

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

## Лабораторна робота з аналогової схемотехніки №1

на тему:

**«Дослідження суматора напруг на резисторі та RC фільтрів»**

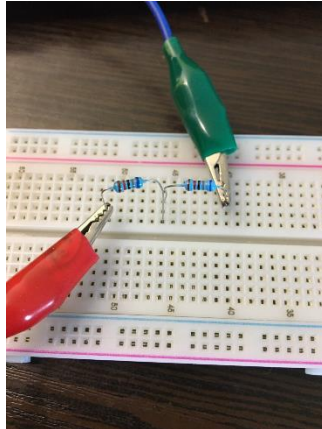
**Виконав Дем'янчук Т. М.**  
**студент II-го курсу ФЕЛ**  
**гр. ДК-12**  
**Дата виконання: 18.02.2023**  
**Перевірив:**  
**Короткий Є. В.**

---

## 1. Дослідження суматора напруг на резисторах.

1.1. Побудувати суматор напруг на 2 входи з резисторів однакових номіналів. Для гарного узгодження за напругою та з метою зниження струму, що протікатиме у колі, номінали резисторів необхідно обирати порядку кількох десятків кОм (50-100 кОм);

Побудовано схему суматора на двох резисторах з опорами по 68 кОм кожен.



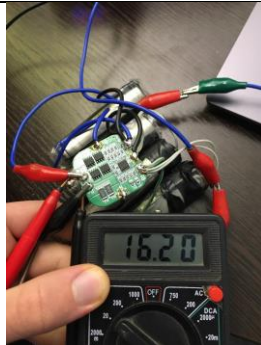
1.2. Подати на вхід дві довільні напруги з джерел постійної напруги та за допомогою вольтметра виміряти напругу на виході суматора. Порівняти одержане значення з теоретичним результатом  $U_{\text{вих}} = (U_1 + U_2)/2$ . Результати вимірювань занести до протоколу.

Напруги на вході

Теоретично розраховане значення вихідної напруги на виході суматора.



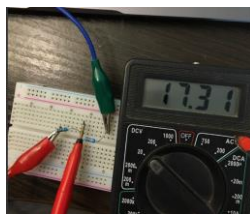
$$U_1 = 19.7$$



$$U_2 = 16.2$$

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_1 + U_2}{2} = \frac{19.7 \text{ V} + 16.2 \text{ V}}{2} = 17.95 \text{ V}$$

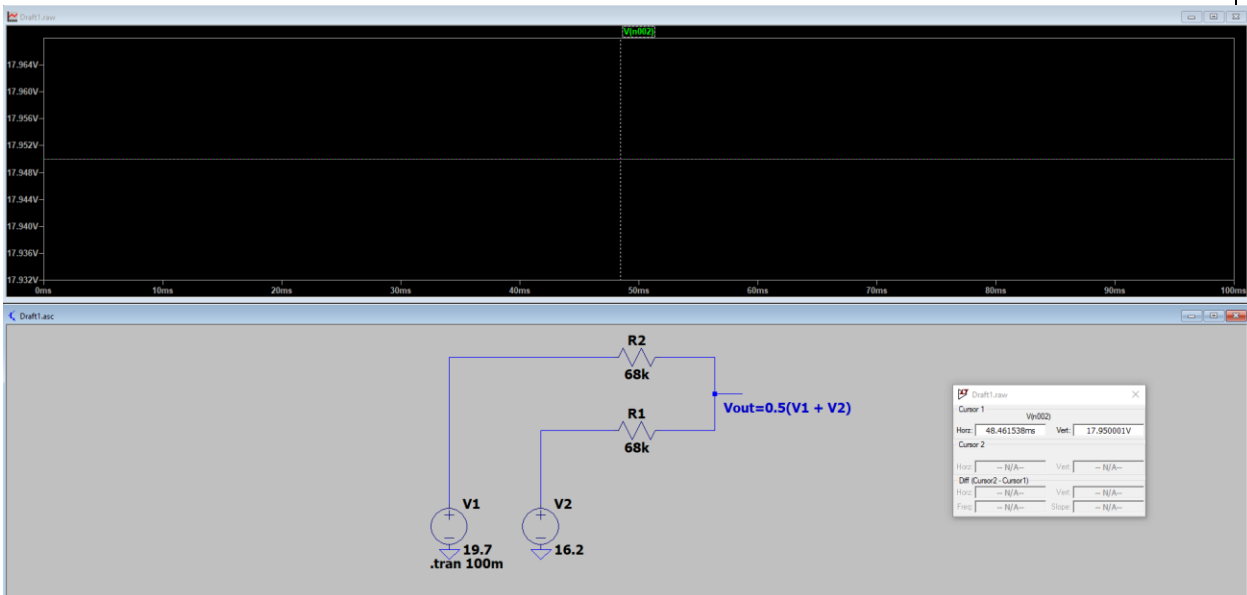
Напруга на виході суматора становить



$$U_{\text{вих}} = 17.31 \text{ V}$$

1.3. Промодельовати роботу суматора в LTSpice для тих же вхідних напруг, що були використані при проведенні вимірювань на реальних приладах. Порівняти одержані результати з результатами реальних вимірювань. Результати симуляції (схема, графіки) занести до протоколу.

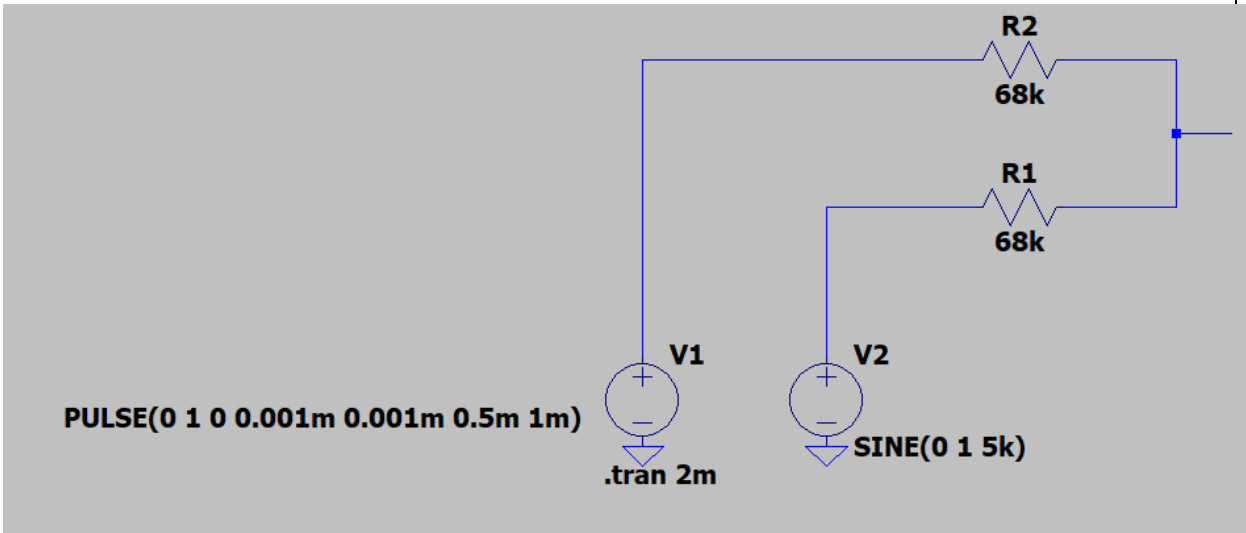
Побудовано схему суматора напруг на двох резистора по 68 кОм кожен в симуляторі LTSpice



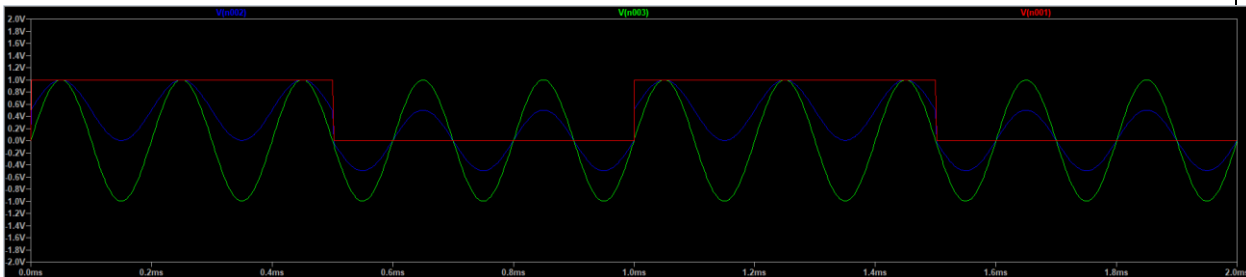
Як бачимо із результатів теоретичного розрахування вихідної напруги суматора та результатів симуляції вихідної напруги суматора в програмі LTSpice вихідні напруги – рівні, але результати практичного дослідження дещо відрізняються від тих результатів, що були отримані теоретично та в процесі симуляції. Розходження в значеннях вихідної напруги суматора напруги можуть бути викликані похибкою вимірювального приладу.

