

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

**РОЗРАХУНКОВА-ГРАФІЧНА РОБОТА**

з дисципліни \_\_\_\_\_ Аналогова електроніка  
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)

Київ - 2021 рік

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	2
Вступ.....	3
Розділ 1 – Вибір та опис принципу роботи схеми .....	4
1.1. Вибір схеми .....	4
1.2. Принцип роботи схем.....	5
Розділ 2 – Розрахунок параметрів АЧХ фільтру.....	7
Розділ 3 – Модуляція роботи схеми .....	10
Висновок.....	14
Список використаних джерел .....	15

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ФЧХ -Фазо-частотна характеристика  
АЧХ - Амплітудно-частотна характеристика  
ФНЧ – Фільтр низьких частот  
РГР - Розрахунково-графічна робота

## ВСТУП

Для виконання РГР мною було обрана схема фільтру Чебишева І-го роду , яка була взята з сайту [1].

Метою моєї роботи було проаналізувати та промодельовати схему фільтру , пояснити її роботу та розрахунок АЧХ.

В першому розділі буде опис роботи обраної мною схеми  
В другому розділі буде розрахунок формули АЧХ фільтру

В третьому розділі будуть наведені результати модуляції обраної мною схеми у програмі LTspice.

## 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.

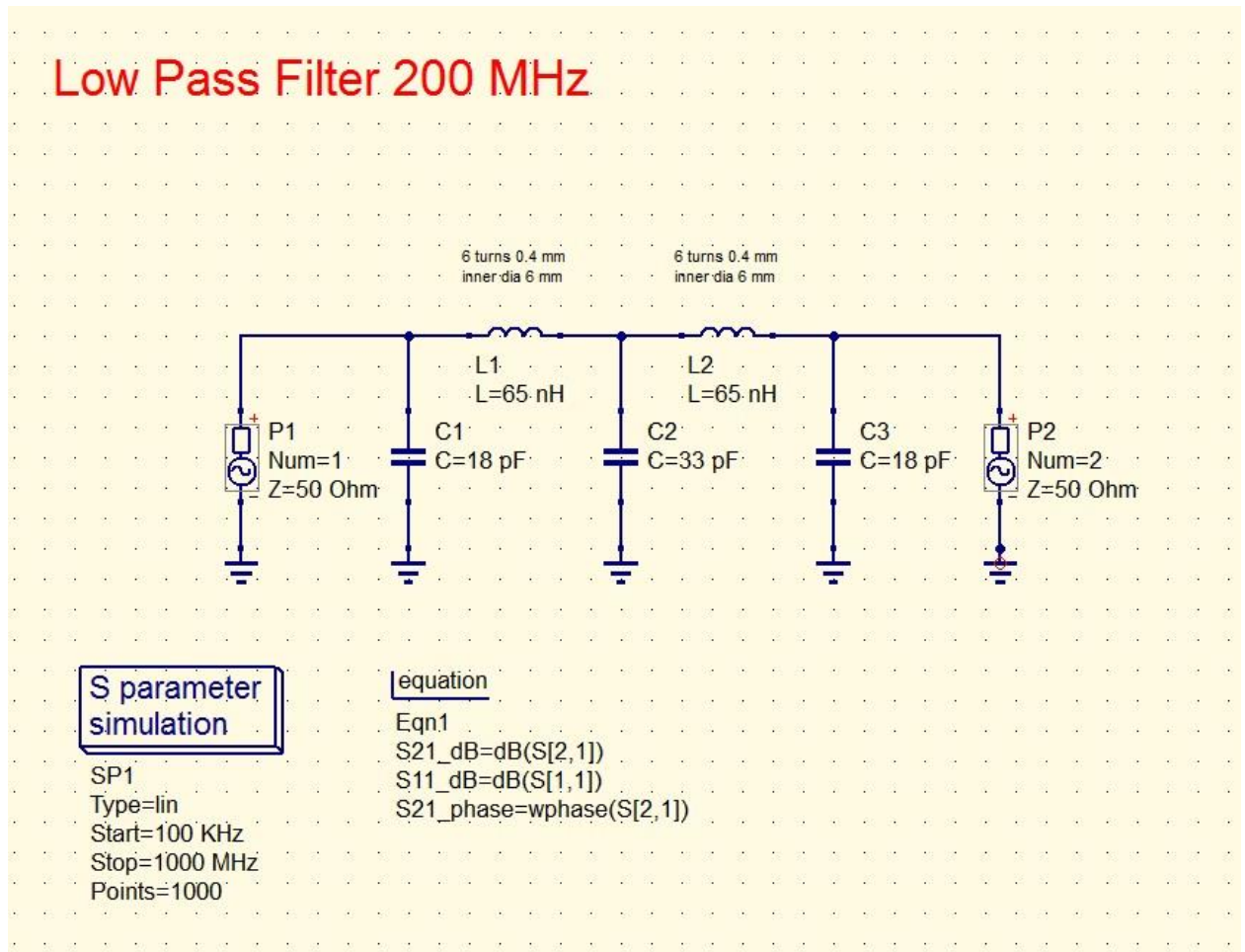


Рис.1.1.1 Оригінальна схема з сайту [1]

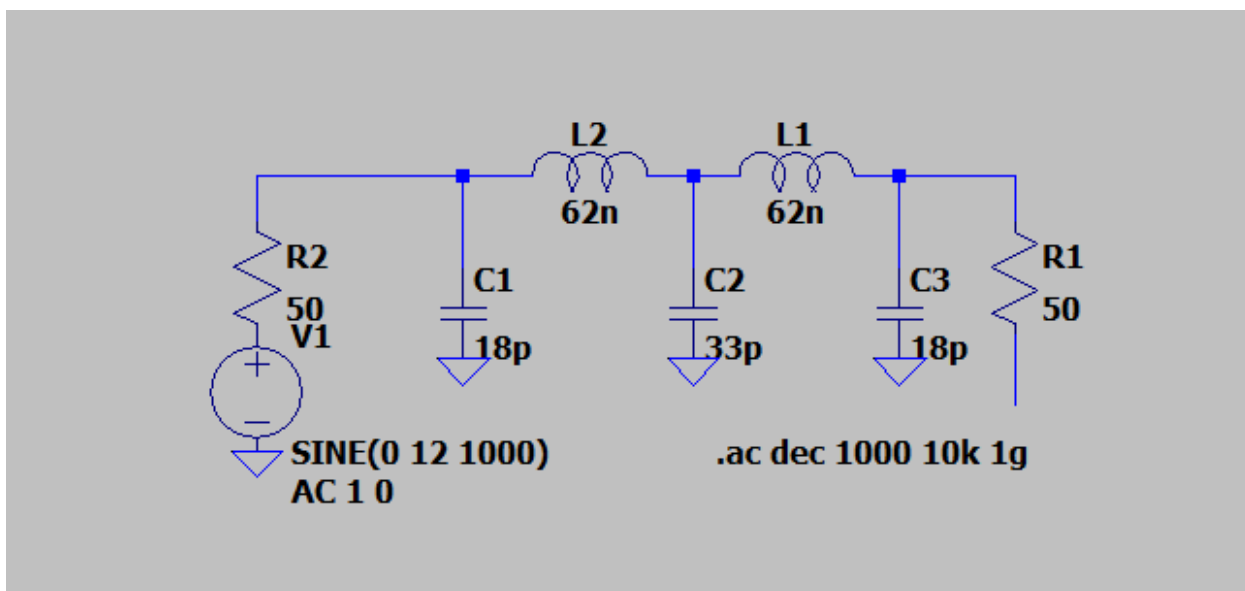


Рис.1.1.2 Схема зі зміненими параметрами індуктивності у LTspice

## 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 I-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 подвоєну 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 частоті (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.

