

*МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»*

*КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ ЕОА*

*КУРСОВА РОБОТА*

*за дисципліною: Фізико-теоретичні основи проектування радіоелектронної  
апаратури – 2  
«Розробка друкованого вузла синтезатора довільного сигналу»*

*Керівник: Губар В.Г.  
Допущено до захисту  
"\_\_" \_\_\_\_\_ 2021 р.  
Захищено з оцінкою*

---

*Виконав: Юрченко В. О.  
Студент 3 курсу ФЕЛ  
Групи ДК-81*

**Національний Технічний Університет України**  
**«Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського»**

Кафедра Конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Дисципліна Фізико-теоретичні основи проектування радіоелектронної апаратури- 2

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Курс III Група ДК-81 Семестр VI

**ЗАВДАННЯ**

**на курсову роботу**

Юрченко Віталій Олегович

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема проекту Розробка друкованого вузла синтезатора довільного сигналу
2. Термін подання студентом проекту 27 травня 2021 року
3. Вихідні данні до роботи Система складається з одного друкованого вузлу. Призначена для синтезування довільного сигналу. Пристрій являє собою моноблочну конструкцію який має кнопки для керування, дисплей для відображення інформації і usb порт для підключення до персонального комп'ютера. Середній час напрацювання на відмову 25000 год. Кліматичне виконання УХЛ4 по ГОСТ 15150-69.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:
  - вступ;
  - опис та аналіз схеми електричної принципової;
  - вибір та обґрунтування використання елементної бази;
  - розміщення конструктивних елементів на друкованій платі;
  - конструкторсько-технологічний розрахунок друкованої плати;
  - електричний розрахунок друкованої плати;
  - розрахунок основних показників надійності;
  - методика проектування друкованого вузлу в середовищі AltiumDesign;
  - висновки;

- література.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)
- схема електрична принципова з переліком елементів;
  - друкована плата;
  - складальне креслення друкованої плати зі специфікацією.
6. Дата видачі завдання 3.02.2021

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання курсової роботи	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Розробка технічного завдання	8.02.21 – 22.02.21	
2	Аналіз схеми електричної принципової	23.02.21 – 8.03.21	
3	Вибір та обґрунтування використання елементної бази	09.03.21 – 22.03.21	
4	Проектування схеми в Altium Designer	23.03.21 – 29.03.21	
5	Розміщення конструктивних елементів на друкованій платі	30.03.21 – 05.04.21	
6	Конструкторсько-технологічний розрахунок друкованої плати	06.04.21 - 12.04.21	
7	Проектування плати в Altium Designer	13.04.21 - 26.04.21	
8	Електричний розрахунок друкованої плати	27.04.21 - 03.05.21	
9	Розрахунок надійності	04.05.21 - 10.05.21	
10	Виконання креслення друкованої плати	11.05.21 - 17.05.21	
11	Виконання складального креслення друкованого вузла	18.05.21 - 23.05.21	
12	Оформлення пояснювальної записки	24.05.21 - 01.06.21	

Студент Юрченко В.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Губар В.Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## Зміст

Скорочення та умовні позначки.....	7
Вступ.....	8
Розділ 1. Аналіз вихідних даних.....	10
1.1. Аналіз ЕЗ та ТЗ.....	10
Розділ 2. Вибір і обґрунтування елементної бази. Посадочні місця активних компонентів.....	12
2.1. Вибір та обґрунтування елементної бази.....	12
2.1.1. Конденсатори.....	12
2.1.2. Інтегральна схеми.....	12
2.1.3. Резистори.....	15
2.1.4. Роз'єми.....	16
2.1.5. Стабілізатори.....	16
2.1.6. Індикатори.....	16
2.1.7. Кнопки.....	16
2.1.8. Кварцовий резонатори і генератори.....	16
2.1.9. Котушки індуктивності.....	17
2.2. Посадкові місця.....	17
Розділ 3. Розміщення КЕ на монтажному просторі.....	21
Розділ 4. Вибір і обґрунтування типу матеріалу, методу виготовлення і класу точності ДП.....	27
4.1. Вибір друкованої плати.....	27
4.1.1. Вибір типу друкованої плати.....	27
4.1.2. Вибір матеріалу ДП.....	28
4.1.3. Вибір класу точності ДП.....	29
4.1.4. Вибір і обґрунтування методу виготовлення друкованої плати.....	30

					<i>ДК81.434811.001 ПЗ</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розробив</i>	<i>Юрченко В.О.</i>				<i>Розробка друкованого вузла синтезатора довільного сигналу</i>  <i>Пояснювальна записка</i>		
<i>Перевірив</i>	<i>Гудар В.Г.</i>						
<i>Н. контр.</i>							
<i>Затв.</i>	<i>Гудар В.Г.</i>						
					<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
					<i>о</i>	<i>4</i>	<i>57</i>
					<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕЛ, ДК-81</i>		

4.2. Конструкторсько-технологічний розрахунок елементів друкованого монтажу.....	31
4.2.1. Визначення мінімальної ширина друкованого провідника за сталим струмом.....	32
4.2.2. Мінімальна ширина провідника з урахування допустимого падіння на ньому напруги.....	33
4.2.3. Розрахунок діаметра монтажного отвору.....	33
4.2.4. Визначення діаметра контактної майданчика.....	34
4.2.5. Визначення мінімальної і максимальної ширини провідника на друкованій платі.....	35
4.2.6. Визначення мінімальної відстані між двома сусідніми провідниками.....	35
4.2.7. Визначимо мінімальну відстань між провідником і контактним майданчиком.....	36
4.2.8. Визначення мінімальної відстань між двома контактними майданчиками.....	36
Розділ 5. Електричний розрахунок друкованої плати.....	38
5.1. Визначте падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику...	38
5.2. Визначимо потужність втрат двосторонньої друкованої плати.....	39
5.3. Паразитна ємність між двома сусідніми провідниками однаковою ширині, розташованими на одній стороні плати.....	39
5.4. Взаємна індуктивність двох паралельних друкованих провідників рівної довжини.....	40
Розділ 6. Розрахунок основних показників надійності друкованого вузлу.....	41
Розділ 7. Методика проектування друкованого вузлу в середовищі Altium Design.....	45
7.1. Основні відомості.....	45
7.2. Створення бібліотеки умовно графічних позначень і посадкових місць .....	45

7.3. Створення принципової схеми. Формування переліку елементів.....	46
7.4. Створення двосторонньої друкованої плати.....	47
Висновок.....	49
Література.....	52
ДОДАТОК А Технічне завдання на проектування.....	53

## Скорочення та умовні позначки

ВІС - велика інтегральна схема

КЕ – конструктивні елементи

РЕА – електронно-обчислювальна апаратура

ТЗ – технічне завдання

ПМ - компоненти та корпуси для поверхневого монтажу

МО - монтажний отвір

БДП – багатошарова друкована плата

ДДП – двостороння друкована плата

ОДП – одностороння друкована плата

					ДК81.434811.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## Вступ

На сьогоднішній день електроніка є однією із сучасних галузей науки і техніки. Радіоелектрична апаратура використовується для зв'язку, управління, навігації, різних наукових досліджень і у виробництві. І для розробки радіоелектричної апаратури інженеру потрібно використовувати сигнали довільної форми. Для цього використовують синтезатори довільного сигналу.

Синтезатор довільного сигналу — електронний прилад, призначений для синтезу сигналів довільної форми і частоти з єдиною опорною частотою, що генерується генератором тактових імпульсів. Характерною особливістю синтезатора довільного сигналу є те, що відліки синтезованого сигналу обчислюються цифровими методами, після чого передаються на цифро-аналоговий перетворювач ЦАП, де і відбувається їх перетворення в аналогову форму напругу або струм.

Основними функціональними блоками синтезатор довільного сигналу є: акумулятор фази, перетворювач фаза-амплітуда, ЦАП. Також синтезатор довільного сигналу містить деяку кількість пам'яті, що служить для зберігання параметрів синтезованого сигналу, таких як частота, фаза, амплітуда тощо. У кожному такті опорної частоти акумулятор фази збільшує своє значення на величину, записану в комірку пам'яті, яку зазвичай називають прирощення фази. У результаті, значення акумулятора фази лінійно збільшується з часом. Потім обчислене таким чином в кожному такті значення фази перетвориться в значення амплітуди. В принципі, дане перетворення може бути довільним і залежить від програми. У найбільш поширеному на практиці випадку, для синтезу гармонійних коливань, обчислюється синус поточного значення фази. Результат обчислення подається на вхід ЦАП.

Швидкість (час) перебудови вихідної частоти з одного значення на інше дуже висока і стабільна, і визначається, в основному, тільки тривалістю

					ДК81.434811.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8



імпульсної характеристики аналогового відновлюючого фільтра на виході синтезатора; сама ж перебудова відбувається фактично миттєво. Час перебудови не залежить від різниці між початковою і кінцевою частотами. У деяких синтезаторах такого типу передбачений, в тому числі, автоматичний лінійний інкремент або хоппінг частоти.

Як недолік можна вказати більш високе, у порівнянні з рішеннями на ФАПЧ, енергоспоживання через великий обсяг обчислень, і більш високий рівень негармонічних паразитних складових в спектрі синтезованого сигналу.

Насамперед стоїть завдання створити синтезатор довільного сигналу для студентів які навчаються в технічних закладах і початківців в схемотехніці.

## Розділ 1. Аналіз вихідних даних

### 1.1. Аналіз ЕЗ та ТЗ

В даному проекті розробляється двоканальний синтезатор довільного сигналу. Заснований на методі прямого цифрового синтезу. На ЦАП подаємо цифровий сигнал з пам'яті з частотою вибірки. Потрібної послідовністю цифр формуємо "довільний" сигнал.

Генератор сигналів складається з ЦАП AD9765, ПЛІС Altera EPM3128ATC100-7, МК Atmega8-16, SRAM AS7C34096A-12, РКІ MT-16S2D, SD flash memory 1 ГБ , Кварцовий генератор SJK 60 МГц, Комп'ютерний інтерфейс на ft232bm.

Синтезатор являє собою окремий пристрій, в незалежну пам'ять якого з комп'ютера один раз записуються сигнали, після чого пристрій може працювати автономно, без комп'ютера. Пристрій має власний інтерфейс у вигляді ЖК дисплея 16x2, і трьох кнопок. За допомогою кнопок вгору вниз можна перегортати сигнали, при цьому на ЖК дисплеї буде відображатися ім'я сигналу. Кнопкою старт/стоп можна запустити відтворення сигналу або, якщо сигнал вже запущений, зупинити його. Після вибору і пуску сигналу за допомогою кнопок, дані з незалежної пам'яті SD карти, завантажуються в оперативну пам'ять SRAM. По закінченню завантаження запускається режим відтворення сигналу, при якому ПЛІС в безперервному циклі зчитує сигнал з оперативної пам'яті і виводить його на ЦАП.