1.4. Промодельовати роботу суматора в LTSpice для сигналів: 1 – Меандр з частотою 1 кГц та амплітудою 1 В; 2 – Синус з частотою 5 кГц та амплітудою 1 В. Результати симуляції занести до протоколу.

Побудовано схему суматора напруг на двох резистора по 68 кОм кожен в симуляторі LTSpice



Отримано графіки вхідних та вихідного сигналів



Де:

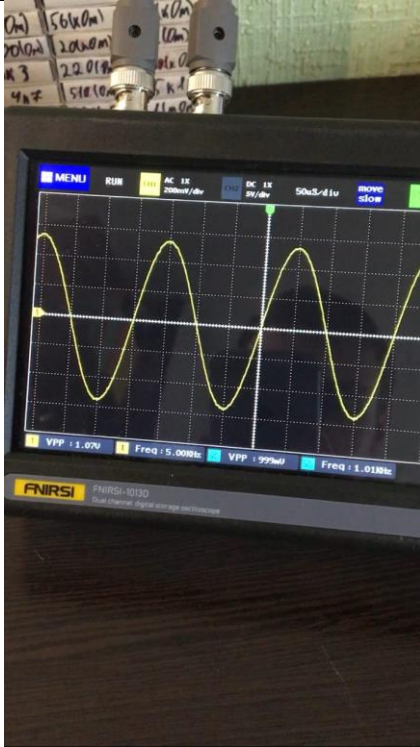
Меандр червоного кольору – сигнал на виході V1 відносно землі.

Синус зеленого кольору – сигнал на виході V2 відносно землі.

Синус синього кольору – сигнал на виході суматора напруг відносно землі.

1.5. Подати на входи суматора два сигнали з генераторів. Перший сигнал імпульсний (меандр) з частотою 1 КГц, амплітудою 1В. Другий сигнал синусоїдальний з частотою 5 КГц, амплітудою 0.5В.

#### Сигнали з генераторів імпульсів



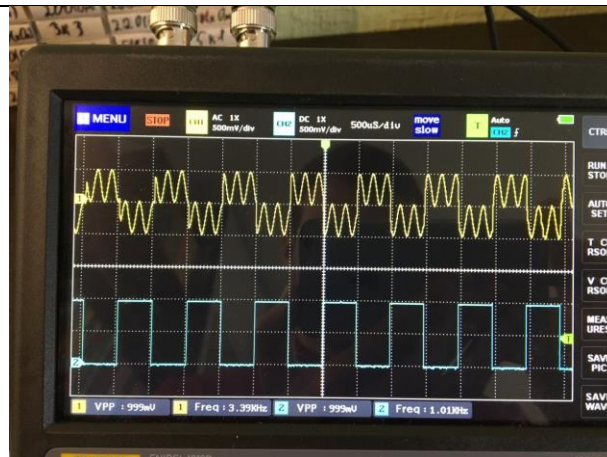
VPP = 1.07 В; f = 5 кГц



VPP = 1 В; f = 1 кГц

Синій сигнал – меандр, що генерується генератором прямокутних сигналів на базі модуля в основі якого лежить таймер NE555.

Жовтий сигнал – сигнал, що генерується ноутбуком.



При роботі в двоканальному режимі осцилограф вносить похибки в значення частоти сигналів.

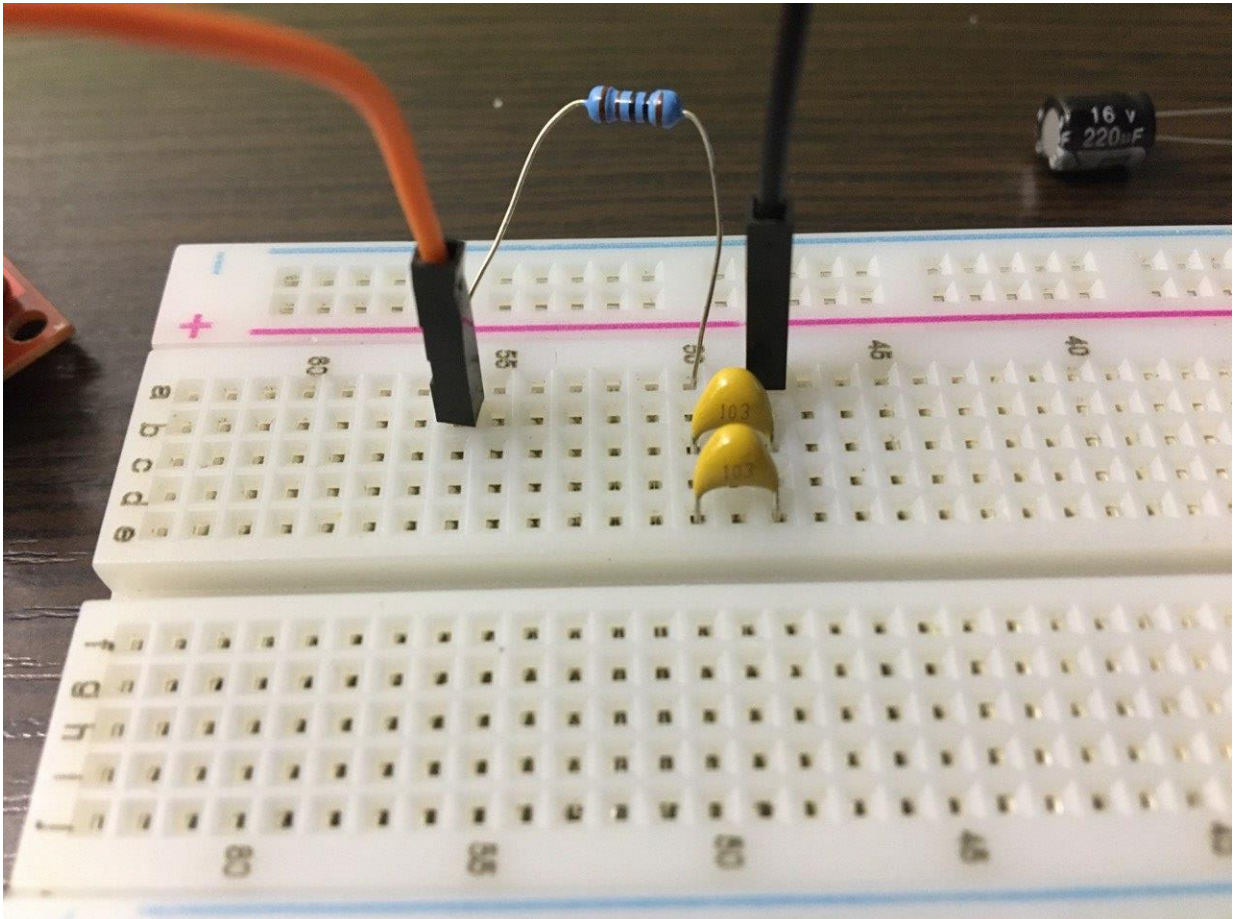
Жовтий сигнал – сигнал, що знімається із вихода суматора напруг.

Синій сигнал – меандр, що генерується генератором прямокутних сигналів на базі модуля в основі якого лежить таймер NE555.

## 2. Дослідження RC ланцюжка.

2.1. Скласти схему RC ланцюжка для довільних значень ємності і опору (опір резистора можна брати порядку кілоома, ємність конденсатора порядку десятків нанофарад).

Складено схему RC ланцюжка з конденсаторів сумарною ємністю в 20 nF та резистора опором 1 кОм



2.2. Розрахувати тривалість заряду та розряду ємності для цього ланцюжка. Результати занести до протоколу.

### Розрахунок тривалості заряду конденсатора

Оскільки напруга на конденсаторі, що підключений послідовно з резистором до джерела напруги, в залежності від часу описується наступною формулою:  $U_c(t) = E \times (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ , то, дивлячись на цю формулу можна сказати, що за час, що дорівнює  $t = 5RC$  напруга на конденсаторі становитиме  $\approx 0.993E$ , це значення напруги і будемо вважати таким, при якому конденсатор заряджений. Тоді, у відповідності до вище написаного і до вибраних значень ємності та опору RC ланцюжка можна визначити час, що буде потрібен для заряду конденсатора:

$$t = 5RC = 5 \times 1000 \times 2 \times 10^{-8} = 100 \text{ мКс}$$

Тобто конденсатор зарядиться за 100 мКс. Водночас напруга на ньому буде становити  $\approx 0.993V$ .



