

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**  
**Кафедра Радіотехніки та телекомунікацій**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до лабораторних робіт з дисципліни  
«Основи схемотехніки»  
для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та  
радіотехніка» усіх форм навчання  
Частина II

**2021**

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Основи схемотехніки” для студентів спеціальності 172 “Телекомунікації та радіотехніка” усіх форм навчання. Частина II / Укл. В.С. Кабак, Г.М. Сидоренко. – Запоріжжя: НУ “Запорізька політехніка”, 2021. – 86 с.

Укладачі: В.С. Кабак, доцент, к.т.н. кафедри РТТ  
Г.С. Сидоренко, зав. лаб. кафедри РТТ

Рецензент: С.В. Морщавка, доцент, к.т.н.

Відповідальний  
за випуск: В.С. Кабак, доцент, к.т.н. кафедри РТТ

Затверджено:  
на засіданні кафедри  
радіотехніки та телекомунікацій  
Протокол № 5 від 2.02.2021 р.

Рекомендовано до видання НМК  
факультету радіоелектроніки та  
телекомунікацій  
Протокол № 5 від 21.02.2021 р.

**ЗМІСТ**

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗИСТОРНИХ КАСКАДІВ У ДІАПАЗОНІ СЕРЕДНІХ ЧАСТОТ.....	4
1.1 Мета роботи .....	4
1.2 Прилади, що використовуються в роботі .....	4
1.3 Завдання на підготовку до виконання лабораторної роботи.....	4
1.4 Експериментальна частина.....	4
1.5 Зміст звіту .....	30
1.6 Контрольні запитання.....	30
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК RC-КАСКАДУ.....	34
2.1 Мета роботи .....	34
2.2 Прилади, що використовуються в роботі.....	34
2.3 Завдання на підготовку до лабораторної роботи.....	34
2.4 Експериментальна частина.....	34
2.5 Зміст звіту .....	68
2.6 Контрольні запитання.....	68
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЗИСТИВНОГО КАСКАДУ У ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ.....	70
3.1 Мета роботи .....	70
3.2 Прилади, що використовуються в роботі.....	70
3.3 Завдання на підготовку до роботи .....	70
3.4 Експериментальна частина.....	70
3.5 Зміст звіту .....	85
3.6 Контрольні запитання.....	85

# **1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗИСТОРНИХ КАСКАДІВ У ДІАПАЗОНІ СЕРЕДНІХ ЧАСТОТ**

## **1.1 Мета роботи**

Закріпити знання з розділу курсу "Методи машинного аналізу електронних схем", експериментально дослідити режими роботи з постійного струму, провести аналіз у часовій області та визначити основні параметри схем підсилювальних каскадів з спільним емітером (СЕ), спільною базою (СБ) і спільним колектором (СК).

## **1.2 Прилади, що використовуються в роботі**

Лабораторний практикум реалізовано шляхом комп'ютерного моделювання на персональному комп'ютері за допомогою програми схемотехнічного моделювання Micro-Cap-9.0 (7.0).

## **1.3 Завдання на підготовку до виконання лабораторної роботи**

**1.3.1** Вивчити розділ курсу "Методи машинного аналізу електронних схем".

**1.3.2** Ознайомитись з основними параметрами і вольт-амперними характеристиками біполярних транзисторів і принциповими схемами підсилювальних каскадів за схемами спільний емітер (СЕ), спільна база (СБ), спільний колектор (СК).

## **1.4 Експериментальна частина**

**1.4.1** Відкрити основне вікно програми Micro-Cap-9.0 (7.0). За допомогою схемного редактора Micro-Cap-9.0 (7.0) побудувати

принципову схему підсилювального каскаду на біполярному транзисторі за схемою СЕ з номіналами елементів, що наведені на рис. 1.1 (номінали елементів відповідають схемі лабораторного стенду з дисципліни “Пристрої підсилення сигналів”).

Тип біполярного транзистора n-p-n типу обирається згідно з № варіанта, відповідно до списку моделей біполярних транзисторів передбачених бібліотекою Micro-Cap-9.0 (7.0). Напругу живлення підсилювального каскаду обрати рівній напрузі живлення лабораторного стенду  $E_{жив} = +15\text{ В}$ .

Для того, щоб побудувати схему в схемному редакторі програми МС-9.0 (7.0) необхідно виконати такі дії (спочатку прочитати цей пункт до кінця, а потім вже переходити до виконання).

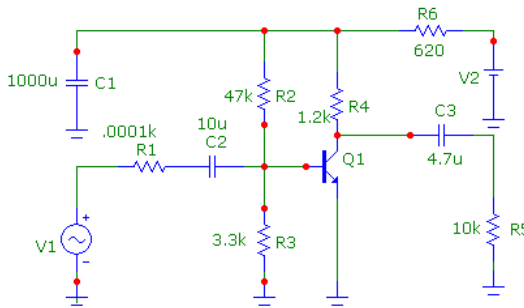


Рисунок 1.1 – Схема підсилювального каскаду з СЕ у форматі МС-9.0 (7.0)

По-перше, у загальному випадку вибір компонентів, які необхідно відобразити, можна проводити таким шляхом:

– у стрічці основного меню МС-9.0 (7.0) (рис. 1.2) вибрати директорію “**Component**” і у вікні, що відкриється, вибрати директорію “Analog Primitives”. У цій директорії знаходяться моделі аналогових функціональних елементів (компонентів), за допомогою яких можливо проводити моделювання схем (рис. 1.3).

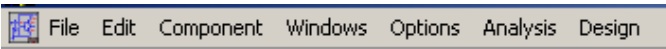


Рисунок 1.2 – Фрагмент основного меню МС7

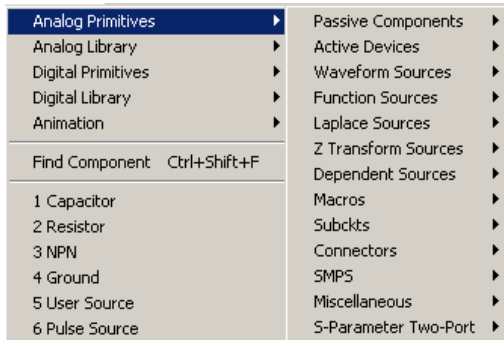


Рисунок 1.3 – Набір функціональних елементів директорії Analog Primitives

Для виконання лабораторної роботи за схемою рис. 1.1, інтерес представляють перші три піддиректорії:

- Passive Components (пасивні компоненти);
- Active Devices (активні пристрої);
- Waveform Sources (джерела вхідного сигналу).

Обравши будь-яку з цих піддиректорій у вікні, що відкриється, можна вибрати необхідний компонент для моделювання (наприклад на рис. 1.4 зображено повний набір пасивних компонентів для піддиректорії Passive Components).

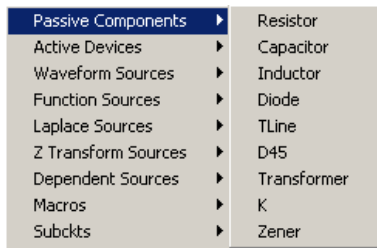


Рисунок 1.4 – Набір пасивних компонентів в МС-9.0 (7.0)

Так, з рис. 1.4 виходить, що програма дозволяє виконувати моделювання з використанням резисторів, конденсаторів, індуктивностей, трансформаторів, діодів, ліній передачі, стабілітронів.

Аналогічно, якщо розкрити піддиректорії “Active Devices” (активні пристрої), “Waveform Sources”, то можна вибрати тип активного приладу, вид джерела сигналу (напруги, струму – тощо).

Для початкового знайомства с програмою МС-9.0 (7.0) передбачено більш простий варіант формування принципової схеми. Деякі елементи, які найбільш часто використовують в принципових схемах, додатково винесено до панелі основного меню (рис. 1.5).

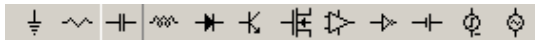


Рисунок 1.5 – Елементи МС7, що винесені на панель основного меню

Тому, для найбільш оперативного формування схеми необхідно лівою кнопкою “миші” вибрати потрібний елемент з пасивних або активних компонентів і перенести його на робоче поле рисунку (натисканням на ліву кнопку “миші” в обраному місці).

Наприклад, якщо вибрати з панелі (рис. 1.5) n-p-n транзистор і розмістити його на робочому полі, то висвітлиться панель з переліком типу транзисторів, моделі яких передбачені програмою, а також повний набір параметрів відповідного транзистора (рис. 1.6).

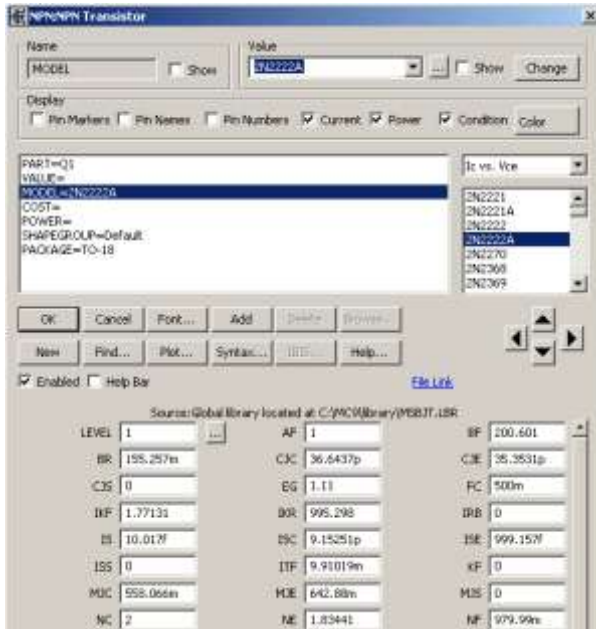




Рисунок 1.6 – Завдання типу транзистора в MC-9.0 (7.0)

Так, для прикладу, що розглядається, обрано транзистор типу 2N222A, а нижче наводяться параметри моделі цього транзистора. У графі Part необхідно вказати порядковий номер транзистора (у наведеному прикладі Q1), а у строчці Model задати тип транзистора з переліку моделей передбачених бібліотекою MC-9.0 (7.0). Після цього підтвердити вибір транзистора натисканням на кнопку “OK”. На робочому полі з’явиться зображення транзистора.

Якщо, тепер, наприклад, до колектора необхідно підключити резистор, то спочатку на панелі основного меню необхідно натиснути кнопку , яка дозволяє змінити тип електронного компонента схеми. Потім на панелі елементів лівою кнопкою “миші” вибрати резистор (стандартне позначення резистора в MC-9.0 (7.0) відповідає західним стандартам – ) і перенести його на робоче поле до колектора



транзистора. Для наочності схеми резистор можна розміщувати на певній відстані від колектора транзистора (рис. 1.1).

Після перенесення резистора на робоче поле висвітлиться наступна панель (рис. 1.7).

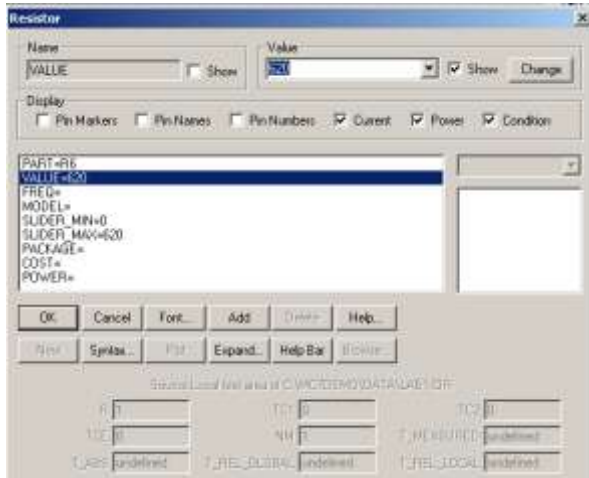



Рисунок 1.7 – Завдання параметрів резистора


У цій панелі достатньо задати дві строчки: по-перше, графу PART =, в якій вказується позиційне позначення резистора в схемі (на рис. 1.7 це резистор R6), а, по-друге, вибравши графу VALUE задати номінальний опір резистора. Множники для позначення опору резисторів такі: 1кОм -1k, 1МОм -1MEG,  $1 \cdot 10^{-3}$ Ом – 1M. Завдання параметрів резистора також необхідно підтвердити натисканням на кнопку “OK”.


Завдання параметрів конденсаторів проводиться повністю аналогічно. Після натискання на кнопку, що відображує функціональне призначення конденсатора і перенесення його на робоче поле, висвітлюється вікно, в якому необхідно задати його параметри.