Вибірка з SRAM пам'яті йде побайтово, зі швидкістю 60 Мбайт / с. Ці дані надсилаються на ЦАП. ЦАП в даній схемі може працювати в одноканальному і двоканальному режимах. Залежно від режиму сигнал на виході ЦАП формується зі швидкістю 30 Мсмплов / с в одноканальному і 15 Мсмплов / с в двоканальному режимі.

SRAM має обсяг 512 Кбайт. Сигнал формується двохбайтними значеннями. При цьому максимально довгий сигнал має тривалість 8,74 мс тобто частоту 114,4 Гц. Мінімально короткий сигнал (меандр) генерується з двох значень, на частоті рівній половині частоти вибірки, тобто 15 МГц в одноканальному режимі, 7,5 МГц в двоканальному. Якщо задати сигнал тільки з одного значення, то в аналоговій частині буде виводитися постійна напруга.

При запису в пристрій необхідно задати ім'я сигналу, яке буде виводитися на ЖК дисплеї. Далі сигнали завантажуються в SD через ft232 і мікроконтролер Atmega8 на швидкості 150 000 біт / с.

## Розділ 2. Вибір і обґрунтування елементної бази. Посадочні місця активних компонентів

### 2.1. Вибір та обґрунтування елементної бази

Вибір елементної бази виконується на основі схеми електричної принципової з врахуванням вимог, викладених у ТЗ. Схема електрична принципова друкованого вузла та перелік елементів наведено у додатку А.

#### 2.1.1. Конденсатори

При виборі конденсаторів можна виділити основні параметри:

- ємність;
- робоча напруга конденсатора;
- точність;
- тип конденсатора;
- робоча температура;
- спосіб монтажу.

За вимогами в ТЗ конденсатори було вибрано в SMD корпусі. Було взято керамічні конденсатори в корпусі 0603 фірми КЕМЕТ. Дана серія задовольняє точність яка складає 5%, і має всі потрібні номінали ємності. Максимальна робоча напруга складає 16 В. Тепловий коефіцієнт Х7R.

Для електролітичних конденсаторів. Було взято конденсатори фірми Nitano. Конденсатори даною фірми має всі потрібні номінали ємності. Максимальна робоча напруга складає 16 В.

#### 2.1.2. Інтегральна схеми

Вибір серії ІС виконаємо по матриці параметрів. Для цього виберемо чотири ІС, аналогічних за своєю функціональністю, різних серій

					ДК81.434811.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

71V124SA15YGI8, AS7C34096A-12TCN, IDT71V124SA20PH, CY7C1049CV33-15VC. Дані мікросхеми виконують функцію оперативної пам'яті з довільним доступом. Значення параметрів мікросхем представлені в Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Основні параметри порівнюваних ІС

№	ІС	Параметри			
		Обсяг пам'яті, Мб	Час доступу, нс	Розсіювання потужності, Вт	Ціна, \$
1	71V124SA15YGI8	1	15	1,25	1,95
2	AS7C34096A-12TCN	4	12	1,0	4,09
3	IDT71V124SA20PH	1	20	1,25	1,68
4	CY7C1049CV33-15VC	4	15	1,25	3,23
	Ваговий коефіцієнт $b_j$	0,4	0,35	0,15	0,10

В таблицю вводиться ваговий коефіцієнт. Величина вагового коефіцієнта вибирається відповідно до важливості того чи іншого параметра, при цьому більш важливому параметру повинен відповідати більший ваговий коефіцієнт  $b_j$ . Величина вагового коефіцієнта повинна бути обмежена:

$$\sum_{j=1}^m b_j = 1 \quad (2.1)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 15 & 1,25 & 1,95 \\ 4 & 12 & 1 & 4,09 \\ 1 & 20 & 1,25 & 1,68 \\ 4 & 15 & 1,25 & 3,23 \end{bmatrix}$$

Проаналізуємо параметри матриці X. Приведемо їх до такого виду, щоб більшому значенню параметра відповідала краща якість ІС. Параметри які не задовольняють цю умову перераховуємо за формулою (2.2):

$$Y_{ij} = \frac{1}{X_j}, \quad (2.2)$$

де  $i$  – кількість вибраних ІС;

j – кількість параметрів ІС.

Кращими властивостями мікросхеми є: великий обсяг пам'яті, низький час доступу, низька розсіювальна потужність, низька ціна. Виходячи з цього матриця наведених параметрів Y має вигляд:

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0,067 & 0,8 & 0,512 \\ 4 & 0,083 & 1 & 0,245 \\ 1 & 0,05 & 0,8 & 0,595 \\ 4 & 0,067 & 0,8 & 0,31 \end{bmatrix}$$

Матрицю Y приводимо до матриці нормованих параметрів – A. Нормування виконуємо згідно формули:

$$a_{ij} = \frac{{}^{max}_j y_{ij} - y_{ij}}{{}^{max}_j y_{ij}}, \quad (2.3)$$

де  ${}^{max}_j y_{ij}$  - максимальний елемент у стовпці j матриці Y;

$y_{ij}$  - поточне значення елемента в стовпці j матриці Y.

$$A = \begin{bmatrix} 0,75 & 0,193 & 0,2 & 0,139 \\ 0 & 0 & 0 & 0,588 \\ 0,75 & 0,398 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0,193 & 0,2 & 0,479 \end{bmatrix}$$

Для узагальненого аналізу системи параметрів вводять оціночну функцію -  $Q_i$ , яка визначається:

$$Q = \sum_{j=1}^n a_j b_j \quad (2.4)$$

$$Q_1 = 0,75 \cdot 0,4 + 0,193 \cdot 0,35 + 0,2 \cdot 0,15 + 0,139 \cdot 0,1 = 0,41$$

$$Q_2 = 0,059$$

$$Q_3 = 0,469$$

$$Q_4 = 1,145$$

З аналізу значень  $Q_i$  робимо висновок, що оптимальною по розглянутих параметрах є AS7C34096A-12TCN. Ця серія мікросхем і буде використовуватися при розробці пристрою. Вона володіє більш кращими значеннями параметрів.

Цифро-аналоговий перетворювач AD9765ASTZ компанії Analog Devices Inc. Даний перетворювач є двохканальним, дванадцяти бітним. Час встановлення складає 35 нс. AD9765ASTZ є лідером серії TxDAC+.

USB-UART перетворювач FT232BM компанії FTDI є фаворитом на ринку USB - UART перетворювачів. Має один канал передачі і забезпечує три стандартних інтерфейсу обміну даних RS-232, RS-422 і RS-485.

Програмована логічна інтегральна схема EPM3128ATC100-7 серії MAX 3000A компанії Intel. Має на борту 128 мікрокомірок, 80 входів/виходів. Максимальна затримка поширення сигналу від входу до виходу становить 7,5 нс.

Мікроконтролер ATMEGA8-16AU компанії Microchip Technology має I<sup>2</sup>C, SPI, UART/USART інтерфейси, розмір пам'яті для програми 8 КБ (4К x 16). Працює на швидкості 16 МГц.

Програмована логічна інтегральна схема EPM3128ATC100-7 і мікроконтролер ATMEGA8-16AU дані інтегральні схеми задовольняють вимоги схеми електричної принципової.

### 2.1.3. Резистори

Резистори фірми Yageo задовольняють всі вимоги ТЗ. Дані резистори випускаються в корпусі 0603. Мають точність 1%. Розсіювальна потужність 100 мВт.

#### 2.1.4. Роз'єми

Було взято штири фірми Connfly electronic (Zhenqin). DS1021 задовольняє експлуатаційні характеристики, а також має гарні електричні характеристики.

Для постійної пам'яті, а саме microSD було взято роз'єм DM3CS-SF фірми Hirose Electric Co Ltd. Даний роз'єм був вибраний через зручну і міцну конструкцію як задовольняє вимоги до надійності.

#### 2.1.5. Стабілізатори

Стабілізатор LM1117MPX-3.3 компанії Texas Instruments відповідає всім вимогам схеми електричної принципово. Максимальна вхідна напруга складає 15 В. Вихідна напруга 3,3 В. Вихідний струм складає 800 мА.

#### 2.1.6. Індикатори

ЖК індикатор MT-16S2D-3YLG компанії МЭЛТ. Має два символічних ряду. В кожному ряду може відображатися 16 символів. Даний екран живиться від 5 В. Даний екран є достатньо яскравим.

#### 2.1.7. Кнопки

Кнопка TL3300CF160Q компанії E-Switch має великі розміри що робить її зручною при натисканні. Дані кнопки мають великий час напрацювання і задовольняє вимоги до надійності.

#### 2.1.8. Кварцовий резонатори і генератори

Кварцовий резонатор 49S-SMD компанії Strong має частоту 6 МГц, навантажувальну ємність 18 пФ. Стабільність при температурі 25 °C складає +/- 30 ppm.

					ДК81.434811.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



Кварцовий резонатор КХ-К компанії Strong має частоту 16 МГц, навантажувальну ємність 20 пФ. Стабільність при температурі 25°C складає +/- 30 ppm.

Дані кварцові резонатори було вибрано через свою популярність. Всі параметри повністю задовольняють всі вимоги схеми електричної принципово.

Кварцовий генератор CFPS-73B-60.0 компанії IQD Frequency Products має частоту 60 МГц з вихідною напругою 3,3 В. Має стабільність частоти 50 ppm. Даний генератор задовольняє всі вимоги схеми електричної принципово.

### 2.1.9. Котушки індуктивності

Електричні характеристики котушок індуктивності визначаються їх конструкцією, властивостями матеріалу магнітопроводу та його конфігурацією, числом витків обмотки.

Основні фактори, які враховуємо при виборі котушки індуктивності:

- значення індуктивності;
- максимальний струм котушки;
- точність;
- спосіб монтажу.

Котушка індуктивності RLB0913-223K фірми Bourns. Котушка має 22 мГн. Дана котушка індуктивності повністю задовольняють ТЗ і схему електричну принципову.

### 2.2. Посадкові місця

Посадочне місце IC визначається видом корпусу, який характеризується його габаритними розмірами, числом контактів та розташуванням їх відносно

площини основи корпусу. Контакти мікросхеми можуть розташовуватися в площині основи корпусу або бути перпендикулярними йому.

У пристрої використовуємо SMD мікросхеми. Вибір даного типу компонентів був зроблений виходячи з великої кількості переваг. Основною перевагою є зменшення габаритів корпусу, отже збільшення щільності розміщення компонентів і зменшення габаритів, маси пристрою.

Для подальшого монтажу ІС на друкованій платі, розглянемо посадкові місця для мікросхем AS7C34096A, Atmega8-16AU, EPM3128ATC100-7. Зображені на рисунку 2.1, 2.2 і 2,3.

