

Затверджено науково-методичною
радою ЖДТУ
протокол від «__» _____ 20__ р. №__

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
для проведення лабораторних робіт
з навчальної дисципліни
**«ФІЗИКО-ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ
РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ»**

для студентів освітнього рівня «БАКАЛАВР»
спеціальності 163 «Біомедична інженерія»
освітньо-професійна програма «Біомедична інженерія»
факультет інформаційно-комп'ютерних технологій
кафедра біоінженерії та телекомунікацій

Розглянуто і рекомендовано
на засіданні кафедри
біоінженерії та телекомунікацій
протокол від «__» _____ 201__ р.
№ _____

Розробник: к.т.н., ст. викл. кафедри біоінженерії та
телекомунікацій Коломієць Р. О.

Житомир
2017 – 2018 н.р.

Зміст

1	Компонування блоків електронної апаратури	5
1.1	Короткі теоретичні відомості	5
1.1.1	Способи виконання компонування	5
1.1.2	Загальні вимоги і рекомендації з компонування низькочастотних радіоелектронних пристроїв	8
1.1.3	Практичні рекомендації щодо оформлення компонувальних ескізів	9
1.2	Порядок виконання роботи	11
1.3	Зміст звіту	11
1.4	Контрольні запитання	12
1.5	Література	12
2	Розробка друкованої плати	13
2.1	Короткі теоретичні відомості	13
2.1.1	Хімічний спосіб виготовлення друкованих плат	14
2.1.2	Відмінності між електричними принциповими та монтажними схемами	14
2.2	Порядок виконання роботи	15
2.3	Зміст звіту	16
2.4	Контрольні запитання	17
2.5	Література	18
3	Оцінка паразитних параметрів друкованих плат	19
3.1	Короткі теоретичні відомості	19
3.1.1	Паразитна ємність	20
3.1.2	Паразитна індуктивність	20
3.1.3	Потужність втрат	21
3.2	Порядок виконання роботи	22
3.3	Зміст звіту	22
3.4	Контрольні запитання	23
3.5	Література	24

4	Дослідження ефективності екранування	25
4.1	Короткі теоретичні відомості	25
4.1.1	Ближня і дальня зони електромагнітного поля	25
4.1.2	Комплексний хвильовий і характеристичний опори	26
4.1.3	Ефективність екранування	27
4.2	Порядок виконання роботи	29
4.3	Зміст звіту	29
4.4	Контрольні запитання	30
4.5	Література	30

Лабораторна робота 1

Компонування блоків електронної апаратури

Мета роботи:

- вивчити вимоги, що пред'являються до сучасної радіоелектронної апаратури;
- ознайомитися з найбільш розповсюдженими технічними способами виконання компонувальних робіт;
- набути конструкторських навичок компонування приладу у відповідності із заданою структурною схемою з урахуванням особливостей експлуатації та призначення пристрою, які викладені в технічному завданні;
- дати орієнтовну оцінку компонуванню;
- вивчити правила виконання та оформлення компонувальних ескізів.

1.1 Короткі теоретичні відомості

Під компонуванням розуміють розміщення основних елементів апаратури в просторі заданого або мінімально можливого об'єму (площі) з метою забезпечення нормального функціонування елементів і пристрою в цілому.

1.1.1 Способи виконання компонування

При виконанні компонувальних робіт конструктор має справу не з абстрагованими умовними графічними зображеннями елементів електри-

чної принципової схеми, а з їх геометричними моделями, які дозволяють вирішувати широке коло важливих питань проектування і забезпечити виконання вимог, які викладені в технічному завданні (ТЗ).

Компонувальний ескіз пристрою до розробки робочих креслень дозволяє оцінити характер і величину паразитних зв'язків заданого конструкторського варіанту, а також основні експлуатаційні характеристики. По компонувальному ескізу можна виконати попередній розрахунок теплового режиму пристрою і на основі отриманих даних оцінити надійність пристрою з урахуванням не тільки електричних коефіцієнтів навантаження, але й температурного режиму.

В практиці сучасного конструювання використовуються наступні способи виконання компонування виробів радіоелектронної апаратури:

- аналітичний (розрахунковий);
- номографічний;
- апікаційний (натурний);
- спосіб комп'ютерних 3D-моделей.

Аналітичний або *розрахунковий* спосіб компонування припускає просте підсумовування відповідних компонувальних параметрів елементів (об'ємів або настановних площ¹). При цьому проводиться оцінка так званого об'ємного коефіцієнту заповнення

$$K_V = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{V},$$

або просто коефіцієнту заповнення

$$K_S = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{S},$$

де N — кількість елементів; V_i — об'єм i -го елемента; V — допустимий об'єм пристрою або об'єм корпусу; S_i — настановна площа i -го елемента; S — допустима площа друкованої плати.

Наставовний об'єм кожного елемента найчастіше є добутком його найбільших габаритних розмірів. У випадку складної геометричної форми елемента його настановний об'єм може бути оцінений як сума прямокутних паралелепіпедів, якими умовно заміняють елемент — їх розміри,

¹Наставовна площа — площа, яку займає елемент; проекція елемента на площину його основи.

як правило, округлюють і беруть такими, щоб настановний об'єм обчислювався б за три–чотири операції.

Широке застосування цього способу ускладнює великий об'єм обчислень, кількість яких навіть для відносно простих виробів може складатися з декількох сотень елементарних операцій.

Номографічний спосіб компоунування дозволяє значно скоротити і спростити велику кількість обчислень, що виконуються при визначенні настановних об'ємів та площ елементів при їх підсумовуванні. Це спрощення досягається за рахунок заміни реальних чисельних об'ємів і площ елементів на нормовані (стандартизовані).

