

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

**КУРСОВА РОБОТА**

з дисципліни \_\_\_\_\_ Електронна компонентна база радіоелектронної  
апаратури  
на тему: ФНЧ на 200МГц

Студента 2 курсу групи ДК-92  
Напряму підготовки: Телекомунікації та радіотехніка  
\_\_\_\_\_ Кіба Є.І.  
(прізвище та ініціали)  
Керівник:  
\_\_\_\_\_ доцент, к.т.н. Короткий Є.В.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)  
Національна оцінка: \_\_\_\_\_  
Кількість балів: \_\_\_\_\_ Оцінка: ECTS \_\_\_\_\_

Члени комісії: \_\_\_\_\_ доцент, к.т.н. Короткий Є.В.  
(підпис) (вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)  
  
\_\_\_\_\_  
(підпис) (вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	3
Вступ.....	4
Розділ 1 – Вибір та опис принципу роботи схеми .....	5
1.1. Вибір схеми .....	5
1.2. Принцип роботи схем.....	6
1.3. Розрахунок АЧХ фільтру Чебишева І-го роду.....	7
Розділ 2 – Заміри струмів та напруг за допомогою програми LTspise .....	10
Розділ 3 – Вибір елементної бази .....	11
Розділ 4 – Створення 3D моделі у програмі Trial Fusion 360 .....	12
Розділ 5 – Створення документації на розробку друкованої плат.....	18
Висновок .....	23
Список використаних джерел .....	24

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ФЧХ -Фазо-частотна характеристика

АЧХ - Амплітудно-частотна характеристика

ФНЧ- Фільтр низьких частот

## ВСТУП

Темою моєї курсової роботи був ФНЧ на 200 МГц. Схему я взяв з сайту [1], у якій була змінена лише індуктивність .

Метою моєї роботи був опис фільтру, розрахунок формули для знаходження АЧХ, заміри струмів та напруг на компонентах за допомогою програми LTspice, створення 3D моделі СОАХ-М входу у програмі Trial Fusion 360 та розробка схеми, друкованої плати та бібліотеки компонентів у програмі Altium Designer.

В першому розділі буде опис схеми та аналіз її роботи

В другому розділі буде описані заміри струмів та напруг на компонентах при 1 В та при 12 В

В третьому розділі буде підбір компонентів для створення такої плати .

В четвертому розділі буде опис створення 3D моделі у програмі Trial Fusion 360

В п'ятому розділі буде показано, як розробити плату у програмі Altium Designer та розроблення бібліотеки для СОАХ-М входу .

## РОЗДІЛ 1

### Вибір та опис принципу роботи схеми

#### 1.1 Вибір схеми

За основу була взята схема на Рис.1.1 з сайту [1]. Єдина зміна, яку додав у неї, було зменшення котушки індуктивності з 65нН до 62нН. Обумовлено це тим, що на сайті [1] використовуються котушки, що були створенні самостійно з мідного дроту. Я вирішив, що краще змінити їх на SMD компоненти та трохи зменшити індуктивність. Суттєво на АЧХ це не вплинуло і при модуляції в LTspice частота зрізу дорівнювала 223 МГц, коли при модуляції схеми з індуктивністю котушок у 65нН частота зрізу дорівнювала 217МГц.

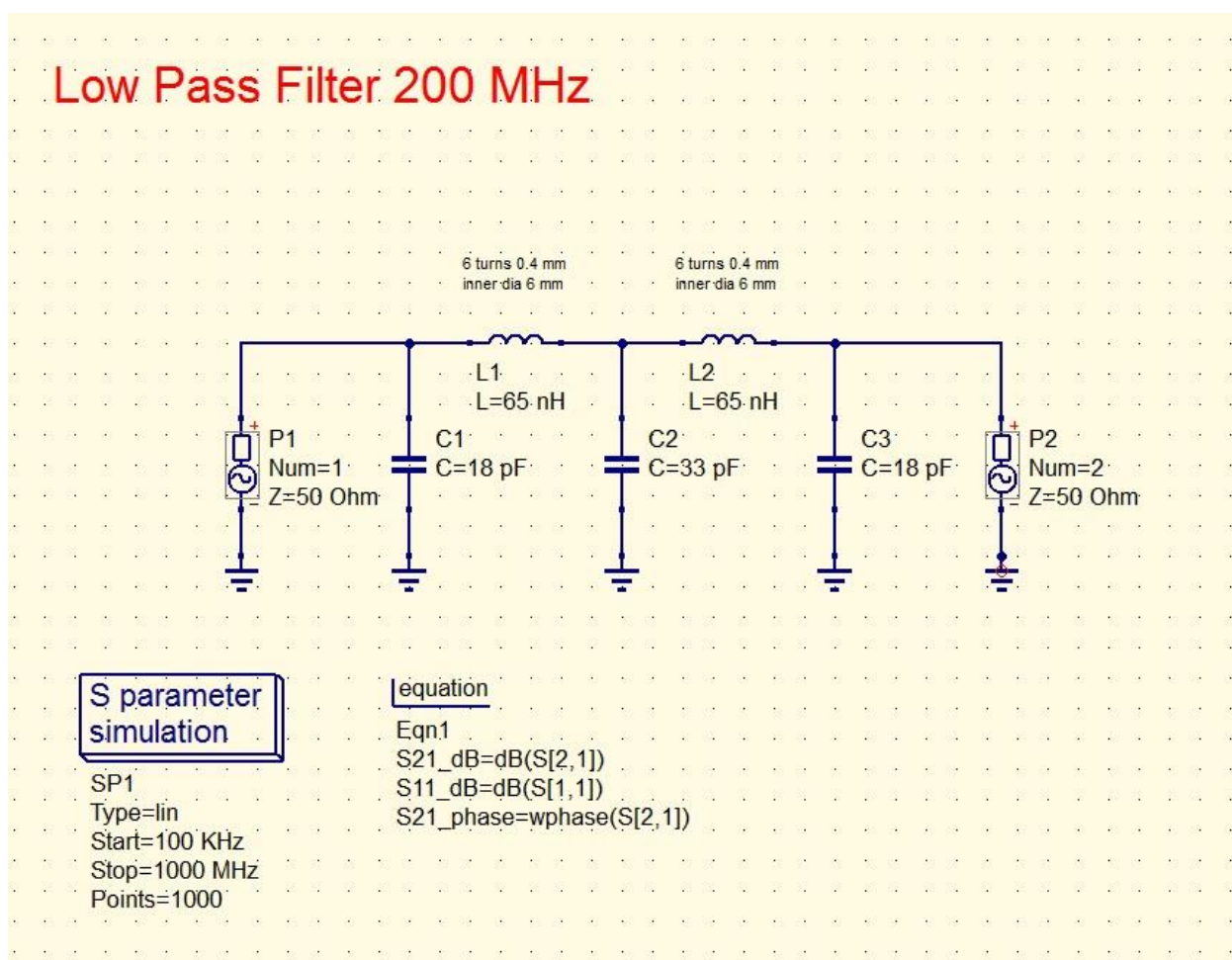


Рис.1.1.1 Оригінальна схема з сайту [1]

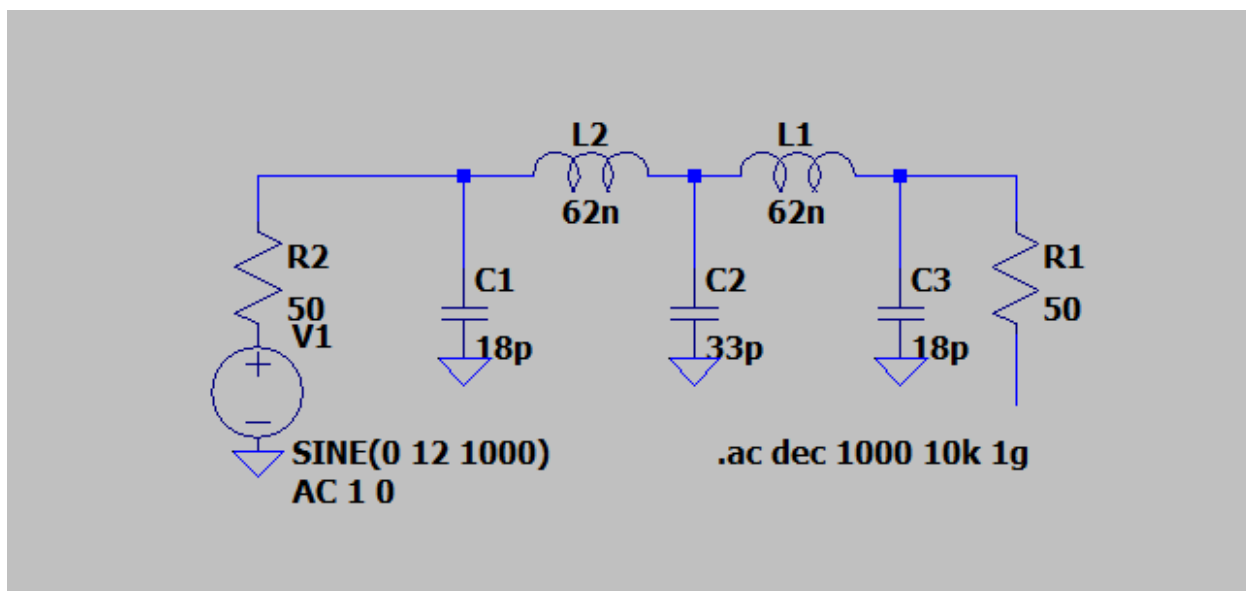


Рис.1.1.2 Схема зі зміненими параметрами індуктивності у LTspice

## 1.2.Принцип роботи схем

Загальновідомо, що індуктивний опір котушки прямо пропорційно частоті струму, що проходить через неї, отже чим вище частота струму, поточного через котушку, тим більше реактивний опір вона цього току надає, тобто сильніше затримує змінні струми на частотах вищих і легше пропускає струми з частотами нижчими.

