


Рисунок 2.19 – Графік перехресних перешкод ланцюга до узгодження

На рисунку 2.19 видно, що максимальне значення сигналу на виході ланцюга жертви UN000010 становить 0,50 В, а мінімальне -0,51 В. Необхідно узгодити ланцюги агресора UN000009 та жертви UN000010 таким чином, щоб максимальне значення сигналу в точці не перевищувало 0,1 В, а мінімальне -0,1 В.

На рисунку 2.20 представлений графік перехресних перешкод ланцюга агресора UN000009 на ланцюг жертву UN000010 після узгодження по входу ланцюга агресора. На рисунку тонкою лінією представлений графік сигналу на виході ланцюга агресора, а товстою лінією - графік сигналу на виході ланцюга жертви, при подачі на вхід ланцюга агресора прямокутного імпульсу амплітудою 5 В. Максимальне значення сигналу на виході ланцюга жертви стало рівним 0,29 В, а мінімальне -0,17 В. На рисунку 2.21 а) приведено меню термінатора для узгодження по входу ланцюга агресора UN000009 перехресних перешкод на ланцюг жертву UN000010 резистором номіналом 80 Ом.

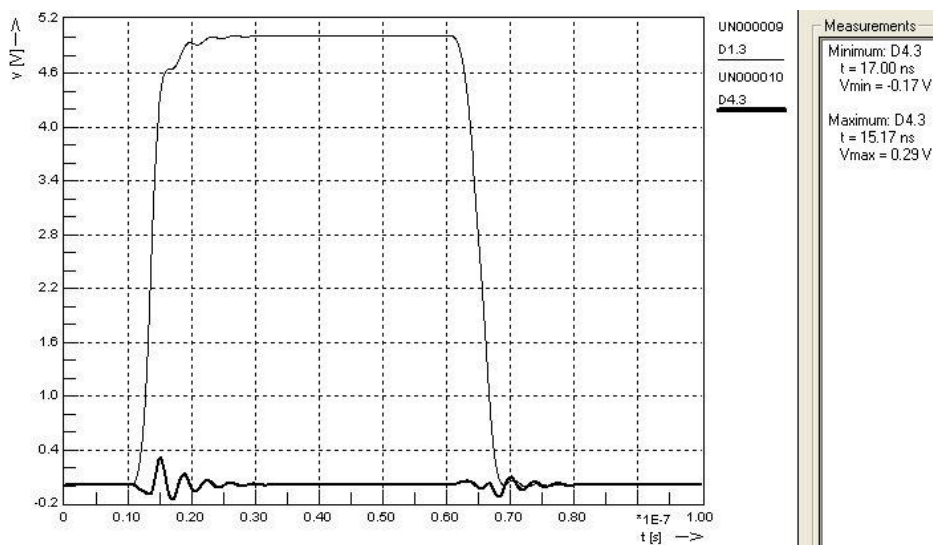
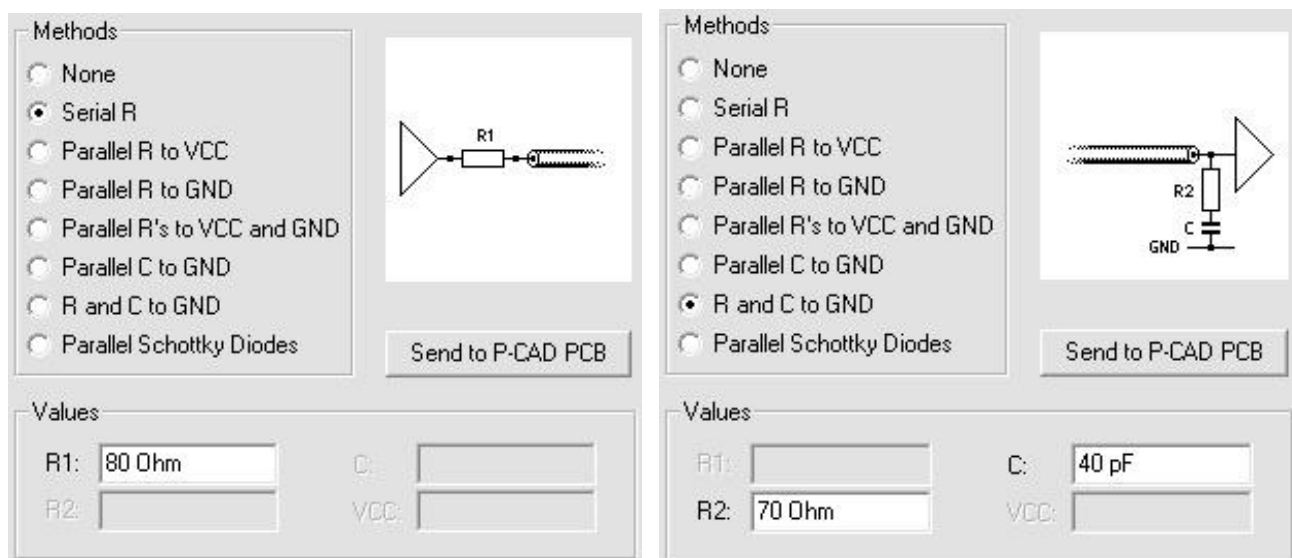


Рисунок 2.20 – Графік перехресних перешкод узгодження по входу ланцюга агресора



а) б)

Рисунок 2.21 – Меню термінатора для узгодження ланцюга по входу а) та по виходу б)

Узгодження по виходу проводиться однаковими елементами для ланцюгів агресора та жертви – резистором з опором 70 Ом та ємністю 40 пФ, меню термінатора для узгодження по виходу представлено на рисунку 2.21 б).