## РОЗДІЛ 2

## Розрахунок параметрів АЧХ фільтру

За даними з книги [2] та сайту [4] 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  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_p$  та показник максимального спотворення квадрата АЧХ  $G_p$  за формулами :

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

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

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

Підставивши у них значення ми отримаємо

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

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

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

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 сторону 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

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

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

Після цього ми розраховуємо значення коефіцієнтів  $A_1, A_2$

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

де  $n = 1, 2$

$$A_1 = \frac{2*1-1}{2*5} * \pi = \frac{\pi}{10} \quad A_2 = \frac{2*2-1}{2*5} * \pi = \frac{3\pi}{10}$$

Тепер розрахуймо 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.

### РОЗІДЛ 3

#### Модуляція роботи схеми

На полосі пропускання ФНЧ Чебишева I-роду модульний коефіцієнт передачі коливається між значеннями максимального спотворення  $G_p$  від  $G_p = 1$  до  $G_p = \sqrt{1/(1 + \epsilon_p^2)}$ , де  $\epsilon_p$  - показники пульсації на полосі пропускання. Число хвиль пульсації, на полосі пропускання, залежить від порядку фільтру, позначеного буквою  $N$ .

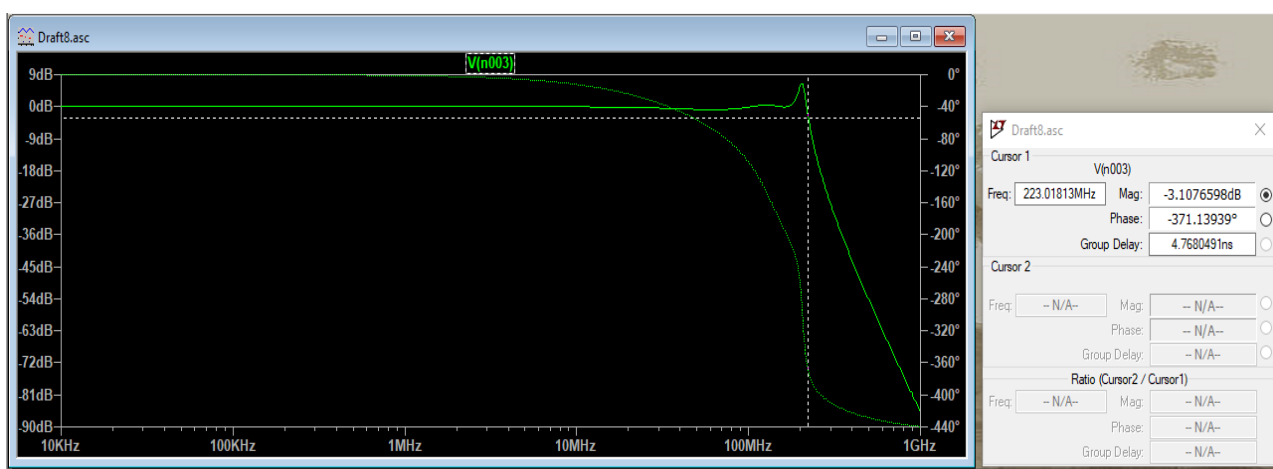


Рис.3.1 Результати модуляції у програмі LTspice

Як ми можемо бачити результати модуляції, то в нас лише явно виражені лише 2 пульсації, хоча фільтр має 5 порядок. Це все через те, що в нас дуже великий проміжок фільтрації діапазону [10 KHz ; 1 GHz], тому програма підставляє значення модуляції так, щоб ми змогли побачити весь проміжок і згладжує їх у рівну лінію.