При цьому необхідно пам’ятати, що множники для позначення ємності конденсаторів у МС7 такі: 1мФ -1m, 1мкФ -1u, 1нФ - 1n.

Завдання параметрів конденсатора також необхідно підтвердити натисканням на кнопку “OK”.

Для з’єднання елементів схеми необхідно натиснути на кнопку  основного меню програми і провести з’єднання вибраних точок. Якщо необхідно змінити розташування якогось елемента, то виділивши його лівою кнопкою “миші” можна пересунути на будь-яке місце робочого поля.


Підключення напруги живлення до схеми здійснюється натисканням на кнопку  панелі електронних компонентів (джерело напруги постійного струму) і аналогічним завданням його параметрів у графах PART і VALUE.

І, нарешті, після того як практично схема каскаду побудована, необхідно задати параметри джерела вхідного сигналу. Для цього на панелі компонентів необхідно натиснути на кнопку  (джерело гармонічного сигналу) і перенести його на робоче поле. Якщо ж на панелі основного меню такий елемент відсутній, то необхідно послідовно активізувати директорії “Component”, “Analog Primitives”, “Waveform Source”, “Sine Source”. В результаті висвітлиться панель “Sine Source” для якої необхідно задати тип джерела і його параметри (рис.1.8).

Так, для схеми підсилювального каскаду (рис. 1.1) задане джерело загального типу “GENERAL” з позиційним позначенням V1, амплітудою  $A = 10$  мВ, частотою 1 кГц, внутрішнім опором  $R_s = 1$  Ом.



Рисунок 1.8 – Завдання параметрів джерела гармонічного сигналу

**1.4.2** Провести нумерацію вузлів схеми натисканням на кнопку панелі управління  (рис. 1.9).

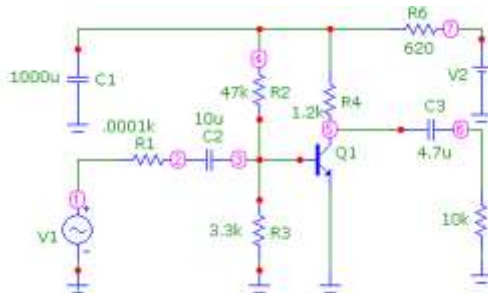


Рисунок 1.9 – Нумерація вузлів схеми

Нумерація вузлів схеми необхідна для перевірки правильності побудови схеми і подальшого виводу результатів аналізу.

**1.3.3** Визначити параметри режиму каскаду за постійним струмом. Для цього в директорії ANALYSIS необхідно запустити режим аналізу Dynamic DC (рис.1.3). На робочому полі повинна з'явитися схема каскаду, що моделюється, з картою режиму за постійним струмом.

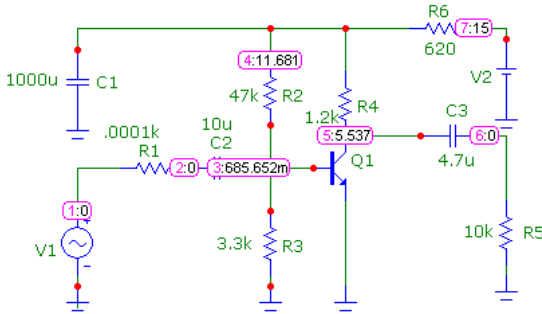



Рисунок 1.10 – Розрахунок режиму каскаду з постійного струму

**1.4.4** Зафіксувати значення і полярність напруги у вузлах схеми і порівняти їх з результатами отриманими в схемі лабораторного стенду.

**1.4.5** Натисканням на кнопку  отримати значення струмів що характеризують робочу точку (точку спокою) транзистора, тобто, за відсутністю вхідного сигналу і відобразити їх у звіті. Порівняти їх з результатами отриманими в схемі лабораторного стенду.

**1.4.6** Провести аналіз схеми у часовій області. Параметри джерела сигналу  $V_{in3}$  з амплітудою  $A = 10$  мВ і частотою 1 кГц були задані в пункті 1.3.1. Вибравши в меню директорії ANALYSIS режим розрахунку перехідних процесів “Transient” задати параметри розрахунку відповідно до рис. 1.11. В графі “Time Range” задати час аналізу 3 мс. Для вхідного сигналу з частотою 1 кГц ( $T = 1$  мс), це означає, що аналіз буде проводитися впродовж трьох періодів вхідного сигналу.



Рисунок 1.11 – Завдання параметрів аналізу і виводу результатів аналізу

Також встановити прапорці у позиціях “Operating Point” (розрахунок проводиться у малосигнальному режимі з параметрами визначеними для робочої точки) і “Auto Scale Ranges” – автоматичний вибір масштабу графіків. Для двох графіків, які передбачаються для розрахунку, у графі Y Expression указати вхідну і вихідну напруги схеми: V(1), V(6) – напруги в першому і шостому вузлах схеми за рис.1.9.

**1.4.7** Запустити аналіз схеми у часовій області натисканням на кнопку “Run”. Отримати результати розрахунку у вигляді відповідних осцилограм (рис. 1.12) Звернути увагу на фазу вхідного і вихідного колювання. Відобразити епюри у звіті.

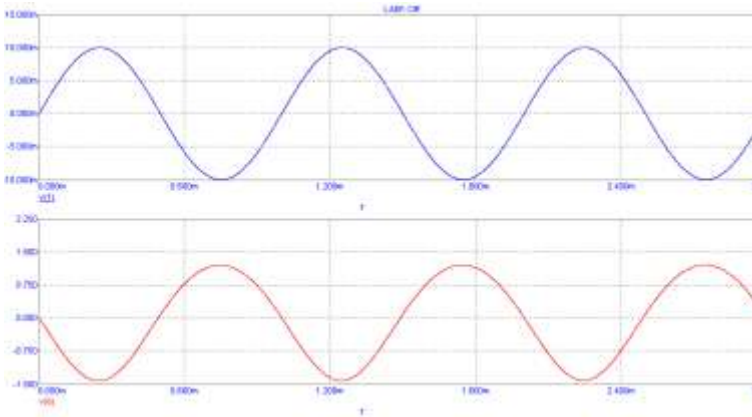






Рисунок 1.12 – Епюри вхідного і вихідного коливання

**1.4.8** За отриманими графіками розрахувати коефіцієнт підсилення схеми в режимі підсилення сигналів змінного струму. Включивши режим курсору натисканням на кнопку  і розмістивши курсор на полі графіку вхідного коливання можна визначити миттєве значення напруги у будь-який момент часу. Додатково, натиснувши на кнопку  (максимум) можна визначити пікове значення вхідної напруги (амплітуду). Потім вибравши будь-яку точку на епюрі вихідної напруги (додатна півхвиля) повторним натисканням на кнопку  визначити амплітуду вихідної напруги. Розрахувати коефіцієнт підсилення. Повторити процедуру визначення амплітуди для від'ємної півхвилі шляхом натискання на кнопку . Пояснити відмінність результатів.

**1.4.9** Провести аналіз нелінійних спотворень у каскаді. Спочатку виставити амплітуду джерела вхідного сигналу рівною 2 мВ (наближення до умов визначення  $k_r$  у лабораторному стенді). Далі необхідно повторно запустити аналіз перехідних процесів “Transient”. У відкритшомуся вікні завдання параметрів провести зміни параметрів відповідно до рис.1.13. По-перше, необхідно в графі “Time

Range” змінити час аналізу з метою проведення аналізу тільки впродовж одного періоду вхідного сигналу – 1 мс.

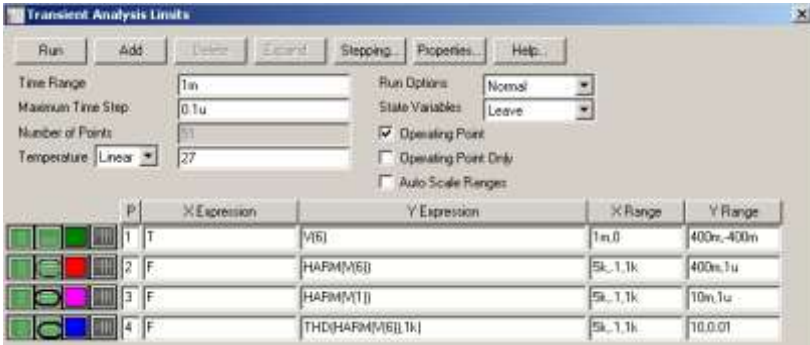


Рисунок 1.13 – Завдання параметрів гармонічного аналізу

По-друге, бажано відмінити автоматичний вибір масштабу графіків, відключивши прапорець “Auto Scale Ranges”, а масштаб графіку для вихідної напруги задати виходячи з визначеного коефіцієнта підсилення з напруги  $K_u$  у пункті 1.3.8 і значення вхідної напруги джерела  $V1 = 2$  мВ.

Для другого графіку в полі “X Expression” задати аргумент F-частота, а в полі “Y Expression” – набрати  $HARM(V(5))$  – гармоніки вихідного сигналу. У полі завдання масштабу графіків у колонці X Range задати: максимальне значення частоти аналізу 5 кГц (аналізуються перші чотири вищих гармоніки), мінімальне значення частоти – 0.1 Гц, крок по частоті 1кГц, а в колонці Y Range відповідно максимальне значення амплітуди першої гармоніки 400 мВ, мінімальне значення амплітуди вищих гармонік, що підлягають аналізу -1мкВ.

Додатково у лівому нижньому полі, яке задає лінійний або логарифмічний масштаб відповідних графіків, натиснути кнопку позначену на рисунку овалом (логарифмічний масштаб по осі ординат)

Далі, встановивши курсор на поле P другого графіку натиснути кнопку “Add”, що призведе до з’явлення індикації третього графіка.



Для цього графіку також в полі “X Expression” задати аргумент F- частота, а в полі “Y Expression” – набрати HARM(V(1))- гармоніки вхідного сигналу. У полі завдання масштабу графіків у колонці X Range повторити параметри другого графіку, а в колонці Y Range встановити максимальне значення амплітуди першої гармоніки 10 мВ, і мінімальне значення амплітуди вищих гармонік, що підлягають аналізу -1мкВ. Аналогічно у лівому нижньому полі натиснути кнопку, що позначена на рисунку овалом.

Для четвертого графіку в полі “Y Expression” – набрати THD(HARM(V(6))) – накопичувальне (кумулятивне) значення коефіцієнта нелінійних спотворень, а в графі Y Range задати максимальне значення  $k_T$  рівним 10%, а мінімальне – 0,01%.

Додатково в графі “State Variables встановити прапорець “Leave” (пояснення цієї опції буде нижче).

Запустити аналіз натисканням на кнопку “Run”. Епюри коливаль і графік спектрального аналізу повинні бути подібними до рис. 1.14.

Як видно з рис. 1.14, на верхньому графіку відображено 1 період вихідної напруги каскаду. Зафіксувати значення амплітуди вихідного колювання  $U_{m|R5=10\text{ кОм}}$

На другому графіку зображено спектр вихідної напруги в абсолютних одиницях (В). Так, на зображеному прикладі для пікового значення амплітуди першої гармоніки (включено режим курсора  і індикація глобального максимуму ) висвітлено значення 314,847 мВ. Додатково спектр містить другу, третьої четверту гармоніки вхідного сигналу, амплітуди яких також визначити за допомогою курсору і записати їх значення.

На третьому графіку зображено спектр вхідного сигналу. Очевидно, що для гармонічного сигналу спектр містить тільки одну дискретну складову з частотою 1 кГц.