Конденсатор навпаки, чим вище частота струму – тим легше даний змінний струм через нього протікає, а чим нижче частота струму - тим більшою перешкодою для струму виявляється цей конденсатор.

Обрана мною схема являє собою ФНЧ Чебишева І-го роду 5-го порядку і сильно шунтує джерело вхідного сигналу. У ній потрібно, або підбирати значення ємності під індуктивність, після чого розділити його на два різних конденсатори, або подвоїти величину індуктивності, яка тепер виходить паралельним включенням двох котушок.

Такий фільтр може використовуватися там, де потрібно відфільтрувати дуже великий сигнал: на радіостанції, підприємстві, військових приймачах

Чим більше в фільтрі ланок – тим точніше вийде фільтрація. У підсумку найбільшу амплітуду на навантаженні буде мати та частота, яка для даного фільтра виявиться найближче до його резонансної частоти (умова – індуктивна складова ланки дорівнює на цій частоті його ємнісної складової), інша частина спектра буде подавлена.

Застосування багатоланкових фільтрів уможливорює дуже точно виділяти сигнал потрібної частоти з багатого на перешкоди сигналу. Навіть якщо амплітуда на

частоті зрізу відносно мала, інша частина діапазону буде подавлена загальним дією ланок фільтра.

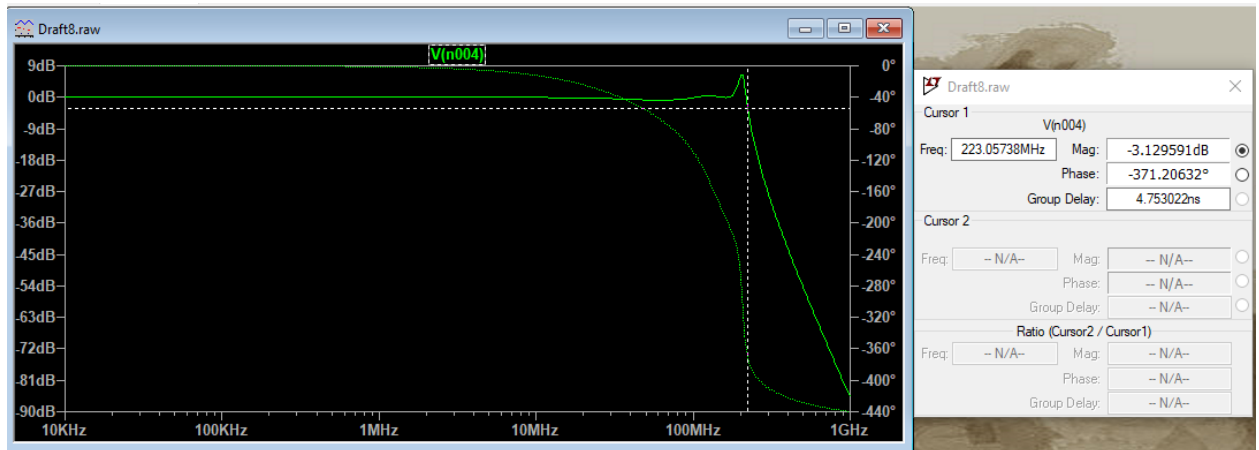


Рис.1.2.1 Результати симуляції фільтру

### 1.3 Розрахунок АЧХ фільтру Чебишева I-го роду

За даними з книги [2] для розрахунку нам потрібні 2 параметри:

$R_p$  – значення модулю комплексного коефіцієнта передачі при максимальному моменті пульсації перед частотою зрізу (дБл);

$R_s$  – значення модулю комплексного коефіцієнта передачі на частоті переходу на смугу затухання (дБл);

$$R_p = 6.5 \text{ дБл};$$

$$R_s = 54 \text{ дБл}.$$

Після цього нам потрібно знайти показники пульсації  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_p$  та показник максимального спотворення квадрата АЧХ  $G_p$  за формулами :

$$\epsilon_p = \sqrt{10^{\left(\frac{R_p}{10}\right)} - 1} \quad (1.1)$$

$$\epsilon_s = \sqrt{10^{\left(\frac{R_s}{10}\right)} - 1} \quad (1.2)$$

$$G_p = \sqrt{1/(1 + \epsilon_p^2)} \quad (1.3)$$

Підставивши у них значення ми отримаємо

$$\epsilon_p = \sqrt{10^{\left(\frac{6.5}{10}\right)} - 1} = 1.88;$$

$$\varepsilon_s = \sqrt{(10^{\left(\frac{54}{10}\right)} - 1)} = 501.18;$$

$$G_p = \sqrt{1/(1 + 1.88^2)} = 0.46961 ;$$

Знаючи ці параметри ми можемо розрахувати порядок фільтру N за формулою :

$$N = \frac{\text{arch}\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_p}\right)}{\text{arch}(n)} \quad (1.4)$$

де n – кількість котушок індуктивності ;

$$N = \frac{\text{arch}\left(\frac{501.18}{1.88}\right)}{\text{arch}(2)} = 4.76$$

Тепер округлимо значення N у більшу стороно та отримаємо значення N = 5:

Тепер ми довели, що фільтр має п'ятий порядок.

Наступним кроком буде розрахування параметру r (його значення може бути або 0, або 1). Він логічно розраховується з наступної формули

$$N = nL + r, \quad (1.5)$$

де n – кількість котушок індуктивності

$$5 = 2L + r \Rightarrow r = 1$$

Тепер розрахуємо значення коефіцієнту  $\beta$  за наступною формулою

$$\beta = \frac{1}{N} \text{arsh}\left(\frac{1}{\varepsilon_p}\right) \quad (1.6)$$

$$\beta = \frac{1}{5} \text{arsh}\left(\frac{1}{1.88}\right) = 0.10195;$$

Після цього ми розраховуємо значення коефіцієнтів  $A_1, A_2$

$$A_n = ((2n-1)/2*N)*\pi, \quad (1.7)$$

де n = 1, 2

$$A_1 = \frac{2*1-1}{2*5} * \pi = \frac{\pi}{10}$$

$$A_2 = \frac{2*2-1}{2*5} * \pi = \frac{3\pi}{10}$$

Тепер розрахуємо значення параметри  $a_n, w_n$  а також розрахуємо  $a_n^2 + w_n^2$  де n = 1, 2 і окрім цього розрахуємо  $a_0$  оскільки коефіцієнт r = 1. Якби r = 0, то нам не потрібно було б розраховувати  $a_0$ :



$$a_0 = -\operatorname{sh}(\beta) = -\operatorname{sh}(0.10195) = -0.102127 \quad (1.8)$$

$$a_1 = -\sin(a_1) * \operatorname{sh}(\beta) = -\sin\left(\frac{\pi}{10}\right) * \operatorname{sh}(0.10195) = -0.0315589 \quad (1.9)$$

$$a_2 = -\sin(a_2) * \operatorname{sh}(\beta) = -\sin\left(\frac{3\pi}{10}\right) * \operatorname{sh}(0.10195) = -0.0826222 \quad (1.10)$$

$$w_1 = \cos(a_1) * \operatorname{ch}(\beta) = \cos\left(\frac{\pi}{10}\right) * \operatorname{ch}(0.10195) = 0.9560 \quad (1.11)$$

$$w_2 = \cos(a_2) * \operatorname{ch}(\beta) = \cos\left(\frac{3\pi}{10}\right) * \operatorname{ch}(0.10195) = 0.5908 \quad (1.12)$$

$$a_1^2 + w_1^2 = -0.0315589^2 + 0.9560^2 = 0.91294 \quad (1.13)$$

$$a_2^2 + w_2^2 = -0.0826222^2 + 0.5908^2 = 0.3420394 \quad (1.14)$$

Тепер можна розрахувати передаточну характеристику фільтра  $H(s)$ :

$$H(s) = \frac{G_p^{1-r} * (-a_0)^r \prod_{n=1}^L (a_n^2 + w_n^2)}{(s - a_0)^r \prod_{n=1}^L (s^2 - 2 * a_n * s + (a_n^2 + w_n^2))}; \quad (1.15)$$

$$H(s) = \frac{1 * (0.102127)^1 * 0.91294 * 0.3420394}{(s + 0.102127)^1 * (s^2 + 2 * 0.0315589 * s + 0.91294) * (s^2 + 2 * 0.0826222 * s + 0.3420394)}$$

На цьому розрахунок нормованого ФНЧ Чебишева першого роду можна вважати закінченим.

Підставивши у вираз для  $H(s)$   $s = j\omega$ , то отримаємо комплексний коефіцієнт передачі  $H(j\omega)$ , завдяки чому ми зможемо розрахувати квадрат АЧХ та ФЧХ фільтру.

