

Роботу виконав:
Студент 2 курсу
5 А групи
Фізичного факультету
Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка
Ракома Олексій Дмитрович

Звіт
Лабораторна робота 1
з радіоелектроніки
ПРОХОДЖЕННЯ СИГНАЛІВ ЧЕРЕЗ ПАСИВНІ ЛІНІЙНІ
ЧОТИРЬОХПОЛЮСНИКИ

Зміст

ПРОХОДЖЕННЯ СИГНАЛІВ ЧЕРЕЗ ПАСИВНІ ЛІНІЙНІ ЧОТИРЬОХПОЛЮСНИКИ.....	1
Вступ	3
Короткі теоретичні відомості.....	4
Експериментальна частина.....	16
Пасивний лінійний фільтр нижніх частот.....	16
Пасивний лінійний фільтр верхніх частот	22
Пасивний лінійний смуговий фільтр.....	28
Пасивний лінійний загороджувальний фільтр	33
Висновки:	37

Вступ

Мета роботи

Дослідити зміну параметрів гармонічних сигналів та прямокутних імпульсів при їх проходженні через пасивні лінійні чотириполіусники, опанувати методи вимірювання амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик пасивних RC-фільтрів та їх перехідних характеристик.

Метод вимірювання

В роботі використовуються:

- 1) Віртуальне середовище для симуляцій електричних кіл Multisim 14.
- 2) Метод співставлення, тобто одночасного спостереження вхідного та вихідного сигналів на екрані двоканального осцилографа із наступним вимірюванням і порівнянням їх параметрів
- 3) Інструмент Bode Plotter XBP-1 віртуального середовища для симуляцій електричних кіл Multisim 14 для вимірювання і побудови АЧХ.

Короткі теоретичні відомості

Чотириполіусник (англ. two-port, four-terminal, quadripole) – це елемент електричного кола з чотирма полюсами, два з яких вхідні, а два – вихідні.

Пасивний чотириполіусник – чотириполіусник, який не здатний збільшувати потужність вхідного сигналу. Потужність сигналу після проходження через чотириполіусник менша за потужність сигналу, що подається до входу.

Ативний чотириполіусник збільшує потужність вихідного сигналу. Він містить хоча б один активний елемент, за допомогою якого енергія передається підсилюваному сигналу.

Лінійний чотириполіусник – це такий, для якого залежність між струмами, що течуть через нього, та напругами на його клеммах є лінійною. Такі чотириполіусники складаються з лінійних елементів.

Лінійні елементи електричних кіл – це такі елементи, параметри яких не залежать від величини струму, що протікає через них або від прикладеної до них напруги. До лінійних елементів електричних кіл належать реальні резистори, конденсатори й котушки індуктивності. *Нелінійний чотириполіусник* – це чотириполіусник, який містить нелінійні елементи.

В схемотехніці пасивні лінійні чотириполіусники, призначені для виділення певних спектральних складових електричних сигналів, називають пасивними фільтрами електричних сигналів.

Пасивний фільтр – це пасивний чотириполіусник, який містить реактивні елементи (індуктивності, ємності), спад напруги на яких або струм через які залежить від частоти, і завдяки цьому здатен перетворювати спектр сигналу, поданого на його вхід, шляхом послаблення певних спектральних складових вхідного сигналу. Решта спектральних складових вхідного сигналу проходить через такий пасивний лінійний чотириполіусник, тобто він працює як фільтр для певних спектральних складових сигналу. З практичних міркувань в пасивних фільтрах як реактивні елементи найчастіше

використовуються ємності. Фільтри, побудовані на конденсаторах і резисторах, називають *RC-фільтрами*.

Лінійні чотириполюсники обирають для вирішення однієї із двох проблем:

- 1) неспотвореної передачі форми сигналу або
- 2) цілеспрямованого перетворення форми сигналу.

Для лінійних чотириполюсників задача відшукування такого зв'язку значно спрощується саме завдяки лінійності рівнянь, що описують цей зв'язок, оскільки для лінійних рівнянь сума будь-яких двох розв'язків рівняння також є розв'язком цього рівняння. Будь-які конкретні сигнали серед різномайття можливих входних сигналів можна подати у вигляді лінійної комбінації деяких наперед заданих стандартних сигналів певної величини, для кожного з яких наперед відомо, яким буде відповідний вихідний електричний сигнал (так званий відгук) чотириполюсника.

Наприклад, нехай $U_{\text{вх}}(t)$ – деякий входний сигнал. Його можна подати у вигляді

$$U_{\text{вх}}(t) = \sum_n a_n U_n(t) \quad (1)$$

де $U_n(t)$ – різні стандартні сигнали, лінійна комбінація яких з коефіцієнтами a_n відтворює входний сигнал $U_{\text{вх}}(t)$, $n = 0, 1, 2, \dots$. Відгук лінійного чотириполюсника на кожний входний стандартний сигнал відомий

$$U_{n \text{ вих}}(t) = K_n U_n(t) \quad (2)$$

де K_n – так званий коефіцієнт передачі стандартного сигналу $U_n(t)$ з входу на вихід. Він залежить лише від параметрів чотириполосника. Досліджуваний сигнал на виході чотириполосника $U_{\text{вих}}(t)$ можна знайти як суму відгуків на стандартні сигнали, якими було подано вхідний сигнал:

$$U_{\text{вих}}(t) = \sum_n K_n a_n U_n(t) \quad (3)$$

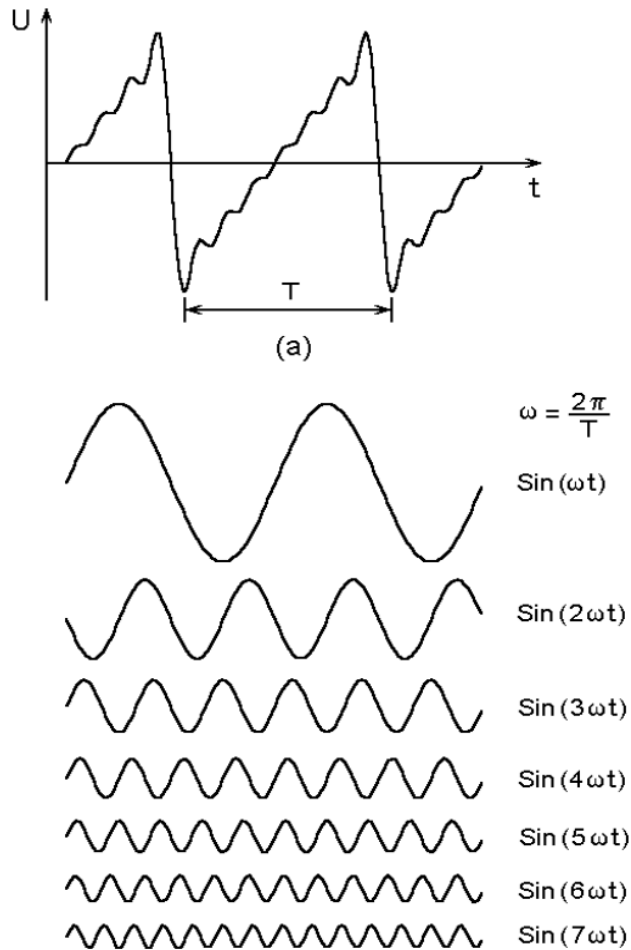


Рис. 1. Розбиття сигналу на сукупність гармонічних сигналів.

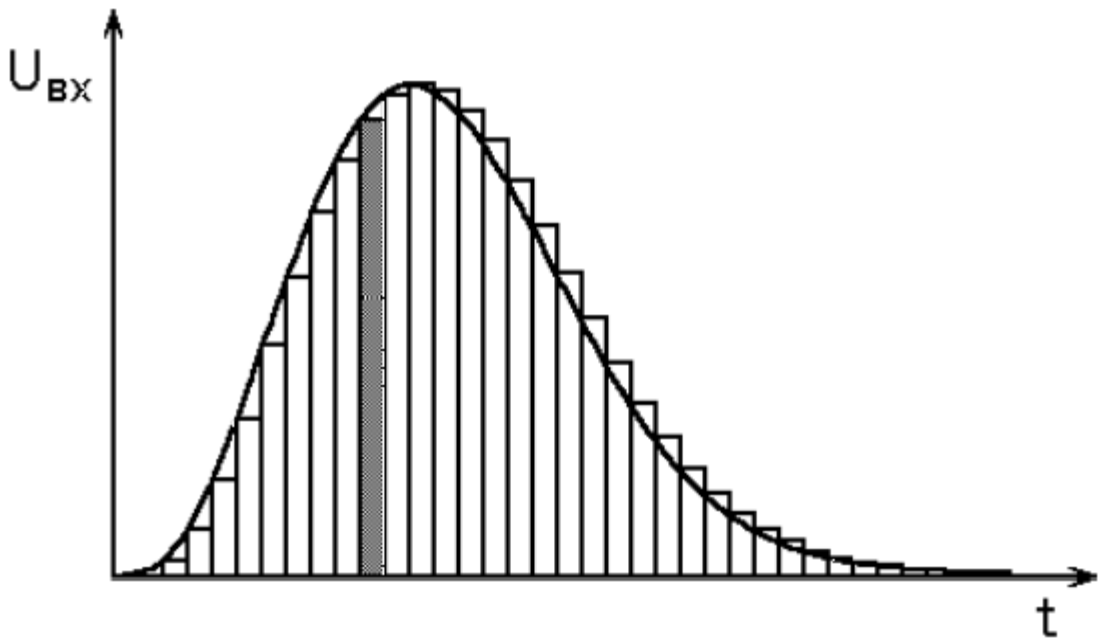


Рис. 2. Розбиття сигналу на сукупність коротких імпульсів.

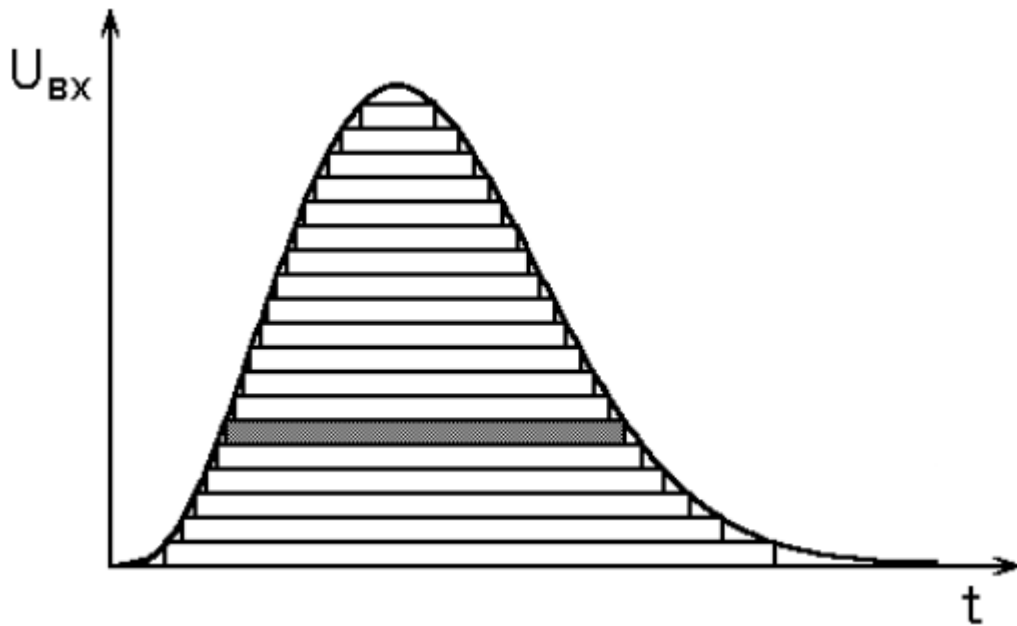


Рис. 3. Розбиття сигналу на сукупність сходинок.

Таким чином, будь-який лінійний чотириполіусник може бути охарактеризований сукупністю коефіцієнтів передачі K_n для стандартних сигналів.

Відомі три способи опису властивостей чотирьохполісників, які відповідають трьом виборам стандартних сигналів:

- 1) у вигляді гармонічних сигналів (Рис. 1),
- 2) у вигляді коротких імпульсів (Рис. 2),
- 3) у вигляді сходинок (Рис. 3).

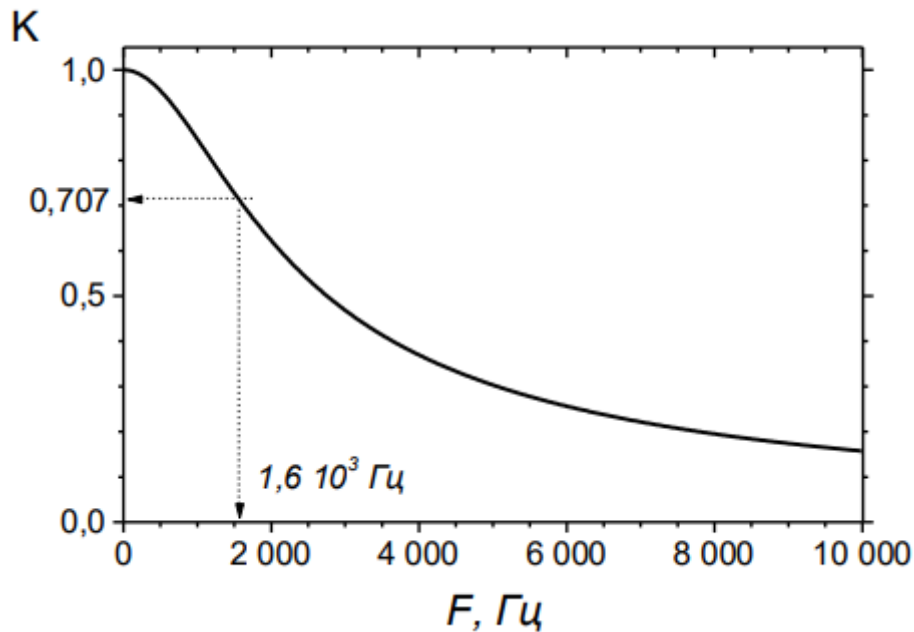


Рис. 4. АЧХ одноланкового НЧ-фільтра в лінійному масштабі.

Найбільшого поширення набуло представлення вхідного сигналу у вигляді суми гармонічних сигналів з різними частотами, амплітудами й початковими фазами, тобто представлення функції $U_{\text{вх}}(t)$ рядом Фур'є (для періодичних сигналів) або інтегралом Фур'є (для неперіодичних).

Гармонічні складові сигналу при представленні рядом Фур'є можуть бути подані в комплексній формі:

$$\widetilde{U}_n = \widetilde{U}_{n0} e^{in\omega t} = |U_{n0}| e^{i\varphi_n} e^{in\omega t}$$

Де \widetilde{U}_{n0} – так звана комплексна амплітуда гармонічної складової, $|U_{n0}|$ – модуль амплітуди, $n\omega$ – циклічна частота, φ_n – початкова фаза.

В загальному випадку гармонічна складова з циклічною частотою ω може бути подана у вигляді:

$$\tilde{U}(\omega) = \tilde{U}_{n0} e^{i\omega t} = |U_{n0}| e^{i\varphi_\omega} e^{i\omega t}$$

Тоді для цієї гармонічної складової

$$\tilde{U}_{\text{вих}}(\omega) = \tilde{K}(\omega) \tilde{U}_{\text{вх}}(\omega)$$

де $\tilde{K}(\omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі на циклічній частоті ω ;

$$\tilde{K}(\omega) = K(\omega) e^{i\Phi(\omega)}$$

де $K(\omega)$ – модуль коефіцієнта передачі або просто коефіцієнт передачі, а $\Phi(\omega)$ – зсув фаз між вихідним і вхідним сигналами. При поданні вхідного сигналу рядом або інтегралом Фур'є, чотириполіусник характеризують залежністю комплексного коефіцієнта передачі від частоти $\tilde{K}(\omega)$, заданою в усьому інтервалі частот від 0 до ∞ . Цю залежність часто називають передавальною функцією або частотною характеристикою чотириполіусника.

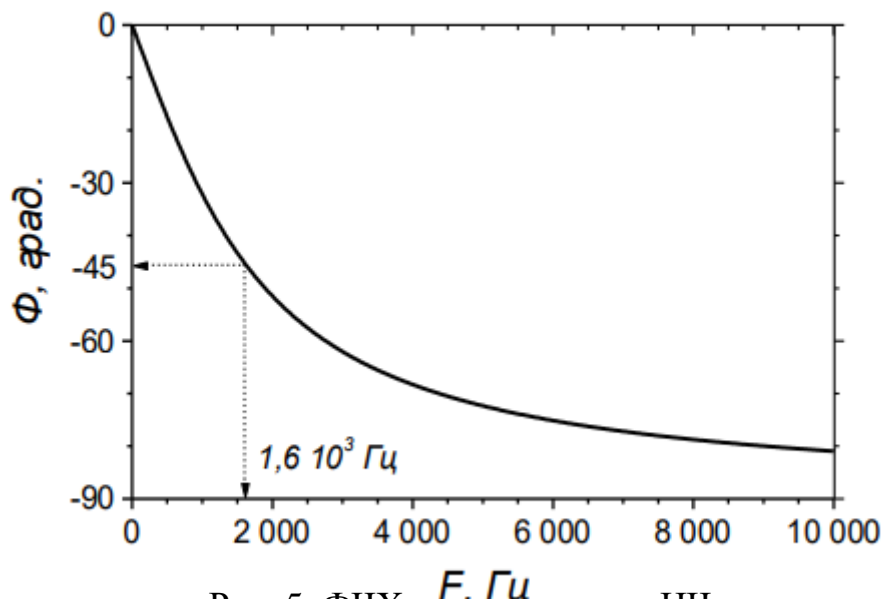


Рис. 5. ФЧХ одноланкового НЧ-фільтра в лінійному масштабі.