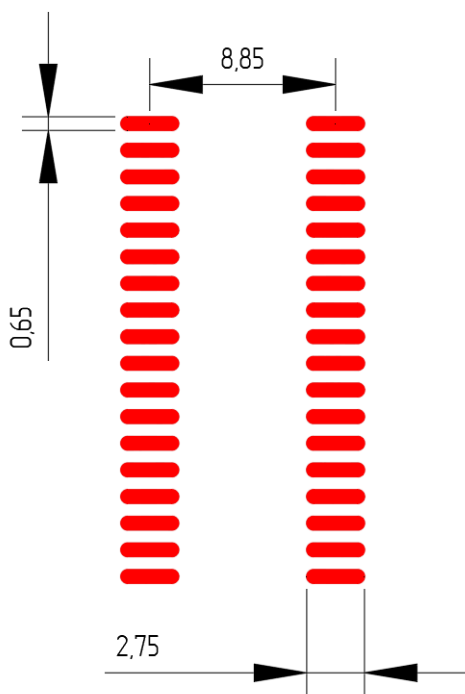


Рисунок 2.1 - Посадкове місце для мікросхеми AS7C34096A

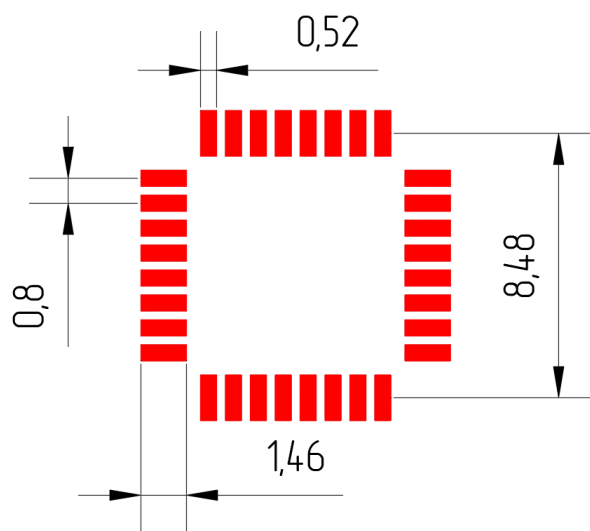


Рисунок 2.2 - Посадкове місце для мікросхеми Atmega8-16AU

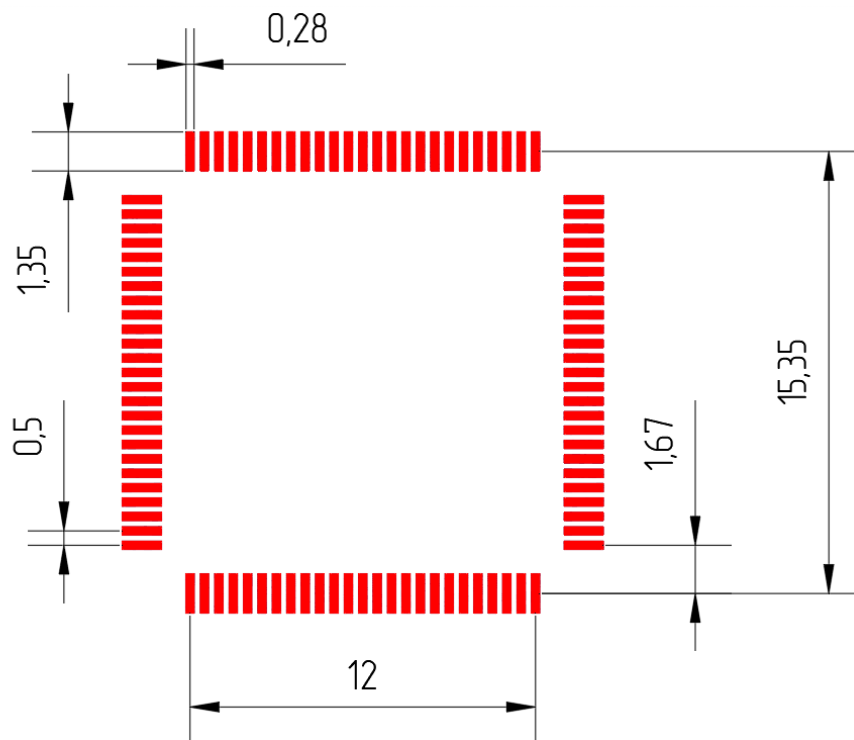


Рисунок 2.3 - Посадкове місце для мікросхеми EPM3128ATC100-7

#### Висновок до розділу:

В цьому розділі було вибрано елементи і розглянуто посадові місця ІС. У першій частині роботи проаналізовано основні параметри компонентів і обрано найкращі елементи. Всі вибрані елементи відповідають вимогам ТЗ і схеми електричної принципової.

Вибір даної елементної бази дозволяє забезпечити надійну роботу при середньому часі напрацювання на відмову 25000 год що задано в ТЗ, а також малий час на відновлення.

### Розділ 3. Розміщення КЕ на монтажному просторі

Для вирішення задачі розміщення КЕ на монтажному просторі в даній роботі використовується метод матричних зв'язків. Вихідна схема зображена на рисунку 3.1.

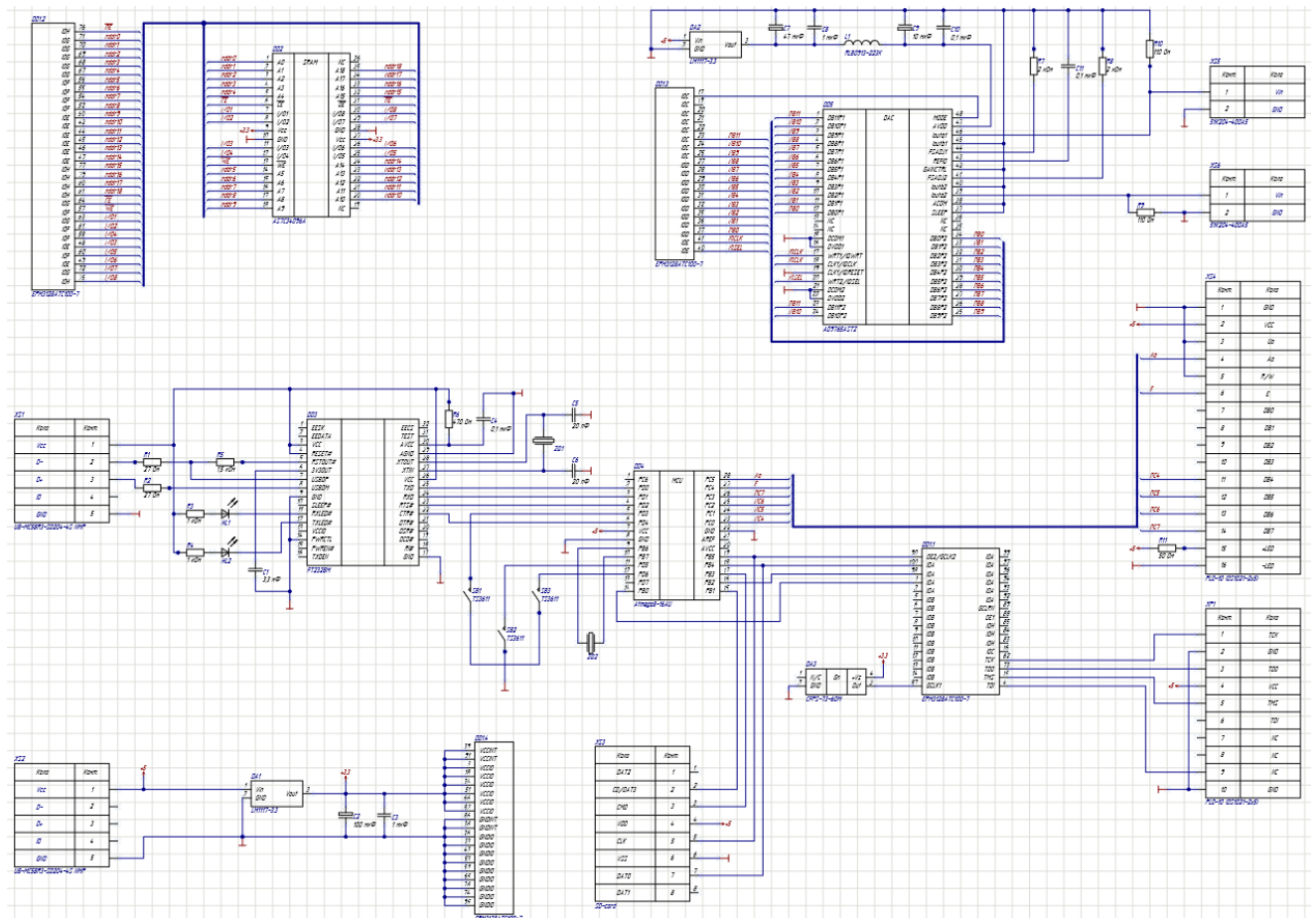


Рисунок 3.1 — Електрична принципова схема пристрою

Зробимо скорочення електричної принципової схеми зображена на рисунок 3.2. При спрощенні схеми виключаємо прості елементи, такі як: резистори, котушки, конденсатори, кварцові резонатори, світодіоди і кнопки. Для наступних дій залишимо мікросхеми та роз'єми.