Аналітичний і номографічний способи компоунування дають можливість відносно швидко виконати орієнтовані значення настановних площ та об'ємів, але не мають достатньої наочності, оскільки не дають можливості виконати просторові компоувальні ескізи. Більш точно значення об'єму, геометричних розмірів і форми проєктованого виробу можна одержати, виконуючи компоунування за допомогою плоских аплікацій або об'ємних моделей.

Сутність **аплікаційного** або *натурного* способу компоунування полягає в тому, що для всіх елементів з відомими габаритними і настановними розмірами на щільному папері або картоні викреслюються їх спрощені проєкції в масштабі 1:1. Число проєкцій залежить від складності елементів проєктованого пристрою. Потім, вирізуючи кожну проєкцію по контуру, проєктувальник одержує аплікації. Після виготовлення необхідної кількості аплікацій на листі ватману або міліметровці виробляється розкладка відповідних аплікацій з урахуванням вимог, що пред'являються до даного пристрою (викладених у ТЗ). Переміщуючи аплікації в межах заданого чи бажаного контуру, вибирається найбільш раціональний варіант взаємного розташування елементів. Час, витрачений на виготовлення аплікацій, окуповується з великим вигрешем завдяки тому, що в процесі компоунування конструктор не користується нічим іншим і не стримує процес мислення креслярською роботою. За короткий проміжок часу проєктувальник має можливість розглянути велику кількість найрізноманітніших варіантів компоунування та вибрати серед них оптимальний за рядом параметрів. Після вибору такого варіанту аплікації аплікації закріплюються клеєм або кнопками і з цього плоского макета викреслюється компоувальний ескіз або складальне креслення. Цей спосіб є найбільш зручним при компоунуванні об'ємних елементів в одній площині (друкованого монтажу).

Спосіб комп'ютерних 3D-моделей передбачає використання систем комп'ютерного 3D-моделювання на зразок SolidWorks чи AutoCAD. Для реальних елементів створюються віртуальні 3D-моделі, які компоуну-

ються між собою точно таким же чином, як і при використанні *аплікаційного* способу. Незважаючи на те, що віртуальні моделі, як правило, є сильно спрощеними по конфігурації аналогами відповідних елементів, незаперечними перевагами використання цього способу є можливість одразу отримати складальне креслення і багаторазове використання моделей елементів.

1.1.2 Загальні вимоги і рекомендації з компоновання низькочастотних радіоелектронних пристроїв

Низькочастотними називаються всі радіоелектронні пристрої, в яких не використовуються сигнали з частотами понад 3 МГц.

При компонованні радіоелектронних пристроїв рекомендується віддавати перевагу функціонально-вузловому методу конструювання, розрахованому на можливість незалежного виробництва, налаштування і контролю окремих функціональних вузлів пристрою і на їхню легку заміну при виконанні ремонтних робіт.

При великій повторюваності і невеликій номенклатурі функціональних вузлів при компонованні рекомендується впроваджувати модульний метод і ширше застосовувати уніфіковані функціональні модулі, нормалізовані і типові вузли і деталі. Це дозволяє значно прискорити процес розробки і виготовлення апаратури, підвищити її надійність.

Великі вузли і блоки, по можливості, варто розбивати на дрібніші. Це дозволяє застосовувати більш просте оснащення для їхнього виготовлення і створює умови для механізації складальних процесів. Важкі деталі треба, по можливості, розміщувати таким чином, щоб їх вага на основі (шасі) була збалансованою щодо геометричного центру блоку. Важкі деталі повинні монтуватися на міцних опорах якомога ближче до точок кріплення шасі. Це додає шасі стійкості, полегшує обслуговування і транспортування. Якщо блок має відносно велику висоту, то важкі деталі варто розміщувати в нижній частині автономних блоків чи в нижніх блоках опори, щоб зменшити можливість перевертання. Важкі елементи, особливо з великими розмірами, варто одночасно використовувати для посилення механічної міцності шасі в якості конструктивних елементів.

При розміщенні елементів керуватися послідовністю проходження сигналу. У пристроях з великим коефіцієнтом підсилення вхід і вихід повинні бути рознесені на максимально можливу відстань, а конструкцію в цілому рекомендується виконувати у вигляді "лінійки".

Елементи варто розташовувати з урахуванням зручності доступу до них та їх заміни. Не рекомендується розташовувати деталі так, щоб при доступі до них потрібно було знімати або переміщувати інші деталі чи вузли. Найбільш вільний доступ повинен бути передбачений до тих еле-

ментів, що мають малий термін служби і вимагають періодичної заміни чи знімання в процесі настроювання й експлуатації (щітки, лампи, генератори, електродвигуни і т.п.). Необхідно передбачити вільний доступ до регульованих елементів і точок змащення.

До контрольних гнізд, розташованих усередині блоку, повинен бути забезпечений зручний і безпечний доступ для підключення контрольно-вимірювальної апаратури при працюючому блоці. Розташування контрольних гнізд повинне відповідати послідовності проходження сигналу. Компонування органів управління, контролю і сигналізації повинні виконуватися з урахуванням психофізіологічних даних людини-оператора. Кількість органів керування на передніх панелях варто зводити до раціонального мінімуму. Ручки тумблерів варто розміщувати на відстані не менш 30...40 мм від інших органів управління. Прилади з періодичним підстроюванням рекомендується вибирати з ручкою (віссю) під шліц з контргайкою. Ці елементи не рекомендується розміщувати на передніх панелях.