На рисунку 2.22 представлений графік перехресних перешкод ланцюга агресора UN000009 на ланцюг жертву UN000010 після узгодження по виходу ланцюга агресора. На рисунку тонкою лінією представлений графік сигналу на виході ланцюга агресора, а товстою лінією - графік сигналу на виході ланцюга

жертви, при подачі на вхід ланцюга агресора прямокутного імпульсу амплітудою 5 В. Максимальне та мінімальне значення сигналу на виході ланцюга жертви стало рівним 0 В. На рисунку 2.23 графік перехресних перешкод з узгодженням по виходу але вже для ланцюга жертви. Максимальне значення сигналу на виході ланцюга жертви в цьому випадку зросло до 0,13 В та мінімальне до -0,08 В.

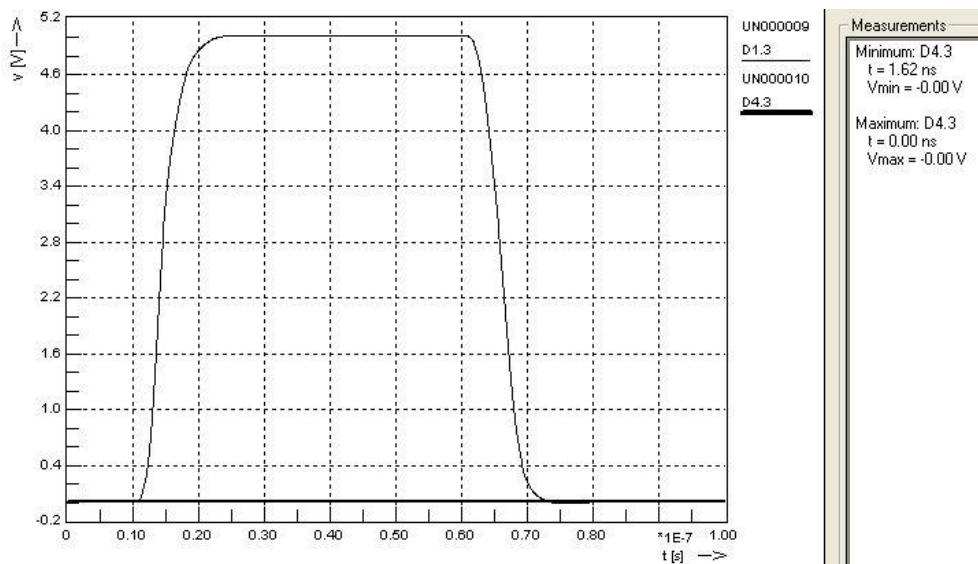


Рисунок 2.22 – Графік перехресних перешкод узгодження по виходу ланцюга агресора

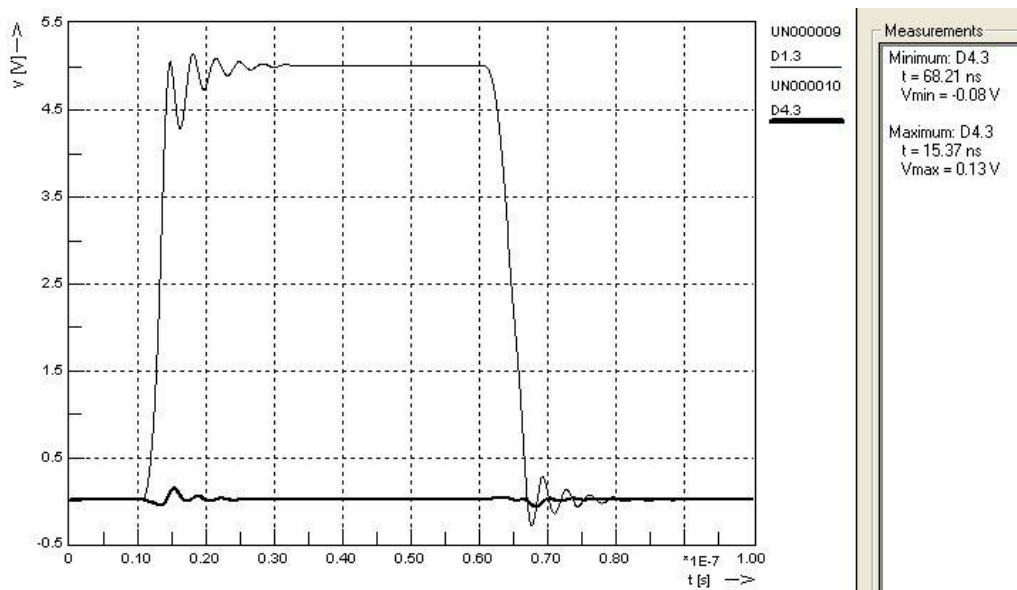


Рисунок 2.23 – Графік перехресних перешкод узгодження по виходу ланцюга жертви

На рисунку 2.24 представлений графік перехресних перешкод ланцюга агресора UN000009 на ланцюг жертву UN000010 після підключення екранних шарів. Тонкою лінією представлений графік сигналу на виході ланцюга агресора, а товстою лінією - графік сигналу на виході ланцюга жертви, при подачі на вхід

ланцюга UN000009 прямокутного імпульсу амплітудою 5 В. Максимальне значення сигналу на виході ланцюга жертви стало рівним 0,06 В, а мінімальне -0,04 В.