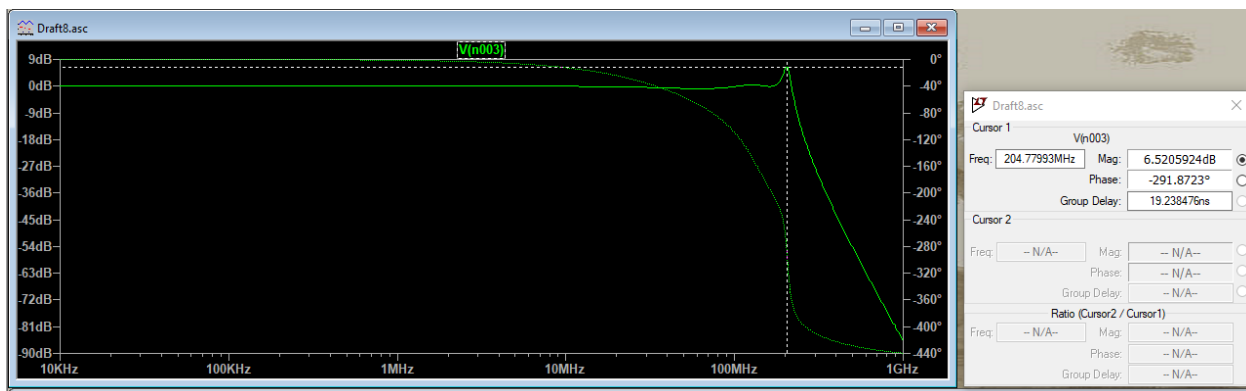


Рис.3.2 Максимальне значення пульсації на полосі пропускання

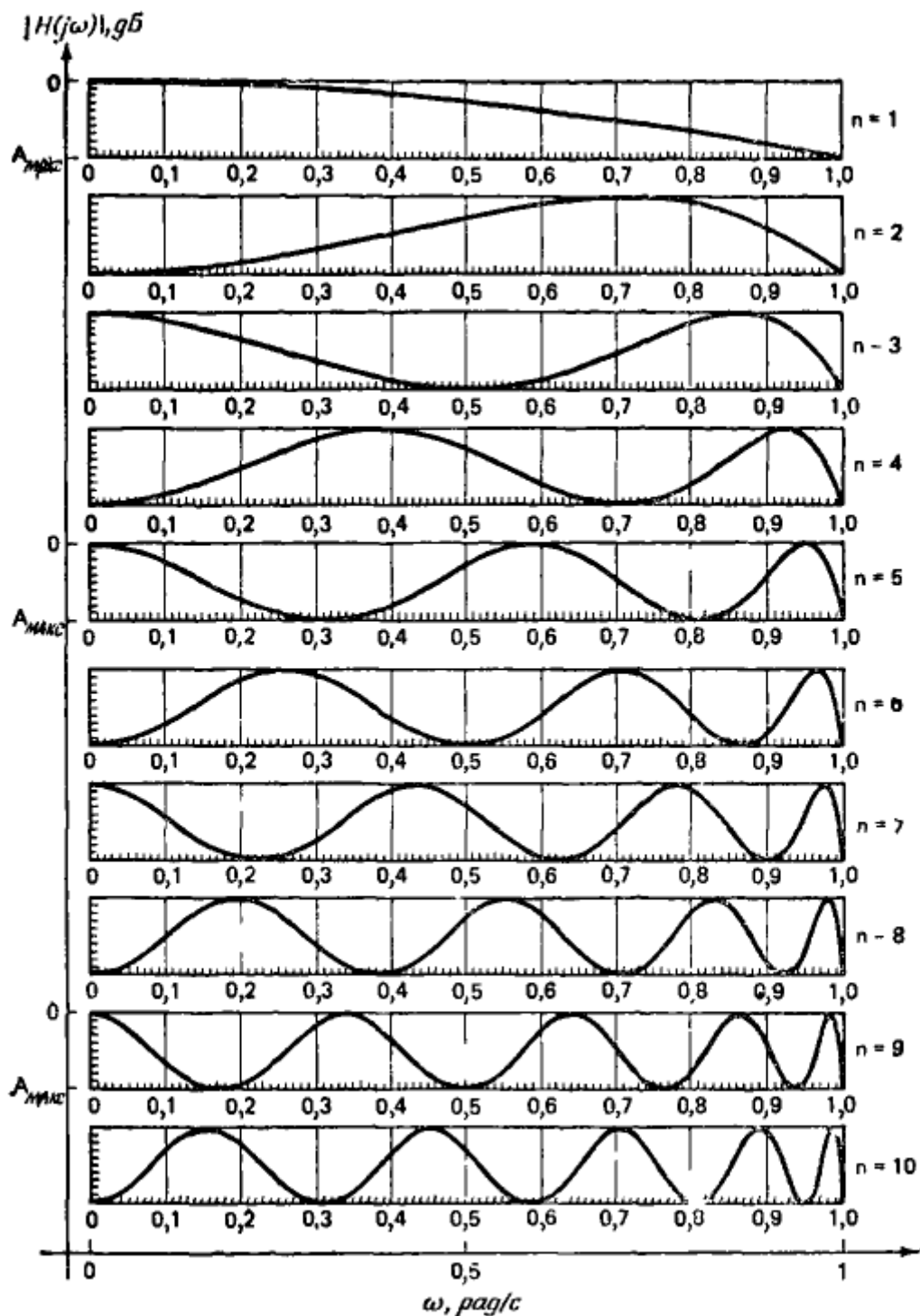


Рис.3.3 Залежність кількості хвиль пульсації на полосі пропускання від порядку фільтру Чебишева I роду

Як ми можемо бачити з рис.3.3 то на модуляції мають бути 5 критичних точок, які відповідають показникам  $G_p = 1$  та  $G_p = \sqrt{1/(1 + \varepsilon_p^2)}$ , тобто теоретично в нас мають бути три точки  $G_p = 1$  та дві точки  $G_p = \sqrt{1/(1 + \varepsilon_p^2)}$ . Це через резистор, який був поставлений замість входів, щоб зімітувати їх опір і для ідеальної модуляції таких пульсацій, як у книзі [2] потрібно підібрати ідеальні параметри опору.