Місця введення і виведення кабелів не рекомендується розміщувати на оперативних передніх панелях, тому що це ускладнює роботу оператора.

Прилади, що вимагають регулювання і точки контролю (наприклад, потенціометри) повинні бути доступні і безпечні для оператора і настроявача.

Елементи з великим тепловиділенням (гасильні резистори, лампи, напівпровідникові елементи, через які протікають великі струми і т.п.) повинні мати вільний простір навколо для створення вихідних потоків нагрітого повітря. Це забезпечує необхідні умови для охолодження і зменшує взаємний прогрів елементів, які розташовані поруч. Температурно-чутливі елементи, наприклад, електролітичні конденсатори, германієві транзистори та діоди варто розміщувати якомога далі від елементів з великим тепловиділенням, або між цими елементами повинен бути встановлений тепловий екран. Друковані плати з електрорадіоелементами й інші допоміжні плати та панелі рекомендується розташовувати вертикально. Якщо схема приладу виконана на електровакуумних і напівпровідникових приладах, то напівпровідникові прилади рекомендується виділяти в уособлену групу, що максимально віддалена та термоізольована від електровакуумних приладів.

1.1.3 Практичні рекомендації щодо оформлення компонувальних ескізів

Компонувальним ескізом називається тимчасовий конструкторський документ, в якому із дотриманням пропорцій розмірів виробу зображені його

го складові частини. Компонувальний ескіз є первинним документом, на підставі якого розробляються електромонтажні карти. Елементи кріплення вибираються з числа нормалізованих або розробляються спеціально для конкретного приладу. На допоміжні і настановні вироби, а також елементи кріплення виконується складальне креслення виробу та складальні креслення складових частин виробу.

Компонувальний ескіз повинен бути виконаний якомога компактніше, але без втрати ясності та зручності його читання на аркушах основних форматів, передбачених ЄСКД. При виконанні компонувального ескізу застосовуються спрощені правила виконання й оформлення складальних креслень.

Компонувальне креслення повинне містити:

- зображення проектного виробу з необхідною та достатньою кількістю видів, розрізів і перетинів, що дають повне уявлення про взаємне розташування складових частин виробу і відстанях між ними;
- спрощене, без графічних подробиць, зображення складових частин виробу (у тому числі з формами і розмірами, що передбачаються, а також складових частин, що будуть розроблені на наступних етапах);
- центри елементів кріплення та орієнтовні обриси допоміжних (кріпильних) деталей, які визначають зазори між елементами і збільшення габаритних розмірів виробу в цілому;
- габаритні, настановні і з'єднувальні розміри;
- позиційні позначення елементів по електричній принциповій схемі, проставлені на всіх проекціях, видах специфікації і графі "Примітки".

У межах спрощених проекцій складових частин рекомендується наносити їх позначення складових частин. Рекомендується не показувати елементи кріплення, якщо їх конструкція не визначає компонувальних рішень.

Поряд з компонувальним ескізом повинна бути оформлена специфікація, у яку повинні бути записані основні складові частини проектного виробу, що підлягають розробці. Специфікацію варто виконувати за правилами, що встановлені для запису виробів і матеріалів при складанні специфікацій за ГОСТ 2.108-68.

1.2 Порядок виконання роботи

Лабораторну роботу рекомендується виконувати у наступній послідовності:

1. Виконати аналіз електричної структурної схеми приладу.
2. Ознайомитися з елементами приладу (блоками та вузлами). З'ясувати взаємозамінні блоки/вузли.
3. Провести вимірювання геометричних розмірів окремих деталей. Дані заносити в протокол у вигляді таблиці, в окремій графі якої обов'язково повинен бути об'єм (обчислюється на основі вимірювань). Всі деталі спрощено представляти як прямокутні паралелепіпеди.
4. Керуючись вимогами ТЗ і вимогами до апаратури подібного призначення, скласти компоновання блоків РЕА в корпусі заданого розміру. При потребі використовувати взаємозамінні блоки/вузли.
5. Керуючись структурною схемою приладу, розробити схему електричних з'єднань.
6. Оцінити максимальні можливі розміри того блоку/вузла, який не представлений для натурального компоновання.
7. Обчислити об'єм корпусу та оцінити об'ємний коефіцієнт заповнення приладу.
8. Зробити ескізне креслення компоновання приладу, на якому показати розміри складових частин та електричні з'єднання.

1.3 Зміст звіту

1. Назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Структурна схема приладу та коротке описання його роботи.
4. Таблиця з розмірами складових вузлів/блоків/деталей та їх об'ємами.
5. Ескізне креслення компоновання приладу, на якому обов'язково повинні бути показані електричні з'єднання.
6. Обчислення об'ємного коефіцієнту заповнення корпусу.
7. Висновки. Про що говорить отримане значення коефіцієнту заповнення? Наскільки оптимальним є компоновання приладу?

1.4 Контрольні запитання

1. Що таке компонування блоку РЕА?
2. Яку інформацію повинен містити компонувальний ескіз?
3. Які питання розробки конструкції блоку можна вирішити за допомогою компонувального ескізу?
4. У чому полягає сутність та переваги компонування за допомогою аплікаційного (натурного) методу?
5. Якими показниками оцінюється компонування блоку РЕА?
6. Які компонувальні рішення сприяють поліпшенню механічних параметрів пристрою?
7. Які компонувальні рішення сприяють підвищенню зручності обслуговування і доступу до елементів блоку?
8. Які компонувальні рішення сприяють поліпшенню теплового режиму блоку?
9. Як робиться механічне кріплення окремих вузлів/деталей до корпусу?
10. Як робляться електричні з'єднання на різних структурних рівнях приладу?