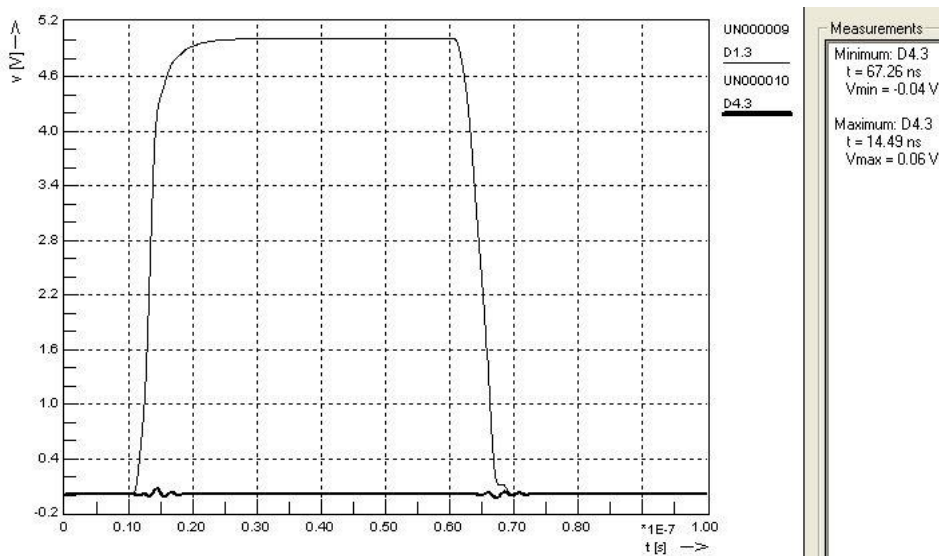


Рисунок 2.24 – Графік перехресних перешкод після підключення екранних шарів

Значення перехресних перешкод виникаючих на ланцюзі жертви UN000010 отриманих по результатах моделювання зведено у таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 Значення перехресних перешкод ланцюга жертви

Варіант моделювання	Umin, В	Umax, В
До узгодження	-0,51	0,50
Після узгодження по входу ланцюга агресора	-0,17	0,29
Після узгодження по виходу ланцюга агресора	0	0
Після узгодження по виходу ланцюга жертви	-0,08	0,13
Після підключення екранних шарів	-0,04	0,06
Задане значення	-0,1	0,1

3. МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

3.1 Системи моделювання параметрів

Завдання параметрів тестових імпульсних сигналів, відображення і аналіз реакції довгого ланцюга на дію тестового сигналу, побудова спектральних діаграм, узгодження навантаження довгих ланцюгів здійснюється системою електромагнітного моделювання планарних НВЧ структур типу: SIX(Signal Integrity+Xtalk), PCAD+SIX, Altium Designer +SIX .

Способі мінімізації перехресних зв'язків: коректування топології, узгодження навантаження ланцюгів та включення екранних шарів

Після того, як буде в редактор PCB завантажений файл друкованої плати, необхідно виконати команду PCB>Utils>P-CAD Signal Integrity, в результаті дії якої діалогове вікно P_CAD 2002 Signal Integrity (рис.3.1).

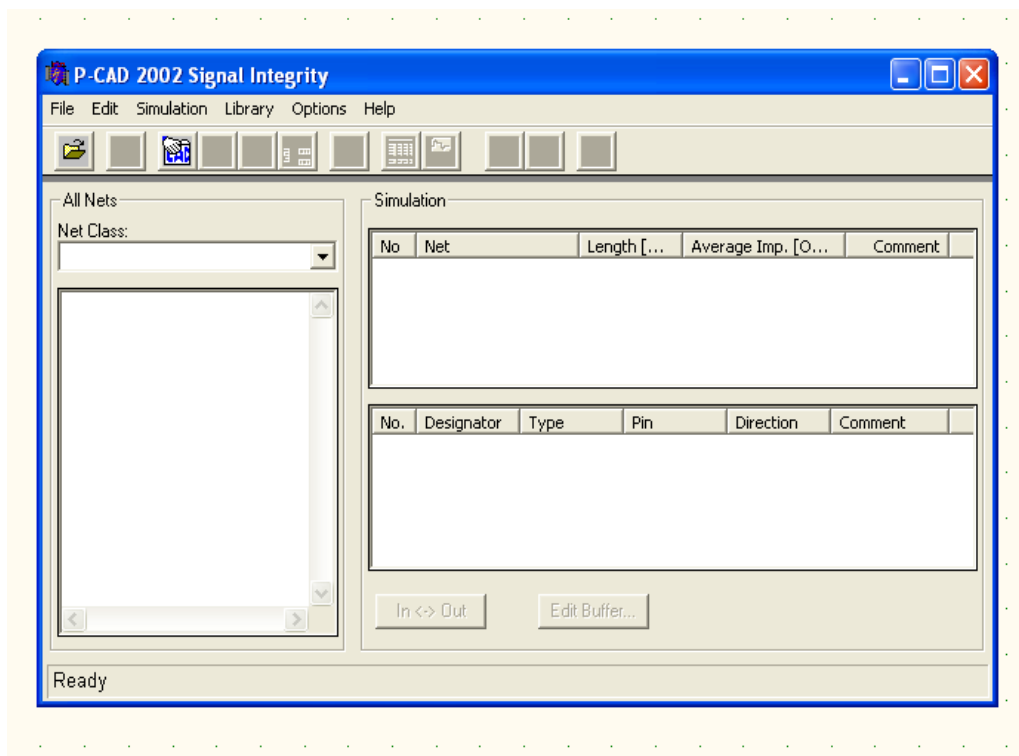


Рисунок 3.1 - Вікно запуску пакету до інформації з **PCB** – файлу.

Наступним кроком є **PCB** – файлу (рис. 3.2) командою **File>Get Nets**.