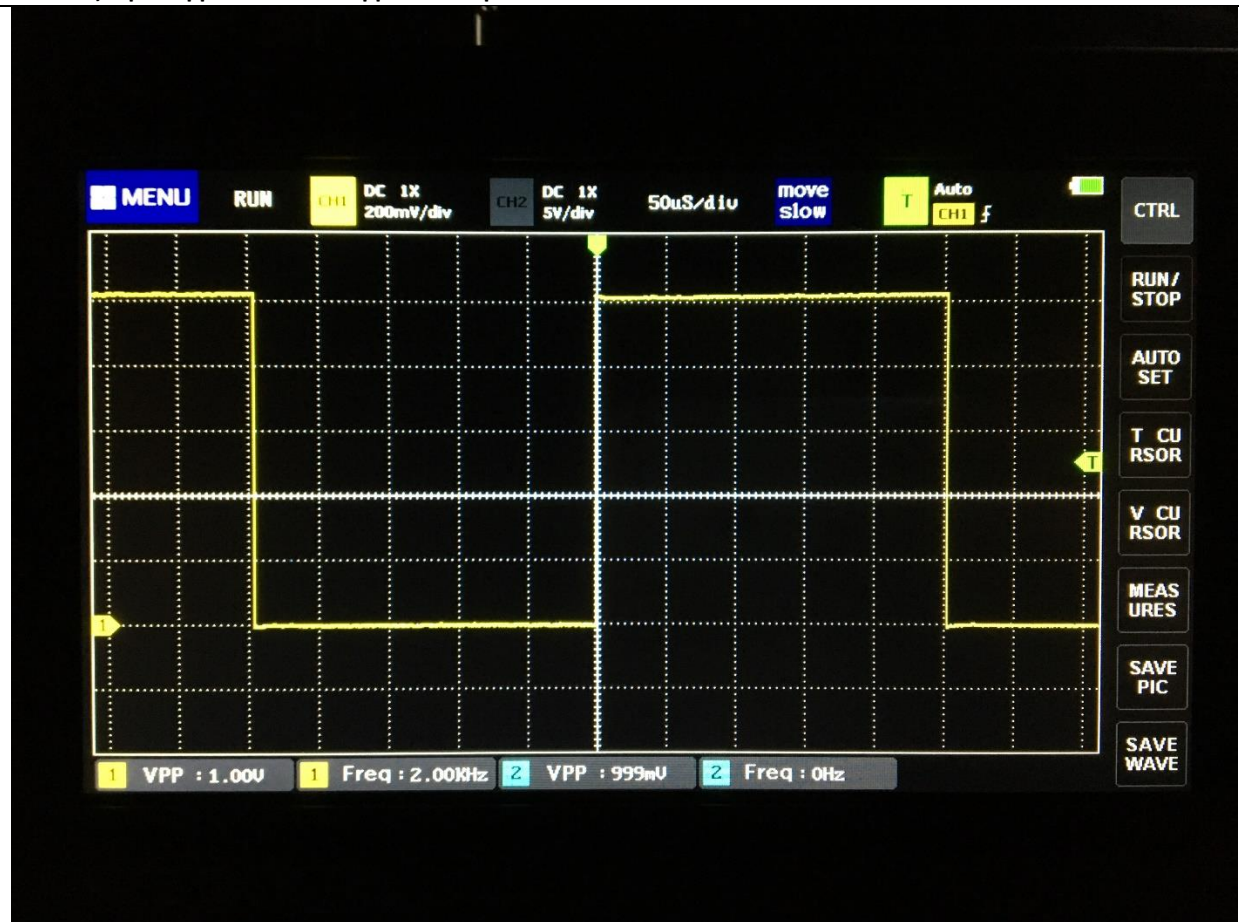
### Розрахунок тривалості розряду конденсатора

При розряді конденсатора через резистор напруга на ньому з плином часу буде змінюватися за наступною формулою  $U_c(t) = E \times e^{-\frac{t}{RC}}$ , після сплину часу, що дорівнює  $t = 5RC$ , напруга на конденсаторі становитиме  $\approx 0.00673E$ , це значення напруги і приймемо за таке, при якому будемо вважати, що конденсатор розряджений. Тоді, у відповідності до вище написаного конденсатор розрядиться за час, що становитиме:

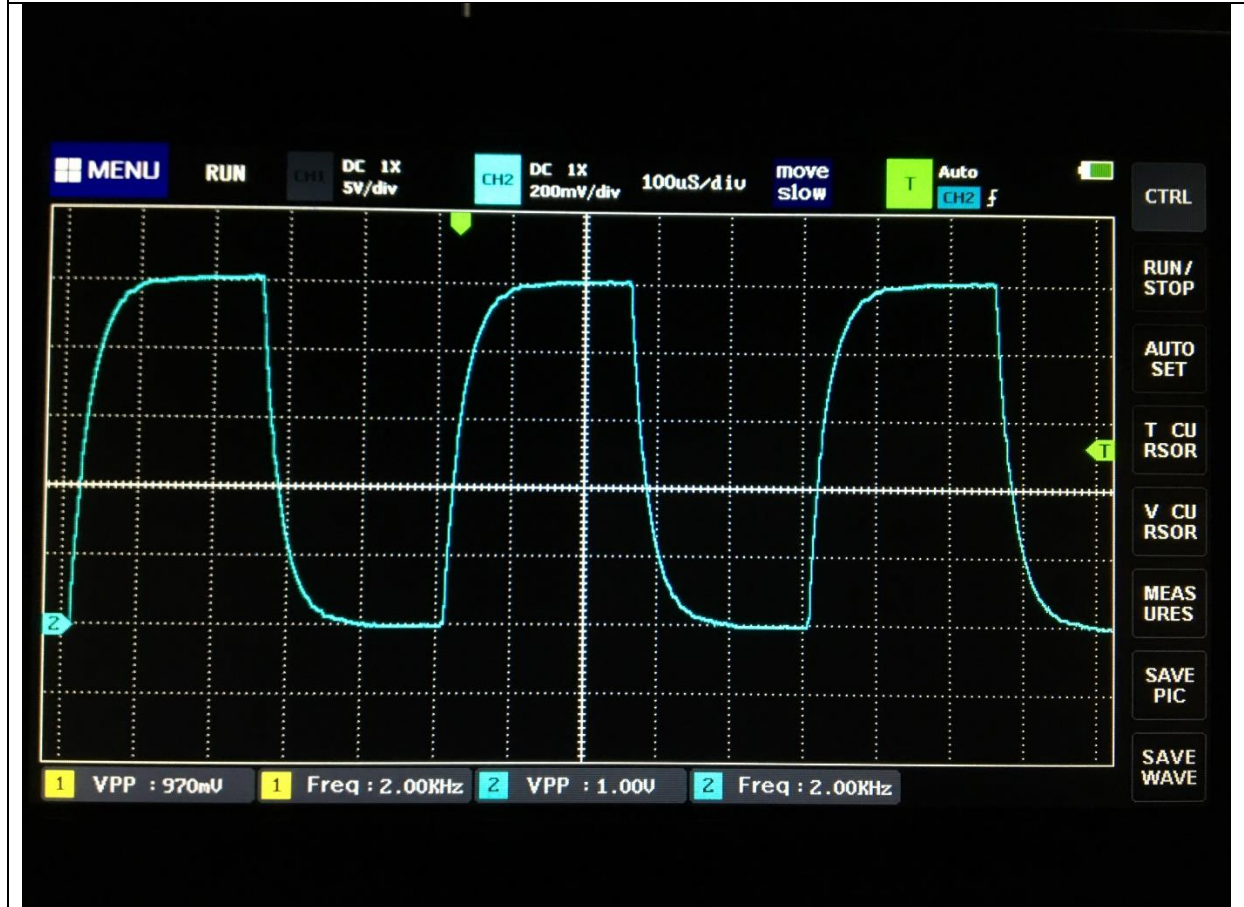
$$t = 5RC = 5 \times 1000 \times 2 \times 10^{-8} = 100 \text{ мКс}$$

2.3. Подати на вхід RC ланцюжка імпульсну напругу з генератора з амплітудою 1 В та такою частотою, щоб період був в 4-6 разів більший за розраховану тривалість заряду-розряду. На осцилографі подивитися на вхідний та вихідний сигнали RC ланцюжка (сфотографувати картинку). Перевірити, що тривалість заряду-розряду дорівнює розрахованому значенню. Результати вимірювань занести до протоколу.

Нехай період буде в 5 разів більший ніж розрахована тривалість заряду-розряду, у такому випадку частота становитиме 2000 Гц. Нижче приведено фото сигналу на осцилографі - це сигнал, що подається на вхід RC ланцюжка.