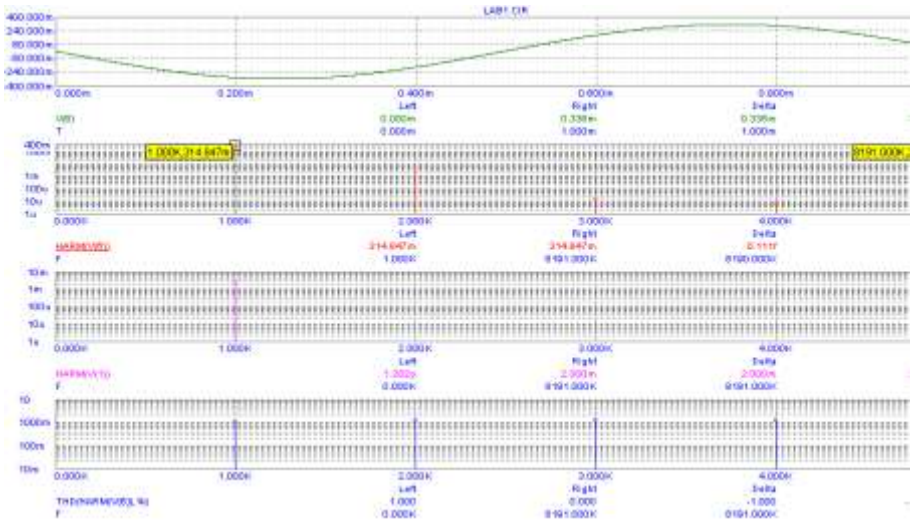


Рисунок 1.14 – Результати гармонічного аналізу

Порівнявши епюри, що зображені на третьому і другому графіках можна зробити висновок, щодо проявлення нелінійних спотворень у підсилювачах – **на виході з'являються нові частотні складові, яких не було у вхідному сигналі.**

На четвертому графіку надані кумулятивні значення коефіцієнта нелінійних спотворень безпосередньо у відсотках.. Це означає, що на частоті 2 кГц наводиться значення  $k_r$ , яке визначається тільки другою гармонікою, на частоті 3 кГц наводиться значення, яке вже визначається другою і третьою гармоніками згідно з відомим виразом:

$$k_r = \frac{\sqrt{U_{m2}^2 + U_{m3}^2}}{U_{m1}} \cdot 100\% ,$$

на частоті 4 кГц враховується значення четвертої гармоніки і т.д.

З епюри для THD ( $k_r$ ) впливає, що найбільший внесок у нелінійні спотворення надає друга гармоніка, трохи збільшує це значення третя гармоніка, а внесок четвертої і подальших вищих

гармонік можна для цього варіанту схеми практично не враховувати. Зафіксувати отримані результати.

**1.4.11\*** *Використання опції “Leave” (виконується за необхідністю)*

Інколи під час гармонічного аналізу на спектрограмі вихідного сигналу окрім вищих гармонік сигналу також присутні додаткові паразитні складові, які утворюють п’єдестал з великої кількості гармонічних складових практично однакової амплітуди і які є похибкою аналізу.

Для того, щоб залишити тільки продукти нелінійності каскаду необхідно зробити наступне: не виходячи з вікна аналізу перехідних процесів знову задати режим аналізу ”Transient” і у відкритшомуся вікні задати строчку “Limits”. При цьому знову відкриється вікно завдання параметрів аналізу подібне рис. 1.13. Зняти прапорець “Operating Point” і натиснути на кнопку “Run”.

Паразитні складові аналізу повинні зменшитися, а основна і вищі гармоніки основної частоти залишаться незмінними. Не виходячи з вікна аналізу повторно задати режим ”Transient” і натиснути кнопку “Run”. Повторити таку процедуру 5...7 разів до тих пір, коли на графіку спектрального аналізу залишаться тільки основна і вищі гармоніки, які не змінюються під час наступного запуску аналіза.

**1.4.12** Змінити амплітуду джерела вхідного сигналу  $A=10$  мВ. Повторити розрахунок у часовій області для робочої точки. Вікно завдання параметрів аналізу повторити відповідно до рис.1.13 (чотири графіки , ручний вибір масштабу і встановлений прапорець “Operating Point”).

Під час визначення діапазону зміни вихідної і вхідної напруги в графі Y Range збільшити відповідні значення максимальної і мінімальної напруг згідно з новим значенням амплітуди вхідного сигналу. Визначити коефіцієнт підсилення з напруги для додатної і від’ємної півхвилі. Порівняти з результатами пп. **1.4.8**.

**1.4.13** Повторити розрахунок коефіцієнта нелінійних спотворень у повній відповідності до пунктів **1.4.9**, **1.4.10**. Порівняти значення  $k_T$  для різних значень амплітуди вхідного сигналу.

**1.4.14** Встановити номінал резистора R1 рівним 1 кОм. У такому включенні резистор моделює опір джерела сигналу. Амплітуду вхідного сигналу повернути до 2 мВ. Додатково, окрім залежностей V(1) – вхідна напруга, V(6) – вихідна напруга, додати графік з епюрами у вузлі 3 – на базі транзистора Q1. Повторити розрахунок у часовій області.

Визначити значення наскрізного коефіцієнта підсилення з урахуванням резистора R1 і порівняти його зі значенням отриманим у пункті **1.4.11**. Пояснити отримані результати.

Розрахувати вхідний опір каскаду як:

$$R_{\text{вхСЕ}} = \frac{U_{m2}}{(U_{m1} - U_{m2})/R1},$$

де  $U_{m1}=2\text{мВ}$  – амплітуда вхідного сигналу,  $U_{m2}$  – амплітуда сигналу змінного струму на базі транзистора, яка визначається з епюри коливання у вузлі 2 як  $U_{m2} = (U_{V2\text{max}} - U_{V2\text{min}}) / 2$ , оскільки корисний сигнал змінного струму на базі транзистора формується відносно напруги зміщення 685,652 мВ (рис.1.10). Порівняти розраховане значення  $R_{\text{вхСЕ}}$  з результатом отриманим в лабораторному стенді.

**1.4.15** Повернути номінальне значення резистора R1 до 0,1 Ом. Зменшити опір резистора навантаження до  $R5=100$  Ом. Амплітуду вхідного сигналу залишити рівною 2 мВ. Повторити розрахунок у часовій області. Зафіксувати амплітуду вихідного коливання  $U_{m|R5=100}$ . За результатами розрахунку визначити коефіцієнт підсилення з напруги для нового значення опору навантаження. Порівняти результат зі значенням отриманим в пункті **1.3.11**.

**1.4.16** Розрахувати вихідний опір каскаду як:

$$R_{\text{вихСЕ}} = \frac{(U_{m|R5=10\text{k}} - U_{m|R5=100}) \cdot 100}{U_{m|R5=100}},$$

де  $U_{m|R5=10\text{k}}$  амплітуда вихідного сигналу при значенні опору навантаження 10 кОм (визначена у пп.**1.3.9**),  $U_{m|R5=100}$  – амплітуда вихідного сигналу, яка визначена у пп.**1.3.15**. Порівняти розраховане значення  $R_{\text{вихСЕ}}$  з результатом отриманим в лабораторному стенді.

**1.4.17** За допомогою схемного редактора побудувати схему зі спільною базою і провести нумерацію вузлів схеми (рис. 1.15).

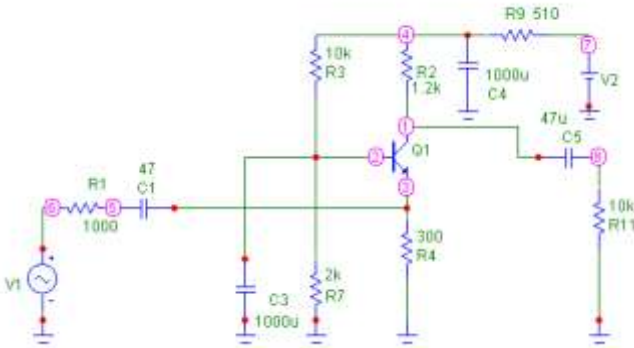


Рисунок 1.15 –Схема каскаду СБ у форматі MC7

**1.4.18** Визначити параметри режиму каскаду за постійним струмом. Для цього в директорії ANALYSIS необхідно запусити режим аналізу Dynamic DC (рис. 1.16). На робочому полі повинна з'явитися схема каскаду СБ з картою режиму за постійним струмом.

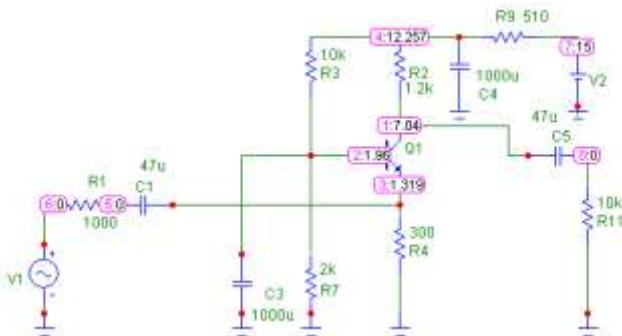



Рисунок 1.16 – Розрахунок режиму каскаду СБ за постійним струмом

**1.4.19** Зафіксувати значення і полярність напруги у вузлах схеми. Натисканням на кнопку  додатково отримати значення струмів, що характеризують робочу точку (точку спокою) транзистора. Порівняти режим роботи каскаду з результатами отриманими в схемі лабораторного стенду.

**1.4.20** Провести аналіз схеми в часовій області. Задати амплітуду джерела сигналу  $V1 A=300$  мВ і частоту  $F=1$  кГц. Вибравши в меню директорії ANALYSIS режим розрахунку перехідних процесів Transient задати параметри розрахунку відповідно до рис.1.17.



Рисунок 1.17 – Завдання параметрів аналізу в часовій області схеми СБ

В графі “Time Range” задати час аналізу 10 мс. Для вхідного сигналу з частотою 1 кГц, це означає, що аналіз буде проводитися впродовж 10 періодів вхідного сигналу. Також встановити прапорці у позиціях “Operating Point” (розрахунок проводиться у малосигнальному режимі з параметрами визначеними для робочої точки) і “Auto Scale Ranges” – автоматичний вибір масштабу графіків.

Для двох графіків, які передбачаються для розрахунку, у графі Y Expression указані вхідна і вихідна напруги схеми:  $V(6)$ ,  $V(8)$  – напруги в шостому та восьмому вузлах схеми.

Звернути увагу на завдання параметрів розрахунку для третього графіку. Для цього графіку необхідно отримати епюри сигнального

коливання у третьому вузлі схеми (на емітері транзистора ) – тобто безпосередньо на вході каскаду з СБ.

Але, оскільки на цьому електроді присутня постійна складова напруги  $U_{R4=}$  від протікання сталої складової емітерного струму, то для усунення постійної напруги  $U_{R4=}$  в графі Y-Expression від аргумента V(3) необхідно відняти потенціал третього вузла, якого було визначено на карті режимів за постійним струмом у пункті **1.4.16**.

**1.4.21** Запустити аналіз схеми у часовій області натисканням на кнопку “Run”. Отримати результати розрахунку у вигляді відповідних осцилограм (рис.1.18). Звернути увагу на фазу вхідного і вихідного коливання.

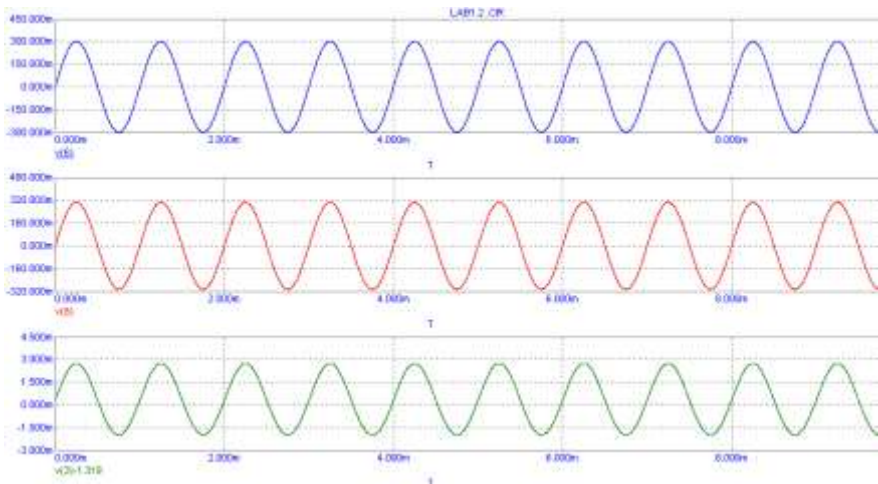




Рисунок 1.18 – Епюри коливань в контрольних точках схеми СБ

Натиснувши на кнопку  можна визначити пікове значення вхідної напруги V6 (розмістивши курсор на графіку вхідного коливання). Потім вибравши будь-яку точку на епюрі вихідної напруги (додатна півхвиля) повторним натисканням на кнопку 

визначити амплітуду вихідної напруги  $V_8$ . Розрахувати наскрізний коефіцієнт підсилення підсилення як  $K_{Унас} = U_{mV8}/U_{mV6}$ .