При цьому розрізняють амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) – залежність відношення модулів амплітуд вихідного і вхідного гармонічних сигналів від їх частоти, яка є не чим іншим як залежністю модуля коефіцієнта передачі від частоти ω , а також фазо-частотну характеристику (ФЧХ) $\Phi(\omega)$,

яка є залежністю від частоти аргумента комплексного коефіцієнта передачі, тобто різниці фаз між вихідним і вхідним гармонічними сигналами на частоті ω . Приклади АЧХ та ФЧХ чотириполюсника, показаного на Рис. 4 та на Рис. 5 відповідно.

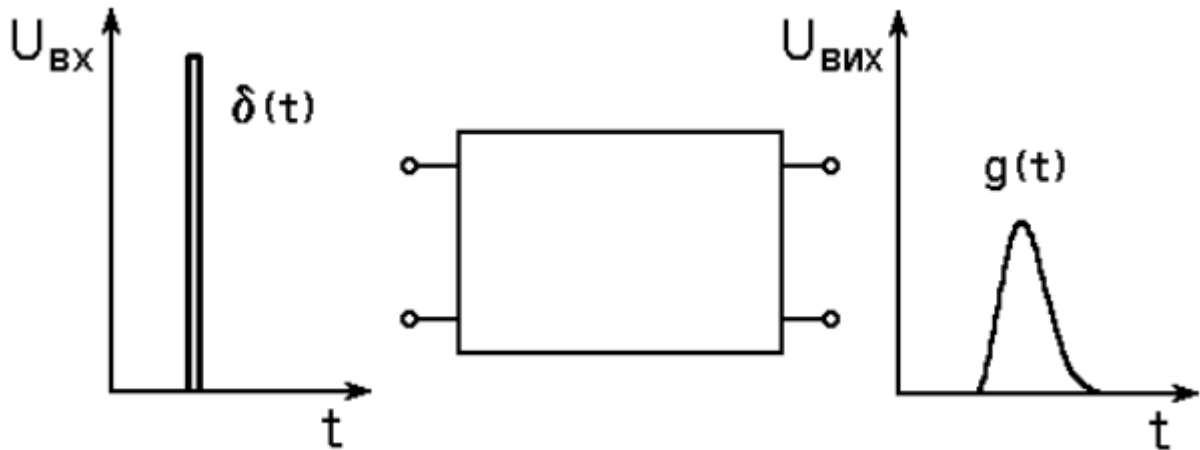


Рис. 6. Імпульс нескінченно малої тривалості й одиничної амплітуди та вихідний сигнал чотириполюсника в якості імпульсної характеристики $g(t)$.

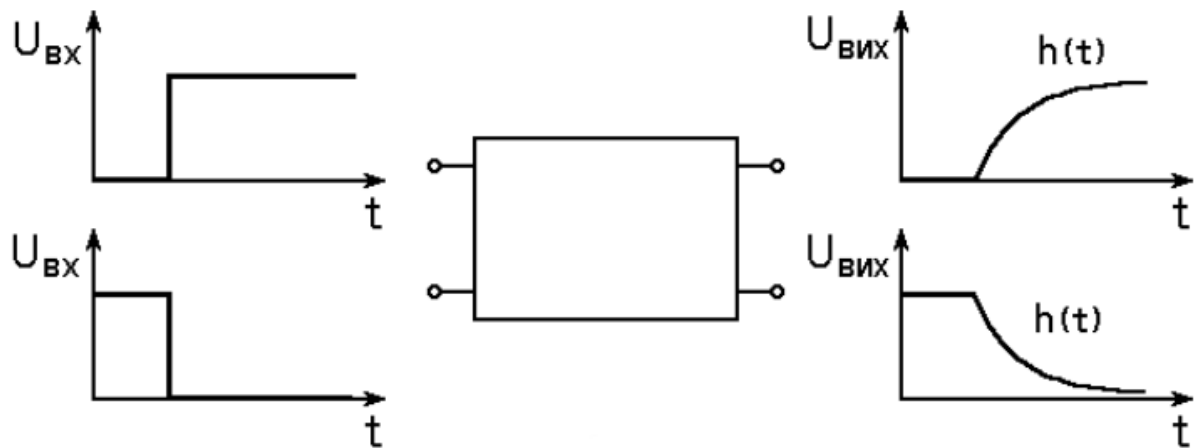


Рис. 7. Сходинко-подібний сигнал одиничної висоти та перехідна характеристика $h(t)$.

Якщо вхідний сигнал чотириполюсника являє собою імпульс нескінченно малої тривалості й одиничної амплітуди (δ -функція), то вихідним сигналом чотириполюсника буде його імпульсна характеристика $g(t)$ (Рис. 6):

$$g(t) = U_{\text{вих}}(t)$$

$$\delta(t) = U_{\text{вх}}(t)$$

Експериментально імпульсну характеристику $g(t)$ можна визначити, подаючи на вхід чотириполюсника короткий імпульс одиничної площі з наступним зменшенням його тривалості при збереженні площі до того часу, поки сигнал на виході не перестане змінюватись. Цей вихідний сигнал і буде імпульсною характеристикою такого чотириполюсника. Якщо на вхід чотириполюсника подавати сходинкоподібний сигнал одиничної висоти, то на виході ми одержимо його перехідну характеристику $h(t)$ (Рис. 7).

З теоретичної та інформативної точок зору всі три способи опису властивостей чотириполюсника рівноправні і, маючи одну з характеристик, можна однозначно перейти до іншої.

Частотна характеристика $\tilde{K}(\omega)$ є фур'є-образом імпульсної характеристики $g(t)$ і навпаки:

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{K}(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) e^{-i\omega t} dt$$

Імпульсна характеристика $g(t)$ є першою похідною від перехідної $h(t)$, а перехідна – інтегралом імпульсної:

$$h(t) = \int_0^t g(t') dt'$$

Застосування тієї чи іншої характеристики зумовлено лише зручністю їх експериментального одержання та використання. Перший з описаних вище підходів до характеристики чотириполюсника відбиває його здатність тим чи

іншим чином перетворювати спектр сигналу, поданого на його вхід. Спектр сигналу – це сукупність значень амплітуд усіх гармонічних складових $|U_{n0}|$ для усіх циклічних частот $n\omega$ (див. (4)) (або сукупність значень амплітуд усіх гармонічних складових $|U_{0\omega}|$ для усіх циклічних частот ω (див. (5)). Чотириполіусник буде передавати вхідний сигнал на вихід без спотворень (тобто без зміни його форми), якщо будуть виконуватися наступні умови неспотвореної передачі сигналу (Рис. 8):

- 1) $K(\omega) = \text{const}$ (умова відсутності амплітудно-частотних спотворень) і
- 2) $\Phi(\omega) = -\omega t_3$ (фази всіх спектральних складових сигналу повинні змінюватися прямо пропорційно їх частоті (t_3 – час затримки сигналу в чотириполіуснику)).

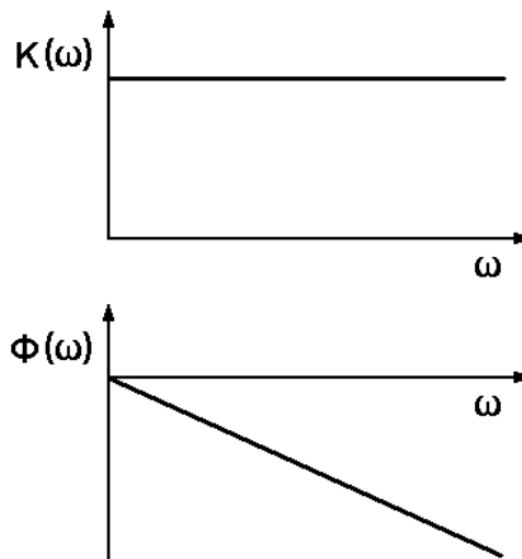


Рис. 8. Умови неспотвореної передачі сигналу при його проходженні через пасивний лінійний чотириполіусник.

В практиці радіоелектроніки найчастіше використовуються чотири типи пасивних RC-фільтрів, які складаються з резисторів та конденсаторів і які наведені на Рис. 9. Це фільтр нижніх частот (а), фільтр верхніх частот (б), смуговий (в) і загороджувальний (г) фільтри. Три перших відносяться до так званих Г-подібних, а останній – до Т-подібних фільтрів. Перші два фільтри можна розглядати як елементарні ланки, з яких можна побудувати складніші

фільтри. Якщо уважно придивитися, можна побачити, що смуговий фільтр побудовано з послідовно з'єднаних фільтрів нижніх і верхніх частот, а загороджувальний являє собою їх паралельне з'єднання.

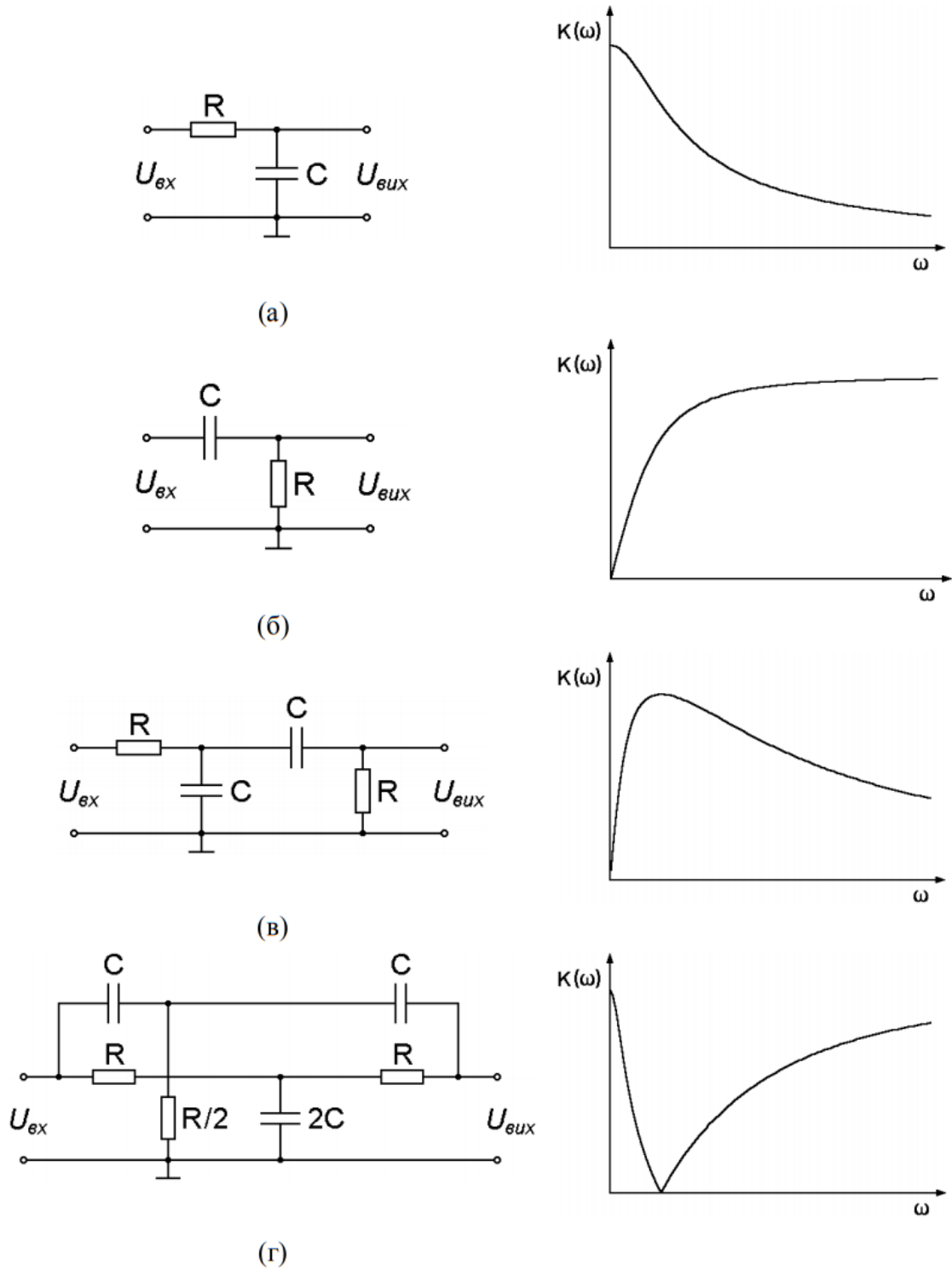


Рис. 9. (а) фільтр нижніх частот; (б) фільтр нижніх частот;
(в) смуговий фільтр; (г) загороджувальний фільтр.

Частотну характеристику цих кіл можна легко розрахувати за допомогою правил Кірхгофа для комплексних напруг і струмів.

Співвідношення, що пов'язують коефіцієнт передачі і зсув фаз з частотою сигналу для фільтрів, поданих на Рис. 9, мають такий вигляд:

Для ФНЧ:

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

$$\Phi = \arctg\left(\frac{1}{\omega RC}\right)$$

Для ФВЧ:

$$K = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

$$\Phi = -\arctg(\omega RC)$$

Для смугового фільтру:

$$K = \frac{1}{\sqrt{9 + \left(\frac{1}{\omega RC} - \omega RC\right)^2}}$$

$$\Phi = \arctg\left(\frac{1 - (\omega RC)^2}{3\omega RC}\right)$$

Для загороджувального фільтру:

$$K = \frac{|1 - (\omega RC)^2|}{\sqrt{1 + 14(\omega RC)^2 + (\omega RC)^4}}$$

$$\Phi = \arctg\left(\frac{4\omega RC}{(\omega RC)^2 - 1}\right)$$

Слід мати на увазі, що наведені співвідношення справедливі, якщо внутрішній опір джерела сигналу, приєднаного до входу фільтра, близький до нуля, а опір навантаження, приєднаного до виходу, зокрема вольтметра, що вимірює вихідну напругу, прямує до нескінченності. Графіки частотної характеристики (в лінійному масштабі) для фільтра нижніх частот зображено на Рис. 4, а для фільтра верхніх частот – на Рис. 10.

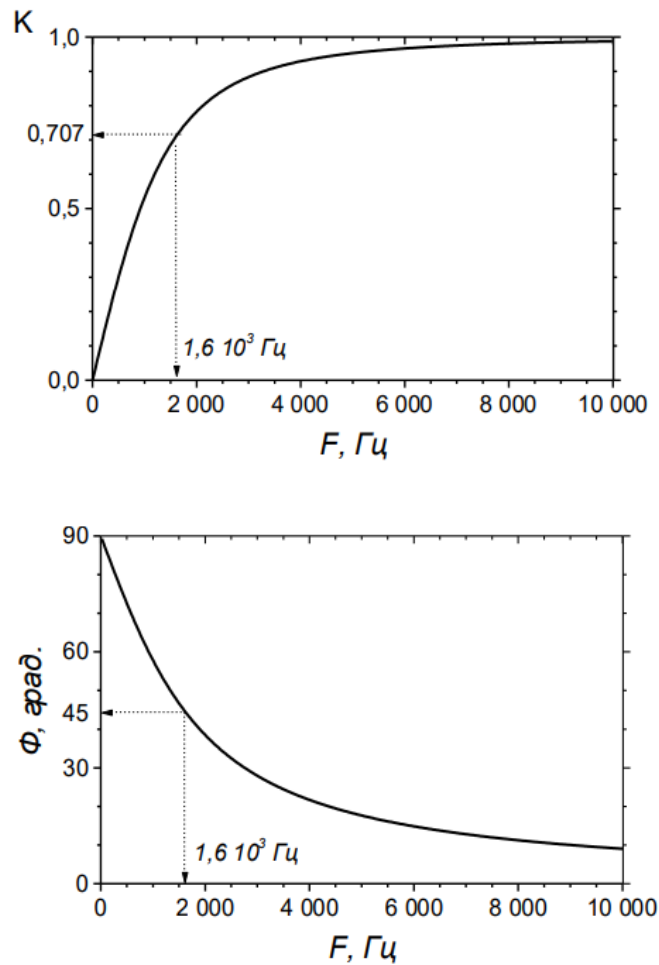


Рис. 10. АЧХ (зверху) та ФЧХ одноланкового ВЧ-фільтра в лінійному масштабі.

Експериментальна частина

Пасивний лінійний фільтр нижніх частот

Схема фільтру зображена на Рис. 11, а схема з фільтром, підключеним до генератора, осцилографа та Bode Plotter XBP-1 – на Рис. 12.

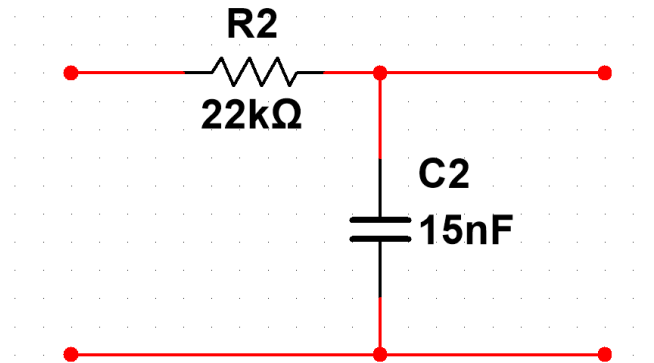


Рис. 11. Схема НЧ-фільтру.