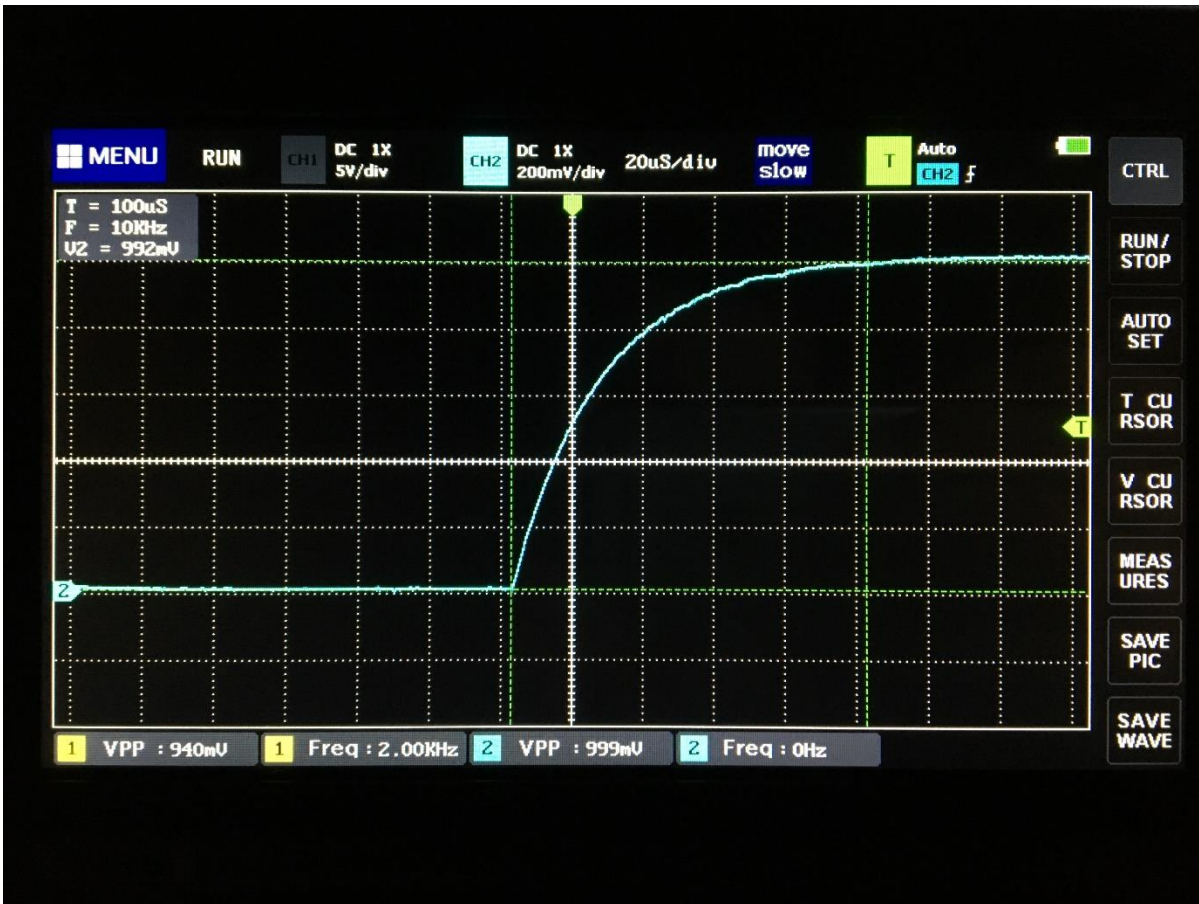


Нижче приведено фото сигналу на осцилографі - це сигнал, що знімається з виходу (точки з'єднання резистора та конденсатора) RC ланцюжка.





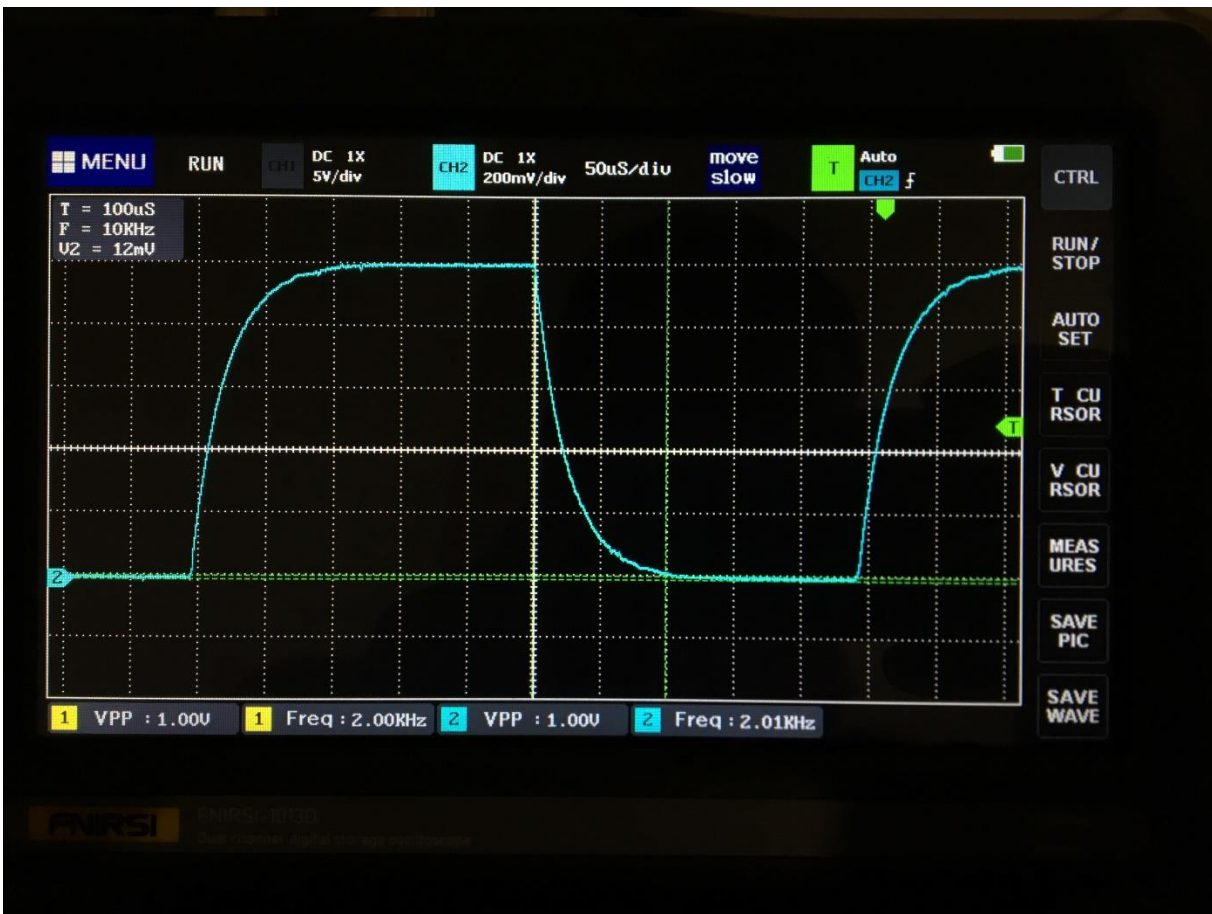
Визначено час заряду конденсатора



Із вікнця зверху зліва видно, що за 100 мКс конденсатор заряджається до напруги 0.992 В, тобто практично до тієї ж напруги, що була обрахована теоретично, похибка становить всього лиш 1 мВ, що є доволі хорошим результатом.

## Визначимо час розряду конденсатора.

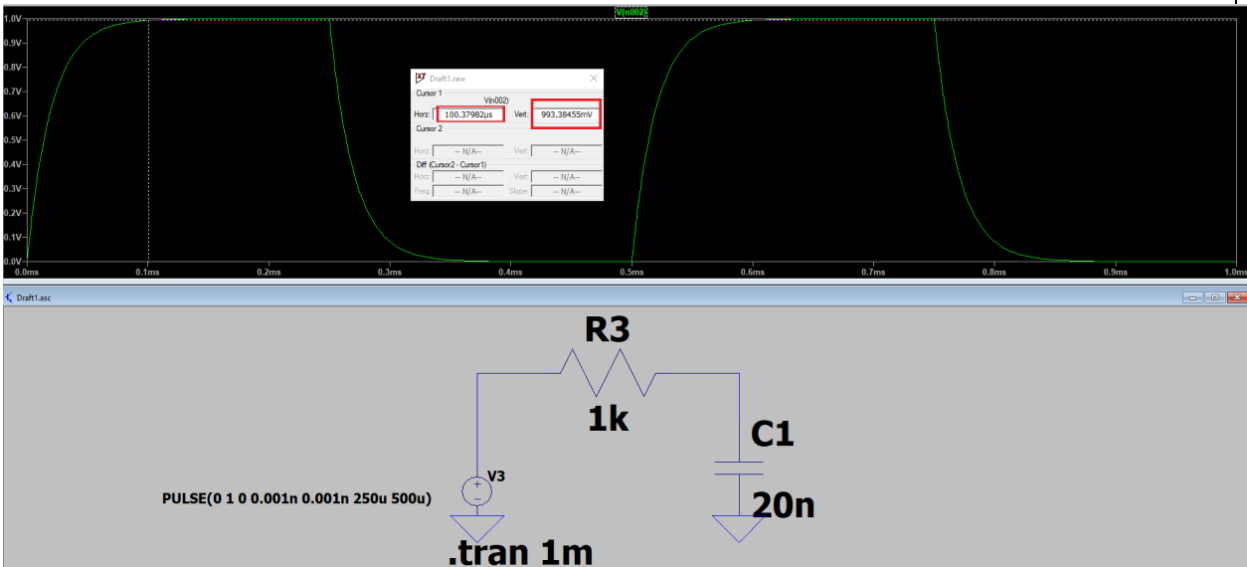
Визначено час розряду конденсатора



Як видно з показників на осцилографі, після сплину 100 мКс на конденсаторі напруга становить 12 мВ, що дещо більше ніж те значення напруги, що було отримане в ході теоретичного обрахунку, але якщо зважати на можливу похибку вимірювального приладу, а також на те, що джерело напруги має деякий невеликий опір який додається до резистора на 1 кОм і у зв'язку з чим конденсатор починає розряджатися трішки довше, то можна вважати, що отримане значення відповідає теоретичному розрахунку.