## РОЗДІЛ 2

### Заміри струмів та напруг за допомогою програми LTspise

Усі виміри були проведені у програмі LTSpise за ідеальних обставин (якщо не зважати резистор R1 та опір на джерелі R2, які симулюють опір входів). Усі значення були записані у таблицю 2.1. при напрузі у 1 вольт. У таблиці 2.2 були розраховані значення для 12 В.

Потужність була розрахована за формулою  $P=U \cdot I$ ;

Таблиця 2.1

Позначення	Напруга, В	Токи, А	Потужність	Номінал/LTSpise
C1. C3	1	0,000000005	0,000000005	18p
C2	1	0,00000001	0,00000244	33p
L1	0,00000006	0,000000015	9E-16	62n
L2	0,00000006	0,000000005	3E-16	62n

Таблиця 2.2

Позначення	Напруга, В	Токи, А	Потужність	Номінал/LTSpise
C1. C3	12	0,00000132	0,00001584	18p
C2	12	0,00000244	0,00002928	33p
L1	0,000054	0,00000379	2,0466E-10	62n
L2	0,00003	0,000001338	4,014E-11	62n

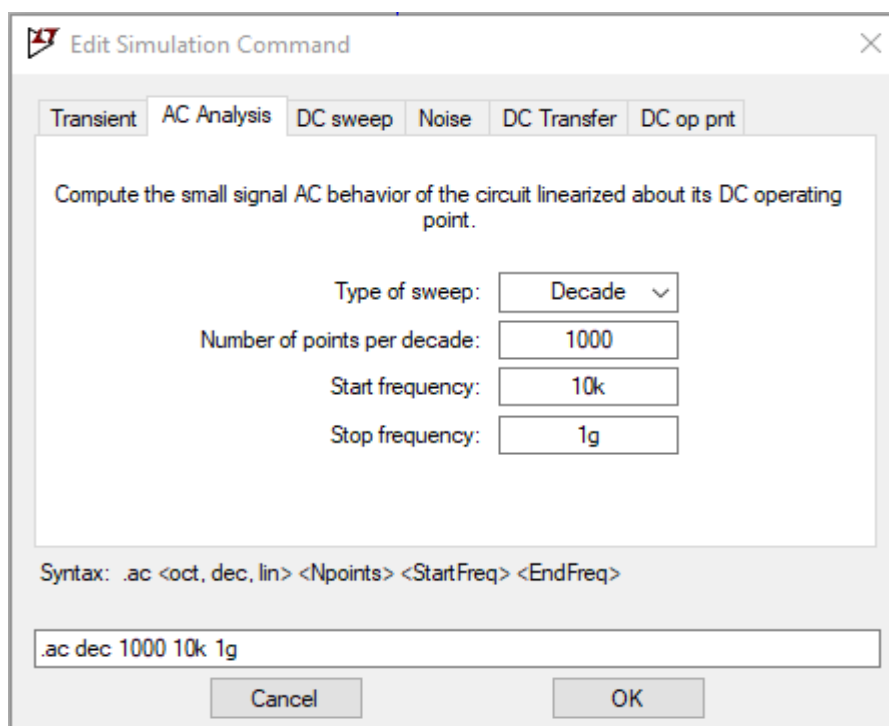


Рис.2.1 Параметри запуску симуляції у розділі «SPISE Analysis»

## РОЗДІЛ 3

### Вибір елементної бази

Замість резисторів R1 та R2 в мене стоять входи COAX-M. Вони були додані до схеми, щоб зімітувати опір цих самих входів .

В якості конденсаторів C1 та C3 мною було обрано конденсатори C0603C180F5GACTU тому що їх номінал як раз підходить до схеми( 18pF) похибка усього лише 1% а номінальна напруга має значення у 50В.

Котушки L1 та L2 я обрав LQG15WZ62NG02D. Її номінал дорівнює 62nF а максимальне значення струму становить 180 mA а значення похибки дорівнює 2%.

Як конденсатор C2 була обраний C0402T330J3GACTU тому що він відповідає значенню номінал (33pF) , і хоча він має похибку 5% його номінальна напруга дорівнює 25В, що відповідає моїм вимогам.

Компоненти я обирав з таким мали формфактором, тому що подібні схеми використовуються у деяких типах радіо та радіостанціях, і чим менше буде плата, тим зручніше буде вмонтувати ФНЧ у прилади .

Такі прилади працюють з значенням напруги, від 9 В до 24 В, тому й було обрано такі значення номінальної напруги для компонентів.

### Bill Of Materials з Altium Designer

Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Quantity
C0603C180F5GACTU	C0603 18 pF C0G 30ppm/°C 1.00% 50 V	C1, C3	FP- C0603C- CF-MFG	CMP- 03020- 028712-1	2
C0402T330J3GACTU	±5% 25V Ceramic Capacitor C0G, 33 pF, NP0 0402 (1005 Metric)	C2	CAPC100 5X55X30 ML05T10	CMP- 2008- 03465-1	1
LQG15WZ62NG02D	Fixed Inductors 0402 62nH 2% 180mA 1.9ohm AEC-Q200	L1, L2	FP- LQG15HH _02-MFG	CMP- 60402- 001578-1	2
COAX-M		P1, P2	COAX-M	COAX-M	2

Посилання на Bill Of Materials на GitHub [6]

## РОЗДІЛ 4

### Створення 3D моделі компоненту у Trial Fusion 360

Для моделювання було обрано вхід COAX-M.

- 1) Спочатку був створений квадратну поверхню 6мм на 6 мм та висотою 1мм.
- 2) Використовувавши вкладку «CREATE» я обрав тип 3D моделі «Box».
- 3) Потім я обрав площу «XY» та зробив у ній 2D проекцію куба 6мм на 6мм.
- 4) Після цього обрав площину «ZY» та настроїв у ній висоту платформи до 1 мм.

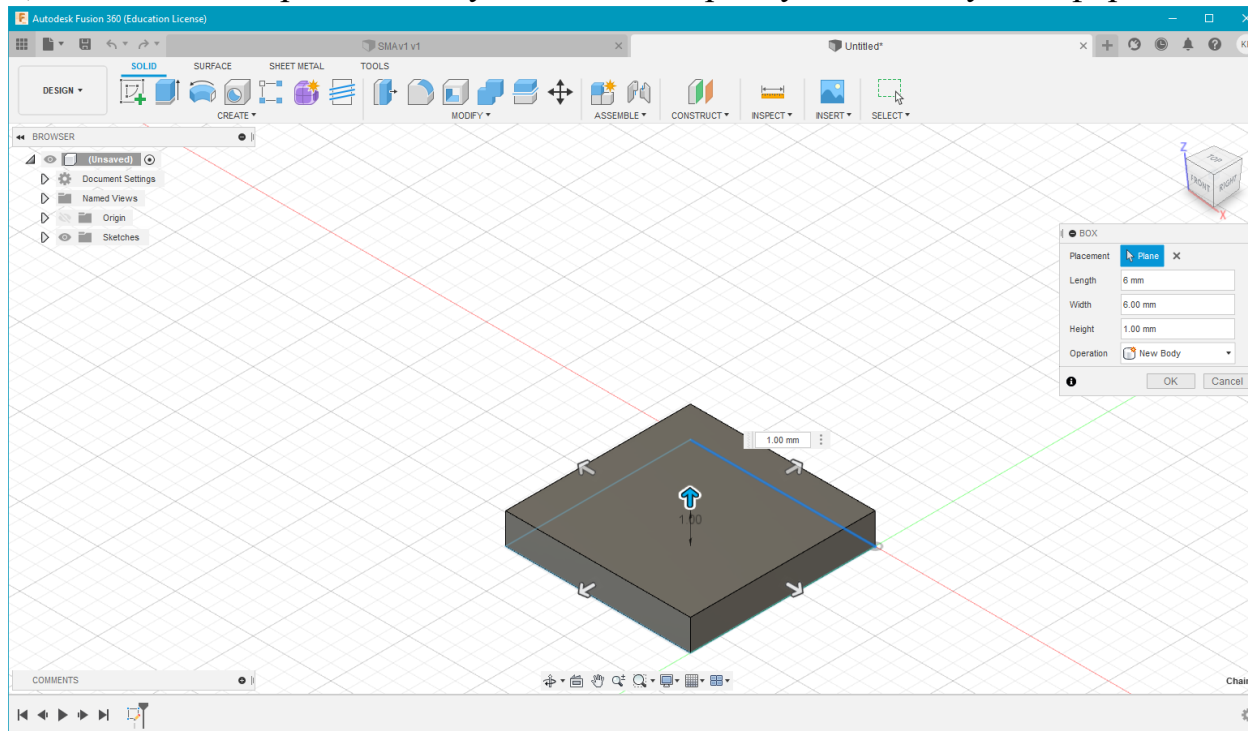


Рис.4.1 Створення платформи у Autodesk Fusion 360

- 5) Наступним кроком було створення циліндру 6 mm у діаметрі та висотою 9 мм.
- 6) Використовувавши вкладку «CREATE» я обрав тип 3D моделі «Cylinder».
- 7) Після цього обрав площу «XY» та, зацентрувавши центр кола на центрі платформи, зробив на ній 2D проекцію коло( основу циліндра ) діаметром 6мм.
- 8) У кінці створення 3D моделі я обрав площину «ZY» та настроїв у ній висоту платформи до 9 мм.
- 9) Так як ми створили його на платформі . що була старенна у 2 кроці то циліндр та платформа вважаються одним тілом та програма рахує його як один об'єкт.