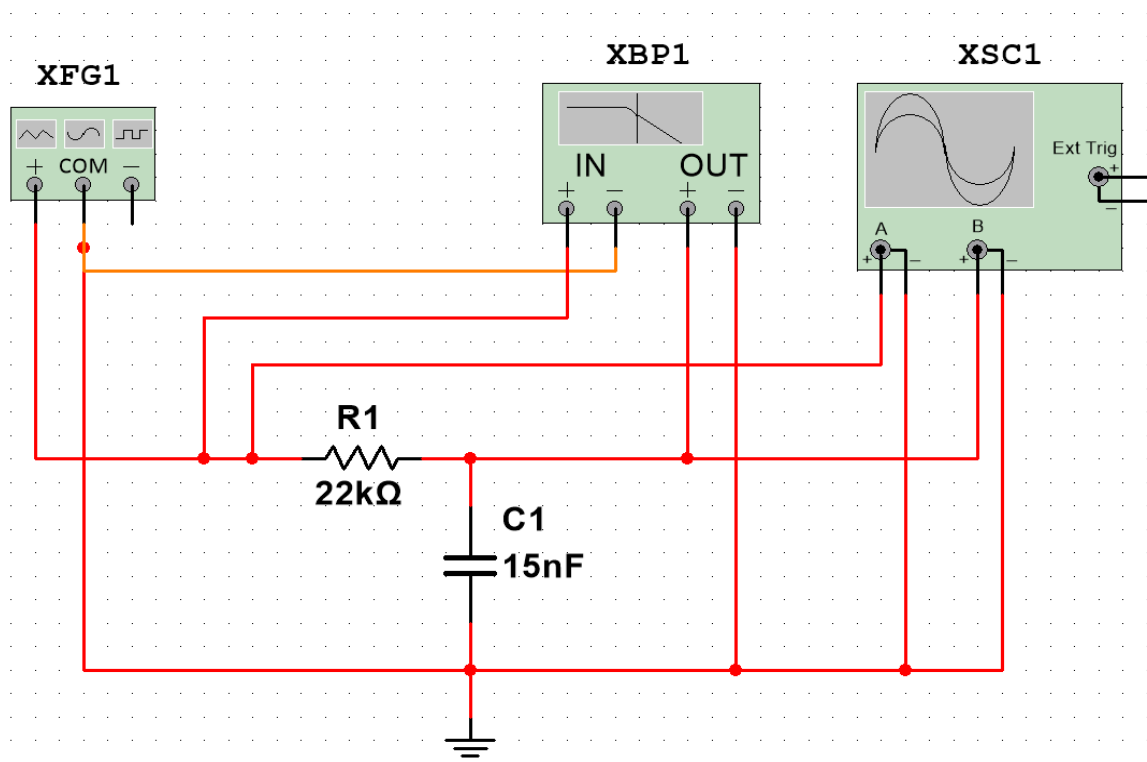


Рис. 12. Робоча схема для вимірювання АЧХ та ФЧХ НЧ-фільтру.

Номинал резистору становить 22 кОм, ємність конденсатору – 15 нФ. Частота струму становить 1 кГц, амплітуда 10 В (Такі самі характеристики мають резистори, конденсатори й генератор у наступних симуляціях, за винятком коли на вхід подається меандр).

Якщо звернутися до Рис. 12, то нижні клеми чотириполюсника підключаються до від'ємних полюсів приладів і до заземлення (таким чином на осцилограф на від'ємні канали подається 0), а верхні до позитивних. Коливання струму на них змінюється після проходження через чотириполюсник, що й показує осцилограф на каналах А (до) та В (після) відповідно. Одночасно клеми з правої сторони під'єднані до входу Bode Plotter ХВР-1, а ліві – до виходу. Результат після підключення зображений на Рис. 13 (Осцилограф), Рис. 14 (Осцилограф, фігури Ліссажу), Рис. 15 – АЧХ у логарифмічному масштабі, Рис. 17 – ФЧХ у логарифмічно-лінійному масштабі, Рис. 16 – скрін усіх вікон разом зі схемою. АЧХ та ФЧХ співпадають із очікуваними.

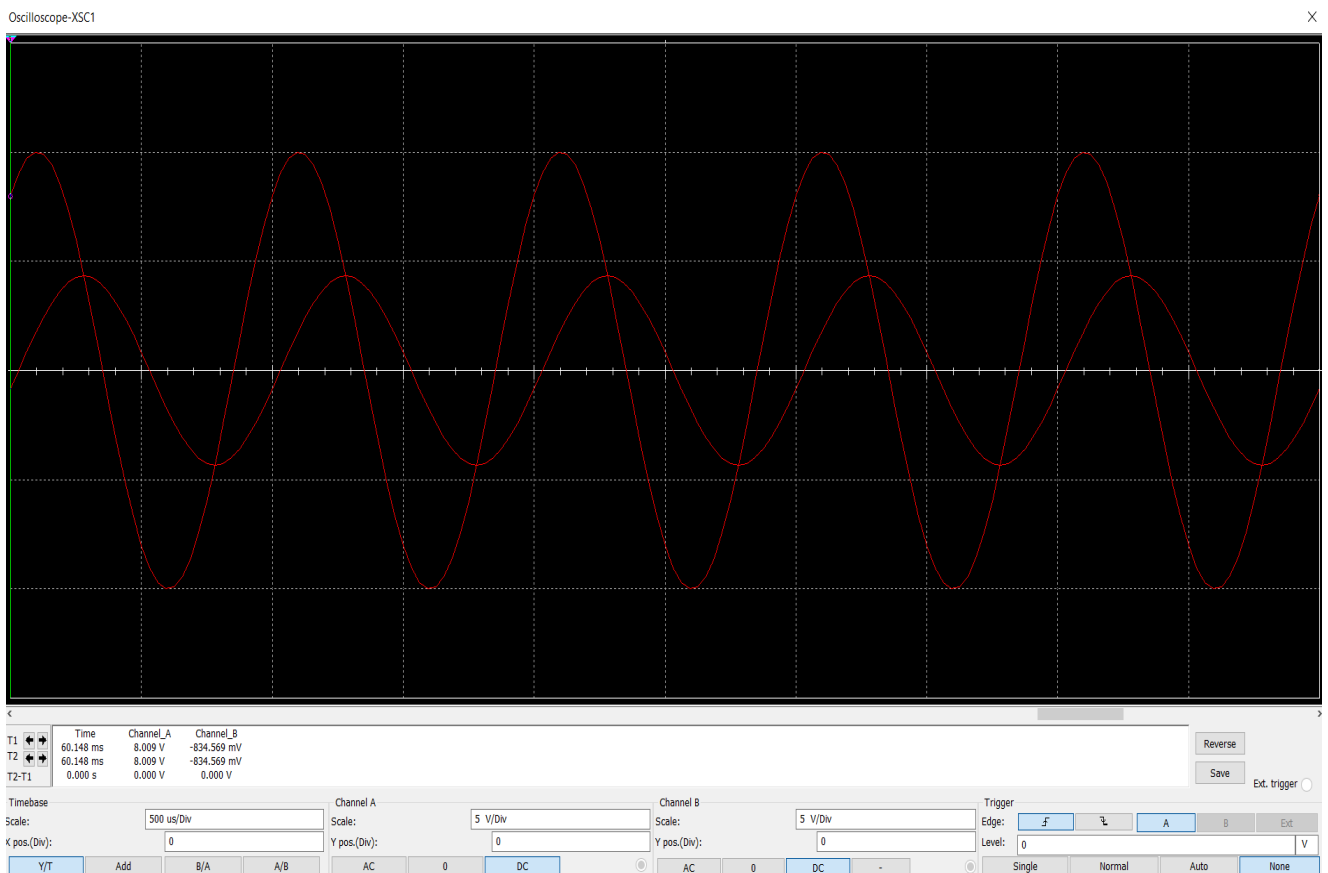


Рис. 13. Вхідний (більший за амплітудою) та вихідний (менший) сигнали НЧ-фільтру.

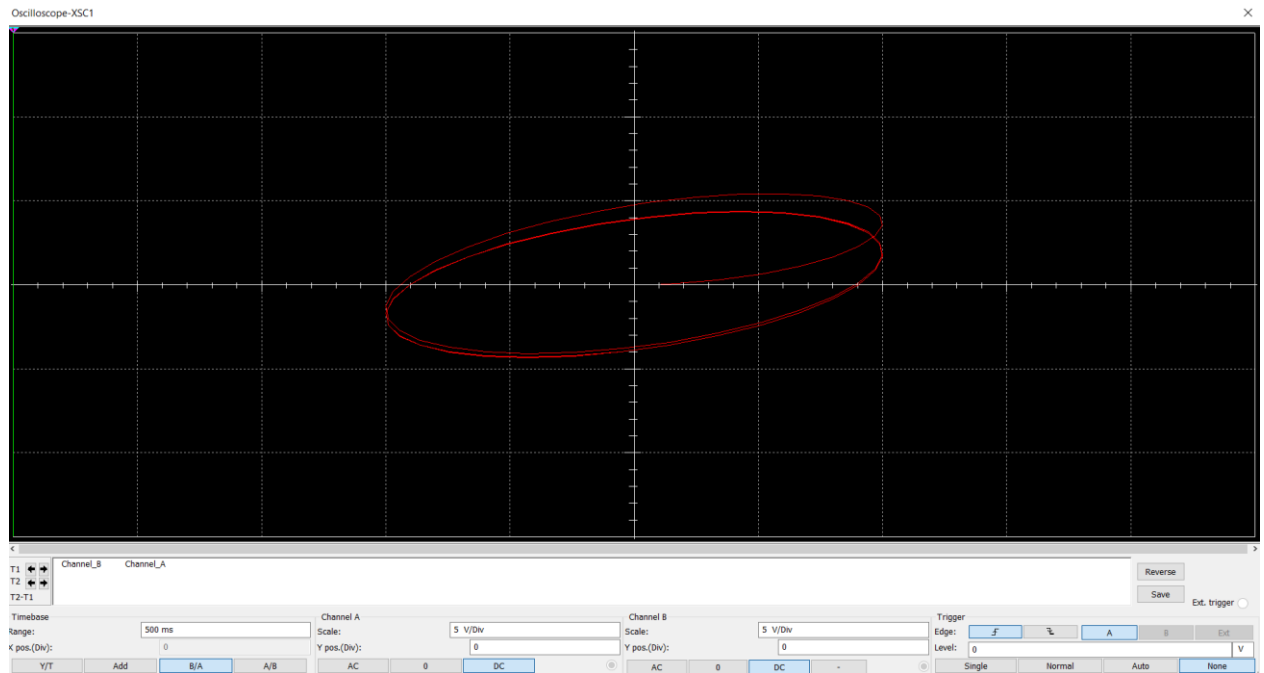


Рис. 14. Фігура Ліссажу з вхідного та вихідного сигналів НЧ-фільтру.



Рис. 15. АЧХ НЧ-фільтру у логарифмічному масштабі.

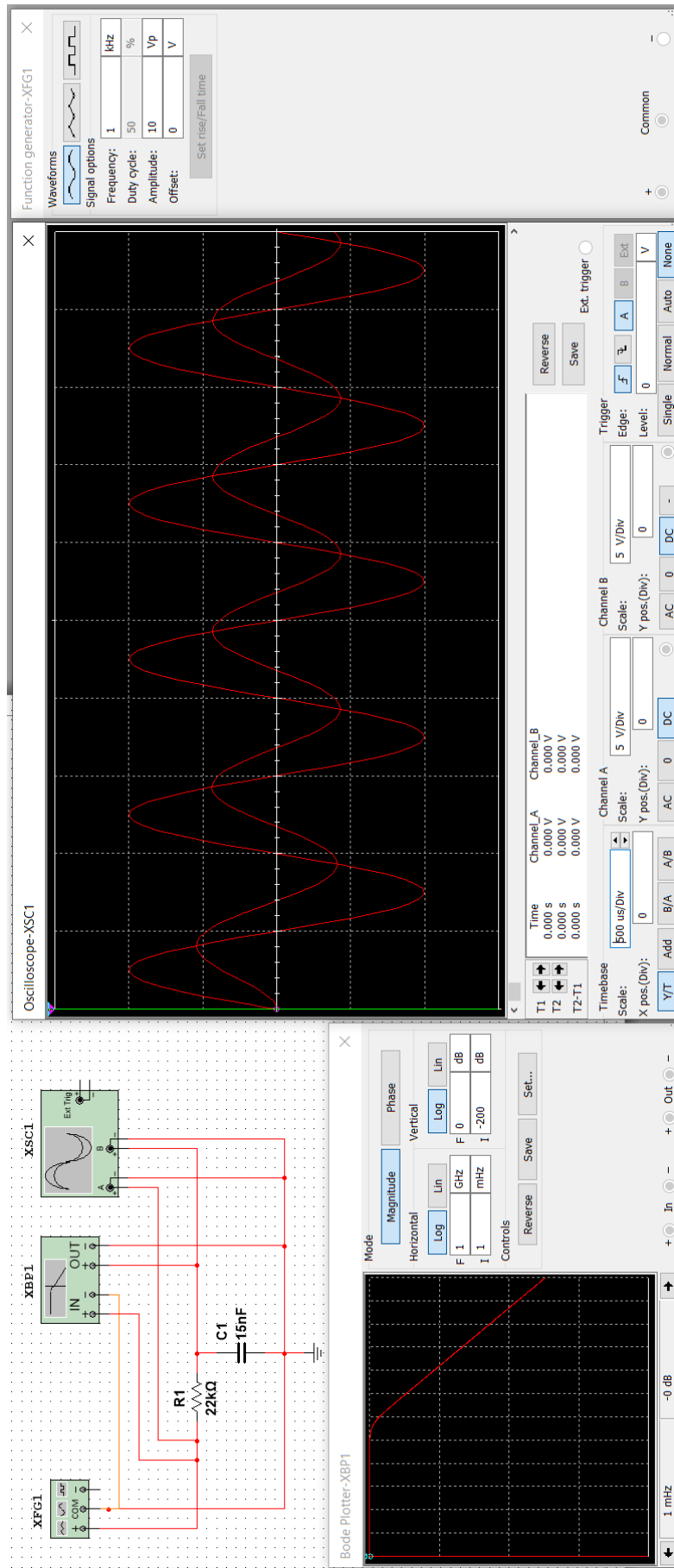


Рис. 16. Вимірювання НЧ-фільтру.

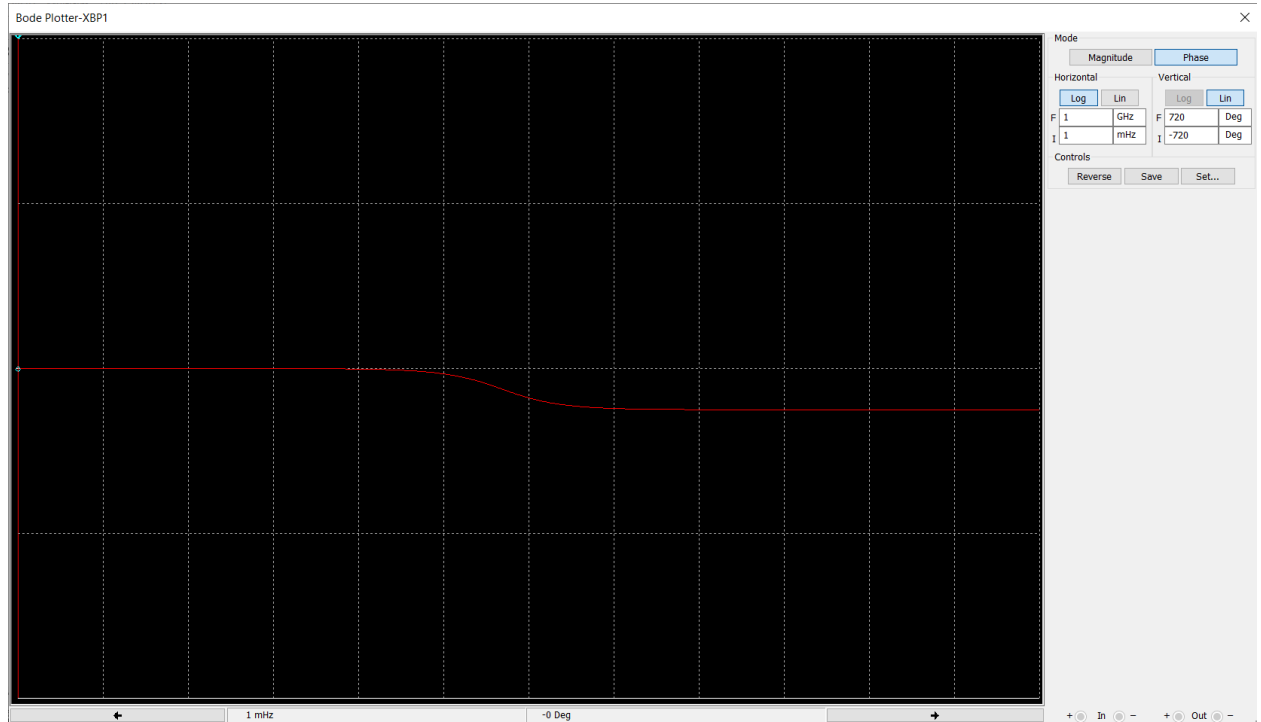


Рис. 17. ФЧХ НЧ-фільтру у логарифмічно-лінійному масштабі.