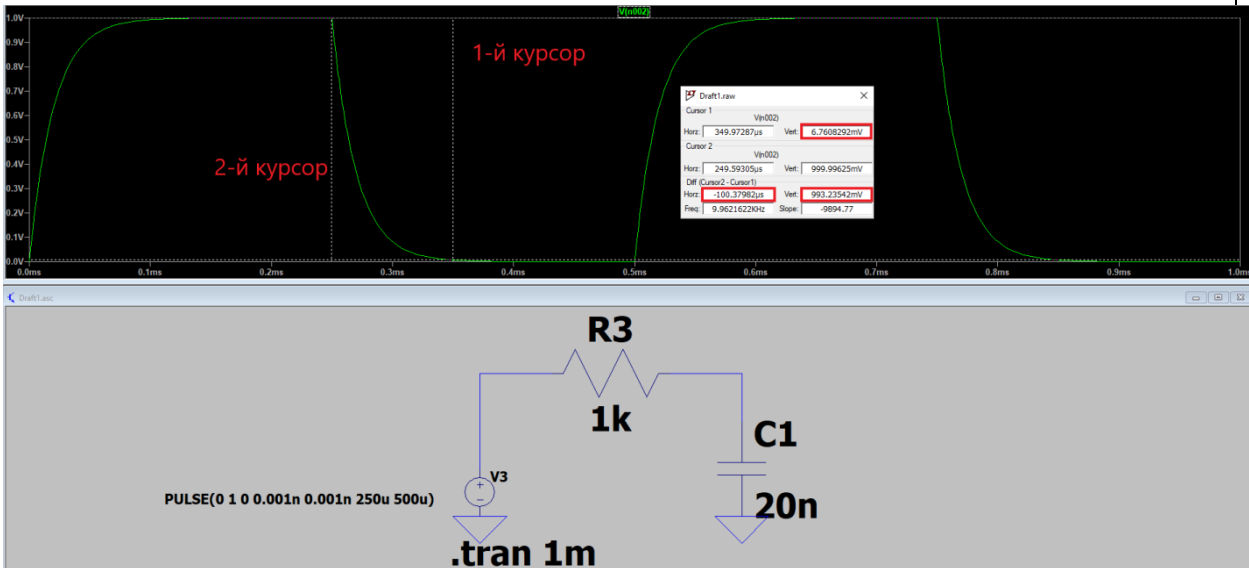
2.4. Промодельовати роботу схеми в LTSpice. Пересвідчитись, що затримка заряду-розряду ємності при симуляції дорівнює затримці заряду при реальних вимірюваннях. Результати симуляції занести до протоколу.

#### Заряд конденсатора



Як видно із скріншота – через 100 мкс напруга на конденсаторі становить  $\approx 0.993\text{В}$ , тобто практично те ж значення, що ми отримали теоретично в пункті 2.2., а також при реальних вимірах на осцилографі. Це свідчить про те, що результати практичного заміру (на “жалізі”) та результати, що були отримані теоретично – вірні.

## Розряд конденсатора



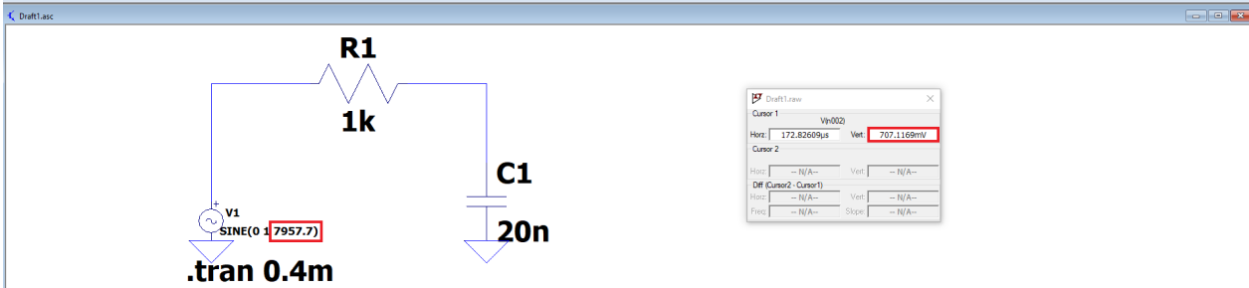
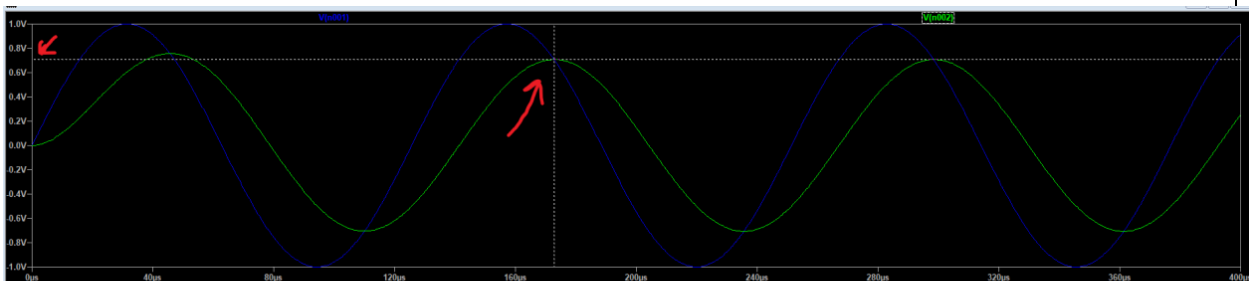
Як видно із скріншота – через час, що практично рівний 100 мкс з моменту заднього фронту сигналу (тобто з моменту, коли амплітуда сигналу типу меандр стала рівною 0) конденсатор розрядився до напруги, що практично рівна напрузі, яку ми отримали при теоретичному розрахунку, а також напрузі, яку було отримано в ході практичного заміру на реальних приладах, тобто напруги, що становить  $\approx 0.00673$ . Це свідчить про те, що результати практичного заміру (на “жалізі”) та результати, що були отримані теоретично – вірні.

### 3. Дослідження RC фільтру низької частоти.

#### 3.1. Розрахувати значення частоти зрізу. Результат занести до протоколу.

$$R=1 \text{ кОм}, C=20 \text{ нФ}$$

Тоді частота зрізу  $f=1/2\pi RC = 7957.7 \text{ Гц}$ . При частоті зрізу напруга на виході RC ланцюжка повинна становити  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  В при вхідній напрузі 1 В.



Як бачимо, напруга на конденсаторі при вхідній частоті на RC ланцюжок, що дорівнює частоті зрізу, дорівнює напрузі що становить  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  В. Це свідчить про те, що теоретичний розрахунок було виконано вірно.