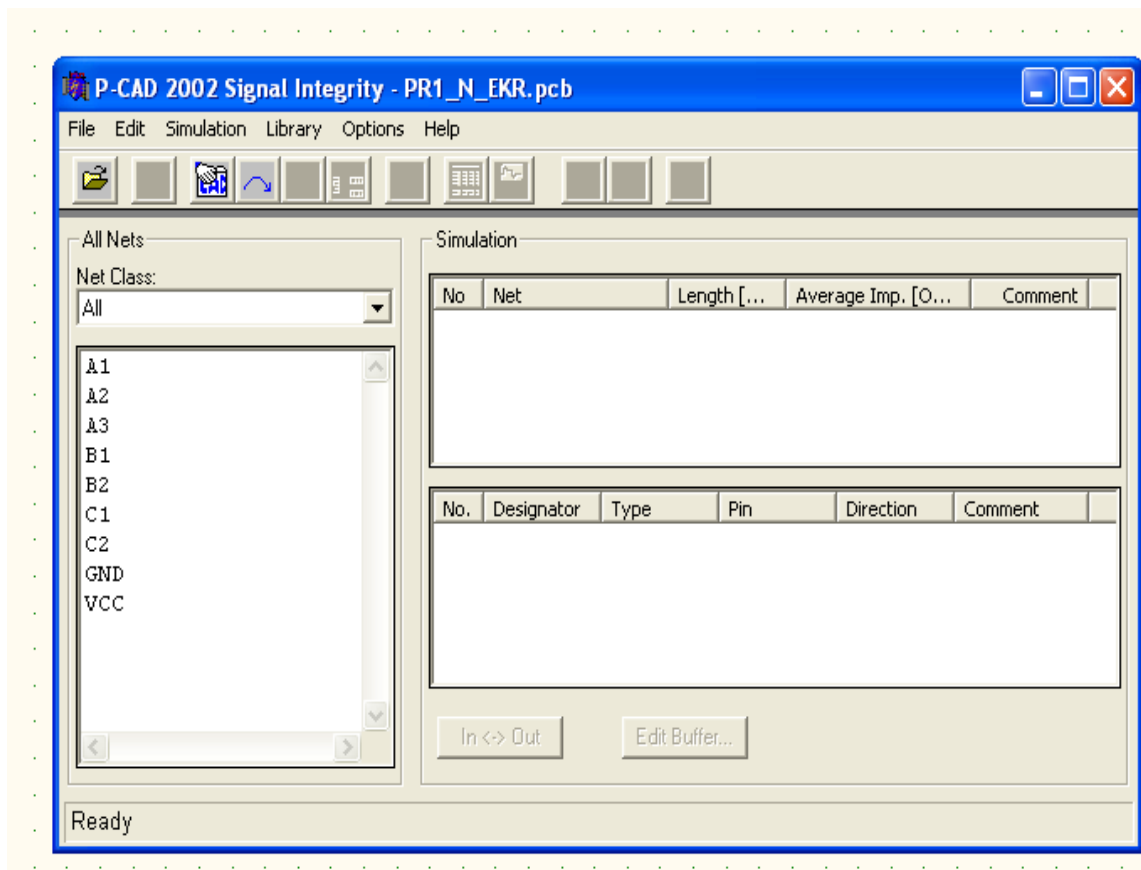


Рисунок 3.2 - Вікно запуску пакету після **PCB** – файлу.

4. Опис властивостей ЕРЕ, ланцюгів і структури шарів друкованої плати. За допомогою команди **Edit>Components** визначаються властивості ЕРЕ (рис. 3.3).

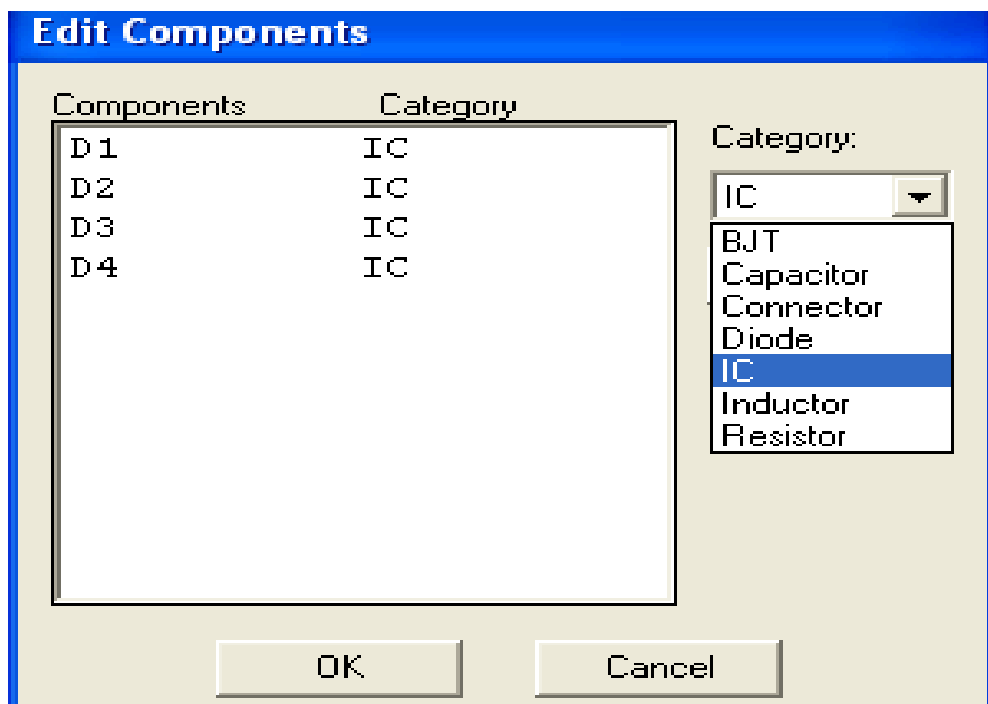


Рисунок 3.3 - Діалогове вікно **Edit>Components**.

Для всіх варіантів виконання настройка однакова – використовуються тільки інтегральні схеми D1 – D4, категорія IC (рис.3.3).

5. Наступним кроком є визначення типів ланцюгів (сигнальні ланцюги – DATA, ланцюги землі і живлення – Supply) з використанням команди Edit> Nets (рис. 3.4).