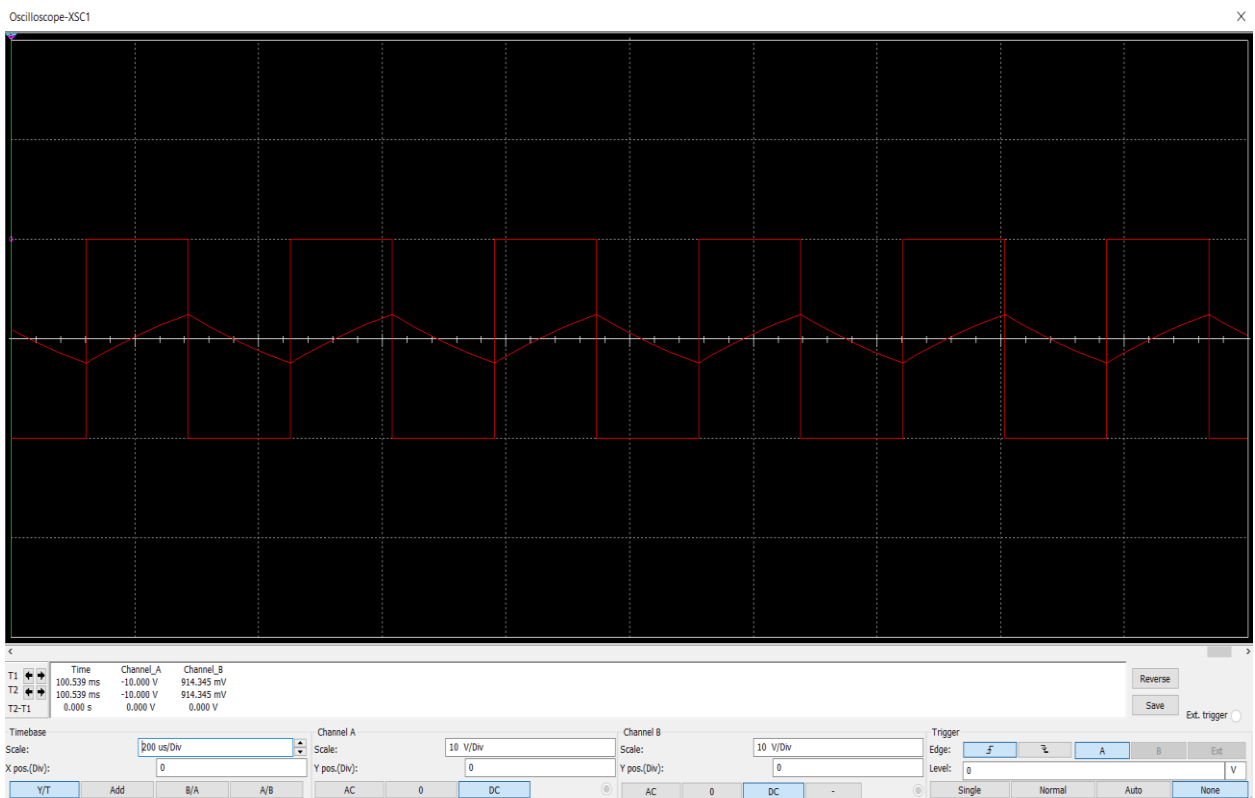


Рис. 18. Вхідний меандр, поданий на НЧ-фільтр, та вихідний сигнал у вигляді ламаної лінії при частоті генератора 3,03 кГц, що співпадає з оберненим параметром $1/RC$.

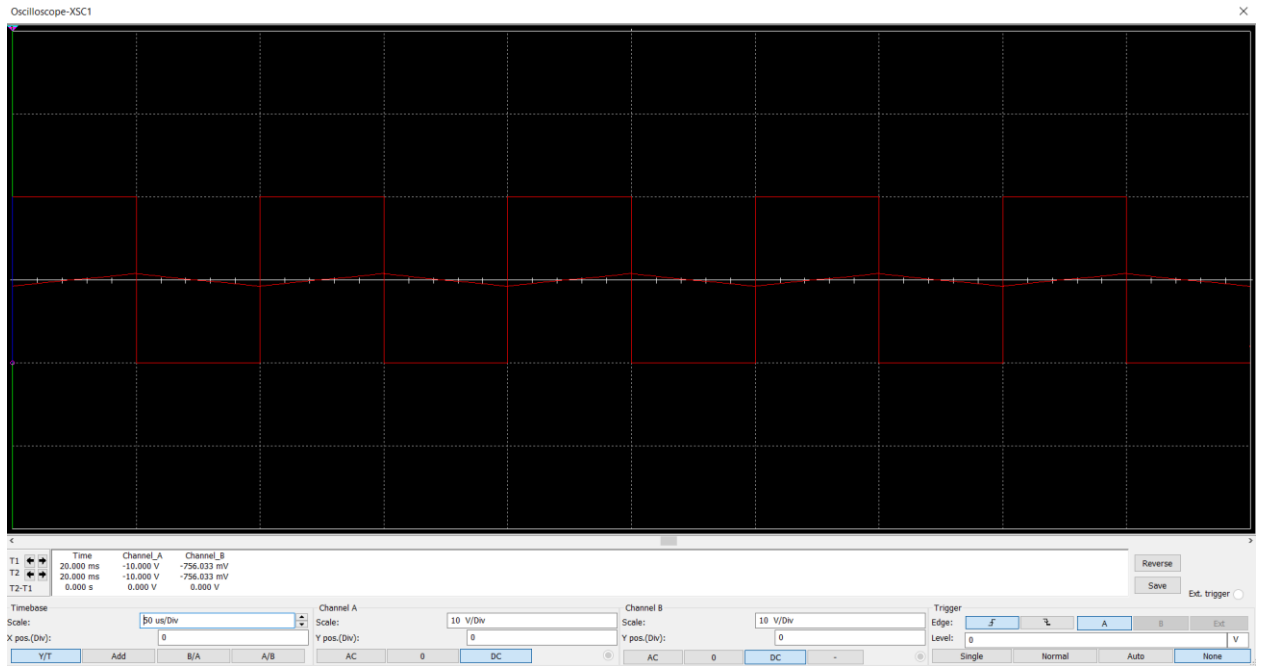


Рис. 19. Вхідний меандр, поданий на НЧ-фільтр, та вихідний сигнал у вигляді ламаної лінії при частоті генератора 10 кГц, що суттєво більше параметра $1/RC$.

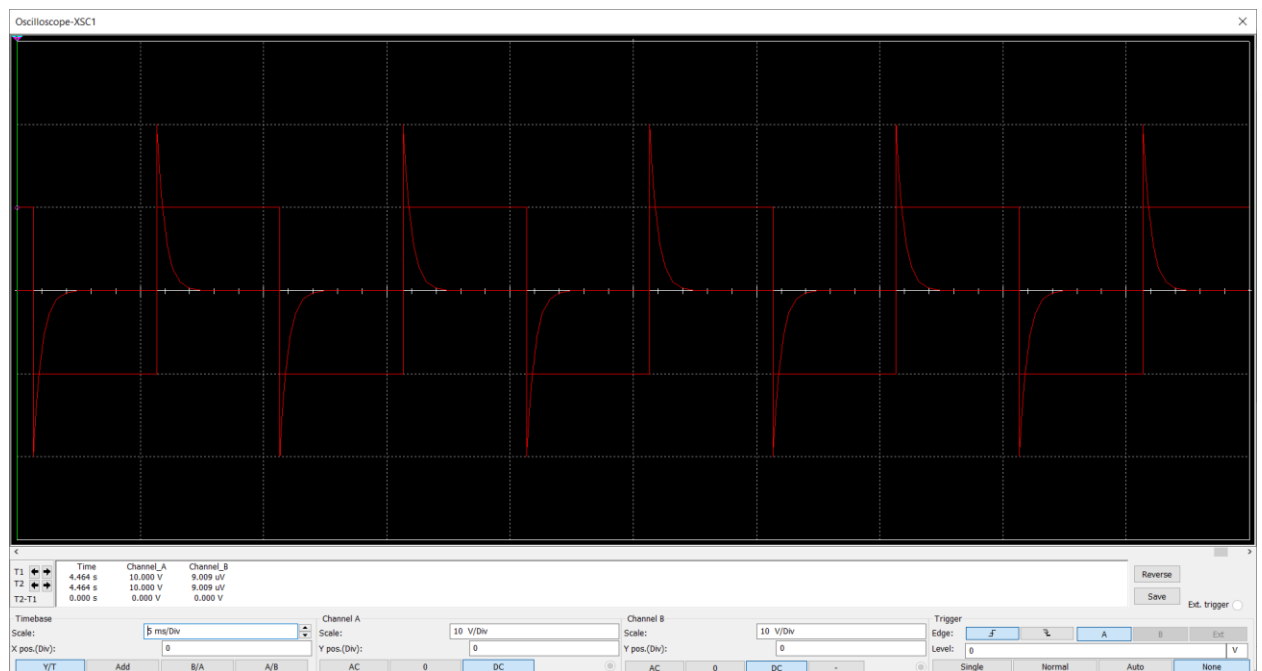


Рис. 20. Вхідний меандр, поданий на НЧ-фільтр, та вихідний сигнал у вигляді ламаної лінії при частоті генератора 0,01 кГц, що суттєво менше параметра $1/RC$.