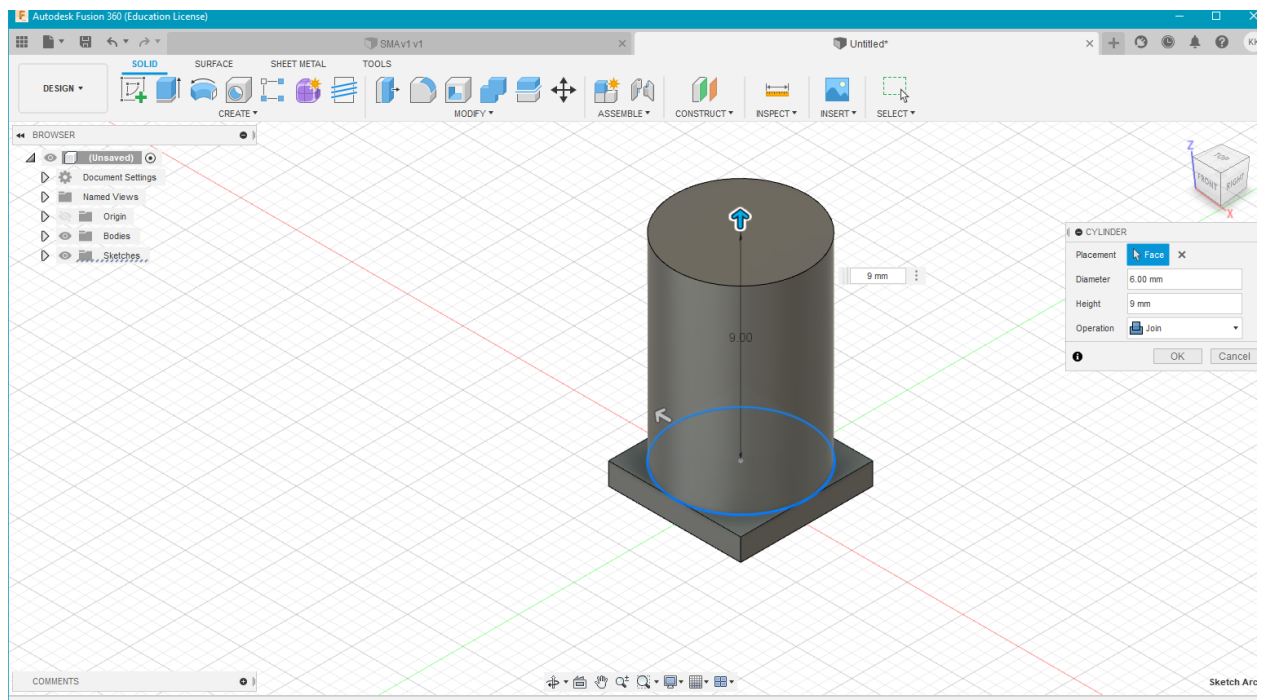


Рис.4.2 Додання до платформи циліндру

10) Потім мені потрібно було створити полу частину у циліндрі , як вона є у COAX-роз'ємі.

11) Я знову обрав на вкладці «CREATE» тип 3D моделі «Cylinder» та на площині «XY» зацентрував основу нового циліндра на вершину тільки но створеного циліндру та робимо коло діаметром 5.5 мм.

12) Потім у віконці зліва, де є параметри нашого циліндру , на пункті «Operation» міняємо «Join» на «Cut».

13) Після цього на вкладці «Height» ставимо параметри – 9 мм. Це потрібно для того ,щоб зробити циліндр ,створений на кроці 3 пустим.

Можна було ще використати на вкладці «CREATE» функцію «Hole» , але так як програма вважає , що циліндр та платформа , це один об'єкт , то він зробить дірку уздовж усього об'єкта.

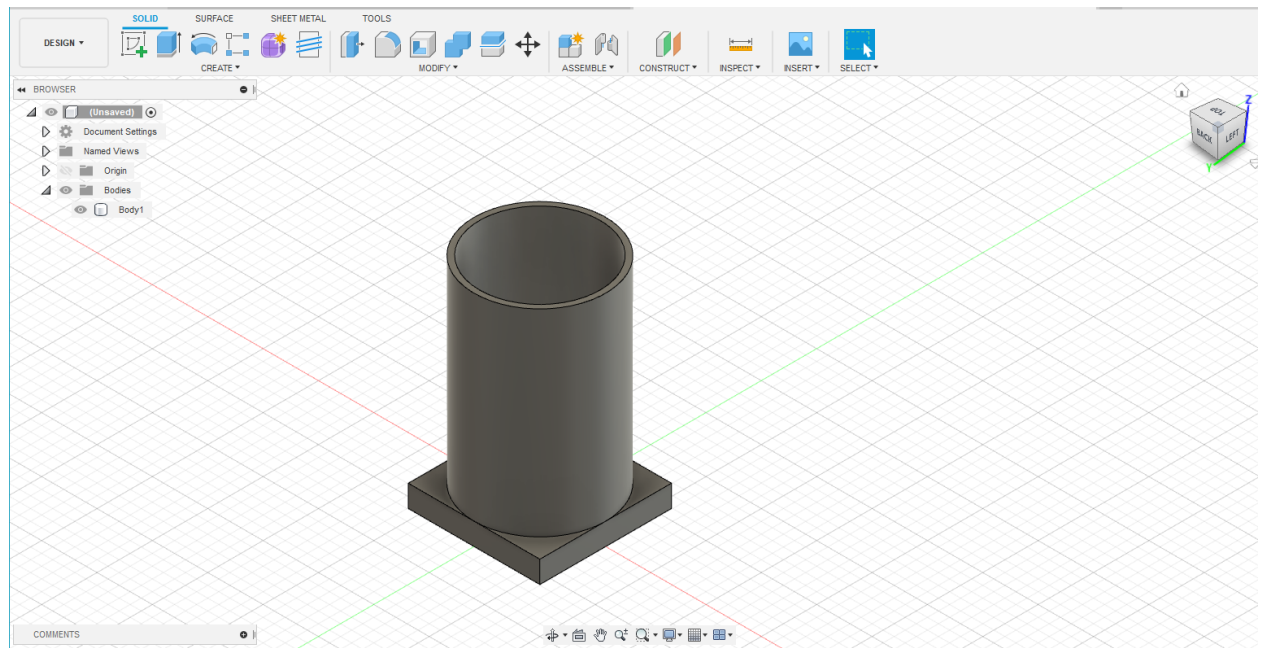


Рис 4.3 Створення порожнини у циліндру

14) Тепер підіймаємо наш об'єкт на 5 мм угору за допомогою правої кнопки миші та на селекторі обираємо «Move\Copy», та підіймаймо по осі «Z» на 5 мм.

15) На Рис.4.4 ми можемо побачити це, завдяки колу, що стоїть по центру площини «XY» під «3D» моделлю.

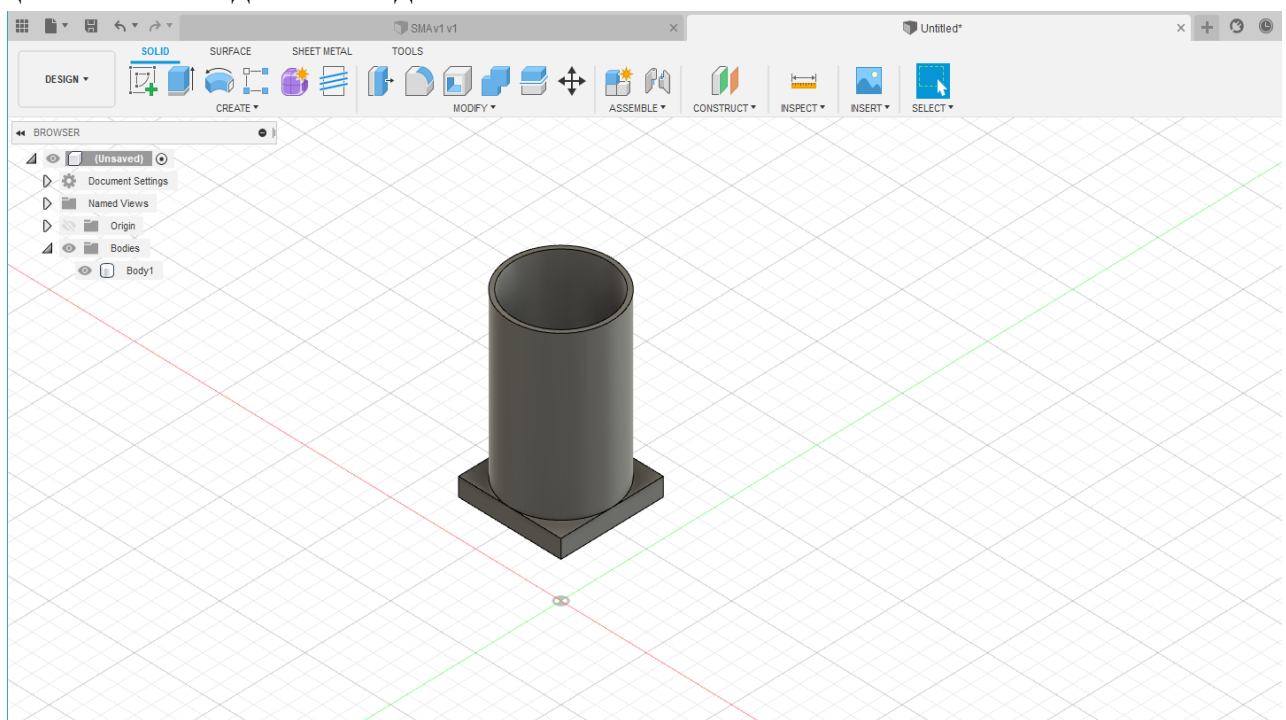


Рис.4.4 Підняття моделі

16) Тепер створимо контакти (1 циліндричний та 4 прямокутних) Для цього треба використовувати ту ж саму вкладку «CREATE» типи 3D моделей «Cylinder» та «Box» шириною 1мм та висотою 5 мм.