1.5 Література

1. А. П. Ненашев Конструирование радиоэлектронных средств – М.: Высшая школа, 1990. – 432 с.
2. Справочная книга радиолюбителя-конструктора. Книга 2 – М.: Радио и связь – Серия "Массовая радиобиблиотека 1992. – 336 с.

Лабораторна робота 2

Розробка друкованої плати

Мета роботи:

- навчитися з електричної принципової схеми робити монтажну схему;
- ознайомитися з програмою Novarm DipTrace і навчитися розводити друковані плати;
- ознайомитися з хімічним методом виготовлення друкованих плат.

2.1 Короткі теоретичні відомості

Друкована плата (ДП) являє собою плоску ізоляційну основу, з однієї або з двох сторін якої нанесені струмопровідні смужки металу (як правило - міді) у відповідності з електричною принциповою схемою вузла або блоку. Друковані плати служать для монтажу електрорадіоелементів (ЕРЕ) на їх поверхні, і дозволяють значно підвищити технологічність конструкцій РЕА, а також виключити помилки при її монтажі.

Розрізняють друковані плати для навісного монтажу, SMT-монтажу та змішані. Навісний монтаж використовується для друкованих плат I - III класів точності і може бути застосований лише для одно- та двосторонніх плат. Особливістю SMT-монтажу (surface mount technology) є те, що ЕРЕ кріпляться безпосередньо до контактних прощадок без монтажних отворів. SMT-монтаж має велику щільність розміщення ЕРЕ, відрізняється малими габаритами і використовується для ДП III - IV класів точності, як односторонніх, так і двосторонніх та багатошарових. І, нарешті, при змішаному монтажі використовуються як SMT, так і навісні ЕРЕ. Змішаний монтаж використовується виключно у складних багатошарових ДП III класу точності.

2.1.1 Хімічний спосіб виготовлення друкованих плат

Найпоширенішим способом виготовлення ДП є хімічний. Для цього методу в якості матеріалів, з яких виготовляють ДП, виступають спеціальні діелектрики – склотекстоліт та гетинакс – на поверхню яких з однієї або з двох сторін щільно приклеєна мідна фольга товщиною 30 ... 50 мкм. На поверхню фольги наноситься захисний малюнок таким чином, щоб він захистив провідники при витравлюванні міді. Захисний малюнок схеми виконується стійкими до впливу травильних розчинів матеріалами. Потім заготовка поміщається в травильний розчин (як правило, це водний розчин хлориду заліза $FeCl_3$), де на протязі 20 ... 60 хвилин мідь з незахищених ділянок розчиняється, а захищені ділянки залишаються і утворюють електропровідний рисунок. Монтажні отвори для встановлення ЕРЕ свердяться або штамнуються після витравлювання міді, і, як правило, не металізуються. Перед початком монтажу ЕРЕ (запаюванням) захисний рисунок видаляється таким чином, щоб залишилася мідь, і ДП залужується сплавом Розе або сплавом Вуда.

Хімічний спосіб виготовлення ДП також називають субтрактивним.

2.1.2 Відмінності між електричними принциповими та монтажними схемами

Електропровідний рисунок ДП можливо отримати за допомогою спеціальних комп'ютерних програм (P-CAD, DipTrace, SprintLayout і т.п.).

При користуванні подібними програмами потрібно пам'ятати кілька принципових відмінностей між електричними принциповими та монтажними схемами:

1. на електричній принциповій схемі використовуються *умовні графічні позначення* ЕРЕ, на монтажній – виводи та форми *реальних* ЕРЕ;
2. на електричній принциповій схемі *допускаються* прості перетини ліній зв'язку або з'єднувальних дротів (без електричного з'єднання), на ДП – *не допускаються*, оскільки перетин друкованих провідників є електричним з'єднанням;
3. на електричній принциповій схемі *живлення мікросхем*, як правило, *не показується*, на ДП його робити *необхідно*, оскільки в протилежному випадку мікросхеми працювати коректно не будуть;
4. на електричній принциповій схемі можуть бути елементи, які реально розміщуються не на ДП, а на корпусі (світлодіоди-індикатори, кнопки, перемикачі, інші елементи керування) – для їх підключення потрібно передбачати відповідні роз'єми; також на електричній

4.4 Контрольні запитання

1. Що таке екран?
2. Які бувають екрани?
3. В чому полягає відмінність між ближньою та дальньою зонами електромагнітного поля?
4. Як проявляють себе завади у випадку цифрових сигналів?
5. Як проявляють себе завади у випадку аналогових сигналів?
6. Що таке скін-ефект і товщина скін-шару?
7. Що таке коефіцієнт екранування і що він показує?
8. Як екранують дроти і кабелі?
9. Як екранують друковані плати?
10. Якими екранами екранують електричне поле, а якими – магнітне?

4.5 Література

1. А. П. Ненашев Конструирование радиоэлектронных средств – М.: Высшая школа, 1990. – 432 с.