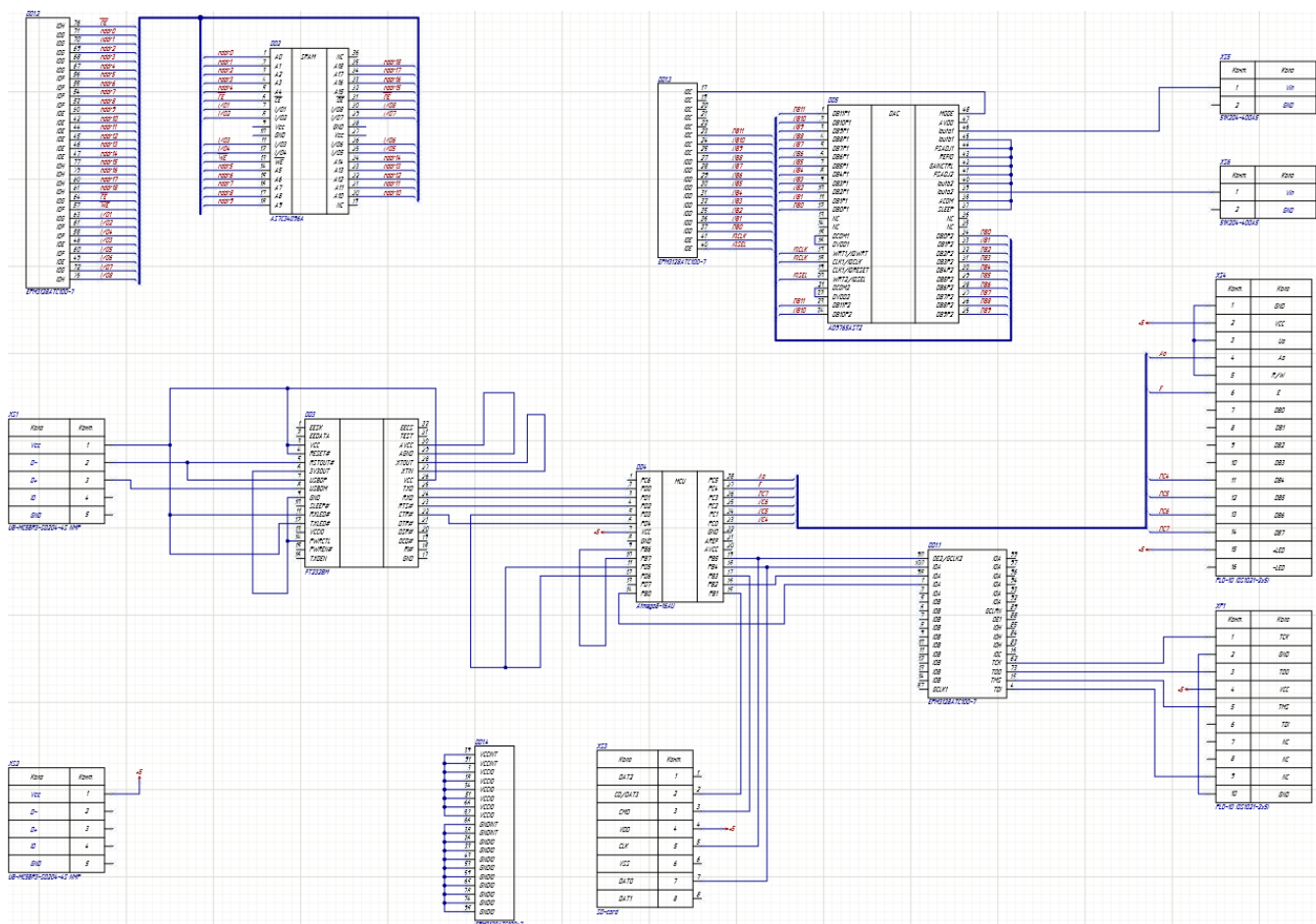


Рисунок 3.2 - Спрощена схема електрична принципова

Приберемо зв'язки землі. Кнопки мають не великий розмір тому розмістимо на краю плати. Приберемо з обрахунку стабілізатори напруги. Отже маємо схему яка зображена на рисунку 3.2.

Маємо множину елементів:  $X = \{DD1, DD2, DD3, DD4, DD5, XP1, XS1, XS2, XS3, XS4, XS5, XS6\}$

Та множина посадкових місць:  $P = \{P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12\}$ .

Визначившись з множиною елементів і множиною посадкових місць для спрощеної схеми пронумеруємо посадкові місця і виставимо на робочій області результат зображено на рисунок 3.3.

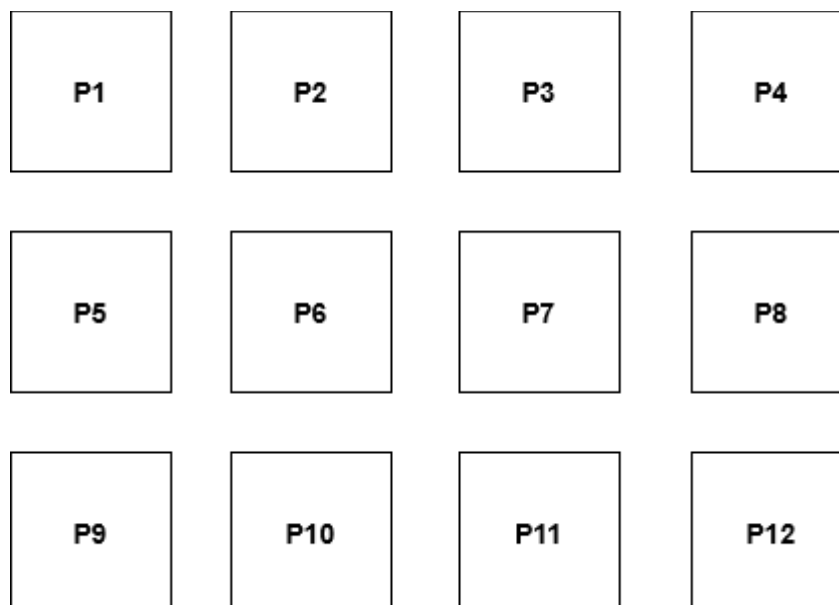


Рисунок 3.3 - Посадкові місця

Послідовний алгоритм представляє собою покроковий процес розташування елементів на посадкові місця. На кожному кроці вибирається елемент, що має максимальну зв'язність з вже розташованими елементами та розташовується в одну оптимальну вільну позицію при незмінному положенні раніш розміщених елементів. Критерій оптимізації: мінімальна сумарна довжина зв'язків між розміщеними елементами. Опишемо спрощену схему на рисунку 3.2 матрицею зв'язків А.

Таблиця 3.1 — Матрицею зв'язків А

	DD1	DD2	DD3	DD4	DD5	XP1	XS1	XS2	XS3	XS4	XS5	XS6	sum
DD1		30	0	4	15	4	0	0	2	0	0	0	55
DD2	30		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
DD3	0	0		4	0	0	3	0	0	0	0	0	7
DD4	4	0	4		0	0	0	1	4	6	0	0	19
DD5	15	0	0	0		0	0	0	0	0	1	1	17
XP1	4	0	0	0	0		0	1	0	0	0	0	5
XS1	0	0	3	0	0	0		0	0	0	0	0	3
XS2	0	0	0	1	0	1	0		1	1	0	0	4
XS3	2	0	0	4	0	0	0	1		0	0	0	7
XS4	0	0	0	6	0	0	0	1	0		0	0	7
XS5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		0	1
XS6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		1

По центру розмістимо елемент з найбільшою кількістю зв'язків DD1 і DD4. Чотири елемента які мають найбільшу кількість зв'язків з елементом DD1 розміщуємо на сусідні місця. Розміщуємо DD5 на посадкове місце P8 бо даний елемент має з'єднання з елементом DD1. По правих кутах на посадкових місцях P4 і P12 розмістимо роз'єми XS5, XS6 бо вони мають з'єднання лише з елементом DD5. Елемент XS3 розміщуємо на посадковому місці P10 бо дане місце є сусіднім з посадковим місцем на якому знаходиться елемент DD4 і з елементом DD1 по діагоналі. Елементи DD3 і XS4 встановлюємо на посадкові місця які знаходяться поруч з посадковим місцем P6 на якому вже знаходиться елемент DD4. Встановлюємо елементи які мають найменшу кількість зв'язків на посадкові місця які залишилися не використані.

В результаті отримаємо схему розміщення елементів для друкованої плати яка зображена на рисунку 3.4.





- не включати маловивідні елементи. Послідовно ввімкнуті елементи закоротити (R, C, VD,...);
- виключити ланцюги живлення та “землі” для ІС.

					ДК81.434811.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

## **Розділ 4. Вибір і обґрунтування типу матеріалу, методу виготовлення і класу точності ДП**

### **4.1. Вибір друкованої плати**

#### **4.1.1. Вибір типу друкованої плати**

Друкована плата призначена для електричного з'єднання і являє собою ізоляційне підставу на лицьовій стороні якого розміщені конструктивні елементи, а на зворотному боці розміщені елементи друкованого монтажу: друковані провідники, контактні майданчики, металізовані монтажні отвори.

Друковані плати за конструкцією поділяються на такі класи: односторонні (Одношарові) - ОДП, двосторонні (двошарові) - ДДП і багатошарові - БДП.

ОДП мають проводити малюнок на одній стороні діелектричного підстави. вони прості за конструкцією і виготовлення. Монтажні і трасувальні можливості цих плат низькі. Надійність ОДП і механічна міцність кріплення елементів також невисока.

ДДП мають проводити малюнок на двох сторонах підстави. Вони мають високу щільністю монтажу, підвищеною надійністю з'єднань. ДДП дозволяють полегшити трасування провідників і оптимізувати розміри плати завдяки щільному розміщенню елементів. ДДП мають високу механічну міцність їх кріплення. Ці ДП допускають монтаж штирьових та SMD елементів з двох боків. Це дозволяє реалізувати на них більш складні схеми, ніж на ОДП. Тому ДДП широко застосовуються в електронній апаратурі.

БДП відрізняються високою трасувальною здатністю та щільністю монтажу елементів. БДП поділяють на чотирьох-шарові ДП попарного пресування і багатошарові ДП з металізацією наскрізних отворів.

Чотирьох-шарові ДП попарного пресування відносно прості у виготовленні та є самим дешевими з багатошарових плат. Вони мають високу трасувальну здібність у порівнянні з аналогічними двошаровими платами. Вартість БДП висока та залежить від кількості шарів та технології. БДП часто використовують у високошвидкісній ЕА та там, де потрібно забезпечити мінімальні габарити та вагу.

В даній роботі друкована плата має малу кількість елементів. Також за умовами ТЗ не стоїть завдання в забезпеченні мінімальних габаритів та ваги, тому нема необхідності використовувати БДП. Також ОДП не дозволяє спроектувати дану друковану плату бо потребуватиме багато перемичок що зменшить надійність друкованої плати і ускладнить виробництво. Отже оптимальним вибором є ДДП.

#### 4.1.2. Вибір матеріалу ДП

При виробництві ДП для основи застосовуються матеріали, які повинні мати:

- високі електроізоляційні властивості;
- достатню механічну міцність;
- бути стійкими до кліматичних впливів.

Цим вимогам задовольняють електротехнічні матеріали склотекстоліт, кераміка, фторопластова плівка, сапфір і ін. В даний час введено новий параметр опірність займання. За цим параметром виділені полімерні композиційні матеріали. FR-1 ... FR-5. Найбільш поширеним матеріалом для виробництва ДДП і БДП є FR-4. Стандартний FR-4 представляє собою композитний матеріал на основі скловолокна. Застосування FR-4 дозволяє отримати отвори високої якості, а це важливо для монтажу елементів в отвори.

Отже вибираємо матеріал діелектричної основи FR-4 товщина якого становить 1,5 мм з 2 шарами міді товщиною 35 мкм.

#### 4.1.3. Вибір класу точності ДП

Виходячи із складності проектованої РЕА і вживаної елементної бази вибирають клас точності ДП.

Відповідно до ДСТУ (ГОСТ 23751-86) "Плати друковані. Основні параметри конструкції" виділені 5 класів точності Таблиця 4.1. Вибір класу точності завжди пов'язаний з конкретним виробництвом.