17) Потрібно зацентрувати циліндричний контакт по центру нижньої платформи а прямокутні контакти ставимо навколо так, щоб між прямокутними, що знаходяться паралельно друг другу було 4 мм а ті, що знаходяться по діагоналі мали відстань  $4\sqrt{2}$  мм, при цьому потрібно, щоб циліндричний контакт знаходився на центрі по діагоналям між прямокутними контактами.

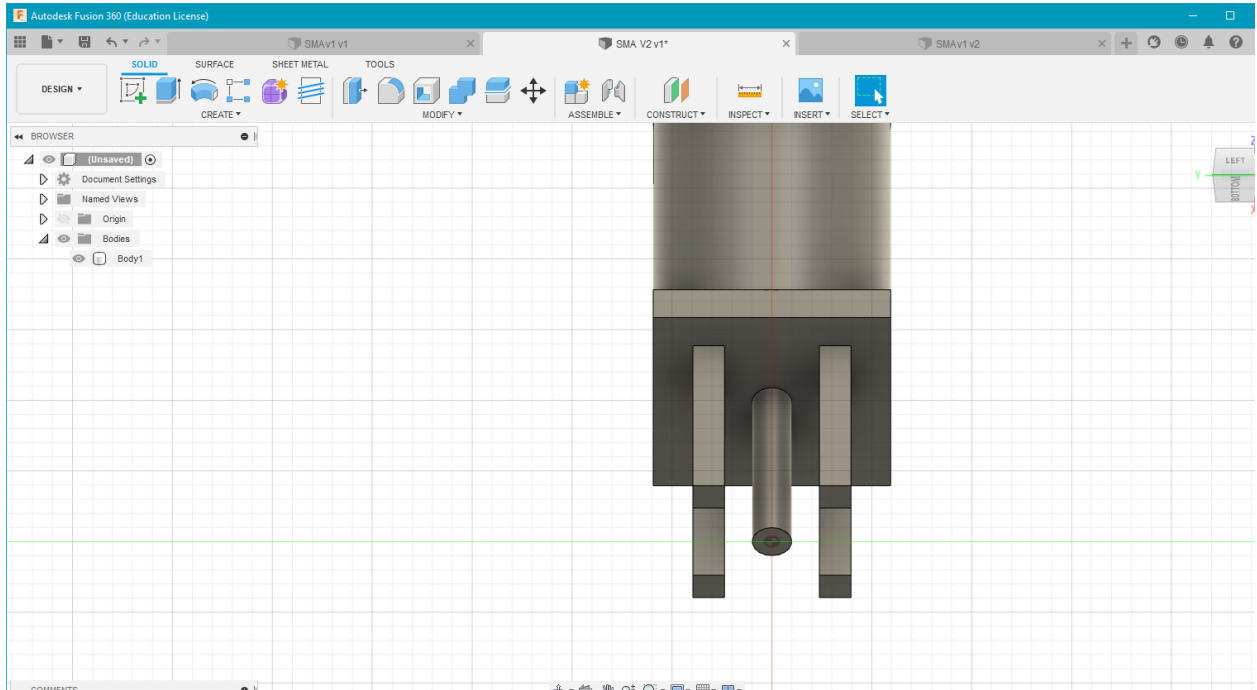


Рис.4.5 Додання контактів до моделі

18) Тепер потрібно створити різьбу. Для цього ми створимо новий циліндр який буде діаметром 6.2 мм та висотою 5 мм, а потім зробимо за допомогою функції «Hole» дірку у циліндрі діаметром 6 мм.

19) Після цього використовуємо на вкладці «CREATE» функцію «Thread», обравши бокову зовнішню стінку. Наступний крок – це зміна параметрів самої різьби: «Thread Type» обираємо як «ISO Metric profile» та «Designation» як «M6x0.5».

20) Тепер перенесем різьбу по центру циліндру так, щоб вона була зовні на висоті 3 мм від прямокутної платформи.



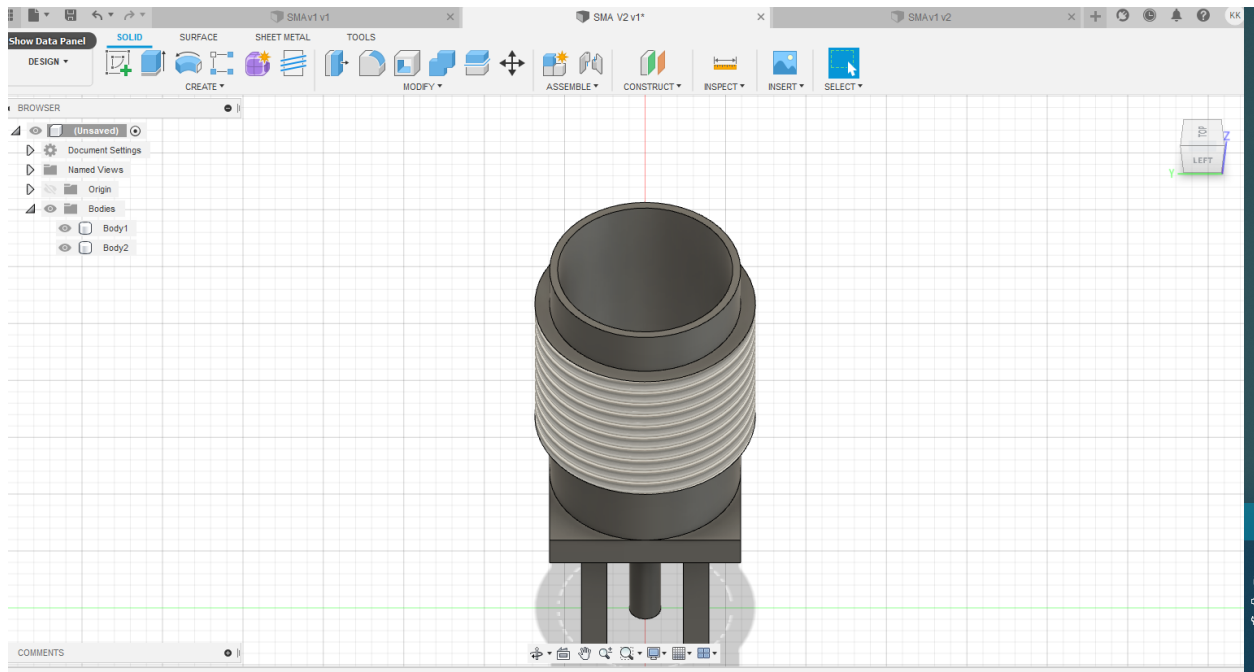


Рис 4.6 Додання різьби до моделі

21) Тепер останній елемент для моделі, а саме діелектрик . Створимо циліндр діаметром 5.5 мм та висотою 4 мм .Помістимо його у середину великого циліндру та зацентруймо. Після цього створимо по центру діелектричного циліндру ще один та видалимо середину за допомогою функції «Cut».

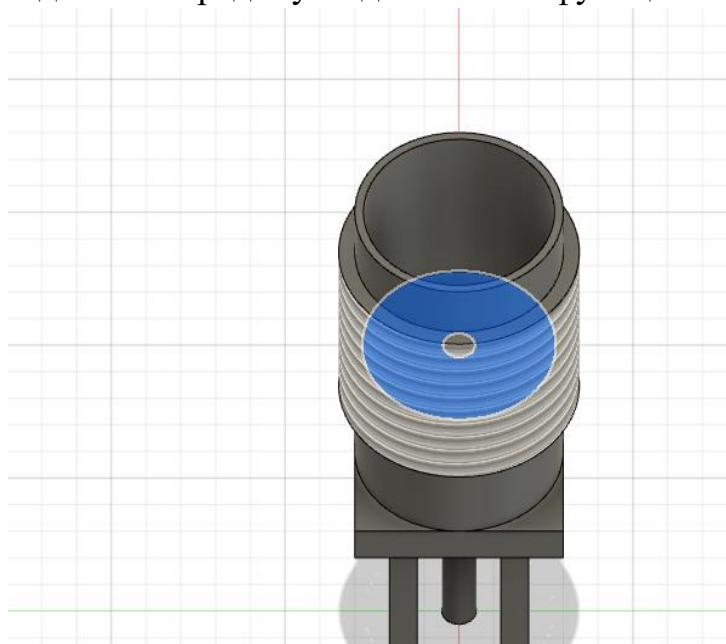


Рис. 4.7 Додання циліндру у середину моделі

22) Останнім кроком є вибір матерілів . Для самого роз'єму підійде один з типів міді або сплаву міді, а для діелектрика – пластмаси.

23) Натиснувши правою кнопкою на нашу подель на селекторі обираємо Appearance.



24) Після цього обираємо потрібний нам метал та пластик . Я обрав звичайну бронзу(Bronze) та білий пластик (Plastic (White)).