принциповій схемі можуть бути відсутні деякі елементи (екрани, конденсатори розв'язки по живленню та фільтри), які повинні бути на ДП;

- на електричній принциповій схемі можуть бути використані не всі елементи мікросхем (наприклад, аналогова мікросхема містить чотири операційних підсилювачі, а використовується в схемі лише три, або цифрова мікросхема містить шість інверторів, а використано в електричній принциповій схемі лише три, і т.д.). В таких випадках на електричних принципових схемах зайві елементи взагалі *не показуються*, проте на ДП відповідні невикористані елементи мікросхем *потрібно спеціальним чином підключати, не можна їх виводи залишати "в повітрі"*. Це обумовлено тим, що по живленню мікросхема являє собою одне ціле, і невикористані елементи її знаходяться під напругою. На протязі тривалого часу такої роботи "вхолосту" такі елементи раніше виходять з ладу, і, як наслідок, в деяких випадках можуть призвести до непрацездатності мікросхеми в цілому. З відомостями про те, як саме потрібно підключати відповідні не використані елементи мікросхем, можливо ознайомитися у спеціальній літературі;

Недотримання правил 1, 2 і 3 призводить до того, що ДП або взагалі не працюватиме, або працюватиме некоректно; дотримання правила 4 дозволяє підвищити ергономічність конструкції; дотримання правила 5 при проектуванні ДП дозволяє значно підвищити надійність конструкції. Також з метою забезпечення завадостійкості та внутрішньої електромагнітної сумісності бажано розносити входи та виходи схем. Інколи з цією ж метою спільний провідник ("землю") роблять у вигляді суцільного кільця навколо всієї схеми.

2.2 Порядок виконання роботи

Лабораторну роботу рекомендується виконувати в наступній послідовності:

- отримати електричну принципову схему, для якої потрібно розробити друковану плату;
- проаналізувати електричну принципову схему і визначити вхідні та вихідні кола;
- з'ясувати, які елементи повинні бути розміщені на друкованій платі, типи їх корпусів та порядок розміщення виводів (за потреби скористатися довідниковою літературою);

4. за допомогою програми Novarm DipTrace виконати розведення електропровідного рисунку;
5. виміряти настановні площі всіх елементів; оцінити коефіцієнт заповнення ДП;
6. оцінити розміри ДП; вирізати з фольгованого склотекстоліту заготовку необхідного розміру, зачистити її та знежирити;
7. роздрукувати отримане зображення на глянцевому папері за допомогою лазерного принтера;
8. перенести рисунок на підготовану заготовку за допомогою нагрітої праски;
9. видалити із заготовки залишки паперу; за потреби навести розриви доріжок маркером;
10. приготувати розчин для травлення (або це розчин хлорного заліза, або суміш перекису водню, столового оцету та столової солі у пропорції 1:1:1);

УВАГА! Використання розчину хлорного заліза потребує обережності! Його пари помірно токсичні, тому приміщення повинно провітрюватися! Також потрапляння цього розчину на шкіру та одяг призводить до появи плям, які практично нічим не виводяться! Всіх цих недоліків позбавлена суміш перекису водню, оцету та солі, яку і бажано використовувати під час цієї роботи.

11. помістити заготовку в розчин для травлення; чекати 30 ... 50 хвилин;
12. вийняти заготовку; пересвідчитися, що незахищені ділянки повністю витравилися; якщо ні, продовжити травлення;
13. промити заготовку проточною водою;
14. просвердлити монтажні отвори.

2.3 Зміст звіту

1. Назва роботи.
2. Мета роботи.

3. Електрична принципова схема вузла та її особливості (живлення, вхідні та вихідні кола, заземлення, завадозахищеність і т.д.).
4. Зображення електропровідного рисунку. Обов'язково вказати крок сітки та розміри друкованої плати.
5. Коротке описання хімічного способу виготовлення ДП. Навести рівняння хімічної реакції травлення (розчинення міді).
6. Наставні площі ЕРЕ на ДП та розрахунок коефіцієнту заповнення ДП.
7. Висновки. Скільки часу травилася плата? Чи були виявлені дефекти після закінчення травлення? Яка була отримана мінімальна ширина провідника? Як можна оцінити клас точності цієї ДП? Про що говорить отримане значення коефіцієнту заповнення ДП?

2.4 Контрольні запитання

1. Що таке друкована плата?
2. Які особливості навісного монтажу ЕРЕ на ДП?
3. Які особливості SMT-монтажу ЕРЕ на ДП?
4. В чому полягає хімічний спосіб виготовлення ДП?
5. Що таке крок сітки ДП?
6. Що таке клас точності ДП?
7. В чому полягають відмінності між електричною принциповою та монтажною схемами?
8. Що таке коефіцієнт заповнення ДП? Що він показує?
9. В яких випадках не можна використовувати ДП?
10. Що є матеріалом для виготовлення ДП та як маркуються ці матеріали?
11. Що таке наскрізна металізація отворів та для чого вона робиться?
12. Для чого і чим залужують ДП?
13. Навіщо рекомендується розділяти вхідні та вихідні кола, розносити входи та виходи вузлів?

2.5 Література

1. В. А. Ильин Технология изготовления печатных плат – Л.: Машиностроение, 1984. – 77 с.
2. М. Н. Николаенко Секреты радиолюбителя-конструктора – М.: NT-Press, 2006. – 320 с.

Лабораторна робота 3

Оцінка паразитних параметрів друкованих плат

Мета роботи:

- отримати уявлення про паразитні параметри друкованих плат та з'ясувати причини їх появи;
- навчитися розраховувати паразитні параметри друкованих плат та визначати завади, які виникають за їх рахунок.