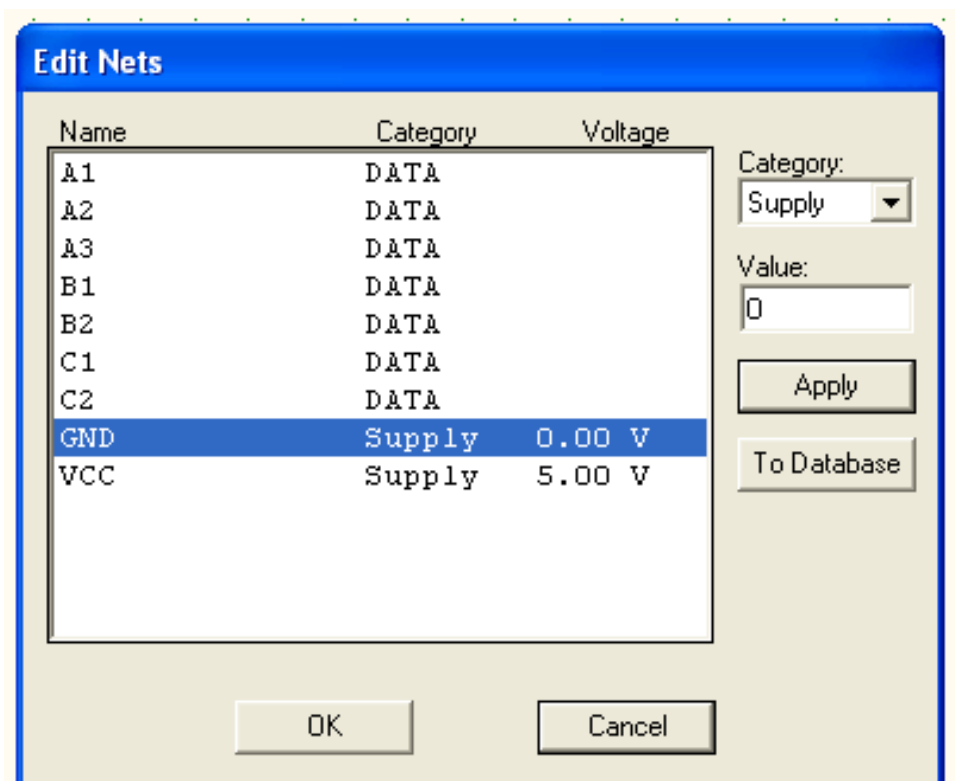


Рисунок 3.4 - Діалогове вікно **Edit Nets**.

Для всіх варіантів виконання настройка однакова (див. рис.3.4).

Структура шарів друкованої плати задається командою **Edit>Layer Stack** (рис.3.5).

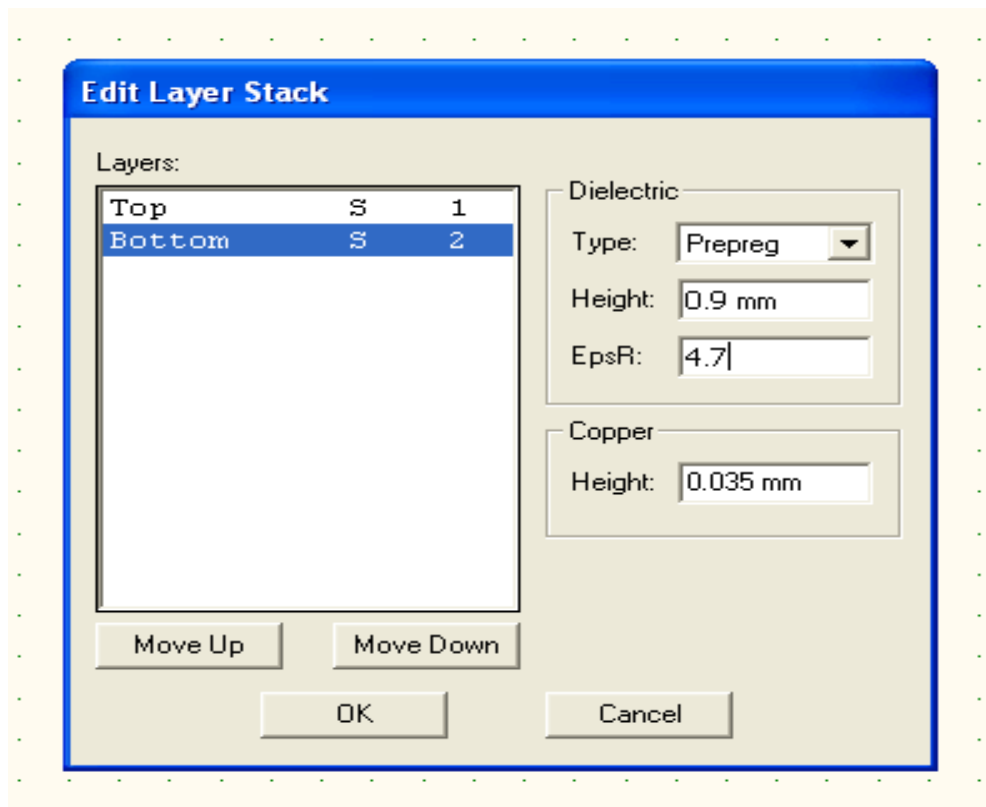


Рисунок 3.5 - Діалогове вікно **Edit Layer Stack**.

У цьому вікні для кожного варіанту виконання необхідно задати параметри:

Height – товщина (мм) діелектрика друкованої плати;

EPSR – діелектрична відносна проникність матеріалу друкованої плати.

На рис. 3.5. параметри задані.

3.2 Моделювання довгих ланцюгів

Для моделювання довгих ланцюгів необхідно в лівій частині вікна (рис. 3.2) вибрати потрібні ланцюги і виконати команду **Edit>Take Over**. В результаті виконання цієї команди відкриється вікно моделювання (рис. 3.6).