Повторити процедуру визначення амплітуди для додатної і від'ємної півхвиль коливання у вузлі  $V_3$  і визначити амплітуду в цьому вузлі як середнє арифметичне:  $U_{mV3} = (U_{V_{m3+}} + U_{V_{m3-}})/2$  (різниця в амплітудах додатної і від'ємної півхвиль для цього графіку пояснюється не повністю точним визначенням постійної складової напруги на емітері -1,319 В). Розрахувати коефіцієнт підсилення каскаду зі спільною базою як  $K_{УСБ} = U_{mV8}/U_{mV3}$ . Пояснити відмінність результатів для наскрізного коефіцієнта підсилення каскаду і, власне, каскаду зі спільною базою.

Розрахувати вхідний опір каскаду з СБ, як:

$$R_{вхСБ} = \frac{U_{mV3}}{(U_{mV1} - U_{mV3})/R1}$$

Розраховане значення  $R_{вхСБ}$  наочно демонструє проблему узгодження високоомного опору джерела сигналу і низькоомного опору навантаження. Дійсно, якщо розглядати резистор  $R1$  як внутрішній опір джерела сигналу, а вхідний опір каскаду СБ як навантаження цього джерела, то у вхідному колі виникає подільник з коефіцієнтом передачі  $K_{под} = R_{вхСБ}/(R1 + R_{вхСБ})$ .

В результаті безпосередньо до входу каскаду надходить напруга, яка за умови  $R_{вхСБ} \ll R1$  набагато менша за е.р.с. джерела сигналу. Це наочно продемонстровано на рис.1.18, де на першій епюрі зображено форму коливання на вході схеми з амплітудою 300 мВ, а на третій епюрі зображено сигнал безпосередньо на емітері транзистора (вхід каскаду СБ), який вже має амплітуду приблизно 3 мВ – тобто практично у сто разів меншу за вхідний сигнал.

Саме тому і вводяться поняття коефіцієнта підсилення з напруги безпосередньо каскаду і наскрізного коефіцієнта підсилення, який враховує придушення сигналу, яке вноситься вхідним подільником.

**1.4.22** Провести аналіз нелінійних спотворень у каскаді. Для цього необхідно повторно запустити аналіз перехідних процесів "Transient". У відкритшомуся вікні завдання параметрів провести зміни параметрів відповідно до рис.1.19

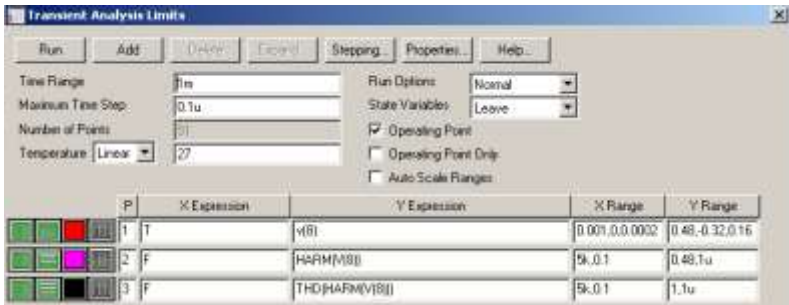


Рисунок 1.19 – Завдання параметрів гармонічного аналізу для схеми СБ

Запустити аналіз натисканням на кнопку “Run”. Епюри коливаль і графік спектрального аналізу повинен бути подібним до рис. 1.20.

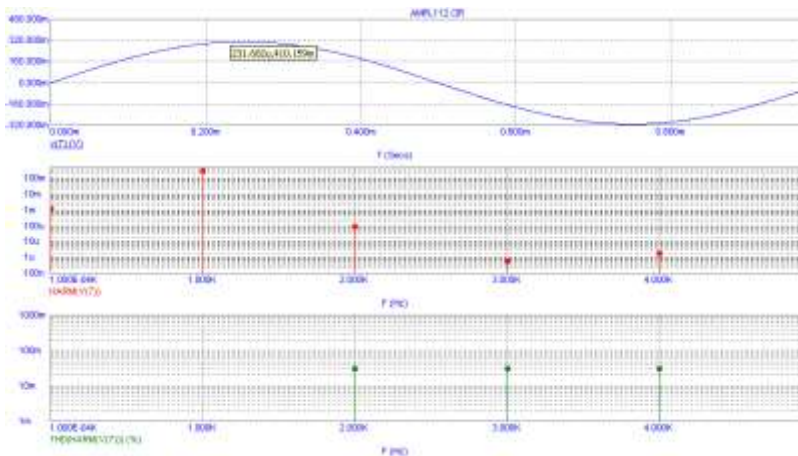


Рисунок 1.20 – Результати гармонічного аналізу для схеми СБ



**1.4.23** За результатами моделювання визначити коефіцієнт нелінійних спотворень. Порівняти отримане значення з результатами для схеми зі спільним емітером.

**1.4.24** Збільшити амплітуду вхідного сигналу до 3В. Повторити вимірювання нелінійних спотворень. Параметри аналізу задати у відповідності з рис. 1.21. Зафіксувати результати моделювання.

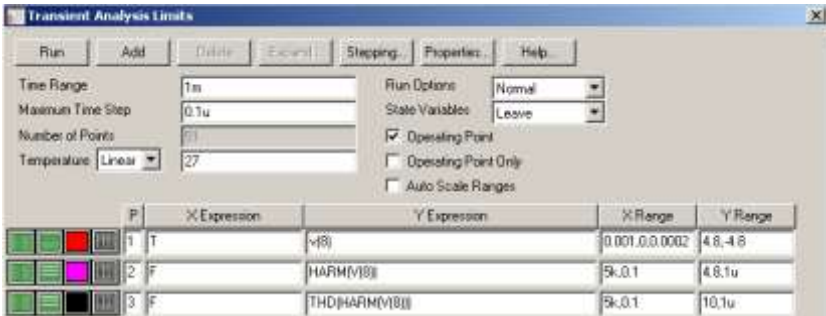


Рисунок 1.21 – Завдання параметрів гармонічного аналізу для схеми СБ при  $U_{вх} = 3В$

**1.4.25** За допомогою схемного редактора побудувати схему зі спільним колектором і провести нумерацію вузлів схеми (рис. 1.22).

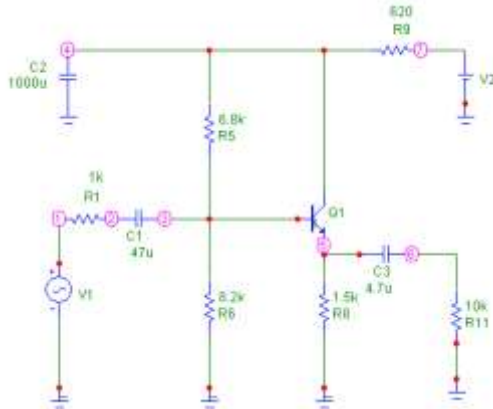


Рисунок 1.22 – Схема зі спільним колектором у форматі МС7

**1.4.26** Визначити параметри режиму каскаду з постійного струму. Для цього в директорії ANALYSIS необхідно запустити режим аналізу Dynamic DC (рис. 1.23).

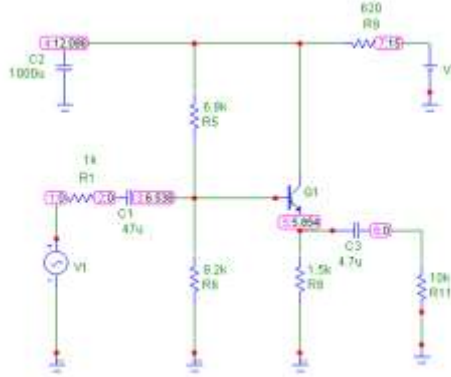



Рисунок 1.23 – Карта режиму каскаду СК за постійним струмом

Зафіксувати значення і полярність напруги у вузлах схеми. Натисканням на кнопку  отримати значення струмів, що характеризують робочу точку транзистора. Порівняти режим роботи каскаду з результатами отриманими в схемі лабораторного стенду.

**1.4.27** Провести аналіз схеми у часовій області. Задати амплітуду джерела сигналу  $V1 A=50$  мВ і частоту  $F=2$  кГц. Вибравши в меню директорії ANALYSIS режим розрахунку перехідних процесів Transient задати параметри розрахунку відповідно до рис.1.24.

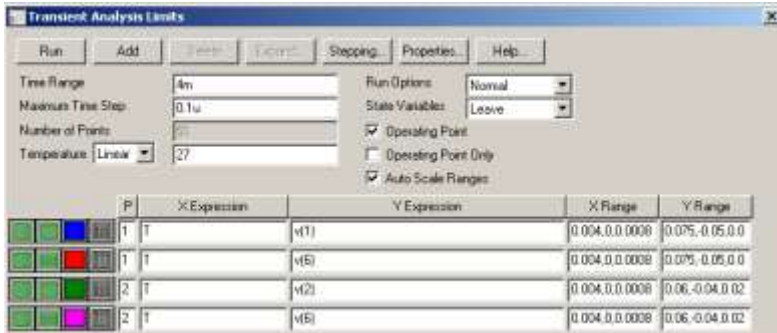


Рисунок 1.24 – Завдання параметрів аналізу в часовій області для схеми СК

За результатами розрахунку визначити:

– наскрізний коефіцієнт підсилення:

$$K_{U_{\text{наскр.}}} = U_{mV6} / U_{mV1};$$

– коефіцієнт підсилення безпосередньо схеми СК (без врахування резистора R1):

$$K_{U_{\text{СК}}} = U_{mV6} / U_{mV2};$$

– вхідний опір схеми СК:

$$R_{\text{вхСК}} = \frac{U_{mV2}}{(U_{mV1} - U_{mV2}) / R1}.$$

Після визначення  $R_{\text{вхСК}}$  розрахувати еквівалентний опір подільника R5, R6, що реалізує схему зміщення:

$$R_{\text{под}} = \frac{R5 \cdot R6}{R5 + R6}.$$

Порівняти опір подільника з розрахованим значенням вхідного опору.

**1.3.28** Змінити номінал навантаження на  $R11 = 100$  Ом, повторити аналіз схеми у часовій області. За результатами експерименту визначити такі параметри:

– наскрізний коефіцієнт підсилення:

$$K_{\text{Унаскр.}} = U'_{\text{mV6}} / U_{\text{mV1}};$$

– коефіцієнт підсилення безпосередньо схеми СК (без врахування резистора R1):

$$K_{\text{УСК}} = U'_{\text{mV6}} / U_{\text{mV2}};$$

– вихідний опір схеми СК:

$$R_{\text{вихСК}} = \frac{U_{\text{mV6}} - U'_{\text{mV6}}}{U'_{\text{mV6}}} \cdot R11,$$

де  $U_{\text{mV6}}$  – значення вихідної напруги емітерного повторювача визначене у пункті 1.1,  $U'_{\text{mV6}}$  значення вихідної напруги емітерного повторювача визначене у цьому пункті

**1.4.29** Повернути значення опору навантаження  $R11=10$  кОм. Провести гармонічний аналіз схеми. Завдання на аналіз задати відповідно до рис. 1.25.

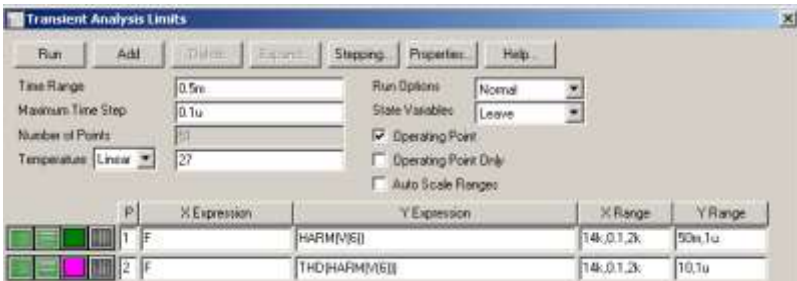


Рисунок 1.25 – Завдання параметрів гармонічного аналізу для схеми СК

Результати аналізу повинні бути подібні до рис. 1.26.