Клас точності, як одна з характеристик друкованої плати, визначає номінальні, мінімальні, максимальні і точностні значення елементів друкованого малюнка і параметрів друкованих плат (діаметри отворів, габаритні розміри і т. ін.).

Вибраний клас точності при подальшій розробці може бути змінений, оскільки конструювання є ітераційний процес синтезу через аналіз.

Точність виготовлення ДП залежить від комплексу технологічних параметрів і з практичної точки зору визначає основні параметри елементів ДП. В першу чергу це відноситься до мінімальної ширини провідників, мінімального зазору між елементами проводить малюнка і до ряду інших параметрів.

Таблиця 4.1 – Основні параметри елементів ДП

Умовне позначення	Номінальне значення основних розмірів для класу точності				
	1	2	3	4	5
b, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
S, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
b <sub>по</sub> , мм	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025
K <sub>дт</sub>	0,4	0,4	0,33	0,25	0,2

У таблиці 4.1 параметр  $b$  - ширина друкованого провідника, мм;

$S$  - відстань між краями сусідніх елементів проводить малюнка, мм;

$b_{по}$  - гарантований поясок, мм;

$K_{дт}$  - відношення номінального значення діаметра найменшого з металізованих отворів до товщини друкованої плати.

Оберемо клас точності опираючись на типи корпусів і щільність монтажу. В проекті використовуються SMD-компоненти з достатньо високою щільністю монтажу, тому вибираємо 4 клас точності.

#### 4.1.4. Вибір і обґрунтування методу виготовлення друкованої плати

Метод виготовлення друкованих плат суттєво впливає на їх схемо-конструкторські та експлуатаційно-економічні характеристики. Метод виготовлення ДП вибирають залежно від складності принципової електричної схеми, конструктивно-технологічних вимог до виробу та оснащеності підприємства, необхідним устаткуванням і оснащенням. Методи виготовлення друкованої плати відрізняються за способом нанесення зображення друкованих провідників та способом отримання провідного малюнка.

Існує кілька методів виготовлення друкованих плат: хімічний (Субтрактивний), електрохімічний (адитивний), комбінований позитивний метод, напіваадитивний метод з диференціальним травленням.

Адитивні методи засновані на виборчому осадженні струмопровідного покриття на діелектричну основу, на яку заздалегідь може наноситися шар клейової композиції.

Фотохімічний спосіб передбачає нанесення на фольгований матеріал фоторезисту і засвічення його через фотошаблон з витравленням фольги після формування малюнка. Цей метод має найвищу точність, не вимагає

складного устаткування і дозволяє легко перебудовувати виробництво на нові види друкованих плат. Використовується в серійному і дослідному виробництві при великій номенклатурі складних плат.

Для виготовлення друкованого вузла обраний комбінований позитивний метод, оскільки він має ряд переваг перед іншими перерахованими вище методами:

- можливість відтворення всіх типів друкованих елементів з високим ступенем дозволу;
- захищеність фольгою ізоляції від технологічних розчинів, отже хороша надійність ізоляції;
- хороша міцність зчеплення (адгезія) металевих елементів плати з діелектричним підставою.

#### 4.2. Конструкторсько-технологічний розрахунок елементів друкованого монтажу

При конструкторсько-технологічному розрахунку необхідно використовувати граничні значення елементів друкованого монтажу ПМ з урахуванням похибки їх виконання. Необхідні граничні значення елементів друкованого монтажу і допустимі похибки наведені в Таблиці 4.1 і Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Граничні значення основних параметрів ПМ

Параметри	Позначення	Клас точності			
		2	3	4	5
Ширина друкованого провідника, мм	$b_{\text{пр}}$	0,4	0,25	0,15	0,1
Відстань між елементами друкованого монтажу, мм	$l^r$	0,4	0,25	0,15	0,1
Відношення діаметра металізації отвора до товщини плати	$K_{\text{дт}}$	0,4	0,33	0,25	0,2
Гарантований поясок, мм	$b_{\text{по}}$	0,2	0,1	0,05	0,025

Таблиця 4.3 - Допустимі похибки виконання елементів ПМ

Зсув друкованого провідника щодо КС, мм	$\delta_{сп}$	0,08
Розташування отворів щодо вузла КС, мм	$\delta_o$	0,07
Похибка розташування КП щодо вузла КС, мм	$\delta_{кп}$	0,15
Похибка топології і фотошаблону, мм	$\delta_{фф}$	0,06
Похибка розташування КП щодо вузла КС на фотошаблонах, мм	$\delta_{фш}$	0,05

#### 4.2.1. Визначення мінімальної ширина друкованого провідника за сталим струмом

Мінімальна ширина друкованого провідника по постійному струмі для ланцюгів живлення і землі визначається виразом:

$$b_{min I} = \frac{I_{max}}{j_{доп} \cdot t_{пров}}, \quad (4.1)$$

де  $I_{min I}$  – максимально можливий струм в колі, А;

$j_{доп}$  - допустима щільність струму для ДП, виготовлених комбінованим позитивним методом,  $j_{доп} = 48 \text{ А/мм}^2$ ;

$t_{пров}$  – товщина друкованого провідника, яка визначається виразом, мм.

$$t_{пров} = h_{ф} + h_{зм} + h_{хм},$$

де  $h_{ф}$  — товщина фольги,  $h_{ф} = 0,035 \text{ мм}$ ;

$h_{гм}$  — товщина шару гальванічно обложеної міді,  $h_{гм} = 0,055 \text{ мм}$ ;

$h_{хм}$  - товщина шару хімічно обложеної міді,  $h_{хм} = 0,0065 \text{ мм}$ .

$$t_{пров} = h_{ф} + h_{зм} + h_{хм} = 0,035 + 0,055 + 0,0065 = 0,097 \text{ мм},$$

Таблиця 4.4 - Надані струми використовуваних мікросхем

Назва	Кількість	$I_{потр}$ , мА
AS7C34096A	1	110
AD9765ASTZ	1	90
Atmega8-16AU	1	150
ЕРМ3128АТС100-7	1	250
PLS-16	1	100



$$I_{max} = 110 + 90 + 150 + 250 + 100 = 700 \text{ мА}$$

Знайшовши всі невідомі можемо обрахувати мінімальну ширину друкованого провідника за формулою 4.1.

$$b_{min I} = \frac{I_{max}}{j_{доп} \cdot t_{пров}} = \frac{0,7}{48 \cdot 0,097} = 0,15 \text{ мм}$$

#### 4.2.2. Мінімальна ширина провідника з урахування допустимого падіння на ньому напруги

Мінімальна ширина провідника з урахуванням допустимого падіння на ньому напруги визначається за формулою 4.2.

$$b_{min U} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot L_{пров}}{t_{пров} \cdot U_{доп}}, \quad (4.2)$$

де  $\rho$  - питомий опір провідника, виготовленого комбінованим методом,  
 $\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} ;$

$L_{пров}$  - довжина найдовшого друкованого провідника на ДП;

$U_{доп}$  - допустиме падіння напруги на друкованому провіднику,  
 $U_{доп} = 5\% \cdot V_{cc}.$

$$U_{доп} = 0,05 \cdot 5 = 0,25 \text{ В}$$

$$L_{пров} = 0,156 \text{ м}$$

$$b_{min U} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot L_{пров}}{t_{пров} \cdot U_{доп}} = \frac{0,0175 \cdot 0,7 \cdot 0,156}{0,097 \cdot 0,25} = 0,08 \cdot \text{мм}$$

#### 4.2.3. Розрахунок діаметра монтажної отвору

Розрахунок діаметра монтажної отвору виконується за формулою (4.3).

$$d = d_{вс} + \Delta d_{мо} + r, \quad (4.3)$$

де  $d_{вс}$  - діаметр виведення елемента;

$\Delta d_{\text{мо}}$  - нижнє граничне відхилення від номінального діаметра МО,  $\Delta d_{\text{мо}} = 0,1 \text{ мм}$ ;

$r$  - різниця між мінімальним діаметром МО  $d_{\text{мо}}$  і максимальним діаметром виводу  $d_{\text{ве}}$ ,  $r = 0,2 \text{ мм}$ .

Проведемо розрахунок для котушки індуктивності

$$d = 0,65 + 0,1 + 0,2 = 0,95 \text{ мм}$$

#### 4.2.4. Визначення діаметра контактного майданчика

Параметри  $D_{\text{min}}$  і  $D_{\text{max}}$  визначаються формулами 4.4 і 4.5 відповідно.

$$D_{\text{min}} = D_{\text{minl}} + 1,5 h_{\text{ф}} + 0,03, \quad (4.4)$$

де  $D_{\text{minl}}$  - мінімальний ефективний діаметр контактної майданчика визначається виразом (4.6);

$h_{\text{ф}}$  - товщина фольги, коефіцієнт 1,5 враховує підтравлювання друкованого провідника в ширину, коефіцієнт 0,03 враховує комбінований метод виготовлення,  $h_{\text{ф}} = 35 \text{ мкм}$ .

Формула для знаходження максимального діаметра контактного майданчика:

$$D_{\text{max}} = D_{\text{min}} + 0,02 \quad (4.5)$$

$$D_{\text{minl}} = 2 \cdot \left( b_{\text{по}} + \frac{d_{\text{max}}}{2} + \delta_o + \delta_{\text{км}} \right), \quad (4.6)$$

де  $d_{\text{max}}$  - максимальний діаметр просверленого отвору ДП, мм,

$b_{\text{по}}$  - гарантований поясок,  $b_{\text{по}} = 0,05 \text{ мм}$  для 4 класу точності;

$\delta_o$  - похибка розташування центру отвору щодо вузла КС,  $\delta_o = 0,07 \text{ мм}$ ;

$\delta_{\text{км}}$  - похибка розташування центру КМ щодо вузла КС,  $\delta_{\text{км}} = 0,05$ .

Максимальний діаметр просвердленого отвору обрховується:

$$d_{max} = d + \Delta d + (0,1 \dots 0,15), \quad (4.7)$$

де  $d$  – номінальний діаметр МО, мм;

$\Delta d$  - допуск на діаметр отвору,  $\Delta d = 0,05$  мм.

$$d_{max} = 0,95 + 0,05 + 0,1 = 1,1$$

$$D_{minI} = 2 \cdot \left( b_{no} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_o + \delta_{км} \right) = 2 \cdot \left( 0,05 + \frac{1,1}{2} + 0,07 + 0,05 \right) = 1,44$$

$$D_{min} = D_{minI} + 1,5 h_{\phi} + 0,03 = 1,44 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 1,52 \text{ мм}$$

$$D_{max} = D_{min} + 0,02 = 1,52 + 0,02 = 1,54 \text{ мм}$$

#### 4.2.5. Визначення мінімальної і максимальної ширини провідника на друкованій платі

Мінімальна ширина провідника на друкованій платі визначається за формулою 4.8. Максимальна ширина провідника на друкованій платі визначається за формулою 4.9.

$$b_{min} = b_{np}^2 + 1,5 \cdot h_{\phi} + 0,03 \quad (4.8)$$

де  $b_{np}$  – мінімальна ширина провідника, мм.