3.1 Короткі теоретичні відомості

Друковані плати є майже універсальним конструкторським рішенням при проектуванні РЕА. Проте на практиці вони працюють далеко не так, як може здатися в теорії. ДП мають паразитні параметри, які утворені струмопровідним рисунком, а точніше, елементи струмопровідного рисунку взаємодіють між собою, що в багатьох випадках є небажаним явищем. Елементи струмопровідного рисунку можуть утворювати небажану (паразитну) ємність або індуктивність. Слід відзначити, що сама по собі ємність та індуктивність не є функціями частоти (не залежать від частоти сигналу), але реактивний опір (ємнісний або індуктивний) є функцією частоти: ємнісний опір обернено пропорційний частоті, а індуктивний – прямо пропорційний. Як наслідок, при високих частотах через паразитні ємності починають протікати паразитні струми, а на паразитних індуктивностях наводиться паразитна е.р.с. самоіндукції, яка призводить до

небажаного падіння рівня корисного сигналу.

Паразитні параметри друкованих плат є головним фактором, який обмежує їх використання на високих частотах. Боротися з цими явищами важко, але можливо. І першим етапом перевірки друкованої плати на працездатність в області високих частот є оцінка їх паразитних параметрів.

3.1.1 Паразитна ємність

Наявність ізоляційної основи з великим значенням діелектричної проникності є причиною виникнення великих паразитних ємностей зв'язку та власної ємності провідника.

Величина паразитної ємності (пФ) між двома провідниками обчислюється за формулою

$$C_n = \frac{0,12\epsilon l_n}{\ln \frac{2s}{h+b}}, \quad (3.1)$$

де l_n – довжина взаємного перекриття провідників, мм; h – товщина друкованого провідника, мм; b – ширина друкованого провідника, мм; s – ширина зазору між краями друкованих провідників, мм.

Розрахунок паразитної ємності C_n необхідно виконувати, вибираючи ті ділянки ДП, на яких вона може приймати найбільші значення (два паралельно розташованих друкованих провідника з мінімальним зазором між ними або з великим зазором при великій протяжності паралельних ділянок). Складена схема друкованих провідників відповідає заданим вимогам, якщо максимальне з отриманих розрахункових значень паразитної ємності є меншим, ніж гранично допустиме (як правило, його величина становить 5 ... 15 пФ). В протилежному випадку необхідно виконати одну або декілька з перерахованих вимог:

- збільшити відстань між провідниками;
- зменшити ширину провідників, враховуючи мінімально допустимі значення для обраного методу виготовлення ДП;
- зменшити довжину одного з провідників.

3.1.2 Паразитна індуктивність

Індуктивність друкованих провідників L_n (мкГн) товщиною h і шириною b розраховується за формулою

$$L_n = 2l_n \left(2,3 \lg \frac{l_n}{h+b} + 0,2235 \frac{h+b}{l_n} + 0,5 \right) 10^{-2}. \quad (3.2)$$

Індуктивність двох паралельних друкованих провідників однакового перерізу, шириною зазору між ними s та та протилежним напрямом струмів визначається за формулою

$$L = 4l_n \left(2,3 \lg \frac{s+b}{h+b} - \frac{s-b}{l_n} + 0,2235 \frac{h+b}{l_n} + 1,5 \right) 10^{-2}. \quad (3.3)$$

Якщо розміри перерізів різні, то

$$L = L_1 + L_2 - 2M, \quad (3.4)$$

де M – взаємна індуктивність провідників (мкГн), при $l_n > 10(b+s)$ визначається виразом

$$M = 2l_n \left(2,3 \lg \frac{2l_n}{s + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2}} + \frac{s + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2}}{l_n} \right) 10^{-2}, \quad (3.5)$$

де b_1 і b_2 – відповідно ширина першого і другого провідників.

Розрахунок паразитної індуктивності проводять для найдовших друкованих провідників та ділянок, на якій друковані провідники ідуть паралельно один одному. Якщо максимальне з розрахованих значень є більшим, ніж гранично допустиме (як правило, 1 ... 3 мкГн), то потрібно виконати одну або декілька з перелічених дій:

- збільшити зазор s між провідниками;
- зменшити довжину ділянок l_n друкованих провідників, які розташовані паралельно один одному;
- змінити схему друкованих провідників.

3.1.3 Потужність втрат

Основними параметрами, що обумовлюють стабільність роботи друкованих плат, є тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$ та діелектрична проникність ε , які найбільш підлягають зміні в процесі старіння органічної основи плати. Тому їх вплив необхідно враховувати при виборі діелектричного матеріалу, що використовується як основа ДП. Зміна діелектричних властивостей друкованих плат (під впливом температури та вологи) призводить до суттєвих втрат, які можуть сягати 70% від розрахункової потужності схеми. Потужність втрат ДП (Вт), визначають за формулою:

$$P = 2\pi fCU^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (3.6)$$

де f – максимальна робоча частота схеми, МГц; C – ємність ДП, мкФ; U – напруга живлення, В; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат матеріалу основи плати.

Ємність ДП (пФ) розраховують за формулою

$$C = \frac{0,009\varepsilon F}{H_n}, \quad (3.7)$$

де ε – діелектрична проникність матеріалу основи плати; F – сумарна площа друкованих провідників, мм²; H_n – товщина друкованої плати, мм.

Визначаючи потужність втрат, підбирають матеріал основи друкованої плати, що відповідає умові забезпечення заданого значення потужності втрат не більше гранично допустимої (як правило, не більше 2,5% від потужності вузла). Для цього необхідно вибрати попередню товщину плати, скласти схему друкованих провідників по заданій принциповій схемі, вибрати обґрунтований метод виготовлення друкованої плати та провести розрахунок вихідної потужності функціонального вузла. Якщо ні один з рекомендованих матеріалів не відповідає поставленій вимозі, то необхідно провести розрахунок для друкованої плати іншої товщини або змінити величину сумарної площини друкованих провідників, розташували їх по-іншому.