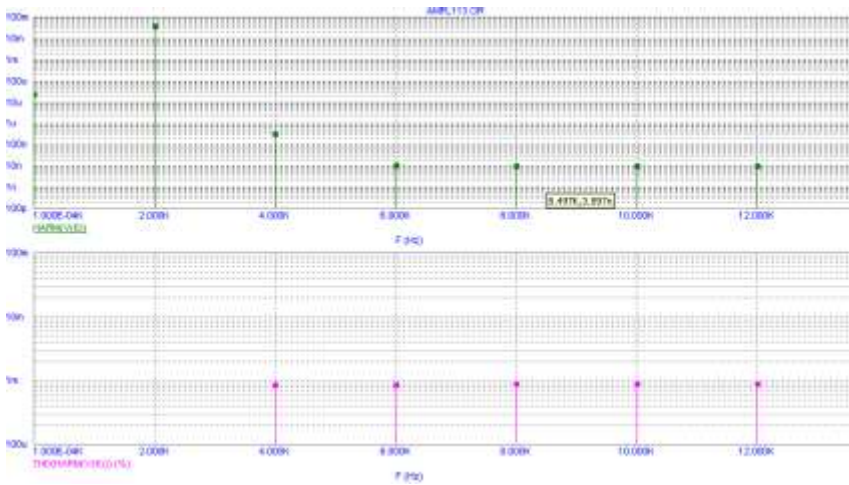


Рисунок 1.26 – Результати гармонічного аналізу для схеми СК при  $R_n = 10 \text{ кОм}$

**1.4.30** Змінити опір навантаження на  $R_{11} = 100 \text{ Ом}$ . Повторити гармонічний аналіз (рис. 1.27).

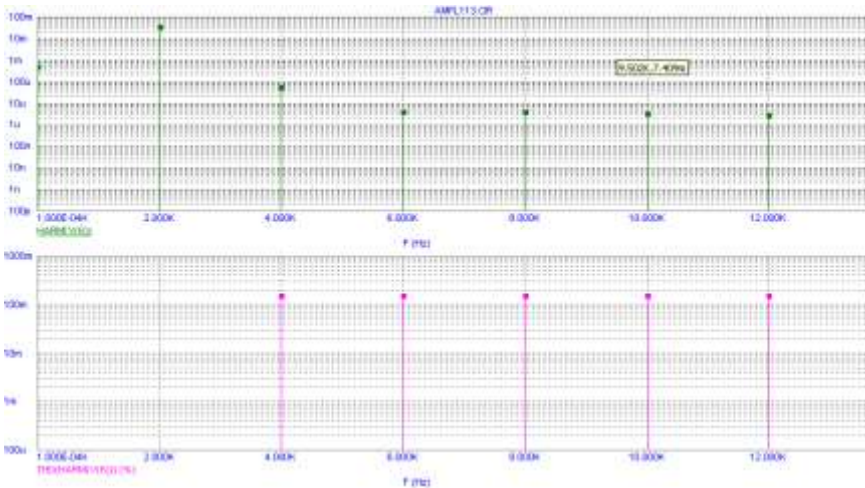


Рисунок 1.27 – Результати гармонічного аналізу для схеми СК при  $R_n = 100 \text{ Ом}$

Порівняти результати гармонічного аналізу для пунктів **1.4.29** і **1.4.30**. Пояснити залежність коефіцієнта нелінійних спотворень емітерного повторювача від опору навантаження.

## 1.5 Зміст звіту

**1.5.1** Схеми каскадів, що досліджуються. Схеми можливо наводити у форматі, який використовується в програмі МС-9.0 (7.0).

**1.5.2** Результати експериментальних досліджень у вигляді таблиць і осцилограм (епюр, отриманих за допомогою МС-9.0 (7.0)).

**1.5.3** Висновки за результатами роботи.

## 1.6 Контрольні запитання

1. Статичні ВАХ транзистора за включенням його по схемі СЕ. Привести вхідну, вихідну та прохідну характеристики. Проставити розмірність по вісям.

2. Статичні ВАХ транзистора за включенням його по схемі СБ. Привести вхідну, вихідну та прохідну характеристики. Проставити розмірність по вісям.

3. Показати напрямок та коло протікання постійного струму бази у схемі зі СЕ. Від чого залежить його значення?

4. Показати напрямок та коло протікання постійного струму бази у схемі зі СБ. Від чого залежить його значення?

5. Показати напрямок та коло протікання постійної складової струму колектора у схемі зі СЕ. Від чого залежить його значення?

6. Показати напрямок та коло протікання постійної складової струму колектора у схемі зі СБ. Від чого залежить його значення?

7. Дати визначення  $h$ -параметрів транзистора. Привести співвідношення між параметрами транзистора та  $h$ -параметрами.

8. Дати визначення  $u$ -параметрів транзистора. Привести співвідношення між параметрами транзистора та  $u$ -параметрами.

9. Як будується пряма навантаження з постійного струму?

10. Чому при зміні опору резистора  $R_4$  у колекторному колі струм колектора практично не змінюється? Який параметр режиму при цьому змінюється?

11. Призначення резисторів каскаду зі СЕ, СБ, СК..

12. Показати коло протікання вхідного струму (сигнальної складової) у схемах СЕ, СБ, СК. Від чого залежить його значення?

13. Показати коло протікання змінної складової колекторного струму у схемі СЕ.

14. Показати коло протікання змінної складової колекторного струму у схемі СБ.

15. Показати коло протікання змінної складової емітерного струму у схемі СК.

16. Дати визначення вхідного опору каскада. Привести методику експеримента для експериментального знаходження  $R_{вх}$  у схемі СЕ. Привести теоретичні розрахункові формули  $R_{вх}$  через параметри транзистора.

17. Дати визначення вхідного опору каскада. Привести методику експеримента для експериментального знаходження  $R_{вх}$  у схемі СБ. Привести теоретичні розрахункові формули  $R_{вх}$  через параметри транзистора.

18. Дати визначення вхідного опору каскада. Привести методику експеримента для експериментального знаходження  $R_{вх}$  у схемі СК. Привести теоретичні розрахункові формули  $R_{вх}$  через параметри транзистора.

19. Вихідний опір каскадів. Привести методику експеримента для експериментального знаходження  $R_{вих}$  у схемі СЕ. Привести теоретичні розрахункові формули  $R_{вих}$  для схеми СЕ.

20. Вихідний опір каскадів. Привести методику експеримента для експериментального знаходження  $R_{вих}$  у схемі СБ. Привести теоретичні розрахункові формули  $R_{вих}$  для схеми СБ.

21. Вихідний опір каскадів. Привести методику експеримента для експериментального знаходження  $R_{вих}$  у схемі СК. Привести теоретичні розрахункові формули  $R_{вих}$  для схеми СК.

22. Дати визначення коефіцієнта підсилення каскаду та наскрізного коефіцієнта підсилення. Методика експерименту щодо визначення  $K_u$ . Привести розрахункові формули для  $K_u$  у схемі із СЕ.

23. Дати визначення коефіцієнта підсилення каскаду та наскрізного коефіцієнта підсилення. Методика експерименту щодо визначення  $K_u$ . Привести розрахункові формули для  $K_u$  у схемі із СБ.

24. Дати визначення коефіцієнта підсилення каскаду та наскрізного коефіцієнта підсилення. Методика експерименту щодо визначення  $K_u$ . Привести розрахункові формули для  $K_u$  у схемі зі СК.

25. Що називається амплітудною характеристикою каскада. Привести АХ, пояснити її поведінку.

26. Що таке динамічний діапазон підсилювача. Як визначити динамічний діапазон з АХ?

27. Які міри застосовані у каскаді зі СЕ для стабілізації режиму з постійного струму?

28. Які міри застосовані у каскаді зі СБ для стабілізації режиму з постійного струму?

29. Які міри застосовані у каскаді зі СК для стабілізації режиму з постійного струму?

30. Порівняти схеми СЕ, СК за вхідними та вихідними опорами.

31. Порівняти схеми СБ, СК за вхідними та вихідними опорами.

32. Порівняти схеми СЕ, СБ за вхідними та вихідними опорами.

33. Порівняти схеми СЕ, СБ, СК за коефіцієнтами підсилення за напругою.



34. Порівняти схеми СЕ, СБ, СК за коефіцієнтами підсилення за струмом.

35. Порівняти схеми СЕ, СБ, СК за коефіцієнтами підсилення за потужністю.

36. Від чого залежить коефіцієнт нелінійних спотворень у схемі зі СЕ. Привести вираз.

## **2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК RC-КАСКАДУ**

### **2.1 Мета роботи**

Закріпити знання з розділу курсу "Методи аналізу електронних схем у частотній області в програмах схемотехнічного моделювання", експериментально дослідити амплітудно- і фазочастотні характеристики підсилювальних каскадів, визначити вплив елементів схеми на частотні характеристики в області нижніх та високих частот.

### **2.2 Прилади, що використовуються в роботі**

Лабораторний практикум реалізовано шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою Micro-Cap-9.0 (7.0).

### **2.3 Завдання на підготовку до лабораторної роботи**

**2.3.1** Вивчити розділ курсу "Методи аналізу частотних характеристик в програмах схемотехнічного моделювання".

**2.3.2** Ознайомитись з основними еквівалентними схемами підсилювального каскаду в області нижніх, середніх і високих частот.

### **2.4 Експериментальна частина**

**2.4.1** За допомогою схемного редактора програми MS-9.0 (7.0) побудувати принципову схему підсилювального каскаду на біполярному транзисторі за схемою СЕ, з номіналами елементів, які наведені на рис. 2.1.

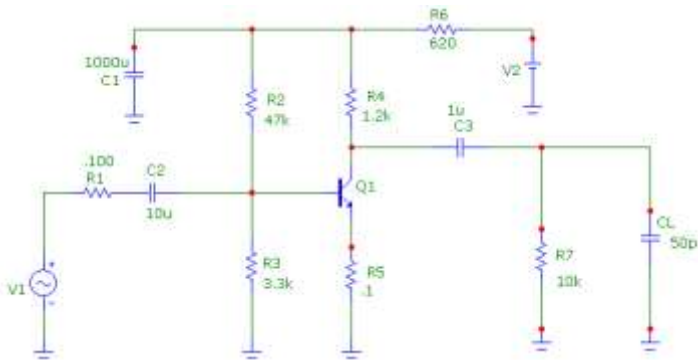



Рисунок 2.1 – Схема підсилювального каскаду з спільним емітером

**2.4.2** Провести нумерацію вузлів схеми натисканням на кнопку панелі управління  (рис. 2.1).

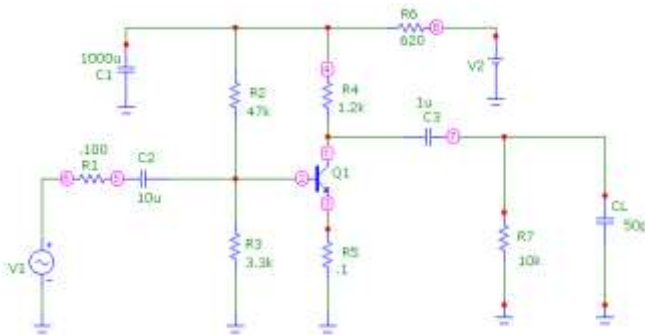


Рисунок 2.2 – Нумерація вузлів схеми

**2.4.3** Перед аналізом схеми в частотній області спочатку необхідно перевірити режим роботи схеми з постійного струму. Для цього в директорії ANALYSIS необхідно запустити режим аналізу Dynamic DC (рис.2.3).

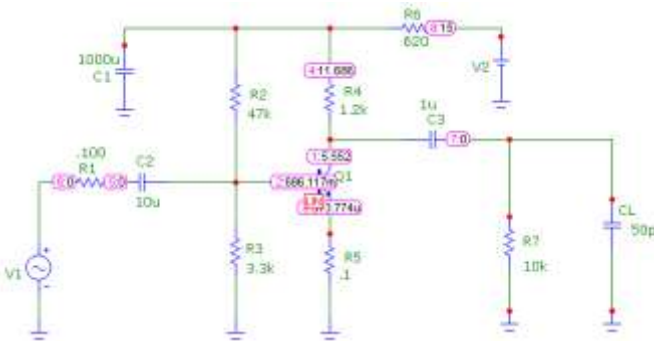



Рисунок 2.3 – Карта режиму з постійного струму та індикацією лінійного режиму

На робочому полі повинна з'явитися схема каскаду, що моделюється, з картою режиму за постійним струмом. Перевірити значення напруг і струмів на відповідність лінійного режиму роботи транзистора. Додатково перевірку лінійності можна провести активацією опції  основного меню. Якщо активний пристрій працює у лінійному режимі, то навколо нього висвітлиться підпис LIN (рис.2.3).

**2.4.4** Провести аналіз схеми в частотній області. Для цього спочатку в меню Analysis необхідно обрати режим аналізу AC. У вікні завдання параметрів аналізу задати значення параметрів відповідно до рис. 2.4.