Мінімальна ширина провідника визначається з таблиця 4.2. Для 4-го класу точності ДМ  $b_{np}^2 = 0,15$  мм.

$$b_{max} = b_{min} + 0,02 \quad (4.9)$$

Визначимо мінімальну і максимальну ширину провідника.

$$b_{min} = b_{np}^2 + 1,5 \cdot h_{\phi} + 0,03 = 0,15 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 0,23 \text{ мм}$$

$$b_{max} = 0,23 + 0,02 = 0,25 \text{ мм}$$

#### 4.2.6. Визначення мінімальної відстані між двома сусідніми провідниками

$$S_{minIII} = L_o - (b_{min} + 2 \delta_{cn}),$$

де  $L_o$  - крок координатної сітки,  $L_o = 1$  мм;

$\delta_{\text{сп}}$  - похибка зсуву провідника,  $\delta_{\text{сп}} = 0,05$  мм.

$$S_{\text{minПП}} = L_o - (b_{\text{min}} + 2 \delta_{\text{сп}}) = 1 - (0,23 + 2 \cdot 0,05) = 0,67 \text{ мм}$$

#### 4.2.7. Визначимо мінімальну відстань між провідником і контактним майданчиком

$$S_{\text{minПКП}} = L_o - (0,5 \cdot D_{\text{max}} + \delta_{\text{кп}} + 0,5 b_{\text{max}} + \delta_{\text{сп}}), \quad (4.9)$$

де  $L_o$  - відстань між центрами елементів,  $L_o = 1$  мм;

$b_{\text{max}}$  - максимальну ширину провідника, мм;

$D_{\text{max}}$  - максимальний діаметр КП, мм;

$\delta_{\text{кп}}$  - похибка,  $\delta_{\text{кп}} = \delta_{\text{сп}} = 0,05$  мм.

$$S_{\text{minПКП}} = 1 - (0,5 \cdot 1,54 + 0,05 + 0,5 \cdot 0,25 + 0,05) = 0,79 \text{ мм}$$

#### 4.2.8. Визначення мінімальної відстань між двома контактними майданчиками

$$S_{\text{minКПКП}} = L'_o - (D_{\text{max}} + 2 \cdot \delta_{\text{кп}}), \quad (4.10)$$

де  $L'_o$  - відстань між центрами сусідніх КП,  $L'_o = 2,5$  мм;

$D_{\text{max}}$  - максимальний діаметр КП;

$\delta_{\text{кп}}$  похибка розташування КП щодо вузла координатної сітки,  $\delta_{\text{кп}} = 0,05$  мм.

$$S_{\text{minКПКП}} = 2,5 - (1,54 + 2 \cdot 0,05) = 0,86 \text{ мм}$$

#### Висновок до розділу:

В даному розділі було вибрано тип друкованої плати, матеріал друкованої плати, клас точності і методу виготовлення друкованої плати. Для даного проекту найкращий тип друкованої плати виявилося двостороння друкована плата. Матеріал для друкованої плати було обрано FR-4 з товщиною 1,5 мм з 2 шарами міді товщиною 35 мкм. Було обрано 4 клас

точності. Виготовлення друкованого вузла обрано комбінований позитивний метод.

Було обраховано основні параметри для проектування друкованої плати. Такі як мінімальна ширина доріжок для ланцюгів живлення, мінімальні відстані між провідниками, діаметр монтажного отвору, діаметр контактного майданчика. Для компонентів в SMD корпусі контактні майданчики були взяті з документації відповідно до кожного компонента. Мінімальна ширина доріжки складає 0,23 мм ця ширина доріжки не дозволить провести її між виводами мікросхем, виключення є мікросхема AS7C34096A-12TCN яка має відстань між краями двох сусідніх майданчиків 0,63 мм.

					ДК81.434811.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

## Розділ 5. Електричний розрахунок друкованої плати

Метою розрахунку є аналіз працездатності проекту. Обрахунок паразитних параметрів друкованої плати.

Зі зменшенням геометричних розмірів конструктивних елементів і підвищенням щільності їх розміщення між сигнальними провідниками виникають місткість і індуктивна зв'язку. При перемиканні елементів по сигнальним ланцюгах протікають високочастотні імпульсні струми з крутими фронтами, які внаслідок наявності паразитних зв'язків наводять на сусідніх сигнальних провідниках перешкоди. Останні за певних умов викликають помилкове спрацьовування дискретних елементів. Необхідно, щоб значення перешкод не перевищували допустиму межу.

Отже, потрібно провести такі розрахунки: падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику, потужність втрат, паразитна ємність між двома сусідніми провідниками, індуктивність двох паралельних друкованих провідників. Для того щоб переконатися в працездатності схеми.

### 5.1. Визначте падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику

Падіння напруги на друкованому провіднику визначається

$$U_{\text{пад}} = \frac{\rho \cdot I_{\text{max}} \cdot l_{\text{np}}}{b_{\text{np}} \cdot t_{\text{np}}}, \quad (5.1)$$

де  $\rho$  - питомий об'ємний опір, для комбінованого позитивного методу виготовлення ДП,  $\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$  ;

$l_{\text{np}}$  - максимальна довжина друкованого провідника,  $l_{\text{np}} = 0,166 \text{ м}$ ;

$t_{\text{np}}$  - товщина провідника, мм;

$b_{\text{np}}$  - ширина друкованого провідника, мм;

$I_{\text{max}}$  - струм в провіднику, А.

$$U_{пад} = \frac{0,0175 \cdot 0,7 \cdot 0,166}{0,035 \cdot 0,23} = 250 \text{ мВ}$$

Розраховане значення падіння напруги не перевищує допустиме падіння напруги живлення.

## 5.2. Визначимо потужність втрат двосторонньої друкованої плати

Потужність втрат визначається:

$$P_{пот} = 2 \pi f \cdot C \cdot U_{жив}^2 \cdot \operatorname{tg} \sigma, \quad (5.2)$$

де  $f$  - частота,  $f = 1$  Гц;

$\epsilon_n$  - для FR-4 становить,  $\epsilon_n = 4,5$ ;

$\operatorname{tg} \sigma$  - тангенс кута діелектричних втрат, для матеріалу FR4  $\operatorname{tg} \sigma = 0,002$ .

$$C = \frac{0,009 \cdot \epsilon \cdot S_m}{h}, \quad (5.3)$$

де  $C$  - ємність друкованої плати;

$\epsilon$  - діелектрична проникність, для FR4  $\epsilon = 4,5$ ;

$S_m$  - площа металізації,  $\text{мм}^2$ ;

$h$  - товщина плати,  $\text{мм}$ .

$$C = \frac{0,009 \cdot 4,5 \cdot 5462,31}{1,5} = 147,48 \text{ нФ}$$

$$P_{пот} = 2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 147,48 \cdot 10^{-12} \cdot 5^2 \cdot 0,002 = 46,3 \text{ нВт}$$

## 5.3. Паразитна ємність між двома сусідніми провідниками однаковою ширині, розташованими на одній стороні плати

Паразитна ємність між двома сусідніми провідниками однаковою ширині, розташованими на одній стороні плати визначається за формулою:

$$C = \frac{0,12 \cdot \epsilon \cdot l_{np}}{\lg\left(\frac{2S}{b_{np} + t_{np}}\right)}, \quad (5.4)$$

де  $S$  - відстань між двома паралельними провідниками, мм;

$b_{np}$  - ширина друкованого провідника, мм;

$t_{np}$  - товщина друкованого провідника, мм;

$l_{np}$  - довжина взаємного перекриття двох паралельних провідників, мм.

Проведемо розрахунок для двох сусідніх доріжок довжиною 7,3 мм.

$$C = \frac{0,12 \cdot 4,5 \cdot 7,3}{\lg\left(\frac{2 \cdot 0,15}{0,035 + 0,23}\right)} = 34,2 \text{ нФ}$$

#### 5.4. Взаємна індуктивність двох паралельних друкованих провідників рівної довжини

$$M = 0,02 (l_{np} \cdot \lg\left(\frac{\sqrt{l_{np}^2 - L_o^2} + l_{np}}{L_o}\right) - \sqrt{l_{np}^2 - L_o^2} + l_{np}), \quad (5.5)$$

де  $l_{np}$  - довжина перекриття паралельних провідників,  $l_{np} = 1,386$  см;

$L_o$  - відстань між осьовими лініями двох паралельних провідників,  $L_o = 0,0415$  см.

$$M = 0,02 (1,386 \cdot \lg\left(\frac{\sqrt{1,386^2 + 0,0415^2} + 1,386}{0,0415}\right) - \sqrt{1,386^2 + 0,0415^2} + 1,386) = 23,6 \text{ нГн}$$

#### Висновок до розділу:

В даній розділі було проведено електричний розрахунок друкованої плати. Результат обрахунку падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику становить 250 мВ знаходиться в межах допустимого значення. Потужність втрат що складає 46,3 пВт на схему впливу не завдасть. Паразитної ємності 34,2 пФ і взаємної індуктивності 23,6 пГн не впливають на роботу друкованого вузлу. Може вважати що паразитні параметри друкованої плати на працездатність схеми значного впливу не завдають.



## Розділ 6. Розрахунок основних показників надійності друкованого вузлу

З точки зору теорії надійності, будь-який виріб можна характеризувати його властивостями, технічним станом та пристосованістю до відновлення справності.

Найважливішим комплексом властивостей виробу є його надійність.

Надійністю називають властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників в заданих межах, що відповідають заданим режимам та умовам використання, технічного обслуговування, зберігання та транспортування.

Найбільш точна кількісна міра надійності кожного конструктивного елементу його індивідуальна напрацювання до моменту виникнення відмови. На практиці ж досить повна характеристика надійності - щільність розподілу часу безвідмовної роботи даного типу КЕ  $f(t)$  і інтенсивність відмов  $\lambda(t)$ .

Знаючи  $\lambda$ , можна визначити інші кількісні характеристики надійності в момент часу  $t$ . Визначаємо ймовірність безвідмовної роботи за формулою 6.2 ймовірність відмови 6.1.

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (6.1)$$

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (6.2)$$

Середній час напрацювання на відмову:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} \quad (6.3)$$

Формула для розрахунку вірогідності відмови елементу схеми (6.4).