3.2 Порядок виконання роботи

Лабораторну роботу рекомендується виконувати в наступній послідовності:

1. для зразка ДП, виконаний в ході лабораторної роботи №2, знайти три найдовші друковані провідники та дві ділянки з паралельними друкованими провідниками найбільшої довжини;
2. розрахувати паразитну ємність за формулою (3.1), порівняти з гранично допустимим значенням 15 пФ;
3. розрахувати паразитну індуктивність за формулами (3.2) – (3.5), порівняти з гранично допустимим значенням 3 мкГн;
4. розрахувати потужність вузла (скористатися даними з попередньої лабораторної роботи);
5. розрахувати потужність втрат готової ДП (за потреби скористатись довідниковою літературою), порівняти її потужністю вузла.

3.3 Зміст звіту

1. Назва роботи.

2. Мета роботи.
3. Креслення струмопровідного рисунку друкованої плати (результат виконання лабораторної роботи №2). На кресленні вказати ділянки, для яких ведеться розрахунок паразитних параметрів.
4. Розрахунок паразитної ємності ДП.
5. Розрахунок паразитної індуктивності ДП.
6. Розрахунок потужності втрат ДП і порівняння її потужністю вузла.
7. Висновки. Чи знаходяться значення паразитних параметрів ДП в межах допустимих? Яка можлива максимальна частота сигналу в даному вузлі?

Якщо значення одного або декількох паразитних параметрів ДП перевищують допустимі межі, то потрібно скоригувати струмопровідний рисунок ДП таким чином, щоб зменшити відповідні паразитні параметри. Після цього потрібно довести, що паразитні параметри зміненої ДП відповідають нормам.

3.4 Контрольні запитання

1. Що таке паразитні параметри друкованих плат і на що вони впливають?
2. Чим обумовлена паразитна ємність друкованої плати?
3. Чим обумовлена паразитна індуктивність друкованої плати?
4. Чим обумовлена потужність втрат друкованої плати?
5. Як паразитні параметри друкованої плати обмежують максимальну робочу частоту вузла?
6. Яким чином можливо зменшувати паразитні параметри друкованих плат?
7. За якими ознаками обирається друковані провідники, для яких розраховуються паразитні параметри?
8. Що таке тангенс кута діелетричних втрат?
9. Що таке взаємна індуктивність і чому у формулі (3.4) вона множиться на 2?

3.5 Література

1. А. П. Ненашев Конструирование радиоэлектронных средств – М.: Высшая школа, 1990. – 432 с.

Лабораторна робота 4

Дослідження ефективності екранування

Мета роботи:

- дослідити процес передачі завад через електромагнітні поля;
- визначити теоретично і практично вплив екранів на цей процес.

4.1 Короткі теоретичні відомості

Екран є металевою перегородкою, що розділяє дві області простору з метою регулювання поширення електричних і магнітних полів від однієї з цих областей до іншої. Можливе екранування джерела наведень і екранування приймача. Конструктор завжди повинен прагнути до пригнічення перешкод у джерелі наведень, оскільки такий підхід виключає проблему пригнічення наведень для великої кількості приймачів.

4.1.1 Близня і дальня зони електромагнітного поля

Характеристики електромагнітного поля чи наведень визначаються джерелом, навколишнім середовищем та відстанню від джерела наведень до приймача. Поблизу джерела властивості поля визначаються, в основному, характеристиками джерела. В даліні від джерела властивості поля залежать, головним чином, від середовища, у якому поширюється поле. Тому простір, що оточує джерело, можна розділити на дві області (зони) - ближнє (індуктивне) та дальнє поле (поле випромінювання).

Поруч із джерелом розташовується ближнє, або індуктивне поле. На відстані $l > \frac{\lambda}{2\pi}$ розташовується дальнє поле, або поле випромінювання.

Відношення напруженості електричного поля E до напруженості магнітного поля H є комплексним хвильовим опором $Z_\omega = \frac{E}{H}$. У дальньому полі це відношення дорівнює комплексному характеристичному опору середовища (наприклад, для повітряного простору або вакууму характеристичний опір активний), $\frac{E}{H} = Z_0 \approx 377$ Ом.

У ближньому полі величина Z_ω визначається параметрами джерела і відстанню від нього до розглянутої точки. Якщо в джерелі генерується великий струм і мала напруга ($E/H < 377$ Ом), ближнє поле в основному змінне магнітне, і навпаки, якщо в джерелі малий струм і висока напруга ($E/H > 377$ Ом), ближнє поле змінне електричне. Якщо розглядати наведення, що випромінюється штирем або прямим проводом, то поблизу такого випромінювача переважним є електричне поле. В міру збільшення відстані інтенсивність змінного електричного поля падає. У ближньому змінному електричному полі його електрична складова згасає пропорційно $E \approx E_0 \left(\frac{1}{r}\right)^3$, в той час як магнітна складова згасає пропорційно $H \approx H_0 \left(\frac{1}{r}\right)^2$.

Таким чином, модуль комплексного хвильового опору зі збільшенням відстані від випромінювача падає і асимптотично наближається до опору, який має вільний простір у дальньому полі. Відстань, починаючи з якої хвильовий опір дорівнює характеристичному опору вакууму, становить $r = \frac{\lambda}{2\pi}$.

В дальньому полі як електрична, так і магнітна складові поля згасують пропорційно $\frac{1}{r}$.