Сенс параметрів для вікна AC Analysis Limits такий:

- у рядку Frequency Range перша цифра (1E7=10 МГц) задає кінцеве значення частоти, а друга цифра (1 Гц) початкове значення частотного діапазону, для якого проводиться розрахунок частотної характеристики;
- у рядку Number of Points вказується кількість розрахункових точок (510) за якими буде побудована АЧХ;
- у рядку Frequency Step задається масштаб по осі частот Log – логарифмічні частотні характеристики. Необхідно відзначити, щл базовою одиницею масштабу для логарифмічного масштабу по осі частот виступає декада – діапазон частот який відповідає десятиразовій

зміні частоти. Додатково для виводу графіку у логарифмічному масштабі по осі частот необхідно активувати крайнє ліве поле у завданні параметрів графіку (обведене кільцем на рис.2.4).

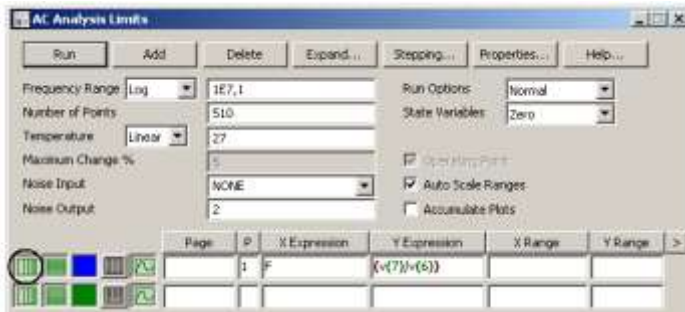


Рисунок 2.4 – Вікно завдання параметрів аналізу.

Оскільки вигляд амплітудно-частотної характеристики перед моделюванням вважається невідомим, то для першого варіанту аналізу АЧХ пропонується задати автоматичний вибір масштабу. Для цього необхідно встановити прапорець у віконці Auto Scale Ranges. При такому заданні аналізу у стовпчиках, які визначають масштаб графіка (X Range, Y Range) можна нічого не проставляти, оскільки діапазон зміни цих параметрів буде обрано автоматично.

Спочатку побудувати класичну АЧХ каскаду у лінійному масштабі, тобто залежність коефіцієнта підсилення з напруги визначається у разях від частоти. Для цього в колонці, яка визначає вид залежності, що будується по осі ординат (Y expression) записати визначене у разях відношення напруги на виході каскаду (відповідно до нумерації вузлів схеми рис.2.2 це V(7)) до вхідної напруги (за схемою це V(6)). Необхідно відзначити, що в залежності від порядку побудування схеми нумерація вузлів змінюється і тому необхідно проставити потенціали вузлів, які саме відповідають входу і виходу каскаду, що моделюється.

Інші опції, що пропонуються у вікні можна прийняти по умовчанням, тобто такими, що висвітлилися автоматично.

Запустити аналіз частотних характеристик натисканням на кнопку “Run”. Характер отриманої АЧХ повинен якісно відповідати рис.2.5.

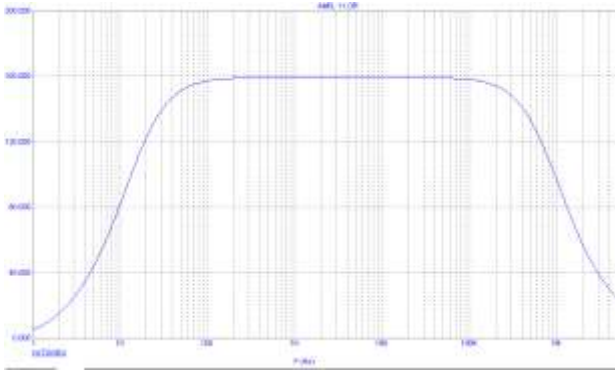



Рисунок 2.5. – Типова АЧХ каскаду підсилення змінного струму

**2.4.5** За отриманим графіком визначити смугу пропускання каскаду за рівнем 0,707. Для цього доцільно включити режим курсора натисканням на кнопку . Лівою кнопкою “миші” встановити курсор в положення, що відповідає максимальному значенню АЧХ (діапазон середніх частот) – рис. 2.6.

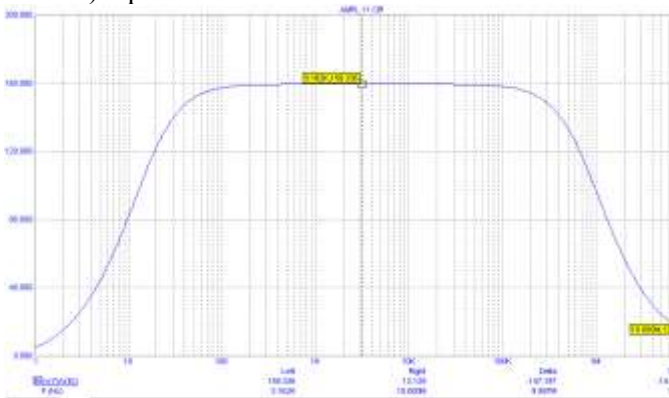


Рисунок 2.6 – Включення режиму курсора

З аналізу рис.2.6 виходить, що значення коефіцієнта підсилення на частоті 3.162 кГц складає 159,326. Відповідно, якщо визначати смугу пропускання за рівнем  $0,707K_{U0}$ , то граничне значення коефіцієнта підсилення, яке визначає смугу пропускання, рівняється 112,64. Тепер переміщуючи курсор в область нижніх частот можна визначити нижню робочу частоту за рівнем  $0,707 K_{U0}$  -  $f_n=16,672$  Гц (рис.2.7).

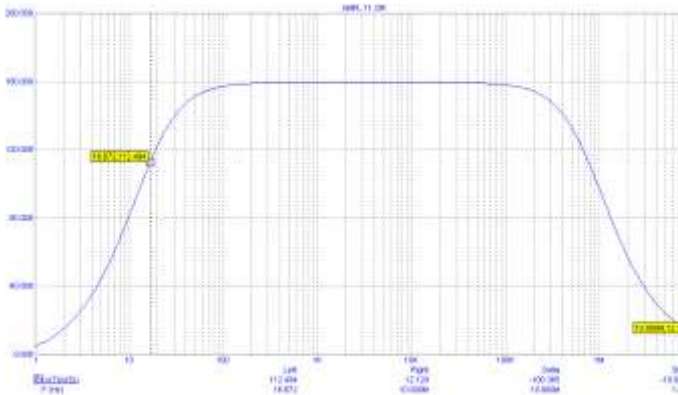


Рисунок 2.7 – Визначення нижньої робочої частоти каскаду

Відповідно для області високих частот аналогічно визначається верхня робоча частота каскаду –  $f_v=764,928$  кГц (рис.2.8).

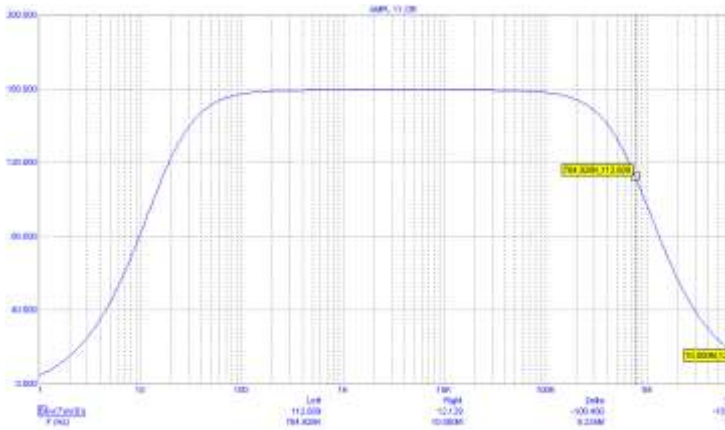


Рисунок 2.8 – Визначення верхньої робочої частоти каскаду

**2.4.6** Дослідження ФЧХ. Досить часто АЧХ схеми аналізується одночасно з фазочастотною характеристикою. Для отримання АЧХ і ФЧХ необхідно змінити завдання на аналіз, яке було зроблено у пп.2.3.4 (рис.2.4). Для цього після вибору в директорії ANALYSIS режиму аналізу частотних АС у з'явившомуся вікні AC Analysis Limits натиснути на кнопку Add і у полі другого графіку у колонці Y Expression записати  $\text{ph}(V(7) / V(6))$  (рис.2.9).

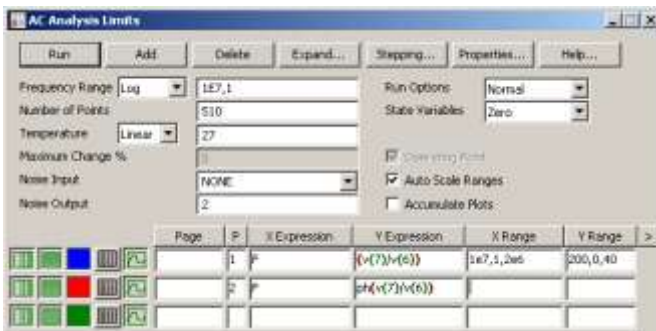


Рисунок 2.9 – Завдання виводу АЧХ і ФЧХ на двох окремих графіках



Натиснути на кнопку Run. Отримані залежності повинні бути подібними до відповідних графіків рис. 2.10.

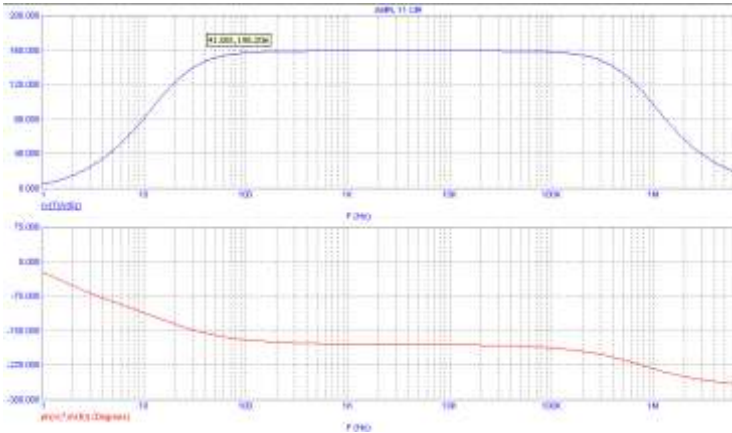


Рисунок 2.10 – Амплітудно-частотна і фазочастотна характеристики каскаду з СЕ

Звернути увагу, що значення фазового набігу в області середніх частот складає  $-180^\circ$ . Це означає, що каскад зі спільним емітером інвертує фазу вхідного каскаду. Якщо стоїть задача визначення фазового набігу, який вноситься власне елементами схеми без урахування інверсії сигналу, то необхідно змінити завдання на аналіз у відповідності до рис. 2.11.

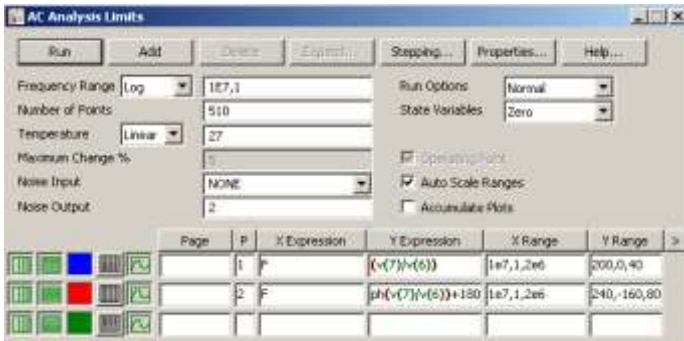


Рисунок 2.11 – Вивід ФЧХ з урахуванням інверсної роботи каскаду з СЕ

Повторити аналіз у частотній області. Вигляд отриманих залежностей зображено на рис.2.12. З аналізу ФЧХ у такому варіанті очевидно, що в діапазоні середніх частот фазовий набіг є нульовим, що, як правило, і трактується у технічній літературі як типова ФЧХ каскаду у діапазоні середніх частот (у цьому діапазоні каскад вважається безинерційним).

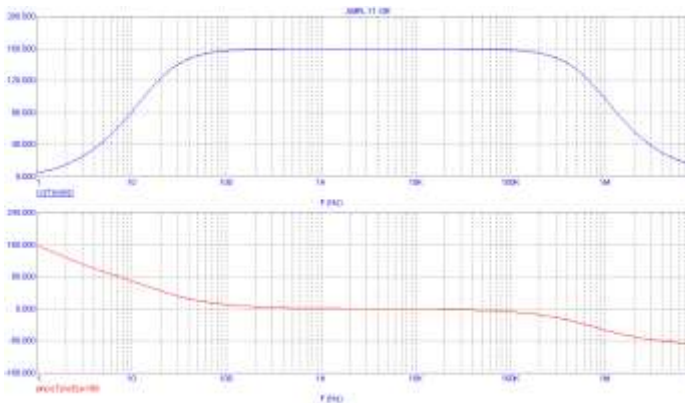


Рисунок 2.12 – Вигляд ФЧХ з урахуванням інверсної роботи каскаду з СЕ

**2.4.7** Дослідження АЧХ і ФЧХ у логарифмічному масштабі. Досить часто у технічній літературі АЧХ і ФЧХ наводяться у логарифмічному масштабі. Для переходу у логарифмічний масштаб необхідно змінити завдання на аналіз відповідно до рис. 2.13.