Сумарна інтенсивність відмов обраховується за формулою (6.5)

$$\lambda_i = \lambda_{oi} \cdot K_n \cdot \alpha_e \cdot \alpha_t, \quad (6.4)$$

де  $K_n$  - коефіцієнта навантаження;

$\alpha_e$  – поправочний коефіцієнт на вплив зовнішніх впливів (в лабораторних умовах  $\alpha_e = 1$ );

$\alpha_t$  – поправочний температурний коефіцієнт;

$\lambda_{0i}$  – вірогідність відмови  $i$ -го елемента.

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^n \lambda_{pi} \quad (6.5)$$

Для розрахунку сумарної інтенсивності відмов потрібно обрахувати коефіцієнта навантаження для елементів.

Коефіцієнт навантаження для резисторів розраховуються за формулою 6.6. В схемі яка проектується мінімальний опір становить резистори 27 Ом. Слід зазначити, що ці резистори підключені до ліній D+ і D- USB інтерфейсу, які слугують для передачі даних в обидві сторони. Так як ці резистори приєднані до інформаційних ліній то струми які протікають є незначні, тому пропустимо їх. Наступний мінімальний номінал є 470 Ом. Для нього визначимо коефіцієнт навантаження. Напруга живлення становить 5 В.

$$K_n = \frac{P_{роб}}{P_{ном}} = \frac{U_{роб}^2}{R \cdot P_{ном}} \quad (6.6)$$

$$K_n = \frac{5^2}{470 \cdot 0,1} = 0,53$$

Коефіцієнт навантаження для конденсаторів розраховуються за формулою 6.7. В схемі є конденсатори як керамічні так і електrolітичні, але у всіх номінальна напруга дорівнює 16 В, тому коефіцієнт навантаження для конденсаторів буде спільний.

$$K_n = \frac{P_{роб}}{P_{ном}} = \frac{U_{роб}}{U_{ном}} \quad (6.7)$$

$$K_n = \frac{5}{16} = 0,31$$

Коефіцієнт навантаження для транзисторів по струму і по потужності розраховуються за формулами за струмом 6.8 і за потужністю 6.9.

$$K_{HT} = \frac{I_{роб}}{I_{ном}} \quad (6.8)$$

$$K_{HP} = \frac{P_{роб}}{P_{ном}} \quad (6.9)$$

Дані для розрахунку часу напрацювання до першої відмови занесені до таблиці 6.1. Кліматичне виконання приладу УХЛ.3.1. Максимальна температура роботи плюс 40°C. Знаючи коефіцієнти навантаження і температуру визначаємо коефіцієнт  $\alpha_t$  для кожного типу. Даний друкований вузол розрахований для експлуатації в лабораторних умовах, тому вибираємо  $\alpha_e = 1$ .

В таблиці 6.1 наведено всі елементів в схемі що розробляється, кількість компонентів кожного типу, коефіцієнти навантаження, теплові коефіцієнти. В таблиці також обраховано сумарну інтенсивність відмов за формулою 6.5.

Таблиця 6.1 - Інтенсивності відмов елементів

Компонент	N	$\lambda_{0e} \cdot 10^{-6}, \text{год}^{-1}$	$K_H$	$\alpha_t$	$\alpha_e$	$N \cdot \lambda_{0e} \cdot K_H \cdot \alpha_t \cdot \alpha_e \cdot 10^{-6}$
Конденсатори керамічні	8	0,05	0,31	0,05	1	0,01
Конденсатори електролітичні	3	0,55	0,31	0,8	1	0,41
Резистори	11	0,05	0,53	0,8	1	0,23
Мікросхеми	8	1	0,8	2	1	12,8
Пристрої індикації	2	0,7	0,2	1,1	1	0,3
Котушки індуктивності	1	0,3	1	1	1	0,3
Кварцеві резонатори	2	0,37	0,8	1,2	1	0,71
Перемикачі	3	0,3	1	2	1	1,8
Контакти роз'ємів	48	0,2	1	1,7	1	16,3
Пайка	397	0,004	1	0,1	1	0,16
Друкована плата	2	0,2	1	1	1	0,4
Сумарна інтенсивність відмови друкованого вузла $\lambda_{0e} \cdot 10^{-6}, \text{год}^{-1}$						33,42

Використаємо обраховані дані з таблиці 6.1 для обрахунку ймовірності відмови за формулою 6.1 та ймовірність безвідмовної роботи по формулі 6.2. Побудуємо графіки ймовірності відмови і ймовірності безвідмовної роботи і відобразимо на рисунку 6.1.

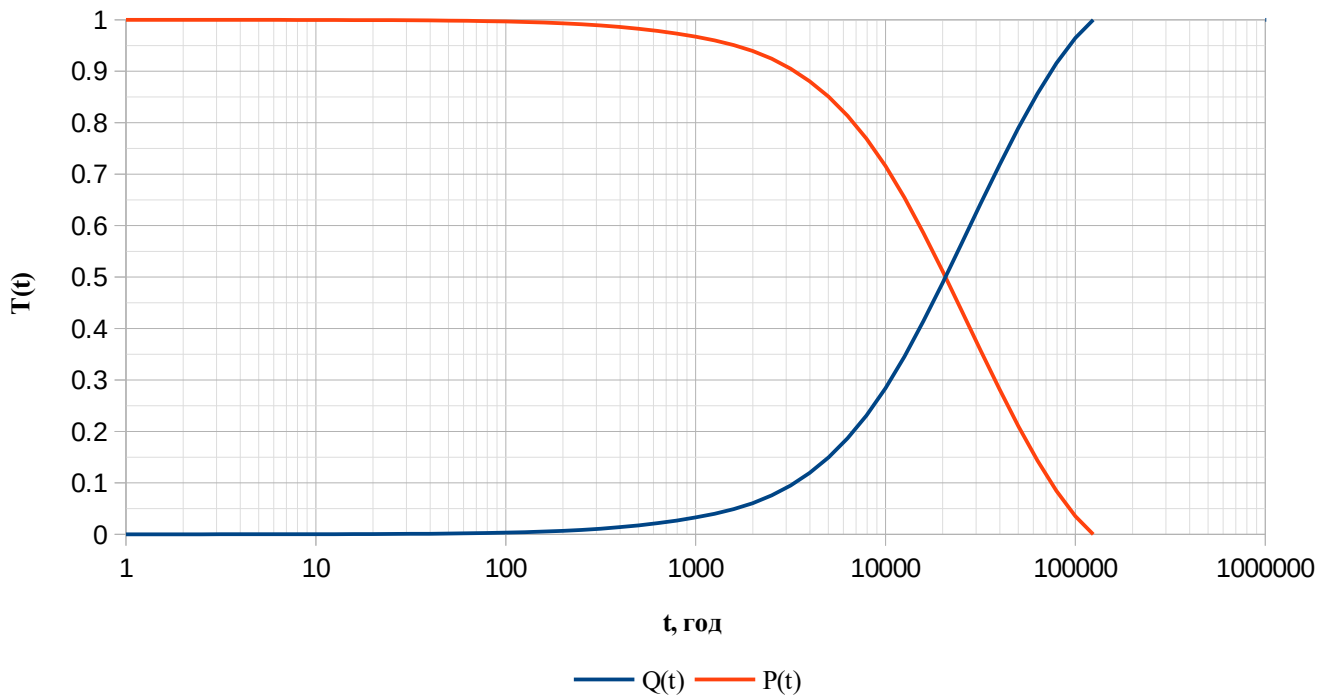


Рисунок 6.1 - Ймовірність відмови і безвідмовної роботи

Обрахуємо за формулою 6.3 середній час напрацювання:

$$T_{cp} = \frac{1}{33,42 \cdot 10^{-6}} = 29922 \text{ год}$$

В технічному завданні вказано середній час напрацювання 25000 год. Отже середній час напрацювання відповідає технічному завданню.

### Висновок до розділу:

В даній роботі було обраховано надійність друкованої плати. В результаті ми отримали середнє напрацювання на відмову 29922 год, той же час в технічному завданні вказано більше 25000 год. Отже ми переконалися в дотримання умов технічного завдання.

## **Розділ 7. Методика проектування друкованого вузлу в середовищі Altium Design**

### **7.1. Основні відомості**

Altium Designer - це система, що дозволяє реалізовувати проекти електронних засобів на рівні схеми або програмного коду з наступною передачею інформації проектувальнику ПЛІС або друкованої плати. Відмінною особливістю програми є проектна структура і наскрізна цілісність ведення розробки на різних рівнях проектування. Вся робота в Altium Designer поділена на такі етапи:

- Створення бібліотеки умовно графічних позначень і посадкових місць;
- Створення принципової схеми. Формування переліку елементів;
- Створення двосторонньої друкованої плати

### **7.2. Створення бібліотеки умовно графічних позначень і посадкових місць**

Умовні графічні відображення і посадочні місця компонентів формуються в редакторі бібліотек (Library Editor). У середовищі Altium Designer є чотири типи бібліотек: бібліотеки моделей, бібліотеки символів, інтегровані бібліотеки, бібліотеки бази даних. Основною панеллю, з якої ведеться робота в редакторі схем, є панель Libraries. Altium Designer ділить об'єкти, на графічні та електричні. При створенні бібліотек умовно графічних позначень і посадкових місць використовується графічні об'єкти.

До графічних об'єктів належать:

- лінія;
- дуга,

- еліптична дуга;
- еліпс, зокрема окружність;
- сплайн-крива;
- прямокутник, округлений прямокутник;
- багатокутник;
- секторна діаграма;
- графік.

### 7.3. Створення принципової схеми. Формування переліку елементів

Є налаштування формату листа, а також використання вже готового шаблону листа. У редакторі Altium Designer для редактора принципової схеми є свій набір панелей і інструментів для роботи. При створенні принципової схеми використовується графічні об'єкти.

До електричних об'єктів належать:

- схемні компоненти;
- лінії електричного зв'язку;
- лінії груповий зв'язку;
- лінії груповий зв'язку у вигляді джгута;
- ідентифікатори ланцюгів.

Присутня функція автоматичної нумерації десигнаторів елементів (Annotation). Після створення електричної принципової схеми є можливість експортувати в інші формати PDF і т. ін. Також присутня функція створення переліку елементів.

#### 7.4. Створення двосторонньої друкованої плати

Після створення файлу PCB потрібно перенести всі елементи з електричної принципової схеми. Після перенесення є можливість оновити з'єднання якщо відбулося змінення в схемі електричної принципової. Зміна відбудеться не шкодячи вже виставлених компонентів. Також можливе оновлення бібліотеки посадкових місць.