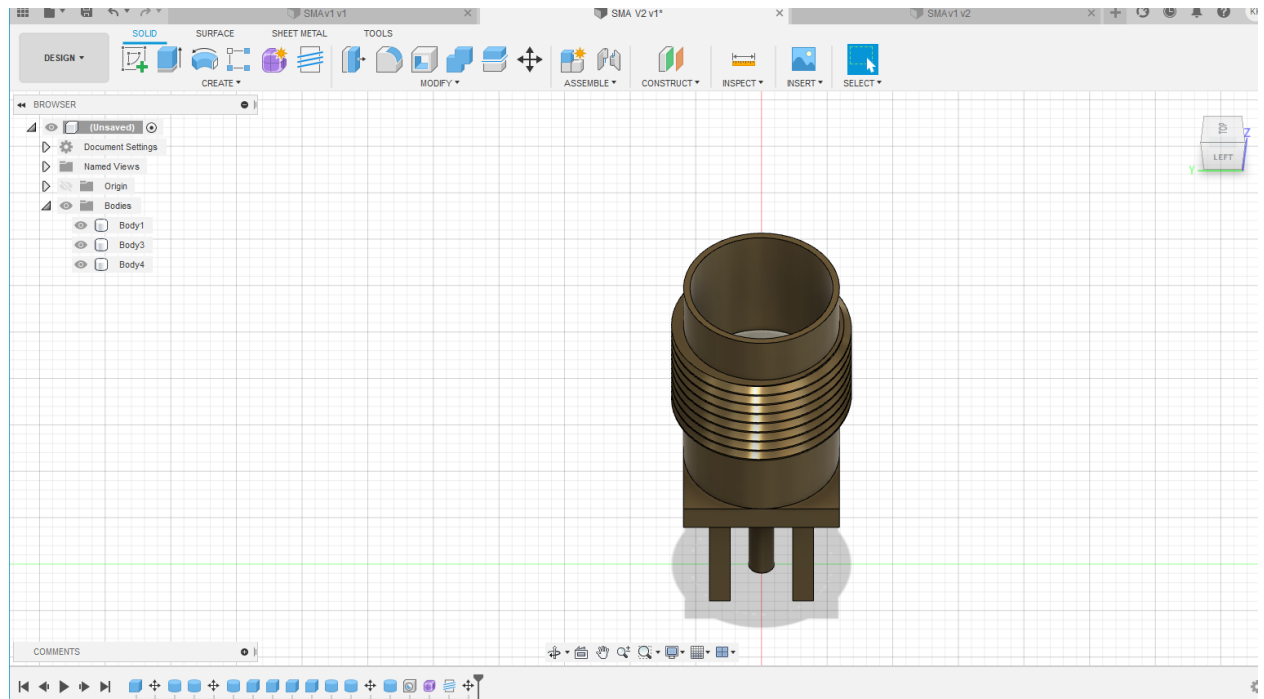


Рис.4.8. Вже готова модель

Посилання на створену модель в Trial Fusion 360 на GitHub[3]

## РОЗДІЛ 5

### Створення документації на розробку друкованої плати

Першим кроком було створення групи проектів Project Group 1.DsnWrk та створення у ньому бібліотеку Integrated\_Library 1.LibPkg та схему Project1.PrjDoc.

У бібліотеці Integrated\_Library 1 були створенні файли COAX-M.PcbLib та COAX-M.SchLib .

У файлі COAX-M.SchLib було розроблено графічне позначення входу .

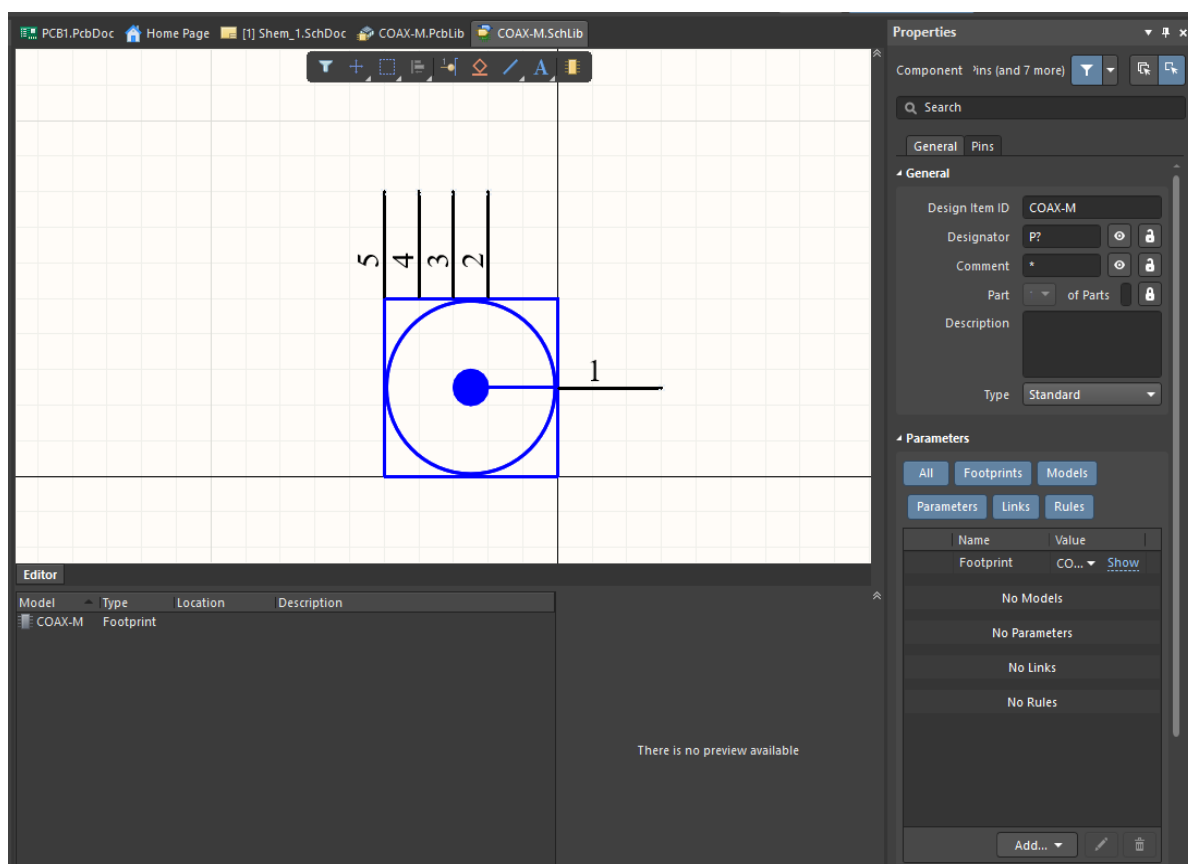


Рис 5.1 УГО Входу COAX-M

Після цього у файлі COAX-M.PcbLib були створені контакти для входу COAX-M та нанесена шовкографія .

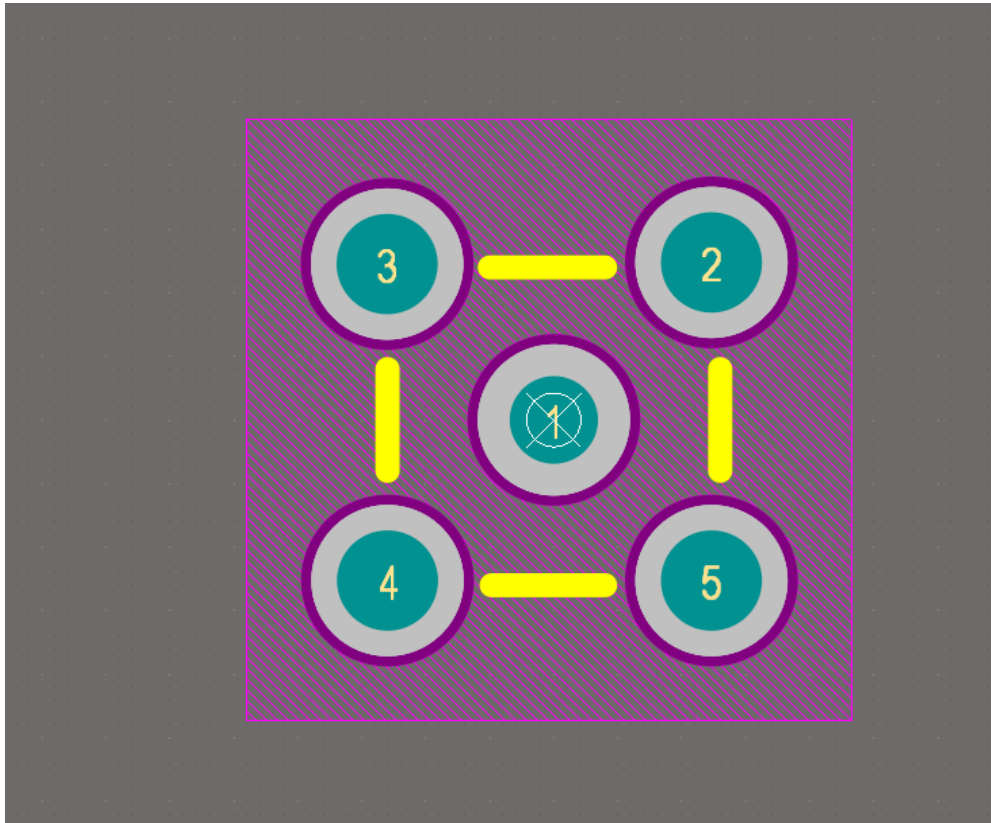


Рис 5.2 Шовкографія та контур COAX-M

Потім була узята модель входу COAX-M з 4 розділу(у форматі .step) та підключена до цього файлу