Пасивний лінійний фільтр верхніх частот

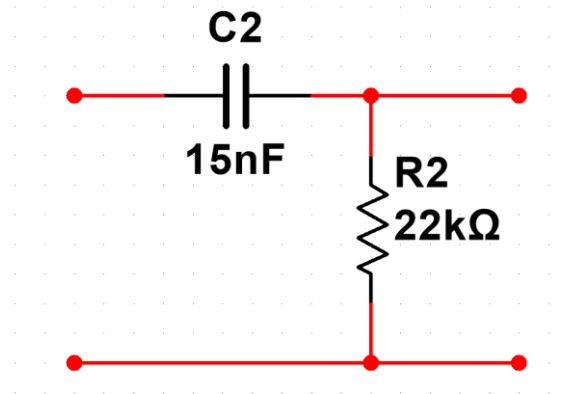


Рис. 21 – Схема ФВЧ

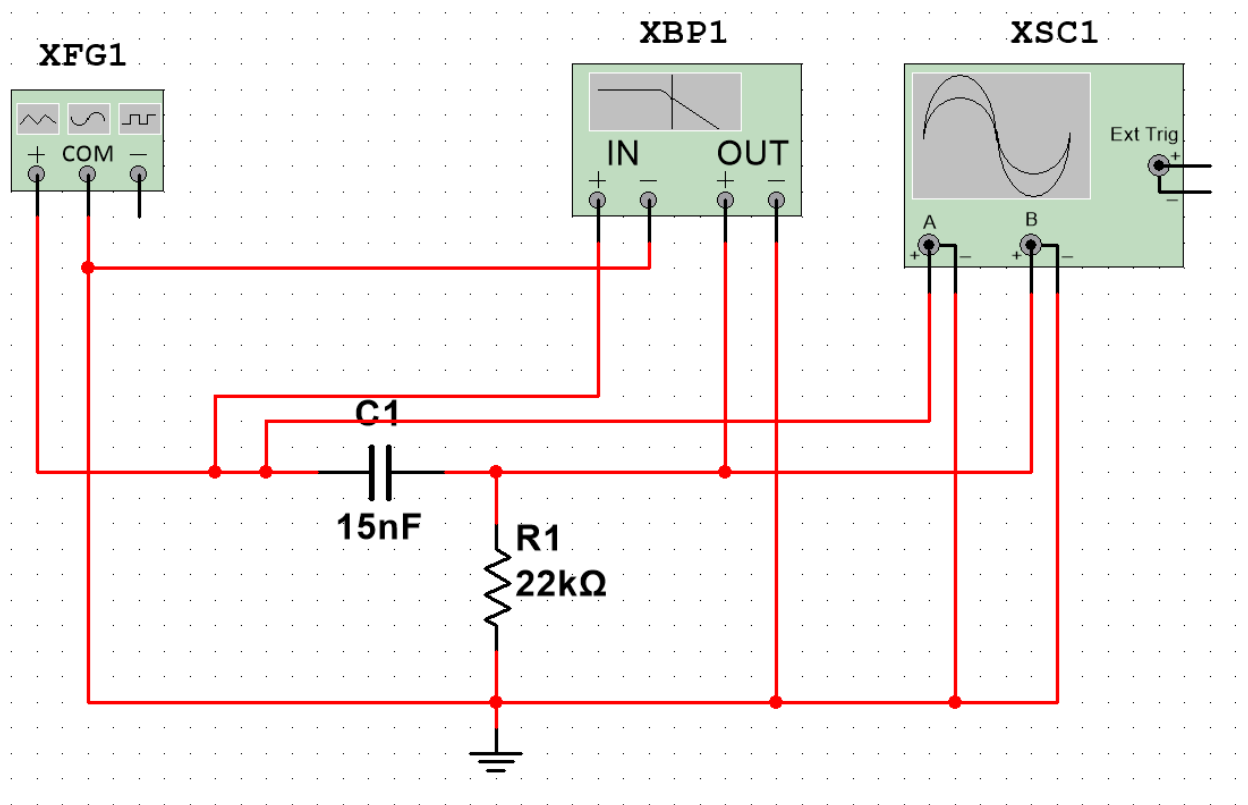


Рис. 22 – Схема для вимірювання характеристик ФВЧ

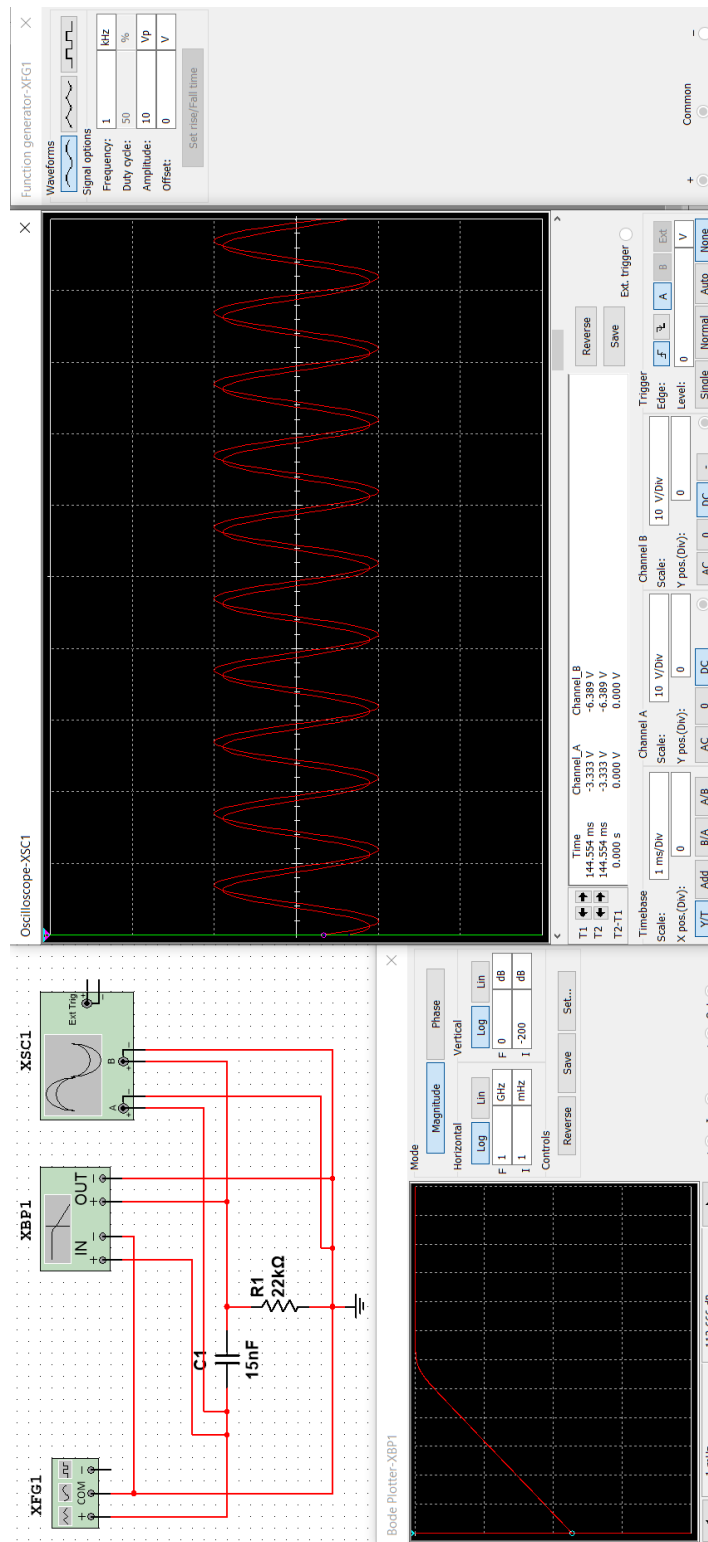


Рис. 23 – скріншот усіх вікон вимірювальних приладів разом зі схемою ФВЧ

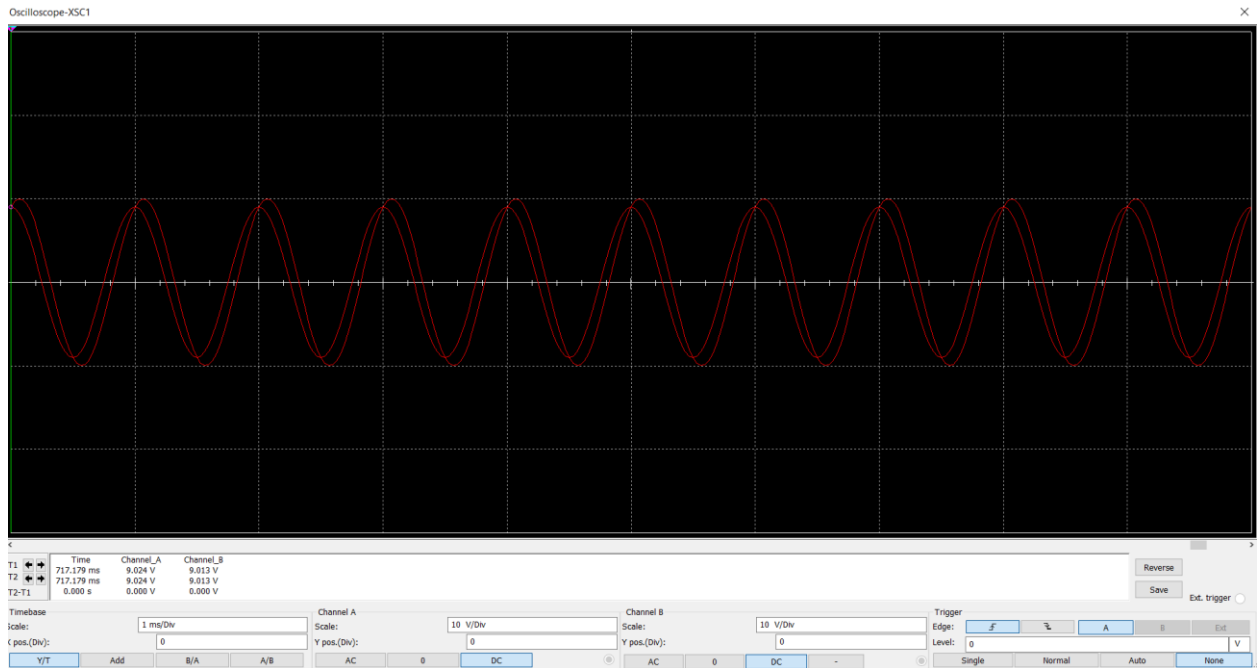


Рис. 24 – Вхідний та вихідний сигнали ФВЧ

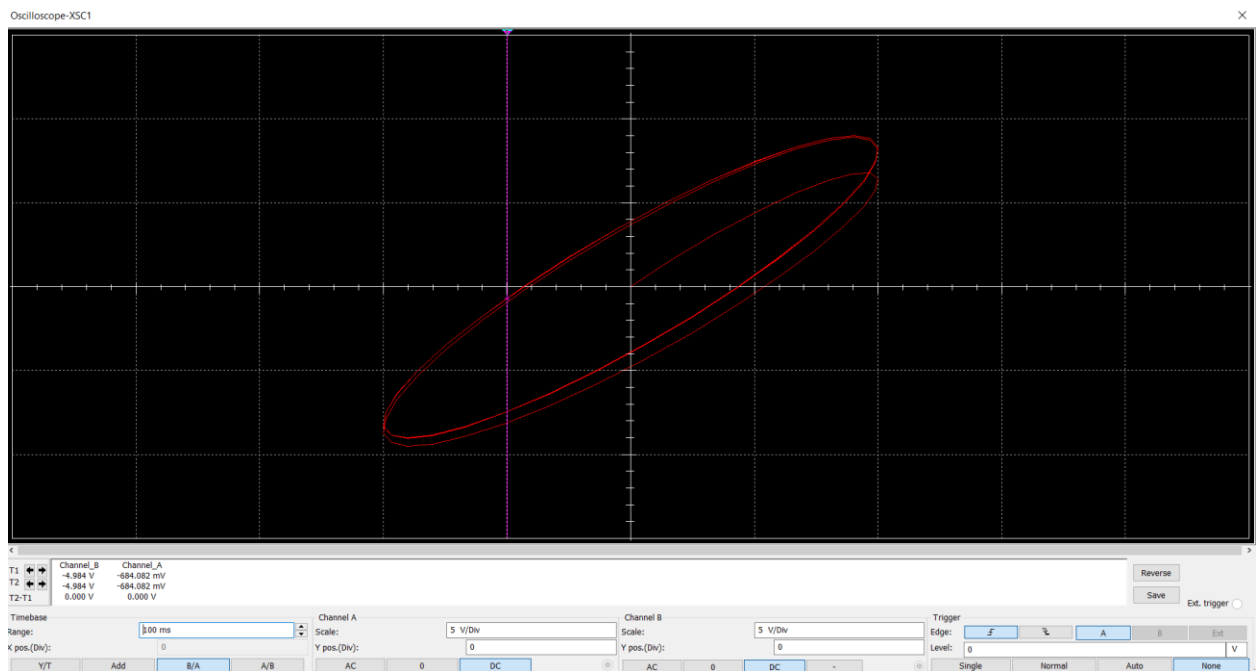


Рис. 25 – фігура Ліссажу для ФВЧ

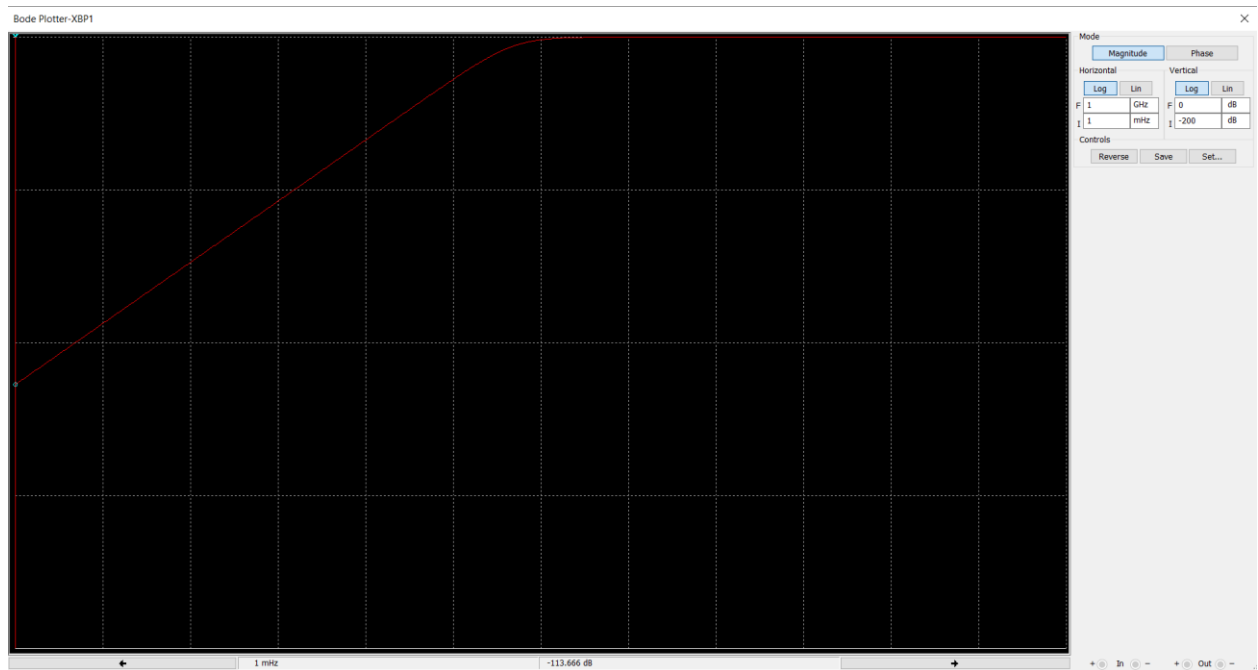


Рис. 26 – АЧХ ФВЧ

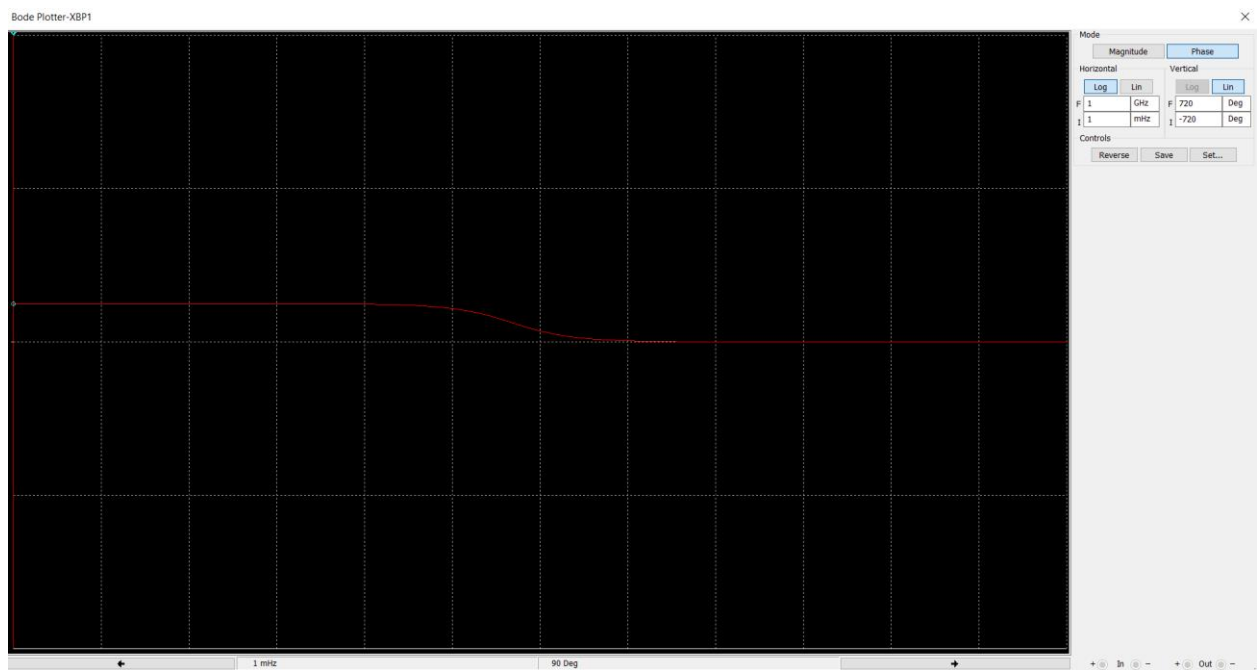


Рис. 27 – ФЧХ ФВЧ

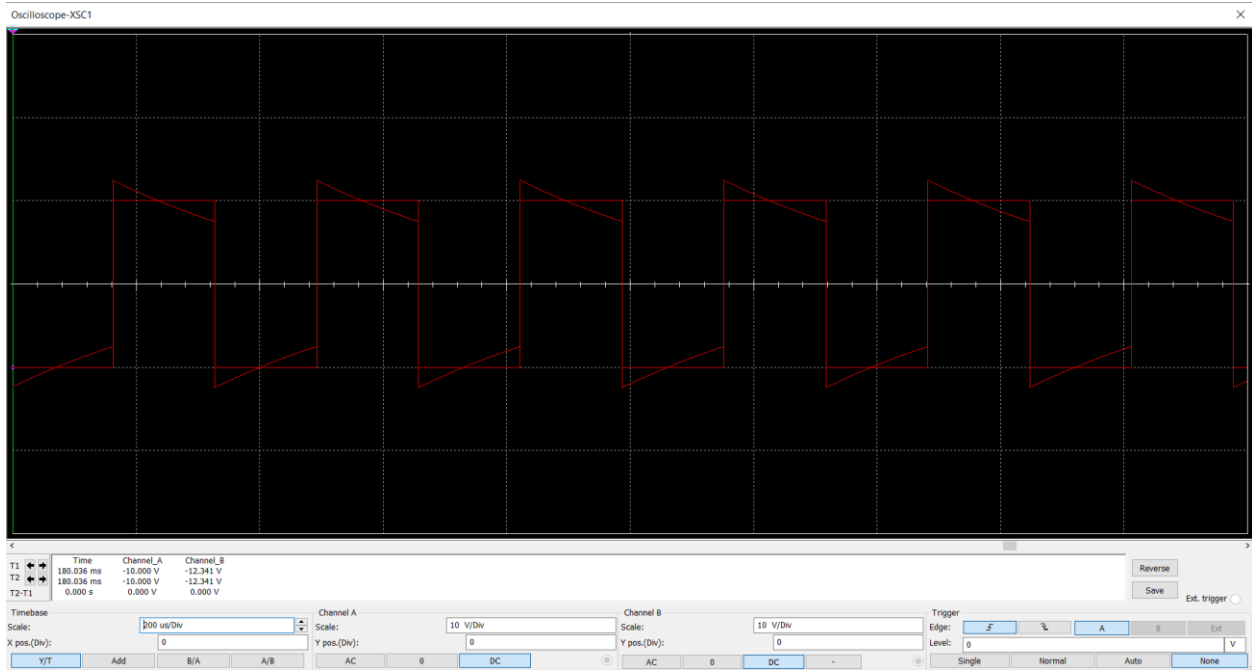


Рис. 28 – Вхідний меандр, поданий на ФВЧ, та вихідний сигнал у вигляді ламаної лінії при частоті генератора 3,03 кГц, що співпадає з параметром $1/RC$.

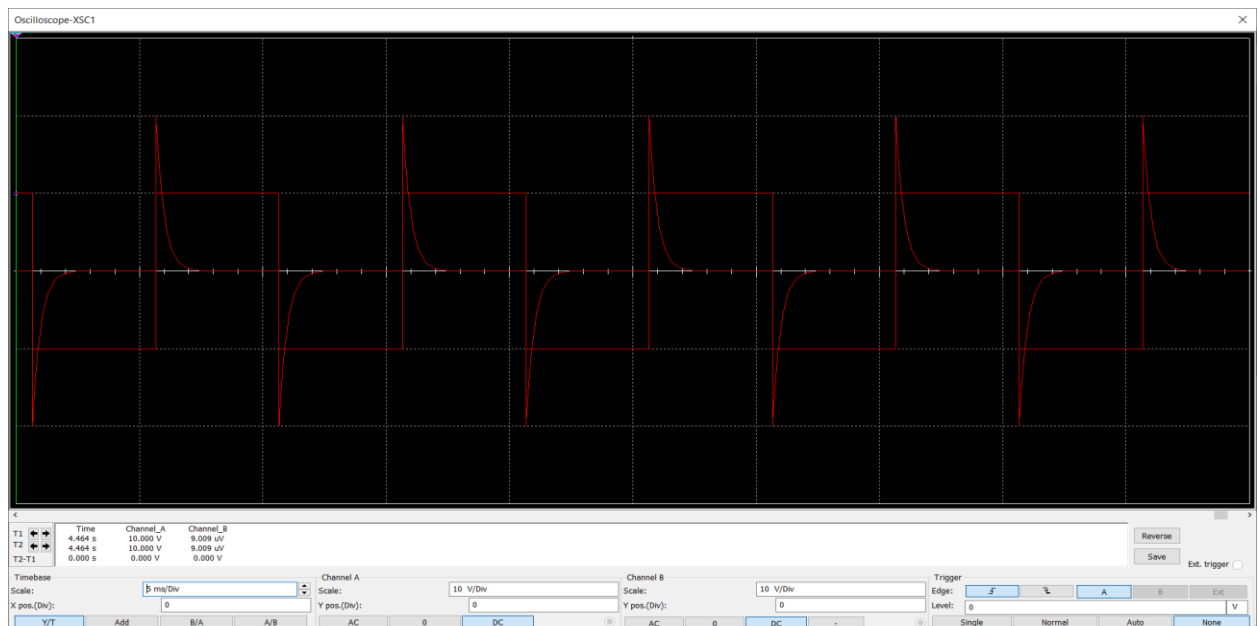


Рис. 29 – Вхідний меандр, поданий на ФВЧ-фільтр, та вихідний сигнал у вигляді ламаної лінії при частоті генератора 0,1 кГц, що суттєво менше параметра $1/RC$.

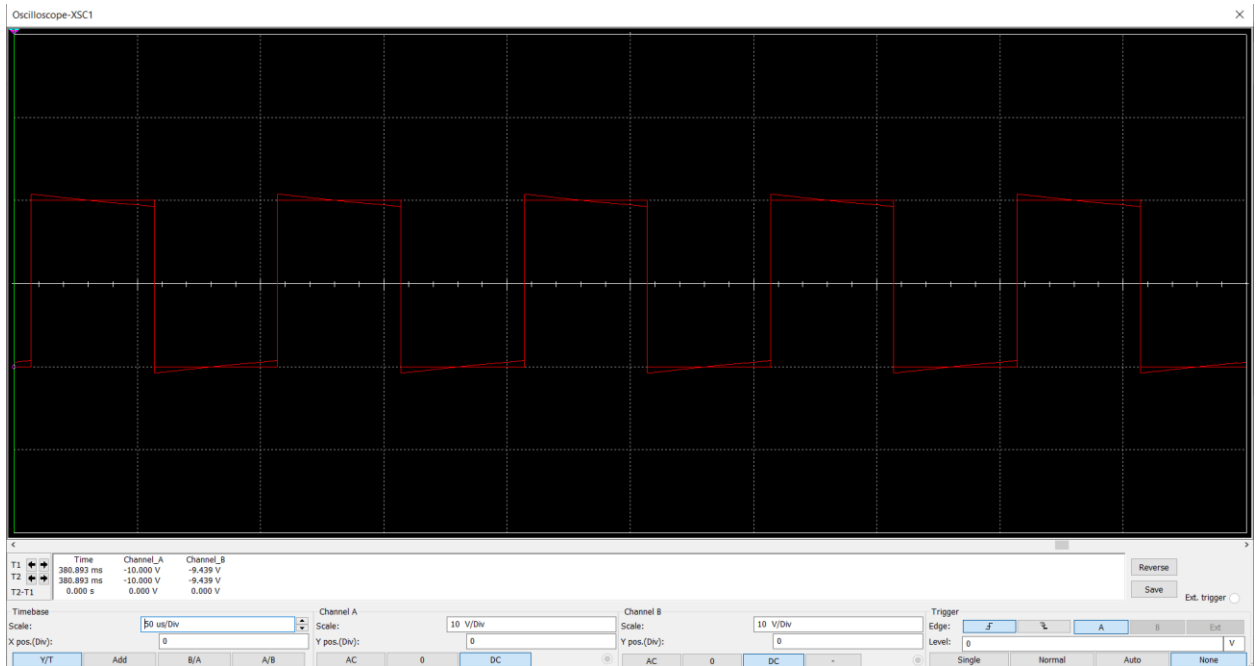


Рис. 30. Вхідний меандр, поданий на НЧ-фільтр, та вихідний сигнал у вигляді ламаної лінії при частоті генератора 10 кГц, що суттєво більше параметра $1/RC$.