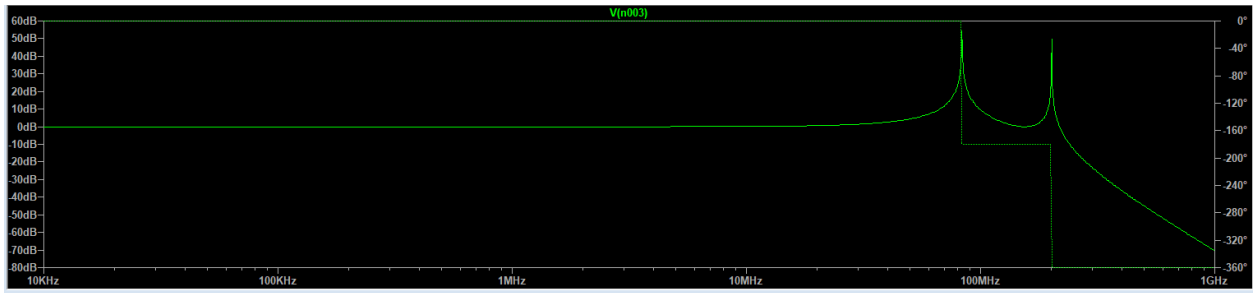


Рис.3.4 Викривлення АЧХ , якщо прибрати резистори R1 та R2

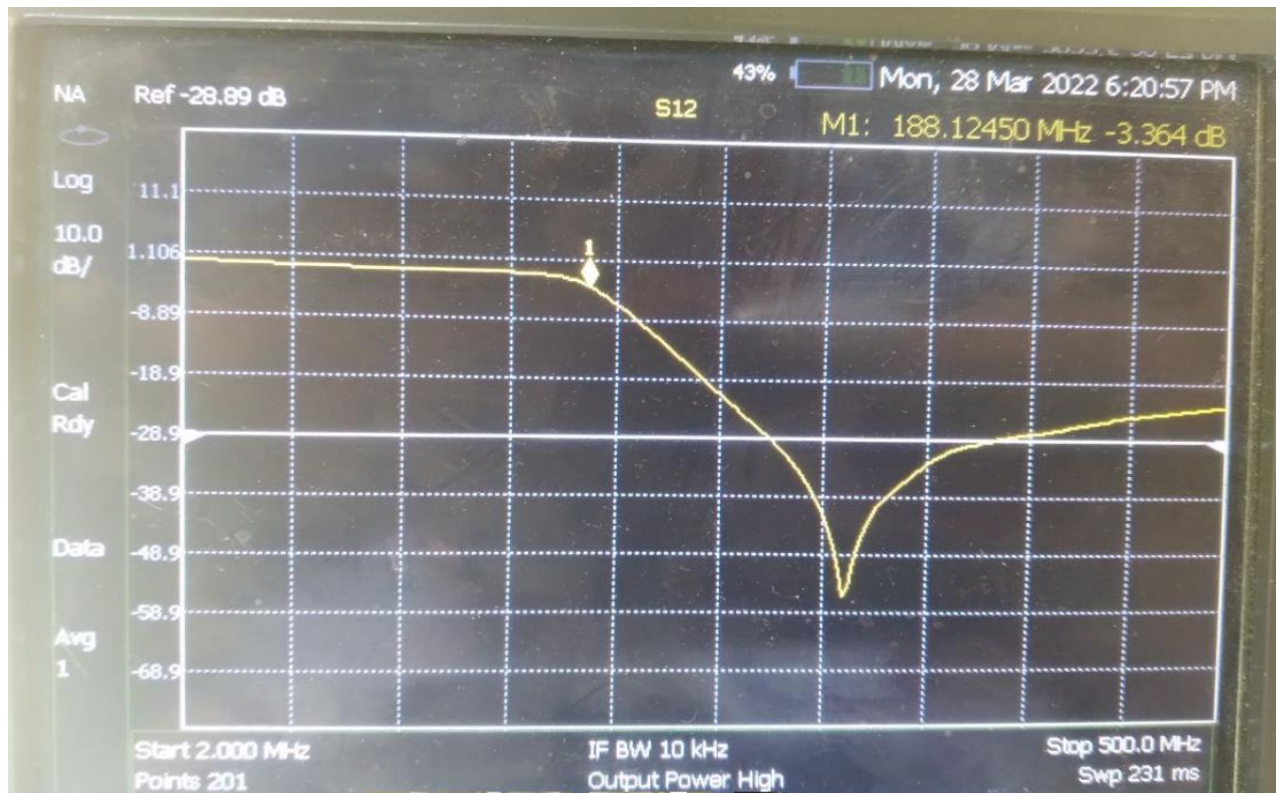


Рис.3.5 АЧХ прототипу



Рис.3.6. Прототип фільтру . Вид згори



Рис.3.7 Прототип фільтру. Вид знизу.

Як ми можемо бачити результати симуляції у програмі LTspice на рис.3.1 не співпадають з результатами замірів АЧХ прототипу з рис.3.5. Обумовлено це тим, що індуктивність схеми прототипу більша за індуктивність модуляції. Виправляється це, як сказано на сайті [1], простим розтягуванням котушок, щоб зменшити їх індуктивність .

## ВИСНОВОК

Як було сказано у третьому розділі теоретичні та практичні значення пульсацій на полосі пропускання не співпадають, оскільки для цього потрібно розрахувати значення ідеально наближені до математичної моделі. Утім, схема виконує свої функцію та працює як фільтр низьких частот, а частота зрізу наближена до 200МГц

В першому розділі був проведений аналіз обраної мною схеми та аналіз її роботи.

В другому були проведенні розрахунки формули для знаходження АЧХ .

В третьому розділі була проведена модуляція роботи схеми, аналіз та порівняння теоретичних та практичних результатів, а також описання , чому вони відрізняються .

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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. LTspice [Електронний ресурс] – Посилання на скачування: <https://www.analog.com/ru/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html#>
4. Расчет аналогового нормированного ФНЧ Чебышева первого рода [Електронний ресурс] - [https://ru.dsplib.org/content/filter\\_cheby1\\_ap/filter\\_cheby1\\_ap](https://ru.dsplib.org/content/filter_cheby1_ap/filter_cheby1_ap)