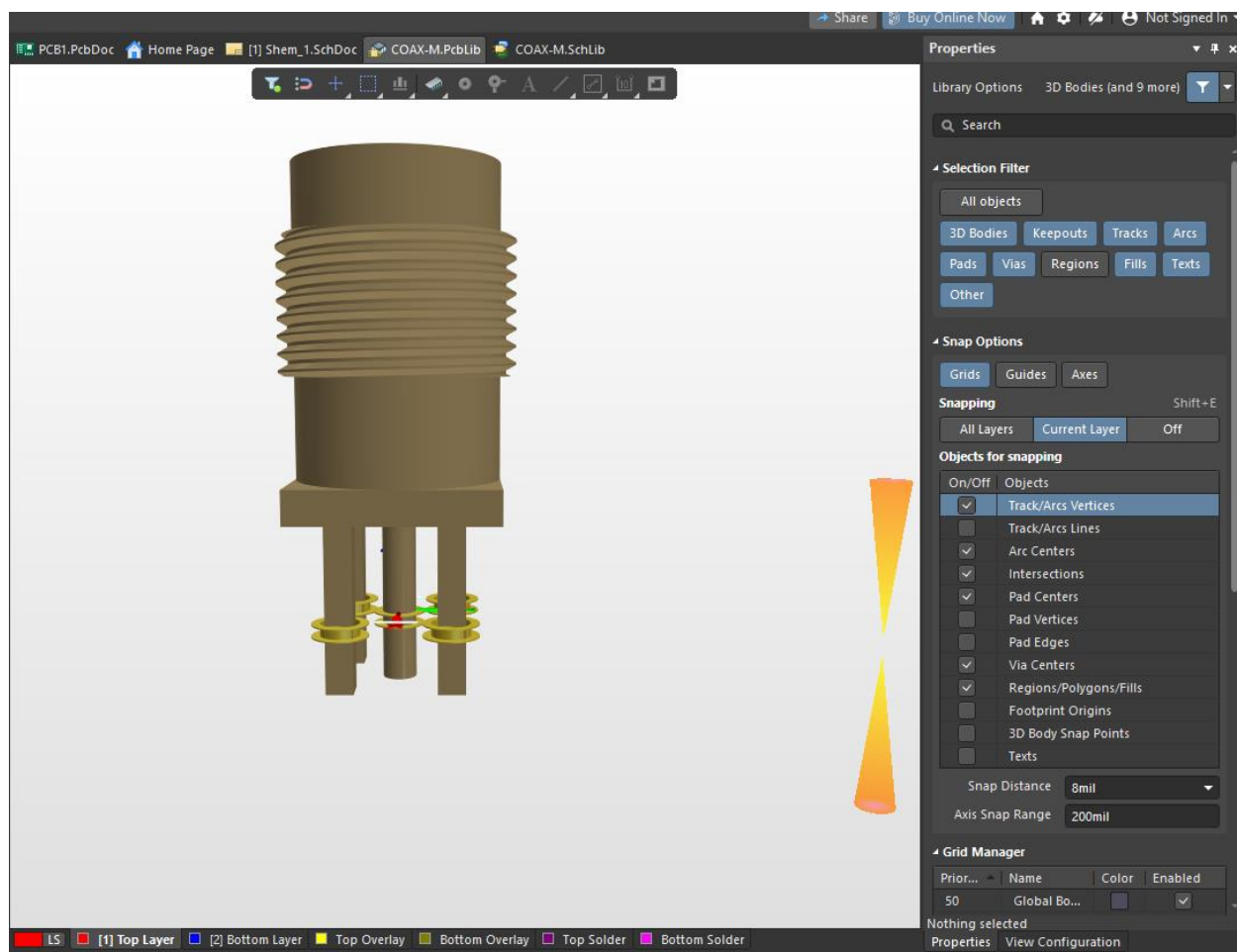


Рис 5.3. Вже імпортована модель

Після цього я створив у проекті Project 1.PrjDoc. файл зі схемою Shem\_1.SchDoc та з платою PCB1.PcbDoc

Тепер у файлі Shem\_1.SchDoc я зробив схему з обраних мною компонентів. У деяких компонентів не було 3D моделі, тому я використав функцію «Add Supplier Link And Parameters To Part» та до елементів, що не мали 3D моделей корпусів додав їх з аналогів.

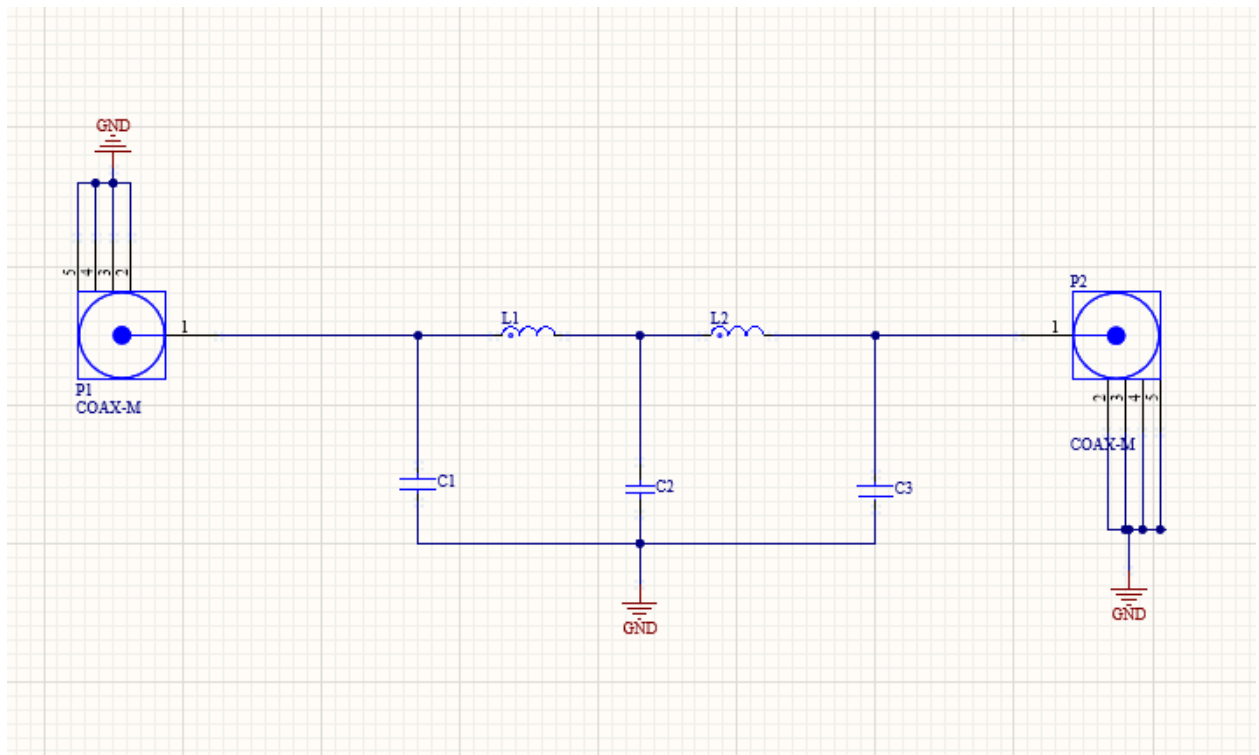


Рис 5.4 Створена схема у програмі Altium Designer

Після створення схеми я імпортував її у файл PCB1.PcbDoc за допомогою вкладки «Design» і функції «Import Changes» та виконав трасировку плати використовувачи полігон для створення землі та звичайні лінії для підключення елементів. Для того, щоб полігон підключився до землі треба обрати у вікні «Properties» у функції підключення «Net» тип підключення до «GND».