Пасивний лінійний смуговий фільтр (далі ЛСФ)

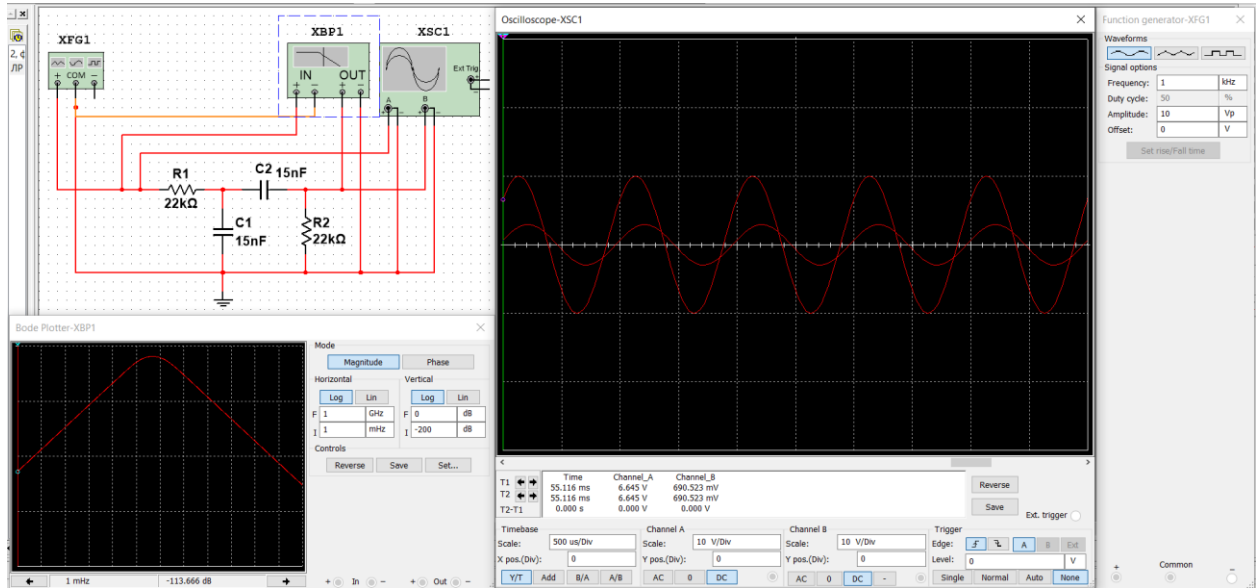


Рис. 31 – скріншот усіх вікон вимірювальних приладів разом зі схемою ЛСФ

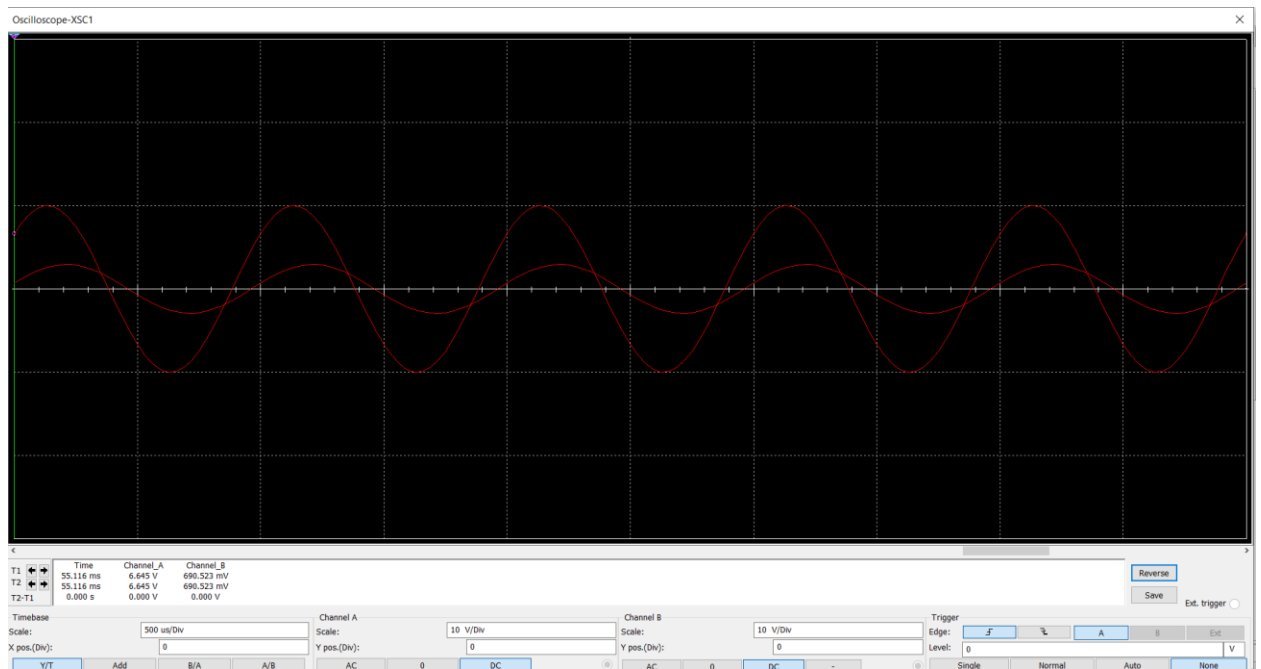


Рис. 32 – Вхідний та вихідний сигнали ЛСФ

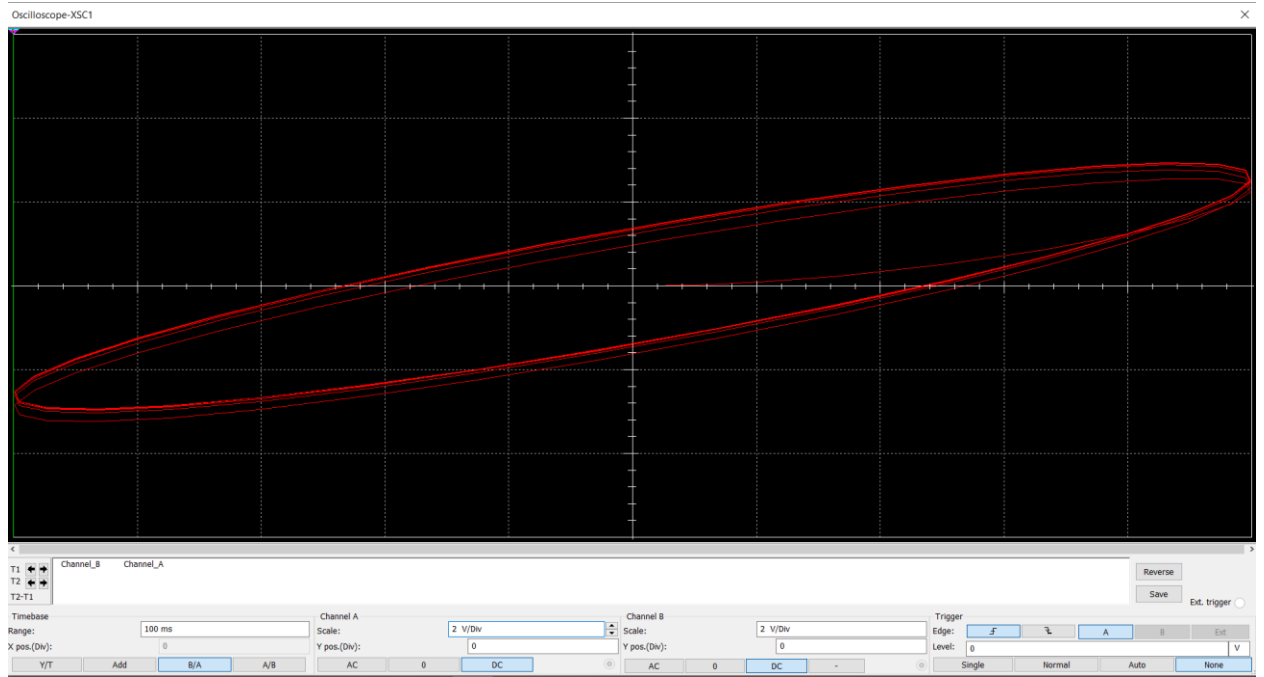


Рис. 33 – фігури Ліссажу ЛСФ

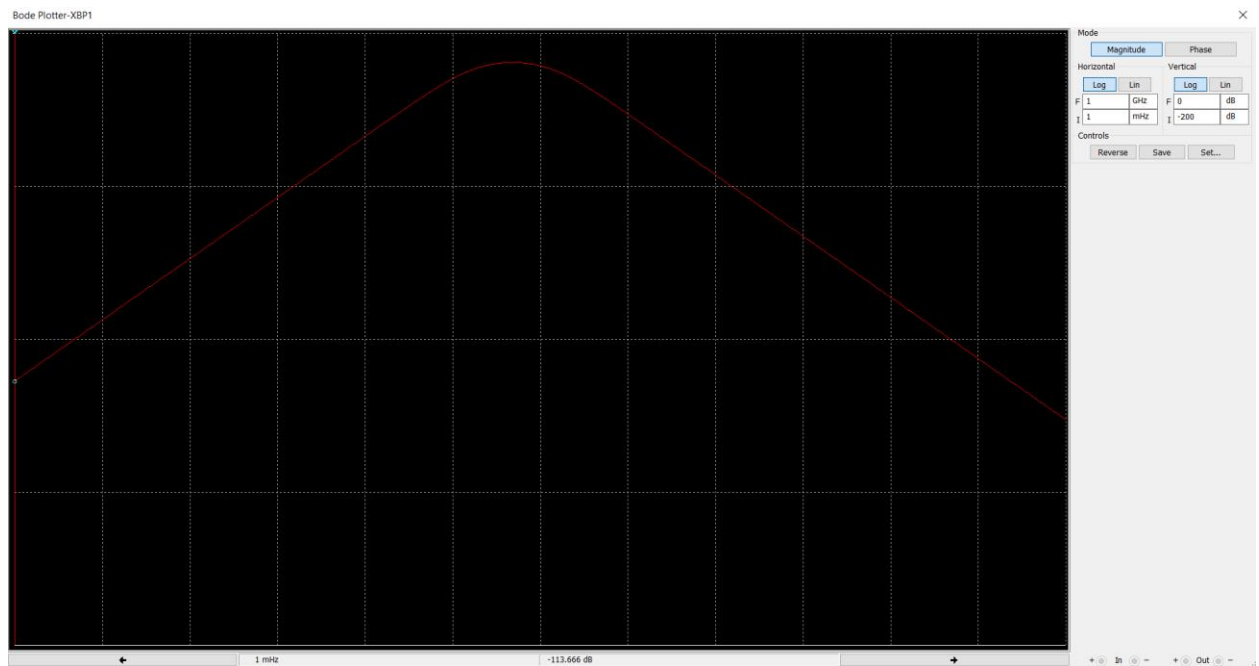


Рис. 34 – АЧХ ЛСФ

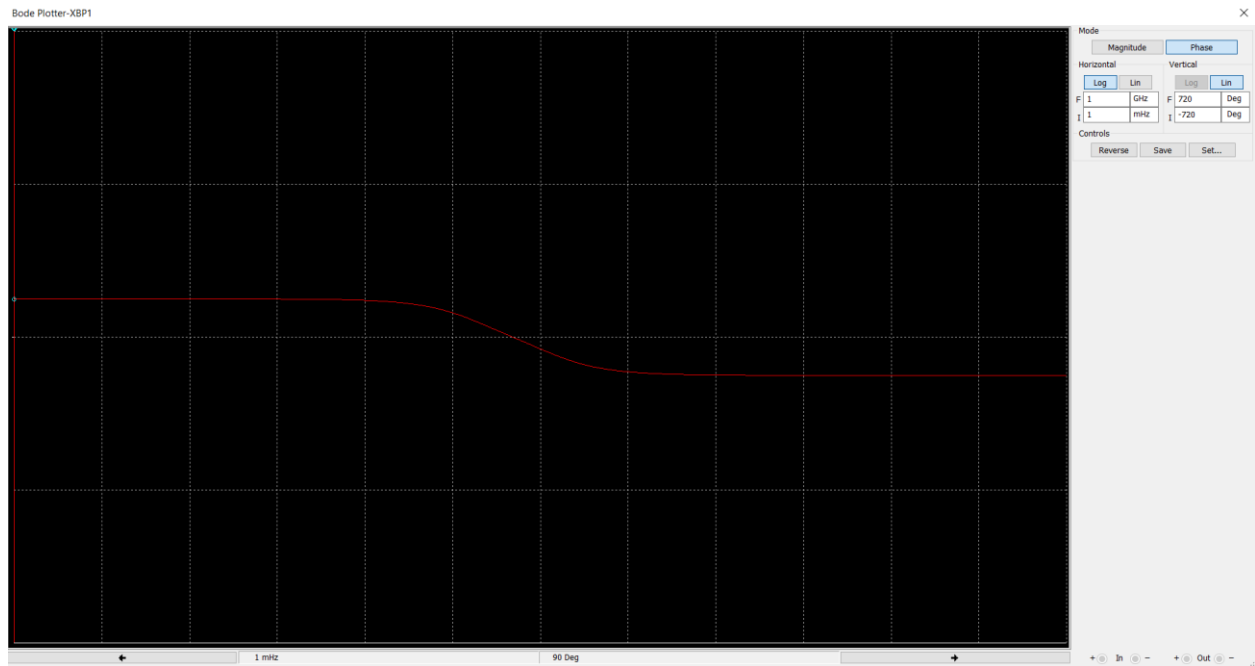


Рис. 35 – ФЧХ ЛСФ

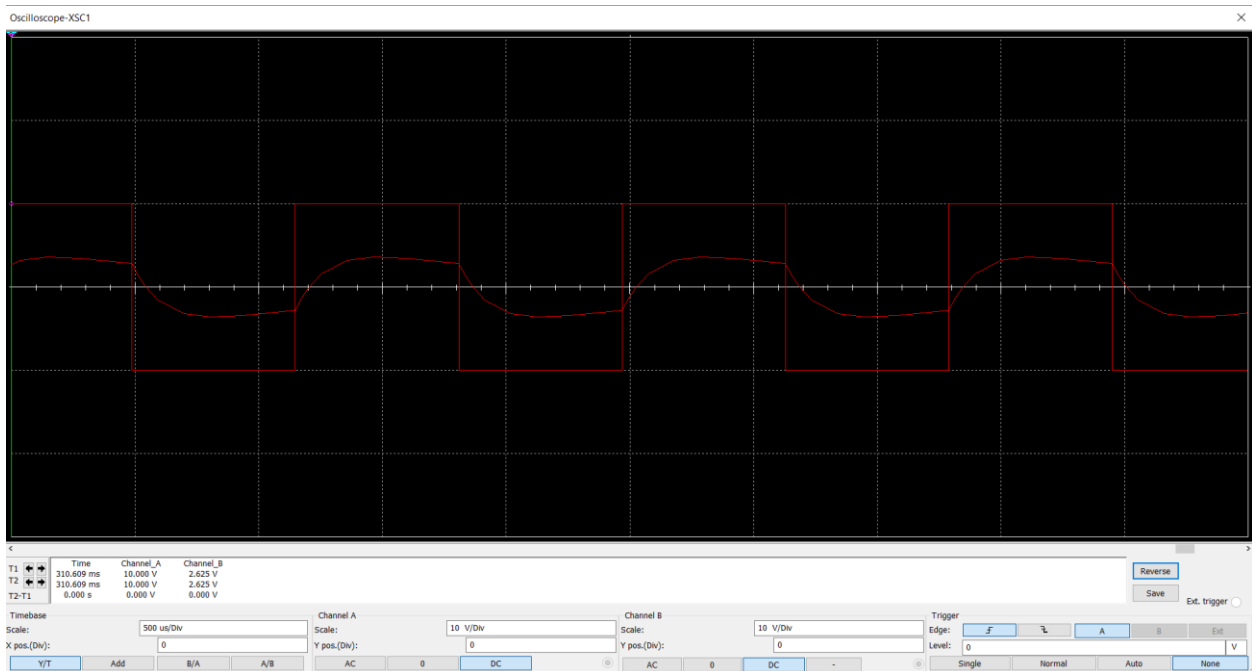


Рис. 36 – Вхідний меандр, поданий на ЛСФ, та вихідний сигнал у вигляді ламаної лінії при частоті генератора 3,03 кГц, що співпадає з параметром $1/RC$.