На частотах до 1 МГц майже всі наведення всередині апаратури визначаються умовами ближнього поля, оскільки ближнє поле на цих частотах простирається на відстань до 45 м і більше. На частоті 30 кГц поле є ближнім на відстані до 1,5 км від джерела. Звідси випливає, що проблема електромагнітної сумісності всередині апаратури низьких, середніх і високих частот варто розглядати як проблеми ближнього поля.

4.1.2 Комплексний хвильовий і характеристичний опори

Для будь-якої електромагнітної хвилі комплексний хвильовий опір визначається як

$$Z_\omega = \frac{E}{H}.$$

Комплексний характеристичний опір середовища визначається виразом

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu_a}{\sigma + j\omega\varepsilon_a}}, \quad (4.1)$$

де $\omega = 2\pi f$ – колова частота; μ_a – абсолютна магнітна проникність (для вакууму $\mu_a = \mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/М); σ – питома електропровідність середовища; ε_a – абсолютна діелектрична проникність (для вакууму $\varepsilon_a = \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/М).

Для діелектриків ($\sigma \ll \omega\varepsilon_a$) вираз для характеристичного опору набуває вигляду

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}.$$

Для провідників ($\sigma \gg \omega\varepsilon_a$) характеристичний опір називається комплексним опором екрана.

Скориставшись тригонометричною і показниковою формами комплексного числа, з (4.1) отримаємо

$$Z_0 = (1 + j) \sqrt{\frac{j\omega\mu_a}{2\sigma}},$$

а з цього виразу можливо визначити, що модуль комплексного опору екрану становить

$$|Z_0| = \sqrt{\frac{\omega\mu_a}{\sigma}}. \quad (4.2)$$

Дані по питомій електропровідності та відносній магнітній проникності для різних матеріалів наведені в таблиці 4.1.

4.1.3 Ефективність екранування

Ефективність екранування визначається як ступінь ослаблення (зменшення) напруженостей полів за рахунок дії екранів. Металевий екран частково відбиває хвилю, а частково поглинає. Чисельно ефективність екранування визначають за допомогою коефіцієнту екранування β , який звичайно виражається в децибелах, завдяки чому повна ефективність екранування складається з складової, обумовленої відбиттям – β_1 , та складової, обумовленої поглинанням – β_2 :

$$\beta = \beta_1 + \beta_2. \quad (4.3)$$

Складова коефіцієнту екранування, обумовлена відбиттям, визначається як

$$\beta_1 = 20 \lg \frac{E_1}{E_0} = 20 \lg \frac{H_1}{H_0}, \quad (4.4)$$

де індексами 0 позначені напруженості падаючої хвилі, а індексами 1 – хвилі, що пройшла.

Для визначення складової коефіцієнту екранування, що обумовлена поглинанням, потрібно знати матеріал еркну. Фізично згасання електромагнітної хвилі обумовлене витратами її енергії на омичні втрати, які пов'язані зі струмами, що індукуються в екрані та, отже, на його нагрівання. кількісно амплітуди біжучих хвиль E_2 і H_2 зменшуються в товщі екрана:

$$E_2 = E_0 e^{-\frac{l}{\delta}};$$

$$H_2 = H_0 e^{-\frac{l}{\delta}},$$

де l – товщина екрану; δ – глибина проникнення хвилі в середовище (товщина скін-шару):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \sigma}}, \quad (4.5)$$

де σ – відносна питома електропровідність матеріалу екрану, См·м.

Тоді складова коефіцієнту екранування, обумовлена втратами на поглинання, запишеться у вигляді

$$\beta_2 = 20 \frac{l}{\delta \lg e}, \quad (4.6)$$

або повний коефіцієнт екранування становитиме

$$\beta = 20 \left(\lg \frac{E_1}{E_0} + \frac{l}{\delta \lg e} \right). \quad (4.7)$$

Значення відносної питомої провідності та відносної магнітної проникності різних провідників наведені в таблиці (4.1).

Таблиця 4.1

Матеріал	Відносна питома провідність σ	Відносна магнітна проникність μ
Срібло	1,05	1
Мідь	1,00	1
Золото	0,70	1
Алюміній	0,61	1
Латунь	0,26	1
Нікель	0,20	1
Бронза	0,18	1
Конструкційна сталь	0,17	200
Олово	0,15	1
Сталь 45	0,10	1000
Свинець	0,08	1
Пермаллой	0,03	12000

4.2 Порядок виконання роботи

Лабораторну роботу рекомендується виконувати в наступній послідовності:

1. отримати лабораторний макет; визначити, які з проводів екрановані, які – ні та визначити матеріал екрану;
2. подати на вхід напругу з частотою в межах 150 ... 200 кГц і амплітудою 3 ... 5 В – вона буде імітувати джерело завади;
3. для кожної пари дротів провести вимірювання рівня паразитного сигналу;
4. для кожної пари дротів визначити величину загального коефіцієнту екранування β (у децибелах);
5. приймаючи товщину екрану 0,2 мм, визначити товщину скін-шару δ (формула 4.5) і втрати в екранах на поглинання β_2 (формула 4.6);
6. на основі отриманих даних визначити величину втрат екранів на відбиття β_1 .

4.3 Зміст звіту

1. Назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Перелік пар дротів з вказанням наявності/ відсутності екранів та матеріалу екрану.
4. Параметри імітації сигналу джерела завади.
5. Результати вимірювання паразитного сигналу.
6. Розрахунок величини загального коефіцієнту екранування для кожного випадку.
7. Розрахунок величини скін-шару та втрат екрану на поглинання для кожного випадку.
8. Розрахунок величини втрат екрану на відбиття для кожного випадку.
9. Висновки. Наскільки добре в кожній з пар дротів екранована завада?