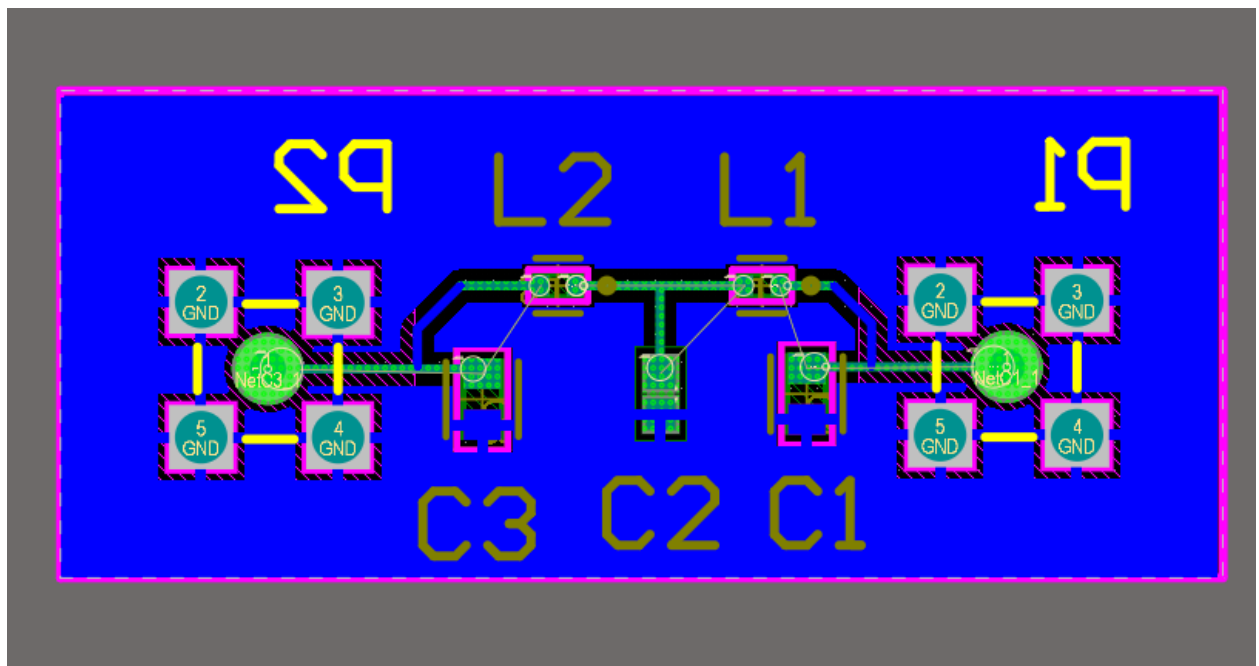


Рис. 5.5 Трассировка плати зроблена у Altium Designer

Тросировка землі полігоном використовується при максимальній площині землі на печатній тому що це мінімізує її індуктивність, що дуже важливо для даної схеми .

Компоненти були розташовані на одній стороні, а виходи на іншій, тому що контакти для входів повинні торкатися сигнальних ліній та полігону.

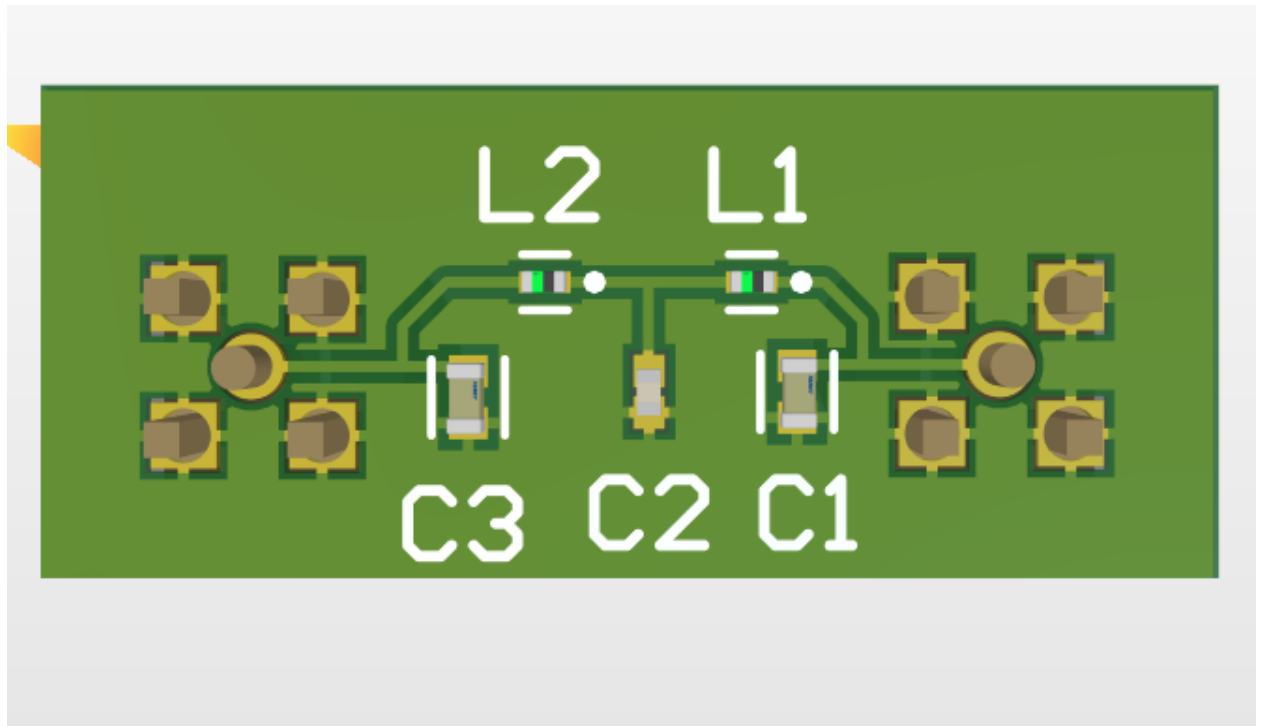


Рис 5.6 Вигляд пати у 3D. Вид знизу.

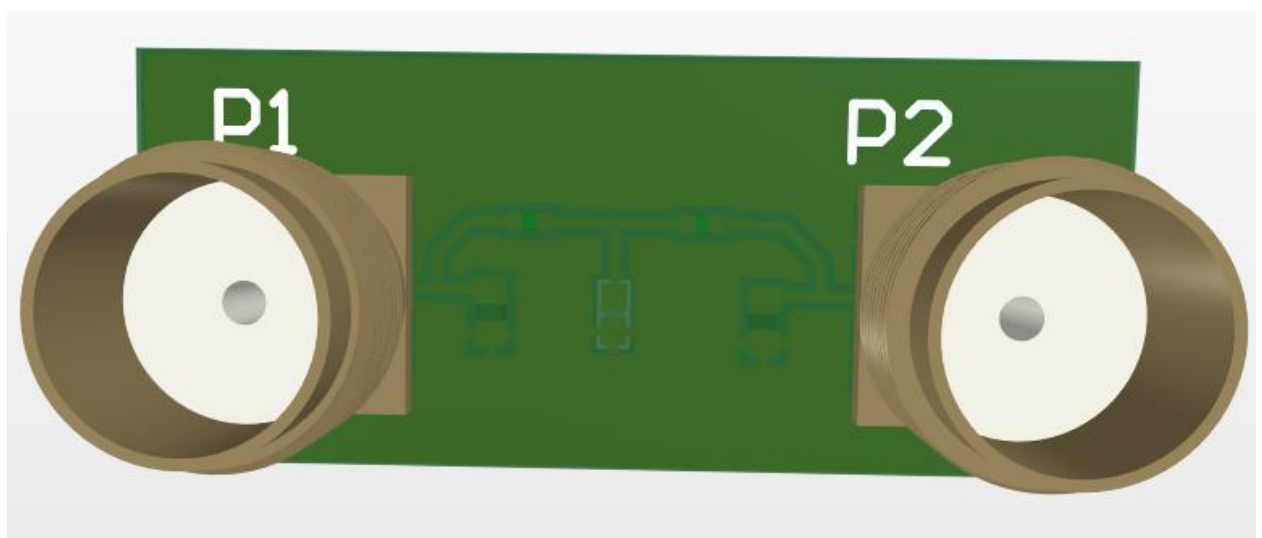


Рис. 5.7 Вигляд плати у 3D . Вид згори.

Посилання на друковану плату , розроблену в Altium Designer [4].

## ВИСНОВОК

В першому розділі я описав обрану мною схему та показав результати розрахунку АЧХ ФНЧ Чебишева.

В другому розділі я визначив характеристики компонентів фільтру при напрузі у 1 Вольт та 12 Вольт.

В третьому було обрано компоненти та описано, чому саме їх потрібно використовувати у цій схемі.

В четвертому було покрокове описано створення 3D моделі СОАХ-М у програмі Trial Fusion 360.

В п'ятому розділі було створено бібліотеку компонентів, додано до неї 3D модель входу СОАХ-М та трасовано друковану плату для ФНЧ Чебишева І-го роду.

При виконанні курсової роботи було використовувано програми: Altium Designer[7], LTspice[8], Trial Fusion 360 [9].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. DIY Low-pass 200 MHz filter [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://lna4all.blogspot.com/2016/02/diy-low-pass-200-mhz-filter.html>.
2. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры. Расчет и реализация — М.: Мир, 1982. — 229-287 с.
3. 3D модель COAX-М входу [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://github.com/Yvgen-Kiba/Kursova\\_robota/blob/main/COAX-M.step](https://github.com/Yvgen-Kiba/Kursova_robota/blob/main/COAX-M.step)
4. Друкована плата, створена у Altium Designer [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://github.com/Yvgen-Kiba/Kursova\\_robota/blob/main/PCB1.PcbDoc](https://github.com/Yvgen-Kiba/Kursova_robota/blob/main/PCB1.PcbDoc)
5. Схема, створена у Altium Designer [Електронний ресурс] – [https://github.com/Yvgen-Kiba/Kursova\\_robota/blob/main/Shem\\_1.SchDoc](https://github.com/Yvgen-Kiba/Kursova_robota/blob/main/Shem_1.SchDoc)
6. Bill Of Materials, створений у Altium Designer [Електронний ресурс] - [https://github.com/Yvgen-Kiba/Kursova\\_robota/blob/main/Material.xlsx](https://github.com/Yvgen-Kiba/Kursova_robota/blob/main/Material.xlsx)
7. Altium Designer програма – Посилання на скачування: <https://www.altium.com>
8. LTspice програма – Посилання на скачування: <https://www.analog.com/ru/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html#>
9. Trial Fusion 360 програма – Посилання на скачування: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/free-trial>