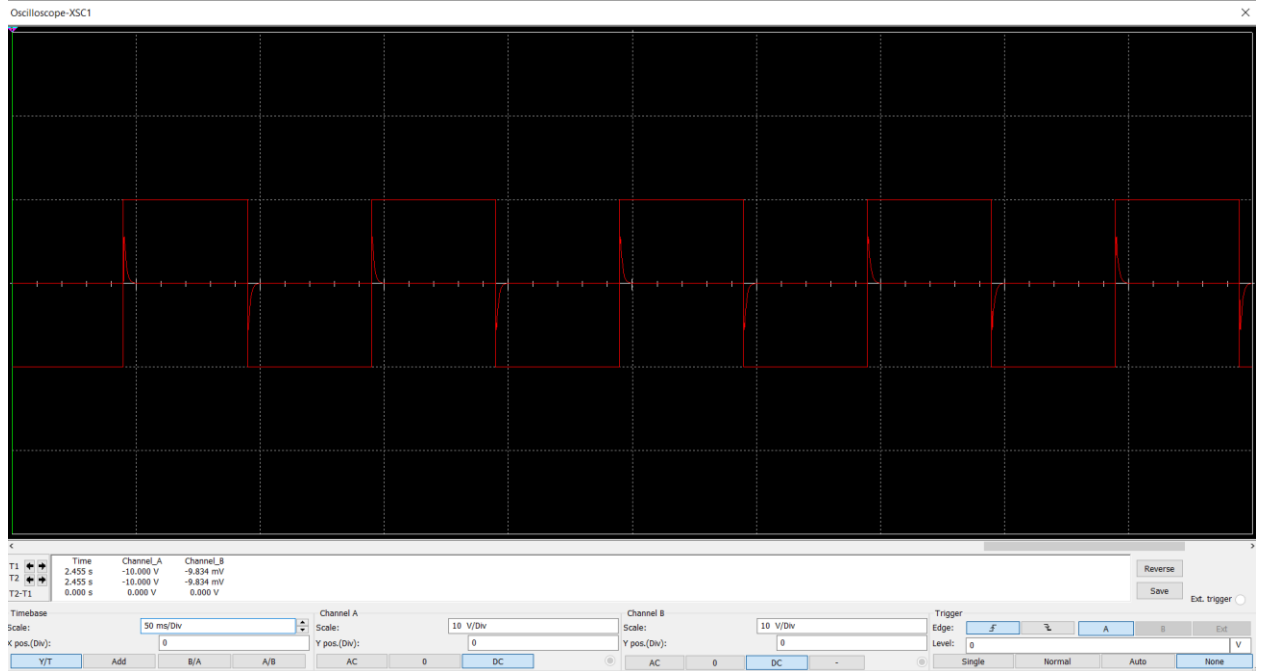


Рис. 37 – Вхідний меандр, поданий на ЛСФ, та вихідний сигнал у вигляді ламаної лінії при частоті генератора 0,01 кГц, що суттєво менше за параметр $1/RC$.

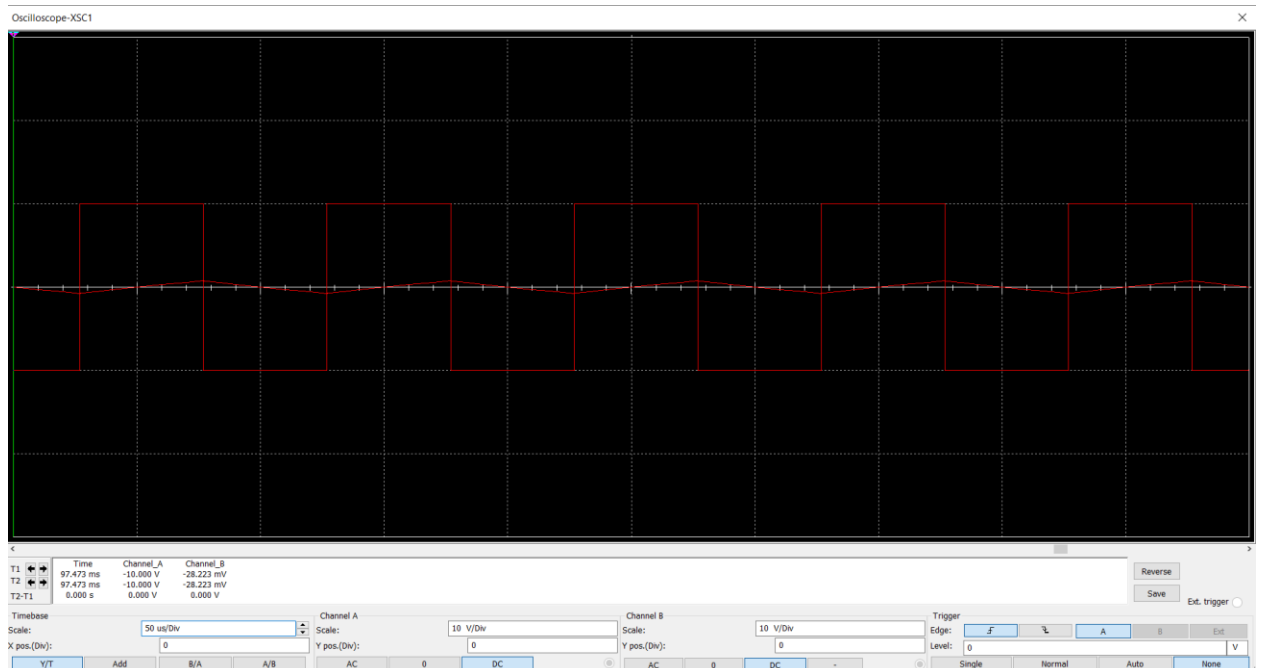


Рис. 38 – Вхідний меандр, поданий на ЛСФ, та вихідний сигнал у вигляді ламаної лінії при частоті генератора 10 кГц, що суттєво більше за параметр $1/RC$.

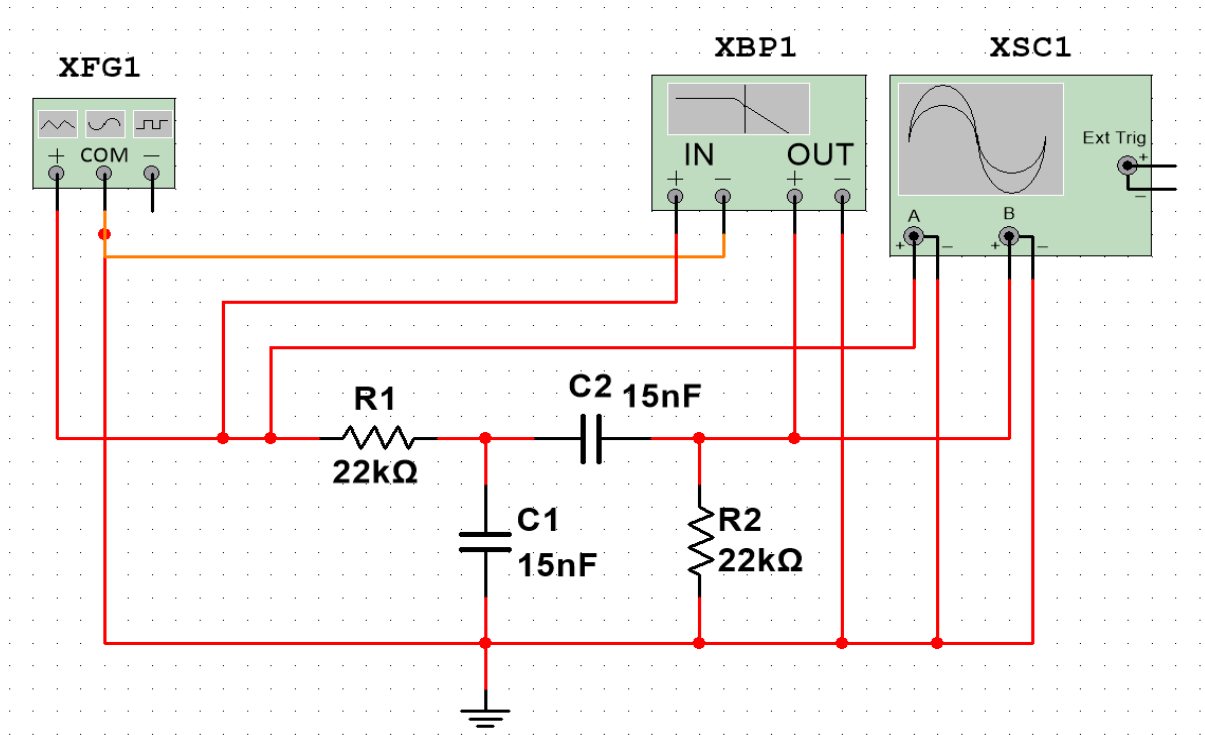


Рис. 39 – Схема для вимірювання характеристик ЛСФ.

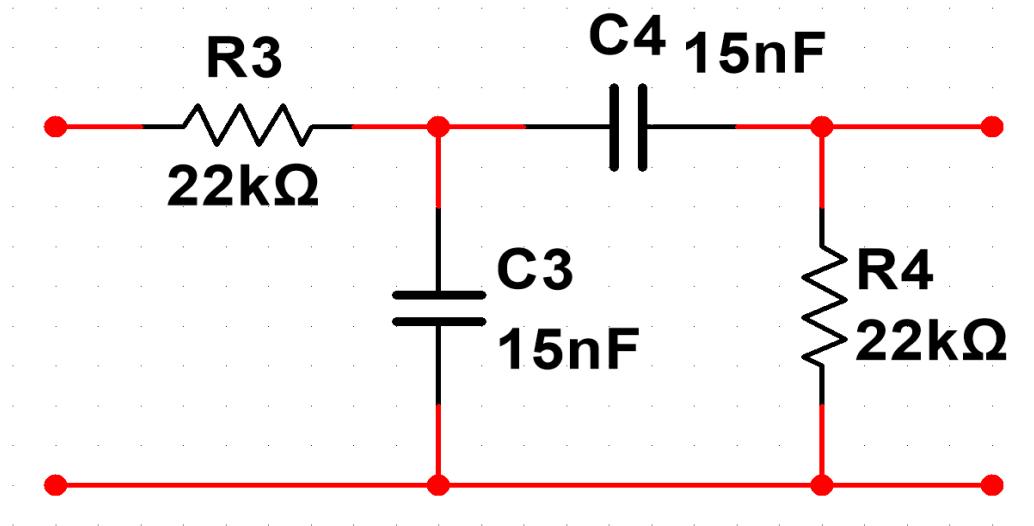


Рис. 40 – Схема ЛСФ.

Пасивний лінійний загороджувальний фільтр
(далі ЛЗФ)

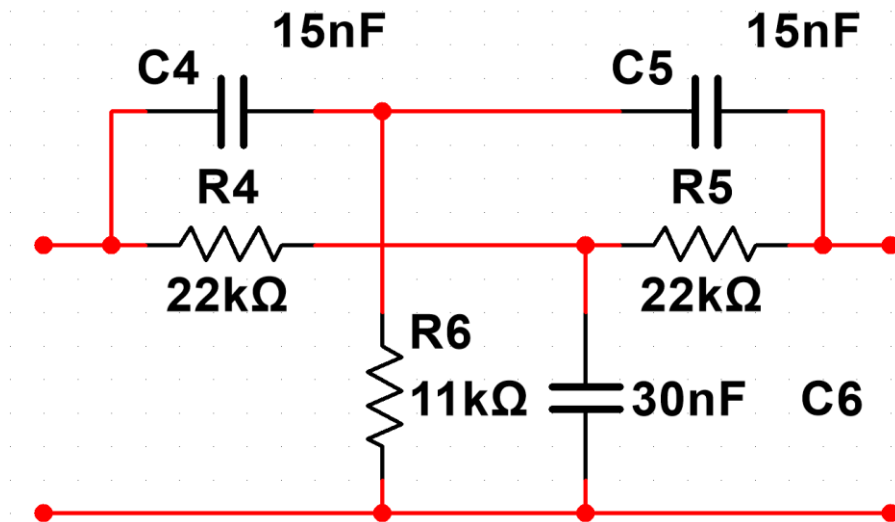


Рис. 41 – Схема ЛЗФ.

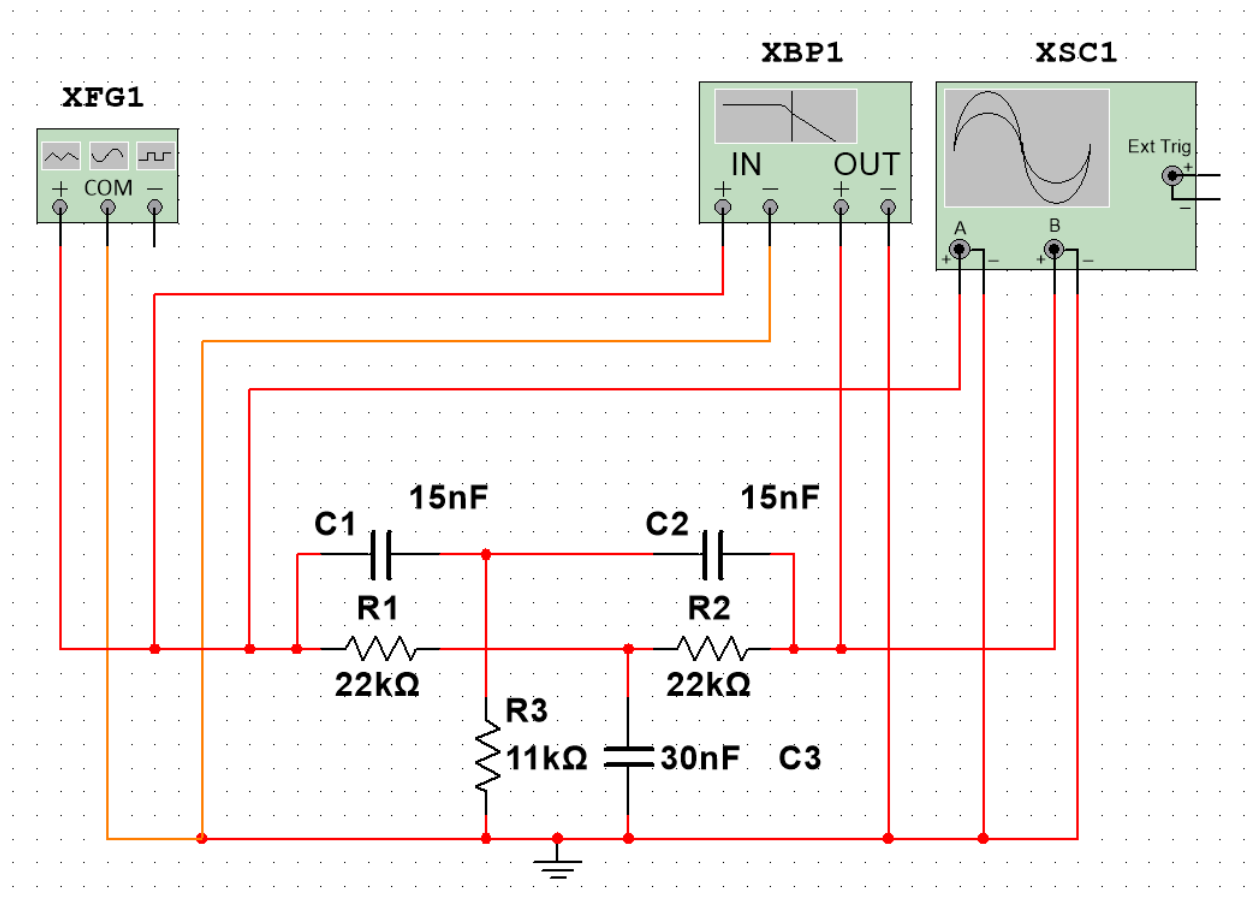


Рис. 42 – Схема для вимірювання характеристик ЛЗФ.