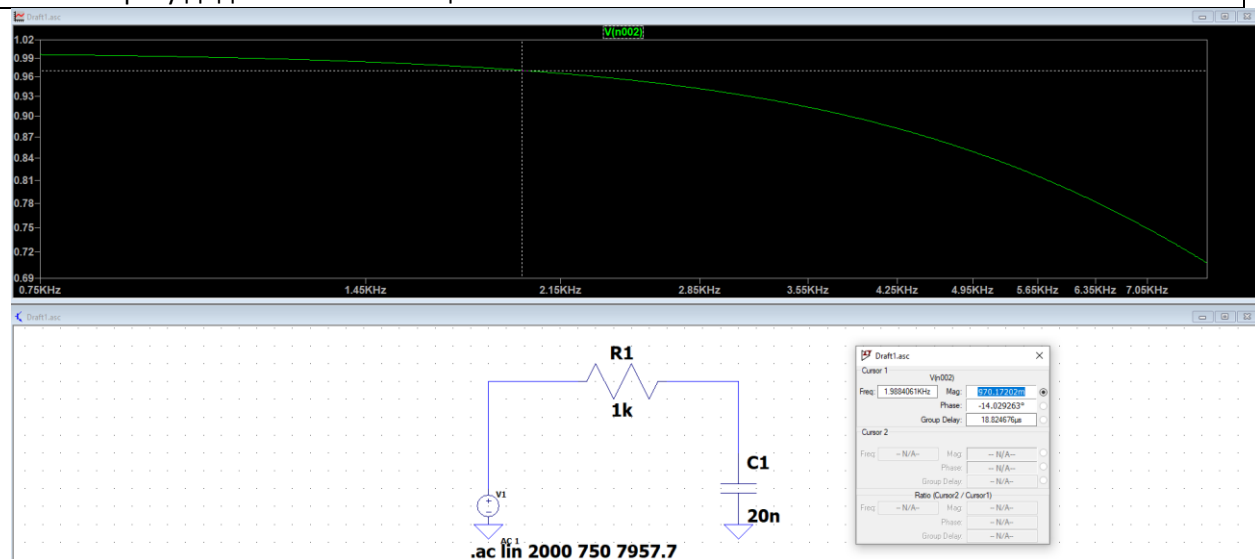


3.2. Виміряти амплітудно-частотну характеристику фільтра. Для цього необхідно подати на вхід фільтру синусоїдальний сигнал з генератора з амплітудою 1В та частотою зрізу. Визначити амплітуду синусоїдального сигналу на виході фільтру. Розрахувати коеф. передачі за напругою ( $K_u$ ) для даної частоти (відношення амплітуди вихідного сигналу до амплітуди вхідного сигналу). Розбити інтервал частот від 0 до частоти зрізу на 3-4 відрізки і для частот на кінцях цих відрізків визначити значення  $K_u$ . При цьому необхідно слідкувати, щоб амплітуда вхідного сигналу завжди дорівнювала 1 В. Розрахувати  $K_u$  для нульової частоти. Взяти 4-5 значень частоти вище частоти зрізу та визначити для них  $K_u$ . Перевірити, що  $K_u$  на частоті близькій до нуля в корінь з двох раз більший ніж  $K_u$  на частоті зрізу. Результат вимірів занести до протоколу у вигляді таблиці частота-> $K_u$ .

Амплітуда синусоїдальної напруги на виході фільтру становить  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  В, це видно зі скріншоту в пункті 3.2..

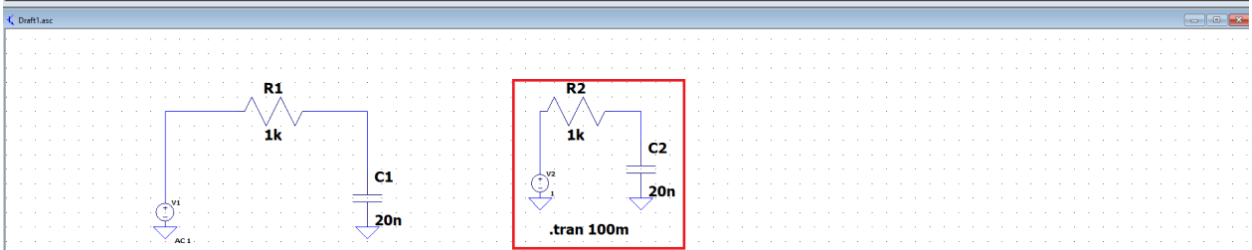
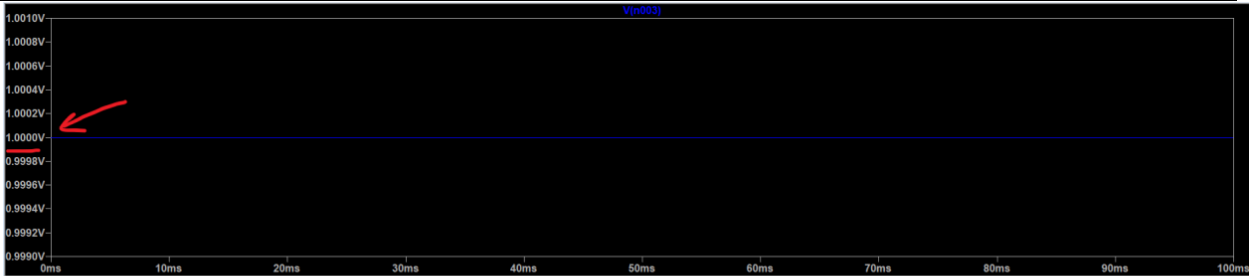
Коефіцієнт передачі за напругою становить:  $K_u = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}}}{1} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ .

Частота зрізу становить 7957.7 Гц, поділимо цю частоту на 4 та отримаємо 1989.425 Гц. Знайдемо коефіцієнт передачі за напругою рухаючись від частоти 1989.425 Гц і до частоти зрізу кожного разу додаючи 1989.425 Гц.



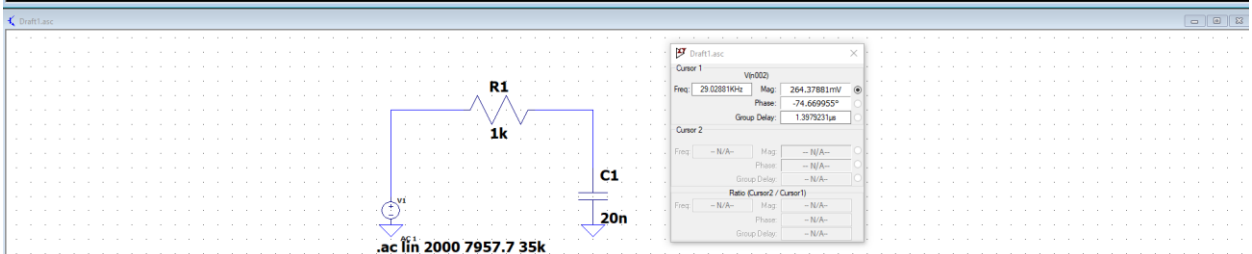
Частота, Гц	Коефіцієнт передачі за напругою
1988	$K_u = 0.9702$
3978	$K_u = 0.8944$
5,968	$K_u = 0.8002$

Якщо частота на вході буде 0 Гц, то це означає, що сигнал на виході генератора в часі не змінюється, тобто він від нього не залежить. Іншими словами – сигнал на виході генератора постійний і його амплітуда дорівнює 1 В. Відповідно  $K_u = 1$ .

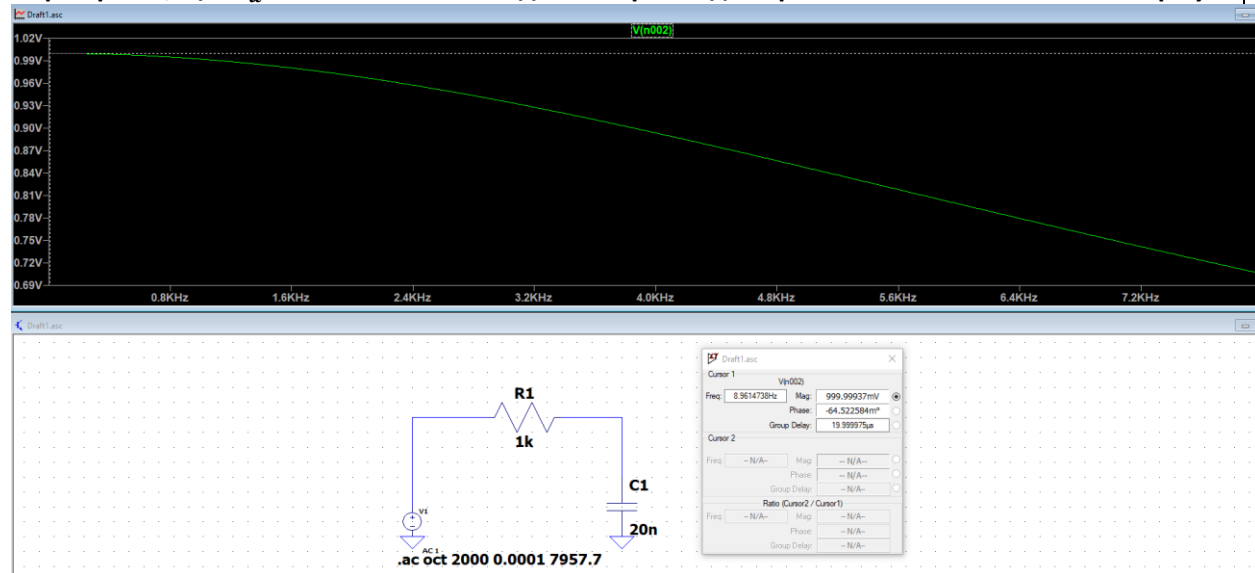


Визначимо коефіцієнт передачі на декількох частотах, що вище частоти зрізу.