Рисунок 2.13 – Завдання виводу логарифмічних частотних характеристик

Запустити аналіз частотних характеристик натисканням на кнопку Run. Вигляд типових ЛАЧХ і ФЧХ зображено на рис.2.14.

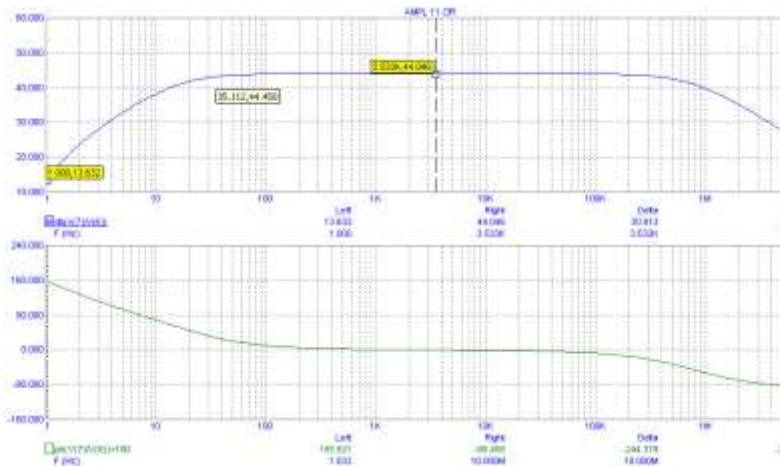


Рисунок 2.14 – Логарифмічні АЧХ і ФЧХ каскаду з СЕ

При цьому по осі ординат для ЛАЧХ відкладається значення коефіцієнта підсилення визначене у децибелах як  $K_U[\text{дБ}] = 20 \lg K_U = 20 \lg 159,326 = 44,046$  дБ, а по осі частот обирається логарифмічний масштаб. Для ФЧХ частота також відкладається у логарифмічному масштабі, а значення фази у градусах.

#### 2.4.8 Провести аналіз частотних характеристик окремо для ОНЧ.

З метою більш детального аналізу впливу елементів на АЧХ каскаду в області нижніх частот обмежити діапазон виводу графіка ЛАЧХ частотою 1 кГц (рис. 2.15).

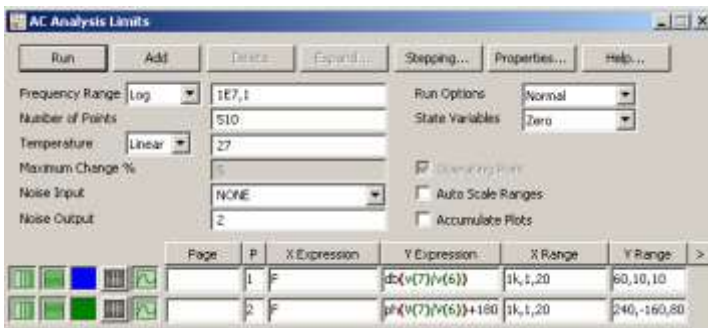


Рисунок 2.15 – Ручне встановлення масштабу графіка

Так, для варіанту завдання параметрів аналізу згідно з рис. 2.15 усунуто прапорець у віконці Auto Scale Range і відповідно у колонці X Range задані максимальна частота виводу графіка 1кГц, мінімальна частота виводу графіка – 1 Гц, крок моделювання – 20 Гц.

Запустити аналіз частотних характеристик. Вигляд отриманих залежностей повинен бути подібним до рис. 2.16.

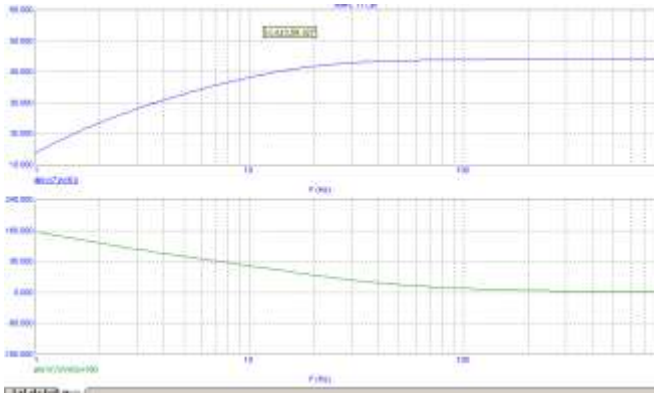


Рисунок 2.16 –ЛАЧХ і ФЧХ каскаду в ОНЧ

**2.4.9** Дослідити вплив роздільної ємності  $C_1$  на АЧХ в області нижніх частот.

Пакет МС-9.0 (7.0) дозволяє ефективно продемонструвати вплив елементів схеми на АЧХ і ФЧХ каскаду. Для більшої наочності отриманих результатів проведемо аналіз впливу роздільної ємності  $C_2$  тільки на амплітудно-частотну характеристику.

Після вибору режиму аналізу частотних характеристик (АЧ) у відкрившомуся вікні завдання параметрів режиму поставити курсор на поле другого графіку (ФЧХ) і натиснути кнопку “Delete”, а усі інші значення залишити такими ж як і пп.2.3.8. Додатково активізувати опцію “Stepping” – покрокова зміна номіналів елементів схеми. Відкриється наступне вікно (рис.2.17).

У цьому вікні необхідно задати такі дані: у графі Step What – той елемент схеми номінал якого будемо змінювати –  $C_2$ , у графі From – указати початкове (мінімальне) значення ємності  $C_2$ , у графі To – кінцеве (максимальне) значення ємності  $C_2$ , у графі Step Value – надати крок зміни ємності.



Рисунок 2.17 – Режим покрокової зміни номіналів елементів каскаду

Далі активізувати прапорці Yes і Linear у графах Step It і Method відповідно. Натиснути кнопку ОК. В результаті з'явиться чисте вікно з основним меню пакету “Microcap”. Повторно задати режим роботи АС і потім натиснути “Run”. В результаті повинні отримати сімейство АЧХ для різних значень ємності C2 в області нижніх частот (рис. 2.18).

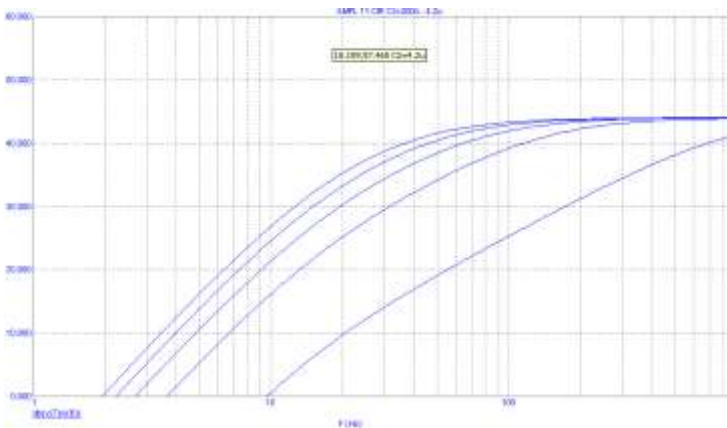


Рисунок 2.18 – Сімейство ЛАЧХ каскаду з СЕ для різних значень C2

**2.4.10** Підписати отримані залежності. Для цього у цьому ж вікні натиснути на кнопку **Scope** і у відкритшому списку опцій вибрати **Label Branches**. З'явиться наступне віконце, в якому необхідно задати місце розташування підписів для графіків АЧХ (рис.2.19).

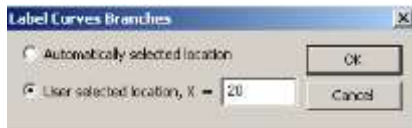


Рисунок 2.19 – Вибір місця розташування підпису графіків

Для розглянутого прикладу вибрано значення частоти 20 Гц і відповідно на цій частоті будуть проставлені підписи під ЛАЧХ для різних значень  $C2$  (рис.2.20).

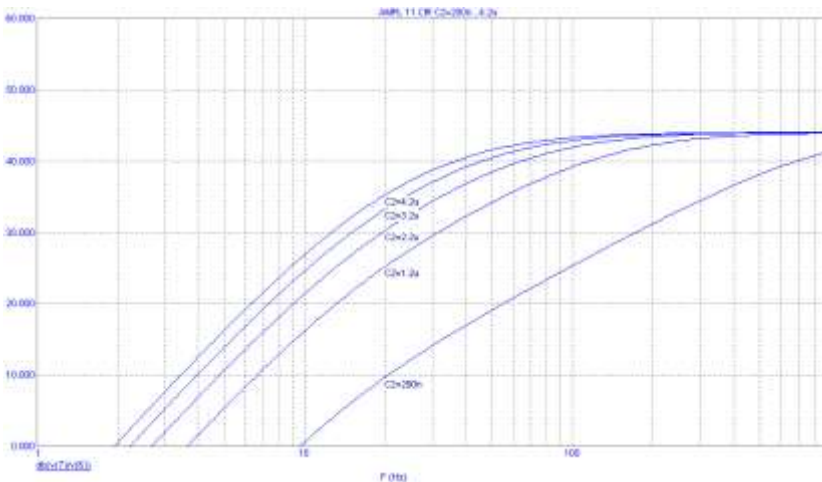


Рисунок 2.20 – ЛАЧХ в ОНЧ з підписаними гілками характеристик

На рис. 2.20 виведені п'ять ЛАЧХ, які відповідають значенням  $C2$ , що були задані у режимі покрокової зміни (Stepping).

Висновок за результатами моделювання очевидний – збільшення вхідної роздільної ємності каскаду (або збільшення сталої часу каскаду в області нижніх частот) зменшує нижню робочу частоту каскаду, або іншими словами, розширює смугу пропускання з боку нижніх частот.

**2.4.11** Дослідження впливу роздільної ємності на частотну характеристику в області середніх і високих частот

Повторити попередній пункт. Тільки під час завдання параметрів аналізу виставити автоматичний вибір масштабу графіка (Auto Scale Ranges). Отримати частотні характеристики і підписати їх (рис.2.21).

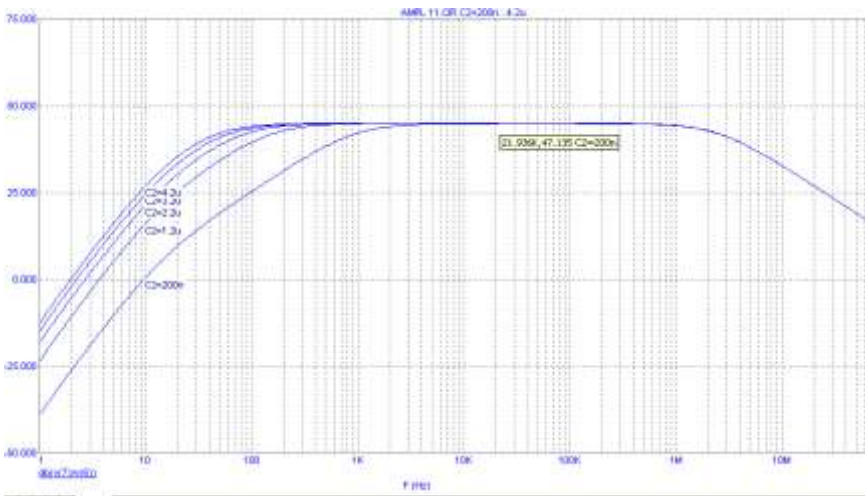


Рисунок 2.21 – ДАЧХ каскаду підсилення для різних значень вхідної роздільної ємності  $C2$

З аналізу графіку очевидно, що роздільна ємність ніяк не впливає на АЧХ в області середніх і високих частот.



**2.4.12** Дослідження впливу резистора R1 на частотні характеристики каскаду в області нижніх частот.

Резистор R1 у наведеній схемі каскаду з СЕ моделює внутрішній опір джерела сигналу. Оскільки він включений послідовно з вхідною роздільною ємністю C2, то він також буде впливати на сталу часу вхідного кола каскаду в ОНЧ, а значить і на нижню робочу частоту.