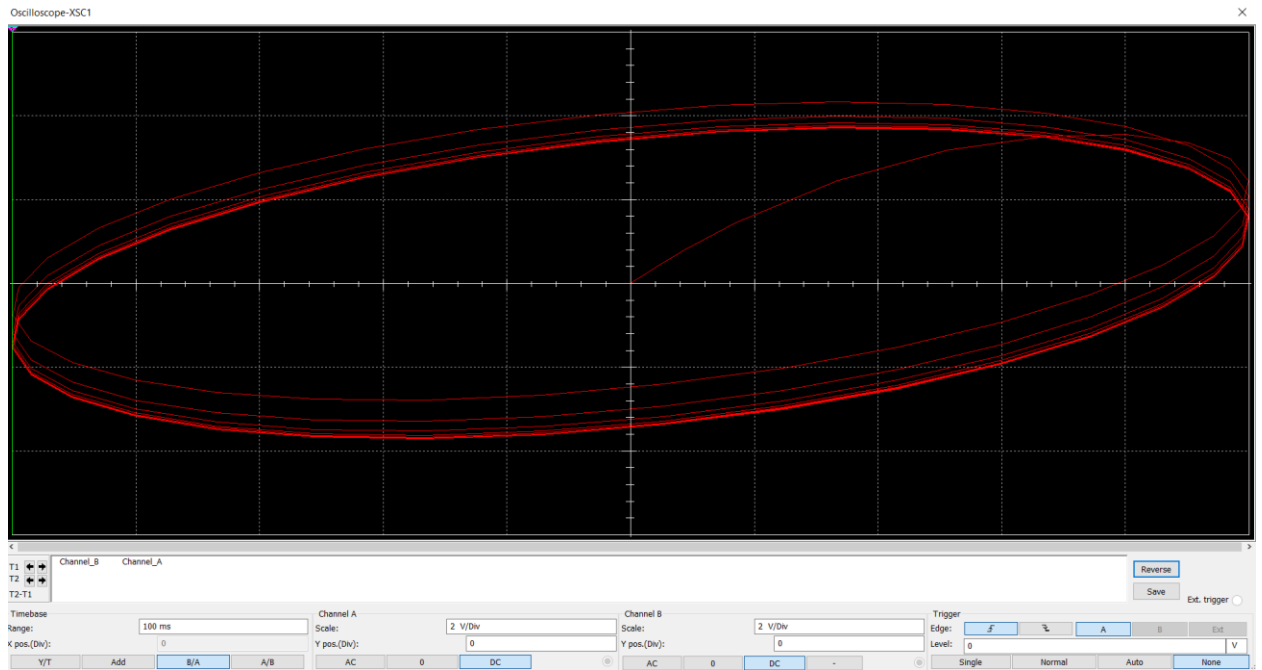


Рис. 43 – фігури Ліссажу ЛЗФ

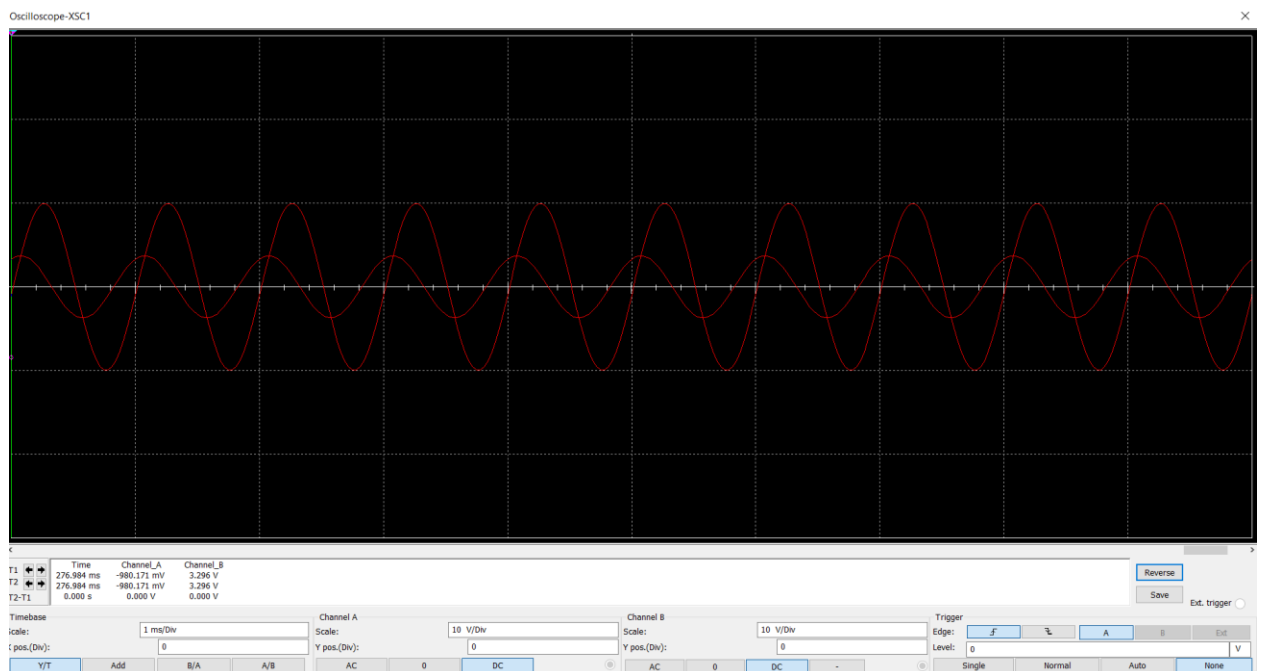


Рис. 44 – Вхідний та вихідний сигнали ЛЗФ

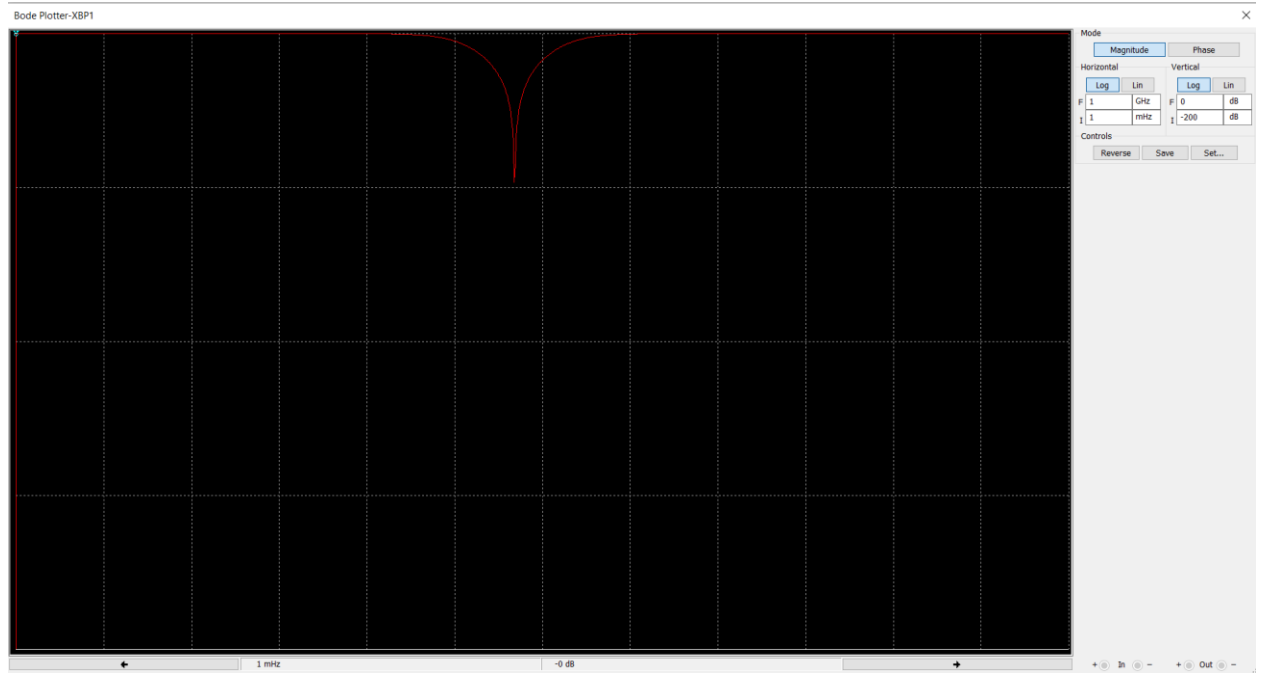


Рис. 45 – АЧХ ЛЗФ

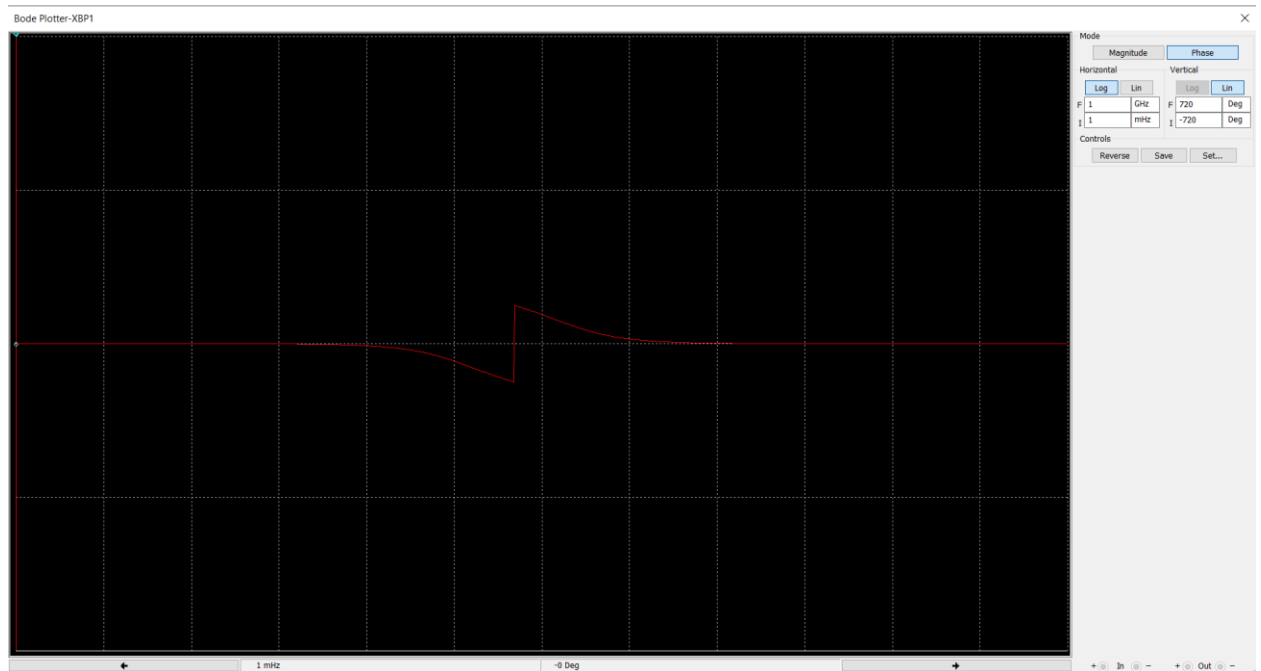


Рис. 46 – ФЧХ ЛЗФ

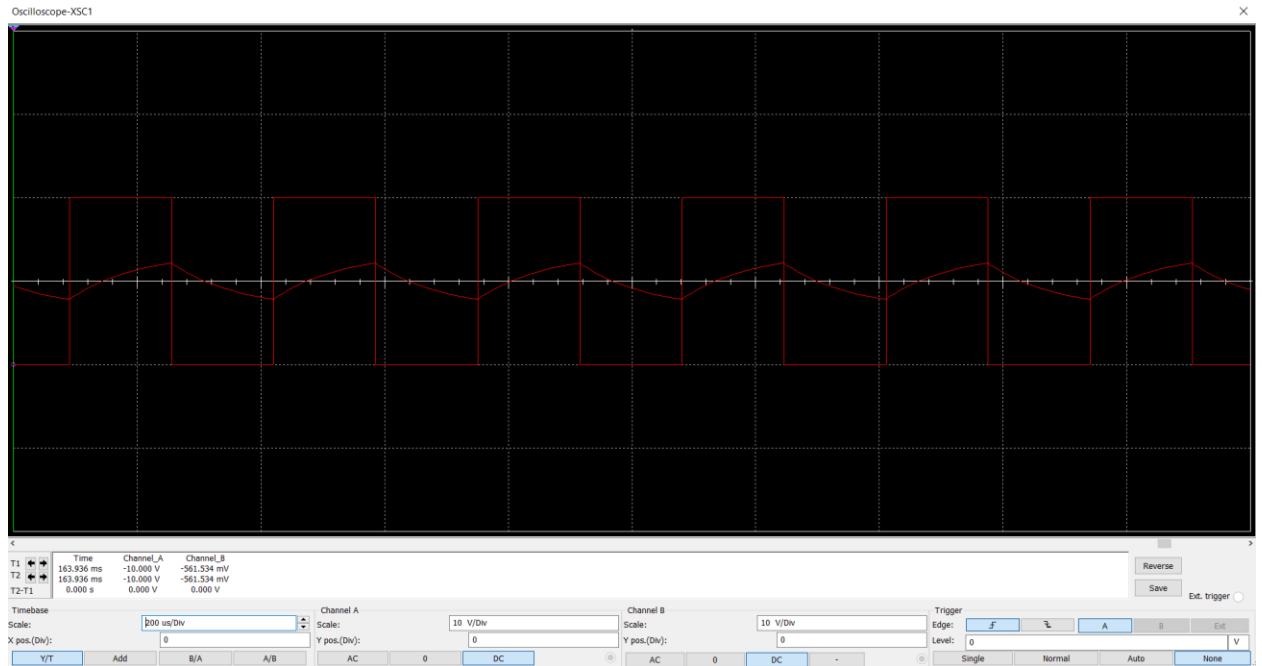


Рис. 47 – Вхідний меандр, поданий на ЛЗФ, та вихідний сигнал у вигляді ламаної лінії при частоті генератора 3,03 кГц, що співпадає з параметром $1/RC$.

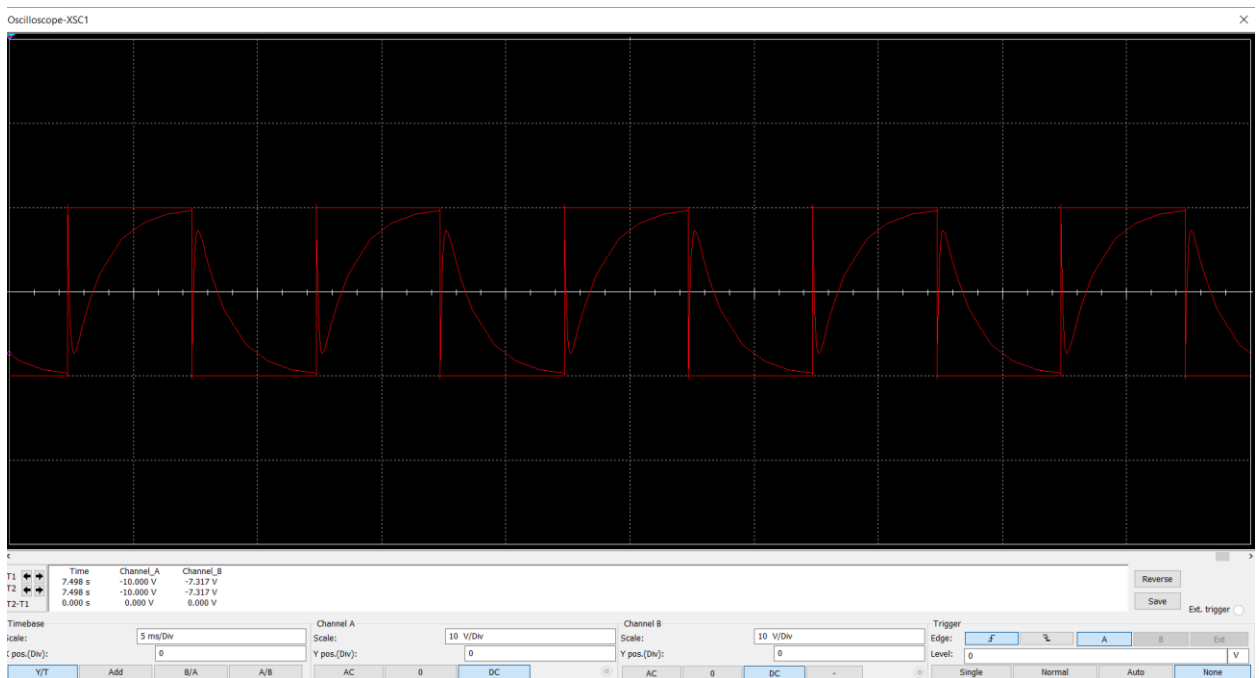


Рис. 48 – Вхідний меандр, поданий на ЛЗФ, та вихідний сигнал у вигляді ламаної лінії при частоті генератора 0,01 кГц, що суттєво менше за параметр $1/RC$.

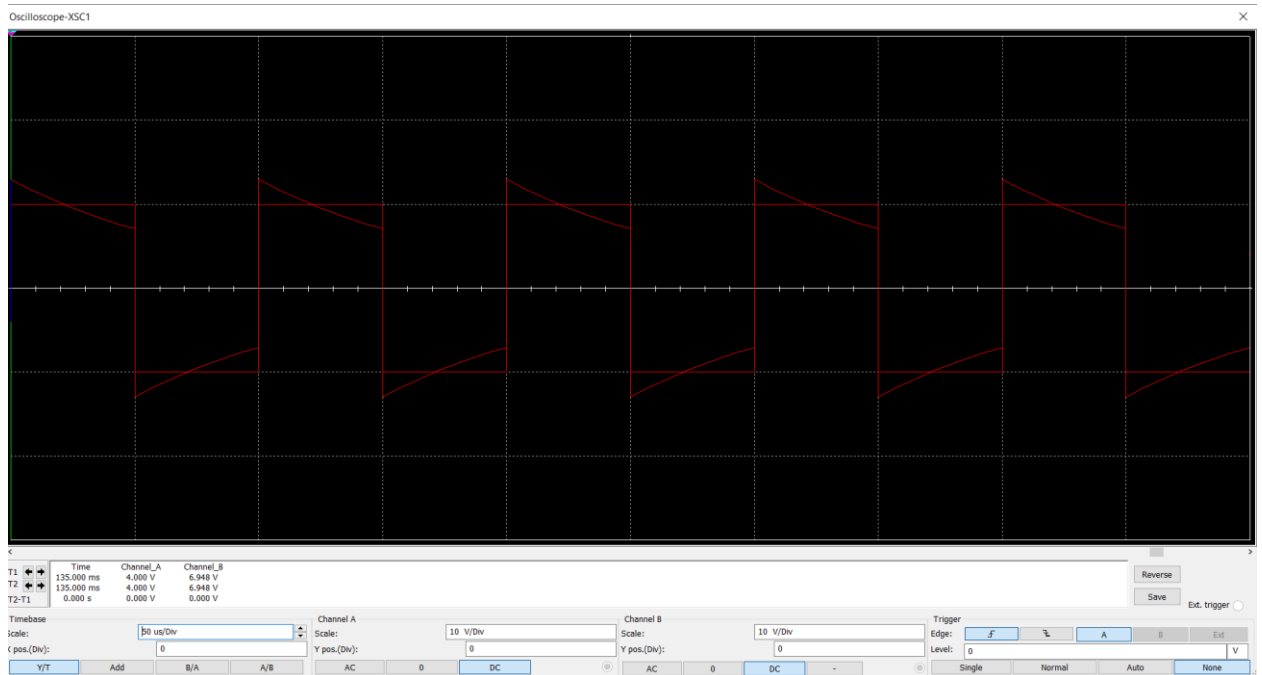


Рис. 49 – Вхідний меандр, поданий на ЛЗФ, та вихідний сигнал у вигляді ламаної лінії при частоті генератора 10 кГц, що суттєво більше за параметр $1/RC$.

Висновки:

Були проведені моделювання схем чотирьох пасивних лінійних чотириполіусників у середовищі multisim 14, а саме: фільтру нижніх частот, фільтру високих частот, смугового фільтру та загороджувального фільтру. Для кожного були отримані вихідний сигнал, який є змінним гармонічним сигналом, АЧХ та ФЧХ, і досліджено, як змінюються поданий меандр в залежності від співвідношення сталої часу фільтра та частоти генератора.

Було зіставлено гармонічний сигнал, поданий на вхід до чотириполіусника, і сигнал на виході. Також для цих сигналів отримано фігури Ліссажу.

Отримані результати співпадають із очікуваними.