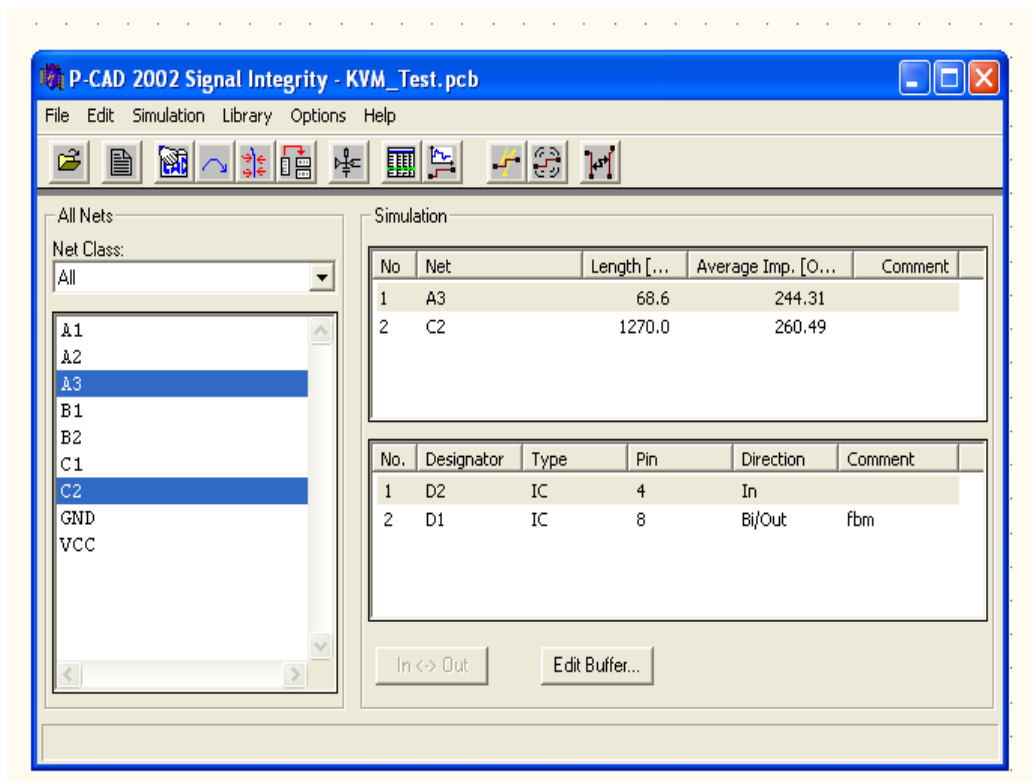


Рисунок 3.6 - Вікно моделювання довгих ланцюгів.

В області **Simulation** відображається список ланцюгів (C2, A3), вибраних для заданого варіанту виконання, а також їх довжини і імпеданс (хвильові опори).

Визначити залежність хвильового опору від матеріалу друкованої плати, який характеризується відносною діелектричною проникністю (табл. 3.4). Для зміни діелектричній проникності необхідно за допомогою команди **Edit>Layer Stack** викликати діалогове вікно (рис. 3.5) і змінити значення параметра **EPSR**.

Побудувати оцифрований графік залежності хвильового опору (вертикальна вісь) від діелектричної відносної проникності **EPSR** матеріалу друкованої плати (горизонтальна вісь). Вказати по осях одиниці вимірювання. Графік побудувати з використанням пакету **Excel**.

3.3 Перехресні перешкоди у разі суцільних шарів землі

Величина перехресного зв'язку між двома провідниками залежить від їх взаємної індуктивності та взаємної ємності [6]. Зазвичай в каналах цифрового зв'язку індуктивний перехресний зв'язок за величиною не поступається ємнісному або навіть перевершує її, так що далі буде розглядатися головним чином механізм індуктивного перехресного зв'язку.

У відповідності з теорією, що лежить в основі механізму індуктивної перехресного зв'язку в ланцюгах з зосередженими параметрами, зворотні струми сигналів збуджують магнітні поля, які, у свою чергу, створюють перешкоди в провідниках схеми.

Амплітуда перешкоди пропорційна швидкості зміни сигналу, що створює її. Чим коротше фронти сигналу, тим більше амплітуда створюваної ним наводки.

Оскільки щільність зворотного струму і напруженість збуджуваного їм магнітного поля знижується відповідно до формули 3.1, можна припустити, що перехресна перешкода, обумовлена взаємною індуктивністю провідників, буде слабшати в міру збільшення відстані між провідниками (рисунок 3.7).

$$\text{перехресна_перешкода} \approx \frac{1}{1 + (D/H)^2} \quad (3.1)$$

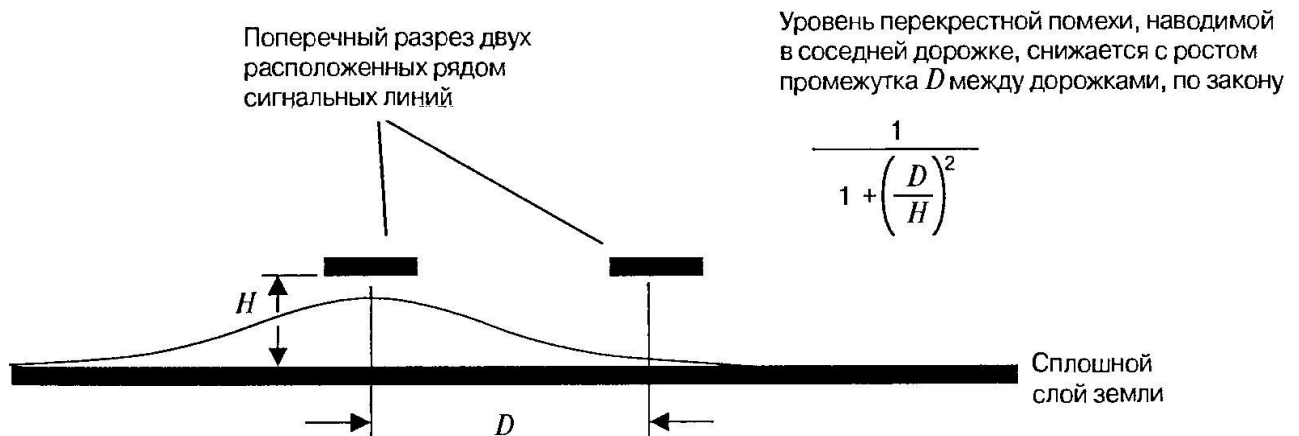


Рисунок 3.7 – Поперечний розріз плати, на якому зображений механізм виникнення перехресного зв'язку між двома доріжками

Перехресна перешкода визначається в даному випадку як відношення вимірної амплітуди перешкоди до амплітуди ступеневого сигналу, що створює її.