Частота, кГц	Коефіцієнт передачі за напругою
10	$K_u = \frac{0.6222}{U_{in}} = \frac{0.6222}{1} = 0.6222$
14	$K_u = 0.4936$
17	$K_u = 0.4238$
20	$K_u = 0.369$
29	$K_u = 0.2644$

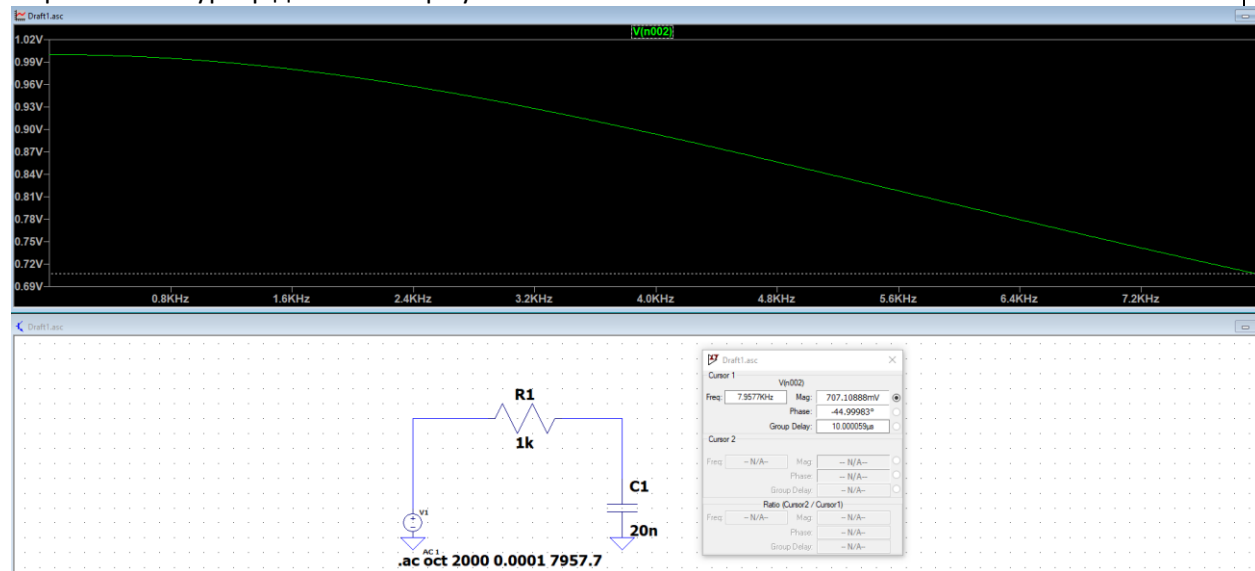


Перевіримо, що  $K_u$  на частоті близькій до 0 в корінь з двох разів більший ніж на частоті зрізу:



Бачимо, що на частоті, що практично рівна 9 Гц, амплітуда на виході становить 0.999999 V, тобто практично 1 V.  $K_u$  на цій частоті становитиме  $K_{u1} = \frac{0.999999}{1} = 0.999999$

Перетягнемо курсор до частоти зрізу:

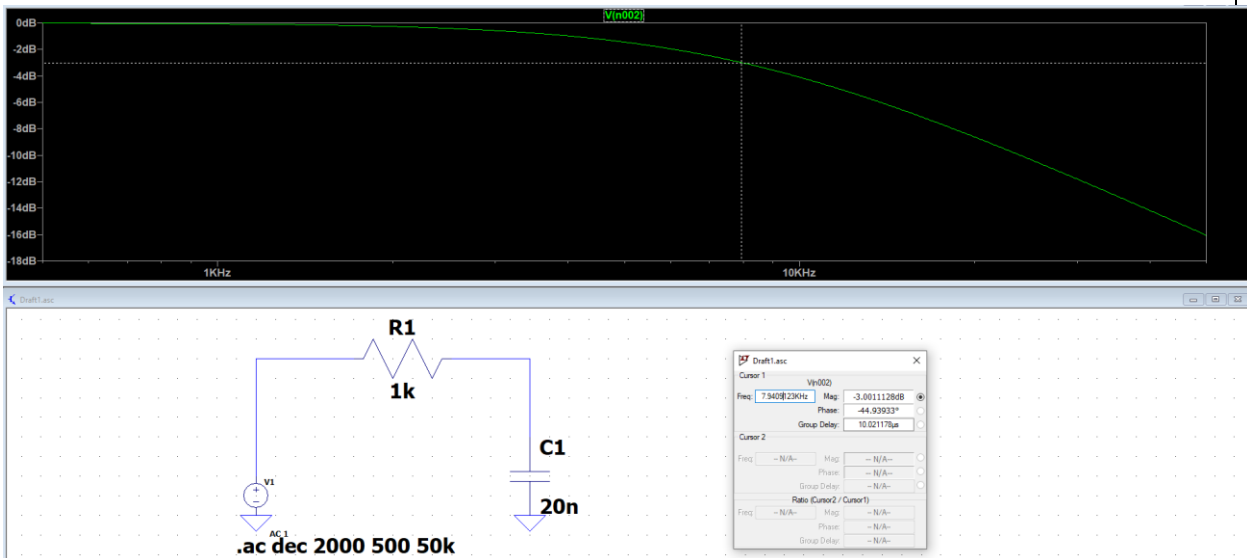


Бачимо, що амплітуда на цій частоті становить 0.707 V.  $K_u$  на цій частоті становитиме  $K_{u2} = \frac{0.707}{1} = 0.707$

Поділимо  $K_{u1}$  на  $K_{u2}$  та отримаємо  $\frac{K_{u1}}{K_{u2}} = \frac{0.999999}{0.707} = 1.4144$ . Відомо, що корінь з двох приблизно рівний 1.4142, тобто, як бачимо, коефіцієнт передачі за напругою при низькій частоті дійсно більший у корінь з двох разів за коефіцієнт передачі за напругою при частоті зрізу.

### 3.4. Побудувати графік амплітудно-частотної характеристики в LTSpice.

Побудовано графік АЧХ в LTSpice



Бачимо, що при амплітуді в -3 дБ частота практично рівна тій, що ми отримали в ході теоретичного розрахунку частоти зрізу, що ще раз підтверджує те, що на частоті зрізу амплітуда вихідного сигналу RC фільтру зменшується в  $\sqrt{2}$  разів, адже:

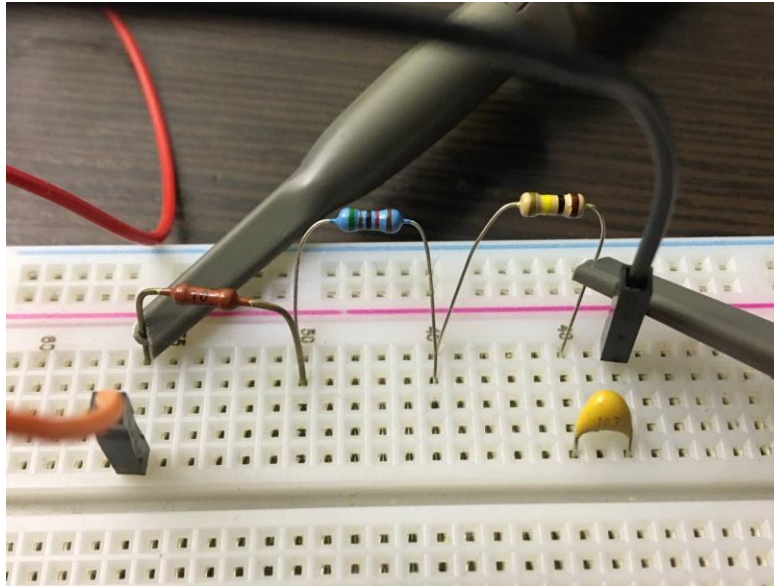
$-3\text{дБ} = 20 \log \frac{U_2}{U_1}$ , де  $U_2$  – амплітуда вихідного сигналу, а  $U_1$  – амплітуда вхідного сигналу.

Оскільки у нас амплітуда вхідного сигналу становить 1 В, то вираз вище прийме наступний вигляд:

$$-3\text{дБ} = 20 \log U_2 \Rightarrow U_2 = 10^{-\frac{3}{20}} \approx 0.707 \text{ В}$$

3.5. Побудувати графік амплітудно-частотної характеристики для RC ланцюжка з резистором 161 кОм та ємністю 10 нФ.