Перенівши елементи до файлу потрібно зробити такі етапи: формування контуру друкованої плати, налаштування стека шарів (Layer Stack Manager), налаштування правил (Rules), виставлення компонентів на друковану плату і кінцевий етап трасування. В редакторі присутні такі можливості створення паду, отвору, полігону, доріжок, тексту. Також є функція вирівнювання розташування елементів які були вибрані. У Altium Designer завдання інтерактивного трасування вирішується інструментом автотрасування розташованим в меню AutoRoute. Інструментарій автотрасування розташований в меню AutoRoute, в якому є такі інструменти:

All - трасування все провідників;

Net - трасування одного ланцюга;

Net Class - трасування класу ланцюгів;

Connection - трасування всіх ланцюгів які приєднані до даного виводу;

Area - трасування всіх провідників у виділеній області;

Room - трасування всіх провідників, між компонентами в обраній області розміщення;

Component - трасування всіх провідників, які підходять до вибраного компоненту;

Component Class - трасування всіх провідників, які підходять до обраного класу ланцюгів;

Connections on selected components - трасування всієї провідників всередині обраних компонентів;

Connections between selected components - трасування всіх провідників між обраними компонентами;

Fanout - трасування Fanout для обраного елемента (ланцюг, КП, компонент тощо).

При правильних налаштування правил друкованої плати автоматичне трасування може трасування добре, але все ж потребує людської корекції.

Отримана друкована плата може експортуватися в різні формати такі як DWG, STEP тощо.

					ДК81.434811.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48



## Висновок

Результатом курсової роботи є друкований вузол. Під час виготовлення друкованого вузлу було виконано такі завдання:

- опис та аналіз схеми електричної принципової;
- вибір та обґрунтування використання елементної бази;
- розміщення конструктивних елементів на друкованій платі;
- конструкторсько-технологічний розрахунок друкованої плати;
- електричний розрахунок друкованої плати;
- розрахунок основних показників надійності.

В першому розділі описано та проаналізовано схему електричну принципову.

В другому розділі було зроблено вибір елементної бази. Відштовхуючись від технічного завдання і технічних характеристик елементів включно з типом корпусу. Було підібрано компоненти для друкованого вузла.

В третьому розділі було розміщено конструктивні елементи на друкованій платі. Для цього було використано метод матричних зв'язків. Завдяки цьому методу було розміщено елементи з мінімальними довжинами доріжок між компонентами. Результат зображений на рисунку 3.4.

В четвертому розділі було вибрано матеріал для друкованої плати та розраховано конструкторсько-технологічний друкованої плати. В ході цього розділу було розібрано можливі матеріали і методи виготовлення друкованого вузла. Для даного вузлу було вибрано двосторонню друковану плату яка має матеріал діелектричної основи FR-4 товщина якого становить 1,5 мм з 2 шарами міді товщиною 35 мкм. Було обрано 4 клас точності. Метод

виготовлення друкованого вузла комбінований позитивний. Також в ході цього розділу було розраховано відстані:

- мінімальної ширина друкованого провідника,  $b_{min}=0,23 \text{ мм}$  ;
- контактного майданчика,  $D_{min}=1,52 \text{ мм}$  ;
- мінімальна відстань між двома сусідніми провідниками,  $S_{minПП}=0,67 \text{ мм}$  ;
- мінімальна відстань між провідником і контактним майданчиком,  $S_{minПКП}=0,79 \text{ мм}$  ;
- мінімальна відстань між двома контактними майданчиками,  $S_{minКПКП}=0,86 \text{ мм}$  .

Отже в цьому розділі було отримано значення для проектування друкованого вузлу.

В п'ятому розділі було проведено електричний розрахунок. Метою розрахунку є аналіз працездатності друкованого вузлу і обрахунок паразитних параметрів друкованої плати. В ході розрахунку було отримано такі значення:

- падіння напруги на найдовшому провіднику,  $U_{nad}=250 \text{ мВ}$  ;
- потужність втрат двосторонньої друкованої плати,  $P_{nom}=46,3 \text{ нВт}$  ;
- паразитна ємність між двома сусідніми провідниками однаковою ширині, розташованими на одній стороні плати,  $C=34,2 \text{ нФ}$  ;
- взаємна індуктивність двох паралельних друкованих провідників рівної довжини,  $M=23,6 \text{ нГн}$

Результат обрахунку падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику знаходиться в межах допустимого значення. Потужність втрат на схему впливу не завдасть. Паразитної ємності і взаємної індуктивності не

впливають на роботу друкованого вузлу. Отже в цьому розділі ми переконалися що паразитні параметри друкованої плати на працездатність схеми значного впливу не завдають.

В шостому розділі розраховали основні показники надійності друкованого вузлу. Виготовивши друковану плату потрібно переконатися щоб вона пропрацювала достатній час. Середній час напрацювання наведений в технічному завданні і складає 25000 год. Тому потрібно переконатися в тому що друкований вузол відповідає технічним вимогам. В результаті ми отримали середнє напрацювання на відмову 29922 год. Отже ми переконалися в дотримання умов технічного завдання.

Із аналізу всієї роботи можна зробити висновок що виготовлений друкований вузол є працездатний, а також відповідає всім поставленим вимогам і готовий до впровадження в серійне виробництво.

## Література

1. Фізико-теоретичні основи проектування радіоелектронної апаратури. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» В. Г. Губар, І. О. Адаменко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 10,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 221 с.
2. Методические Указания по проведению практических занятий по курсу «Физико-теоретические основы конструирования ЭВА» для студентов специальности направления подготовки 6.05092 «Радиоэлектронные аппараты» [Електронний ресурс] - Режим доступу :  
<https://onedrive.live.com/?authkey=%21ALzBaId8XEXUOO4&cid=D1785C298F1B017B&id=D1785C298F1B017B%213931&parId=D1785C298F1B017B%213895&o=OneUp>
3. Л. А. Брусницына Е. И. Степановских Технология изготовления печатных плат – Екатеринбург, «Издательство Уральского университета», 2015.
4. ГОСТ 23752-79 Платы печатные общие технические условия
5. ГОСТ 23751-86 Платы печатные основные параметры конструкции

## ДОДАТОК А

### Технічне завдання на проектування

#### 1. Найменування та галузь використання

Двоканальний синтезатор довільного сигналу. Синтезатор довільного сигналу формує сигнали довільної форми. Генератори сигналів застосовують для перевірки, виміру характеристик і тестування в граничних режимах. Призначений для використання в дослідницьких і вимірювальних лабораторіях, телекомунікаційній сфері, промисловому виробництві і в багатьох інших галузях.

#### 2. Підстава для розробки

Підставою для проведення курсової роботи є завдання, що видане викладачем згідно навчального плану на 6 семестр.

#### 3. Мета і призначення розробки

Метою розробки є розробка друкованого вузла для даного приладу.

Прилад використовується в лабораторних умовах. Цільова аудиторія студенти технічних наук, новачки в електроніці.

#### 4. Джерело розробки

Дана тема проекту розробляється не вперше, в якості джерела розробки береться розроблений раніше проект. В якості основного матеріалу взято статтю “Непрецизионный синтезатор сигналов произвольной формы.” на сайті <https://www.radiokot.ru/circuit/digital/measure/39/>

## 5. Технічні вимоги

### 5.1. Склад виробу й вимоги до пристрою, що розробляється.

Пристрій являє собою моноблочну конструкцію, яка містить рідкокристалічний дисплей, два виходу, usb-порт для зв'язку з комп'ютером, кнопки керування.

### 5.2. Показники призначення.

Пристрій повинен забезпечувати:

- збереження сигналів;
- кнопки переключення ;
- частота вибірки - 15 MSPS;
- амплітуда сигналів — 0..2В;
- шум 30мВ;
- частота аналогового сигналу: 114,4Гц - 7,5 МГц;
- сигнал однополярний.

### 5.3. Вимоги до надійності.

Середній час напрацювання на відмову повинен бути на менше 25000 год, враховуючи вартість і складність виготовлення даного пристрою.

### 5.4. Вимоги до технологічності.

Орієнтовані на передові прийоми виготовлення деталей і складання.

### 5.5. Вимоги до рівня уніфікації й стандартизації.

Для виготовлення пристрою передбачається застосування стандартних, уніфікованих деталей та виробів.

## 5.6. Вимоги безпеки обслуговування.

Керуватися загальними вимогами безпеки до апаратури низької напруги ГОСТ 12.2.007-75.

## 5.7. Вимоги до складових частин виробу, сировини, вихідних і експлуатаційних матеріалів.

Для виробництва пристрою використовують матеріали імпортного виробництва.

## 5.8. Умови експлуатації.

Кліматичне виконання УХЛ4 по ГОСТ 15150-69.

## 5.9. Вимоги до транспортування і зберігання.

Група умов зберігання УХЛ.3.1 по ГОСТ 15150-69. Зберігати в приміщеннях. Транспортувати автомобільним, залізничним або авіаційним видами транспорту в спеціальній транспортній тарі. Умови транспортування жорсткі (Ж) по ГОСТ 23216-78.

## 5.10. Додаткові технічні вимоги

Технічні характеристики:

Температурний режим	+1°C...+40°C
Вологість	65%
Габаритні розміри	не більше 140x90x45
Маса(не враховуючи джерела живлення)	не більше 200г
Живлення	5 В ± 5 %
Струм споживання	не більше 1 А

## **6. Результати роботи**

**6.1.** Результати даної роботи можуть бути використані як вихідна документація по створенню прототипу пристрою, його програмування, налагодження й подальшого впровадження в серійне виробництво.

**6.2.** Дана робота (звітна документація) після виконання надається на кафедру КЕОА для подальшого захисту й зберігання як навчальної документації.

## **7. Робота повинна містити в собі документи**

Пояснювальну записку (формату А4, до 70 аркушів)

- Схему електричну принципову та перелік елементів (формату А1, А4 відповідно)
- Складальне креслення та специфікацію (формату А1, А4 відповідно)
- Креслення друкованої плати (формату А1)
- Додатки (формату А4)

## **8. Порядок розгляду й приймання роботи**

Порядок розгляду й приймання роботи на загальних умовах, прийнятих на кафедрі КЕОА. Рецензування й прийняття роботи комісією на загальних умовах.

## **9. Економічні показники**

В умовах даної роботи не розглядаються.



## 10. Етапи розробки

№ п/п	Назва етапів виконання курсової роботи	Час виконання етапів проекту
1	Розробка технічного завдання.	01.02.21 - 21.02.21
2	Аналіз технічного завдання.	21.02.21 - 07.03.21
3	Вибір елементної бази та друкованої плати.	08.03.21 - 14.03.21
4	Проектування Altium Designer.	15.03.21 - 11.04.21
5	Конструкторсько-технологічні розрахунки. Електричний розрахунок друкованої плати.	12.04.21 - 02.05.21
6	Розрахунок надійності, віброміцності, теплового режиму.	03.05.21 - 09.02.21
7	Виконання креслення друкованої плати	10.05.21 - 19.05.21
8	Виконання складального креслення друкованого вузла.	20.05.21 - 23.05.21
9	Оформлення пояснювальної записки.	21.05.21 - 29.05.21