Постійна K залежить від тривалості фронту сигналу і довжини ділянки взаємодіючих доріжок. Вона завжди менше одиниці.

Ця гіпотеза може бути перевірена за допомогою простого експерименту. На рисунку 3.8 зображено дві друковані доріжки довжиною 26 дюймів, виконані на діелектричній підкладці з одностороннім фольгуванням. Відстань між осями друкованих доріжок становить 0,080 дюйма. Суцільний шар землі в даному макеті виконаний у вигляді мідного листа, притиснутого до діелектричній підкладці плати знизу. Це зроблено для того, щоб можна було змінювати висоту підйому друкованих доріжок над шаром землі, прокладаючи між діелектричної підкладкою друкованої плати та мідним листом діелектричні прокладки заданої товщини. У даному випадку, як і у випадку хвильового опору, співвідношення фізичних розмірів має більш важливе значення, ніж самі розміри. У даному випадку величина перехресною перешкоди визначається відношенням D / H . Змінюючи висоту підйому друкованих доріжок над шаром землі, ми можемо задавати відношення D / H .

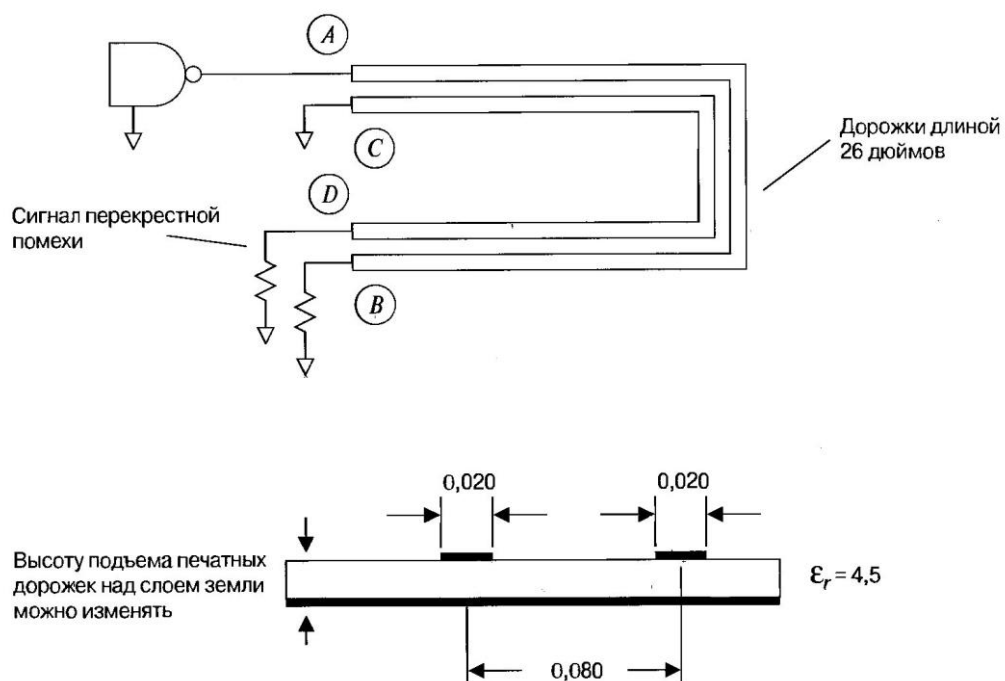
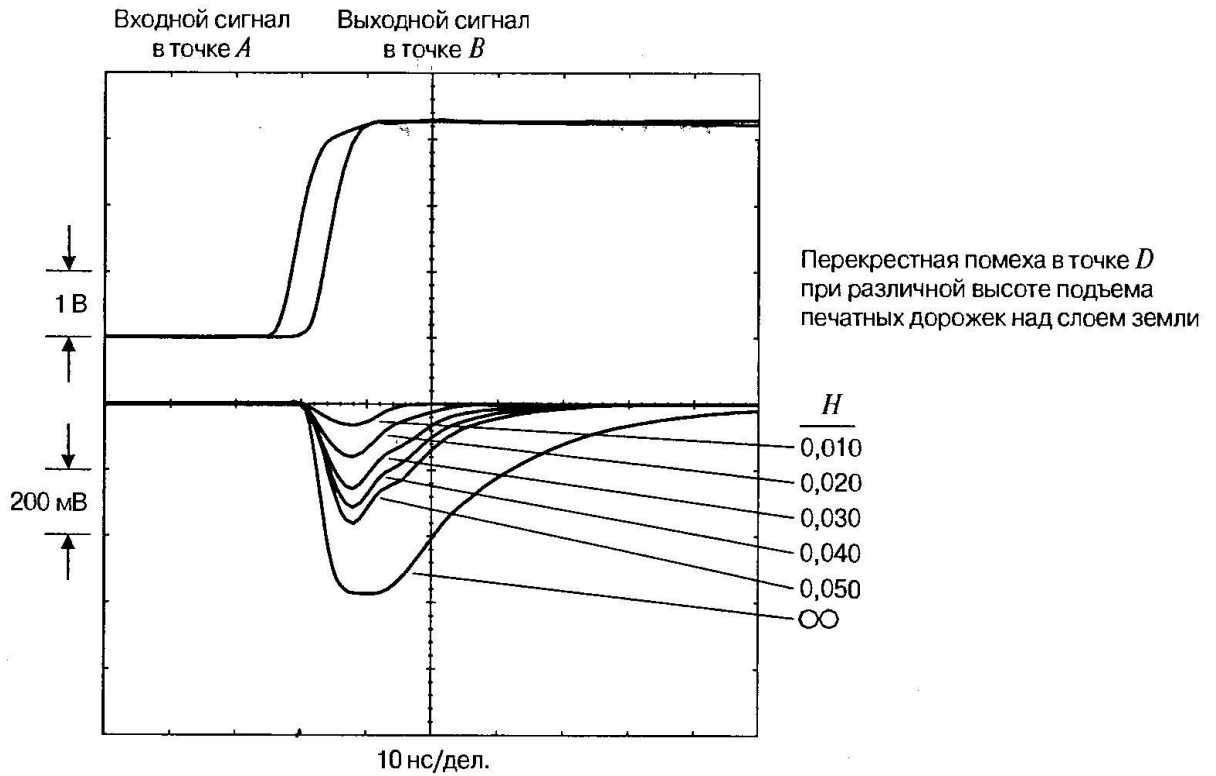