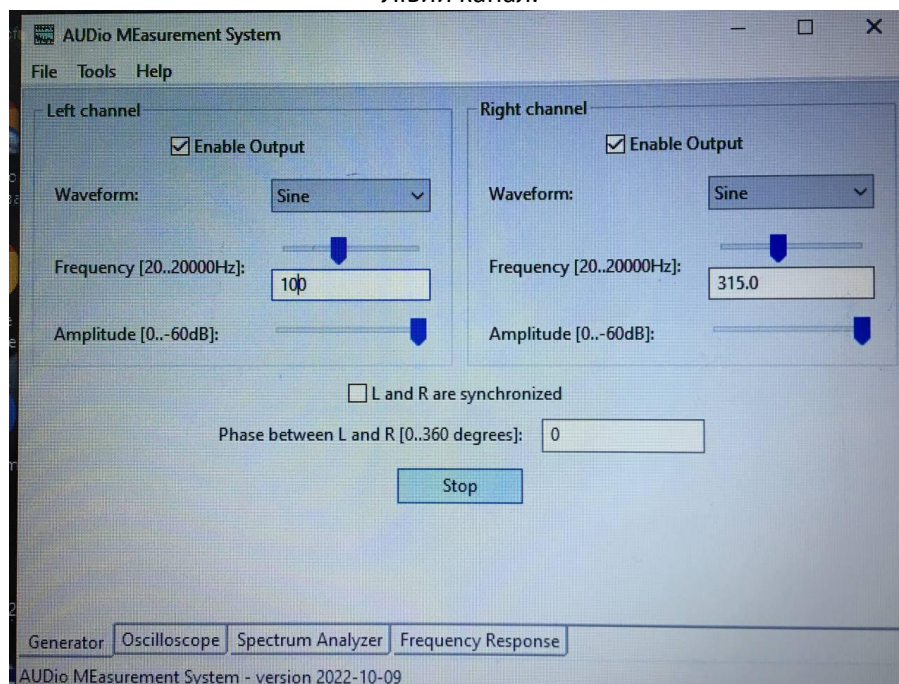
Побудовано схему RC ланцюжка



Знайдемо частоту зрізу даного RC ланцюжка:  
 $f = 1 / 2\pi RC \approx 100 \text{ Гц}$

Подамо на вхід RC ланцюжка синусоїдальний сигнал амплітудо (пік-пік) 1 В та частотою 100 Гц.

Лівий канал.







Синій синус – вхідний сигнал.  
Жовтий синус – вихідний сигнал.

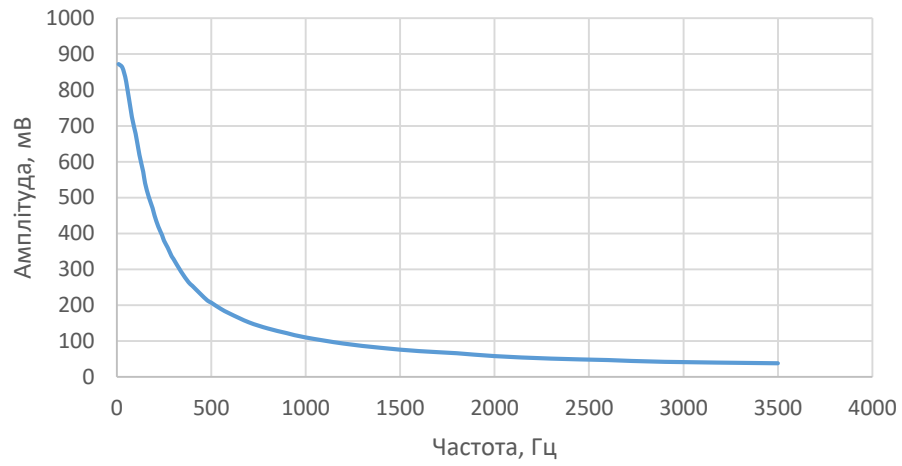
Бачимо, що напруга (пік-пік) становить 682 мВ. При вхідній напрузі в 1 В напруга на виході RC ланцюжка повинна становити 0.707 В, а у нас значення дещо менше. Це із-за того, що конденсатор та резистор (декілька послідовно включених) не мають ідеально заявленого значення ємності та опору відповідно, також похибку вносить вимірювальний прилад.

Подаватимемо на вхід RC ланцюжка синусоїдальну напругу з ноутбука з амплітудою (пік-пік) 1 В та частотами від 10 Гц до 3500 Гц паралельно заповнюючи таблицю відповідності частота-амплітуда (амплітуда на виході).

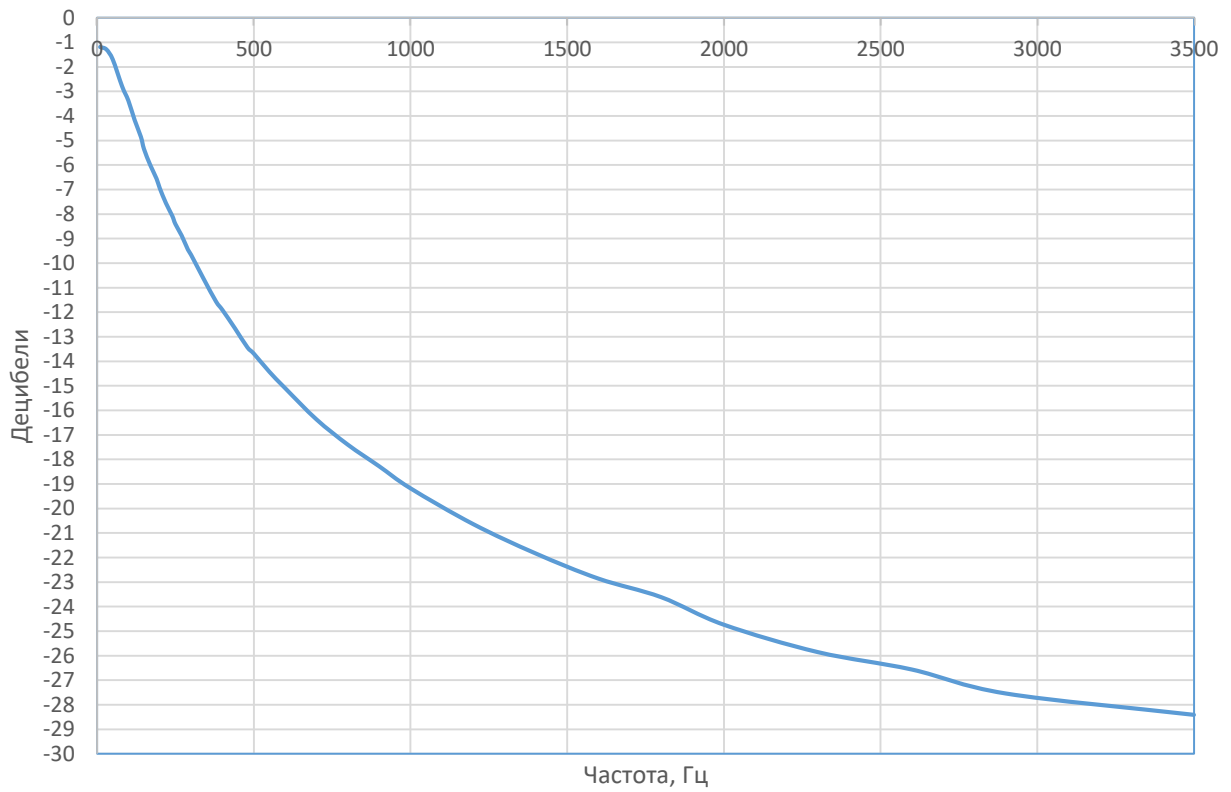
частота на вході, Гц	амплітуда на виході (пік-пік), мВ
10	872
30	862
50	823
80	725
100	678
120	619
140	572
150	540
170	501
190	470
200	450
220	419
240	395
250	380
270	360
290	337
300	329
340	294
380	264
400	254
440	233
480	213
500	207
550	190
600	176
700	152
800	135
900	122
1000	110
1200	93
1400	81
1600	72
1800	66
2000	58
2300	51
2600	47
2900	42
3500	38

Із отриманих значень побудуємо графіки АЧХ у вольтах та децибелах.

АЧХ (Мілівольти)



АЧХ (Децибели)



## Висновок

1. Пункт: в першому пункті було досліджено суматор напруг на резисторах однакового опору. Було складено реальну схему та схему в симуляторі, а також заміряно напруги на виході суматора при одних і тих же значеннях вхідних напруг. Було помічено, що напруга на виході зібраного в домашніх умовах суматора дещо відрізняється від розрахованої теоретично та тієї, що отримали в процесі замірів в симуляторі LTSpice. Похибка спричинена неточними значеннями опорів резисторів (значення опору яких знаходиться в межах допустимої похибки) та похибкою вимірювального приладу.
2. Пункт: в другому пункті було досліджено RC ланцюжок. Теоретично обраховано тривалість його заряду та розряду, а також перевірено теоретично отримане значення значеннями, що були отримані в ході практичного дослідження та в ході симуляції в програмі. Була розбіжність в тривалості розряду конденсатора, яка могла бути спричинена внутрішнім опором джерела напруги.
3. Пункт: в третьому пункті було досліджено RC фільтр. Також переконалися в тому, що при частоті зрізу напруга на виході RC фільтру в корінь з двох раз менша за вхідну. На останок було знайдено АЧХ RC фільтру побудованого на резисторі з опором в 161 кОм та конденсатором з ємністю 10 нФ.