Рисунок 3.8 – Експеримент з вимірювання залежності величини взаємного зв'язку між доріжками від їх геометричних параметрів

На рисунку 3.9 наведені осцилограми перехресною перешкоди в точці D при ступінчастому вхідному сигналі амплітудою 3,5 В. Осцилограми наведені для висоти підйому друкованих доріжок над шаром землі, рівної 0,010, 0,020, 0,030

0,040 дюйма. Останній графік (самий більший імпульс перешкоди) відповідає



випадку, коли суцільного шару землі взагалі немає.

Рисунок 3.9 – Перехресна перешкода при ступінчастому вхідному сигналі

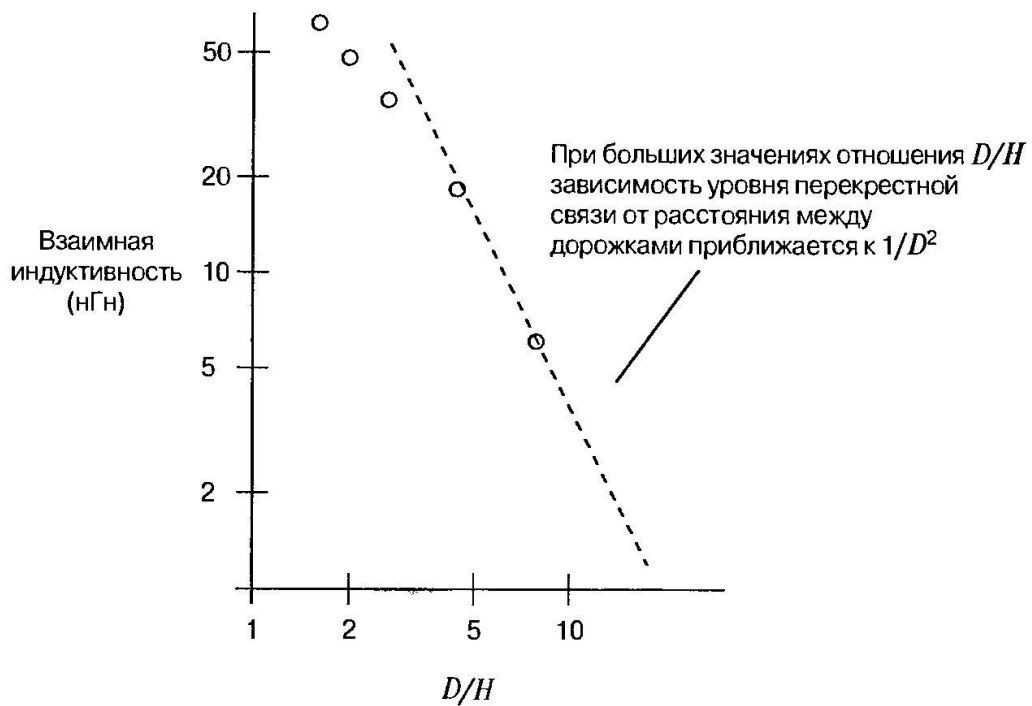


Рисунок 3.10 – Експериментальні дані по взаємному зв'язку друкованих доріжок

На рисунку 3.10 наведено графік залежності взаємної індуктивності від ставлення D / H , побудований за цим експериментальним даним. Розрахунок взаємної індуктивності виконаний за методом площ, який описаний в [номер книги зі списку літератури]. Метод площ дозволяє врахувати ефект зниження швидкості наростання ступеневої сигналу при зростанні індуктивності проводить контуру. Цей ефект проявляється на кривій перешкоди як розтягнення імпульсу перешкоди при високих значеннях коефіцієнта зв'язку [1].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломного проекту були розглянуті теоретичні основи проектування високошвидкісної РЕА з виконанням вимог електромагнітної сумісності, за допомогою яких було досліджено деякі лінії зв'язку блоку комбінованого БК-2075 і запропоновані методи подолання неузгодженості ліній за допомогою розташування цільних шарів металізації.

При розгляді основ проектування високошвидкісної РЕА були вивчені важливі відомості про параметри імпульсних сигналів та їх спектральний склад, розглянемо ланцюги з зосередженими та розподіленими параметрами, види реактивностей у ланцюгах та завадостійкість РЕА і класифікацію перешкод.

Були проаналізовані конструкції шарів землі багат шарових структур друкованих плат, напрямки поширення струмів у шарах металізації, конфігурації шарів живлення та землі, проаналізована необхідність наявності захисних доріжок та шарів апаратної землі.

Також були досліджені механізми виникнення перехресних перешкод та способи їх ослаблення шарами землі та живлення. Детально розглянуто механізми взаємного ємнісного та індуктивного зв'язку.

Запропоновані методи укладання шарів у багат шарових друкованих платах, а також запропонований попередній аналіз для визначення ширини друкованих доріжок, та визначення кількості необхідних шарів. Розглянуто метод укладання шарів для чотирьохшарової, шестишарової та десятишарової друкованої плати.

У розділі аналізу електромагнітної сумісності топології ДБП було запропоновано метод дослідження друкованих плат, та за його допомогою був досліджений блок комбінований БК-2075, а саме його лінії зв'язку UN000008, UN000009, UN000010. Лінія UN000008 була проаналізована на склад перехідних процесів, а лінії UN000009 та UN000010 на склад взаємних перехідних процесів. На кожну досліджуємо лінію було запропоновано методи подолання небажаних коливань виникаючих при перехідних процесах.

Виконано розділ охорона праці дипломного проекту.