Задати режим частотного аналізу АС. Повернути ручне встановлення діапазонів виводу графіків відповідно до рис. 2.15. Активізувати опцію Stepping. Відмінити режим покрокової зміни номіналу для ємності C2 (у графі “Step It встановити прапорець “No”) і задати такий режим для резистора R1 (рис. 2.22).

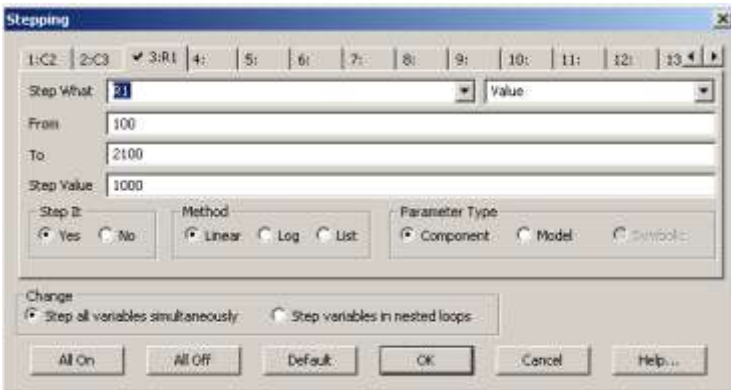


Рисунок 2.22 – Режим покрокової зміни резистора R1

Натиснути ОК. Задати режим аналізу АС і запустити аналіз частотних характеристик. За допомогою директорії Score підписати відповідні ЛАЧХ (спочатку необхідно знищити підписи з попереднього моделювання активувавши опцію Delete All Objects). Отримати результати моделювання (рис. 2.23).

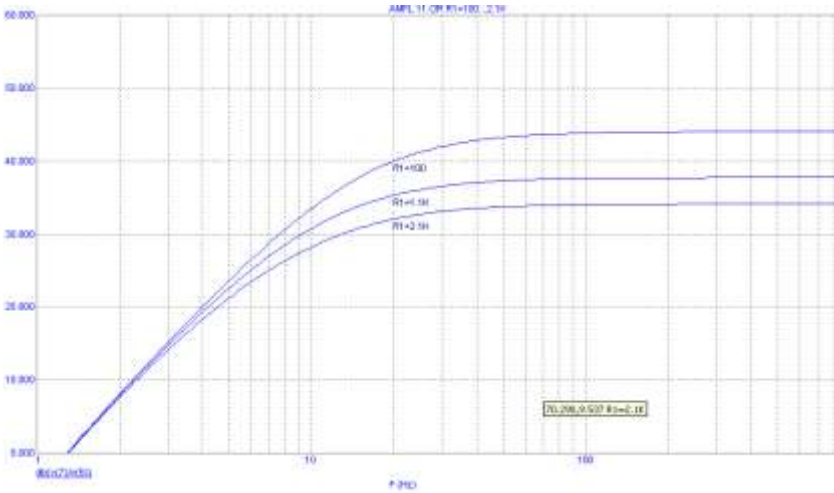


Рисунок 2.23 – Сімейство ЛАЧХ каскаду з СЕ для різних значень  $R_1$

Визначити нижню робочу частоту за рівнем -3 дБ для усіх графіків. Очевидно, що збільшення номіналу  $R_1$  (збільшення сталої часу вхідного кола в ОНЧ) призведе до розширення смуги пропускання і зменшення нижньої робочої частоти каскаду. Але, як свідчать графіки, під час збільшення резистора  $R_1$  зменшується коефіцієнт підсилення каскаду з напруги. Тому під час проектування досягнення необхідного значення  $f_n$  реалізується шляхом коректного вибору саме роздільної ємності.

**2.4.13** Дослідження впливу вихідної роздільної ємності на частотні характеристики каскаду в області нижніх частот.

Задати режим частотного аналізу АС. У вікні завдання параметрів натиснути кнопку Stepping. Відмінити режим покрокової зміни номіналу для резистора  $R_1$  і задати такий режим для вихідної роздільної ємності  $C_3$  (рис. 2.24).

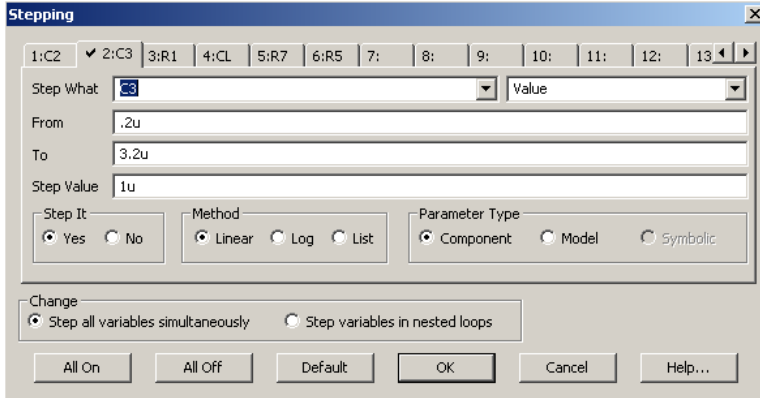


Рисунок 2.24 – Режим покрокової зміни номінала конденсатора C3

Натиснути ОК. Задати режим аналізу АС і запустити аналіз частотних характеристик. За допомогою директорії Score підписати відповідні ЛАЧХ Отримати результати моделювання (рис.2.25). Визначити значення  $f_n$  за рівнем -3 дБ. З аналізу графіків очевидно, що збільшення вихідної ємності понад 3.2 мкФ практично не впливає на значення  $f_n$ .

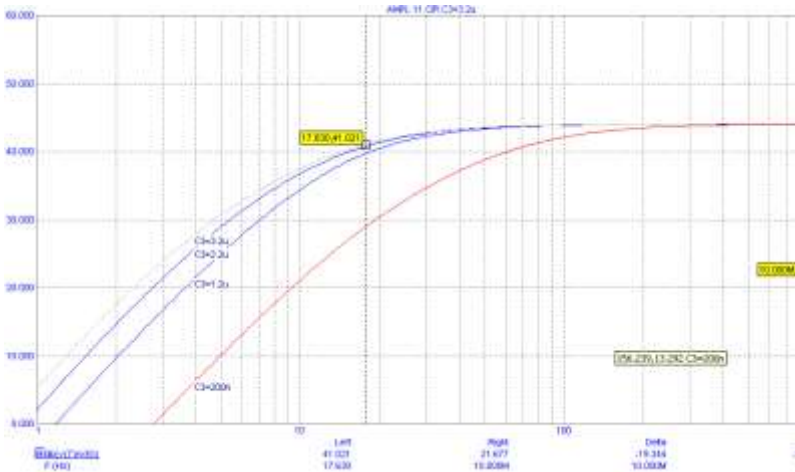


Рисунок 2.25 – Сімейство ЛАЧХ каскаду з СЕ для різних значень вихідного роздільного конденсатора  $C_3$  ( $R_7=10$  кОм)

**2.4.14** Дослідження впливу опору навантаження на частотні характеристики каскаду в області нижніх частот

У початковій схемі каскаду (рис. 2.1) змінити значення опору навантаження –  $R_7 = 100$  Ом. Повторити частотний аналіз за попереднім пунктом і отримати нове сімейство ЛАЧХ (рис. 2.26).

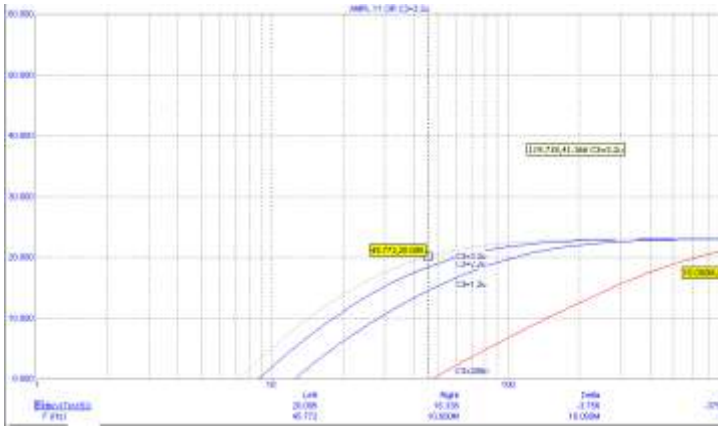


Рисунок 2.26 – Сімейство ЛАЧХ для різних значень вихідного роздільного конденсатора  $C_3$  при меншому значенні опору навантаження ( $R_7 = 100 \text{ Ом}$ )

Порівняти значення нижньої робочої частоти при  $R_7 = 10 \text{ кОм}$  і  $R_7 = 100 \text{ Ом}$ . Зробити висновок.

**2.4.15** Дослідження впливу блокувальної ємності на АЧХ в ОНЧ  
Якщо в схемі каскаду застосовується емітерна термостабілізація, то досить часто від'ємний зворотний зв'язок, який створюється через введення резистора  $R_e$ , усувається в області середніх частот за допомогою блокувальної ємності. Але в ОНЧ цей конденсатор також впливає на значення нижньої робочої частоти каскаду. Змінити схему відповідно до рис. 2.27.

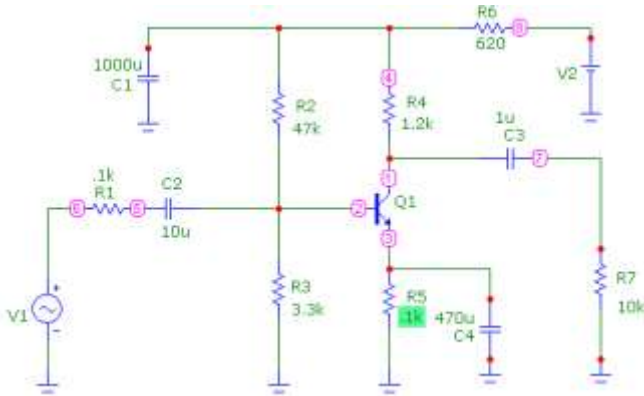


Рисунок 2.27 – Схема каскаду СЕ з емітерною термостабілізацією і блокувальним конденсатором

Задати значення резистора емітерної термостабілізації  $R_5=100$  Ом. Додатково підключити паралельно резистору конденсатор  $C_4$ , який виконуватиме функцію блокувального конденсатора (в області середніх частот реактивний опір цього конденсатора повинен бути близьким до нуля, тобто  $X_{C_4} \ll R_5$ ).

Запустити режим частотного аналізу АС. Але у вікні завдання параметрів задати у графі Y Expression коефіцієнт підсилення каскаду з напруги як відношення напруг  $V(1)/V(2)$ . При такому визначенні коефіцієнта підсилення практично усувається вплив вхідного  $C_2$  і вихідного  $C_3$  роздільних конденсаторів на частотну характеристику. Отримати частотну залежність, яка формується саме ємністю блокувального конденсатора  $C_4$  (рис. 2.28).

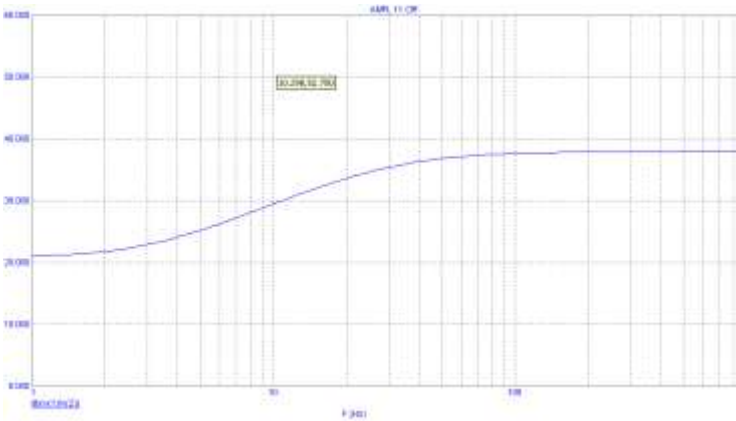


Рисунок 2.28 – ЛАЧХ каскаду з урахуванням тільки впливу блокувального емітерного конденсатора.

Пояснити вид отриманої залежності. Також зверніть увагу на значення коефіцієнта підсилення в ОСЧ, порівняйте його зі схемою без емітерної стабілізації. .

**2.4.16** Провести дослідження каскаду в області високих частот. Повернути схему каскаду до початкової (рис. 2.29). Задати режим частотного аналізу і встановити параметри аналізу відповідно до рис. 2.30.

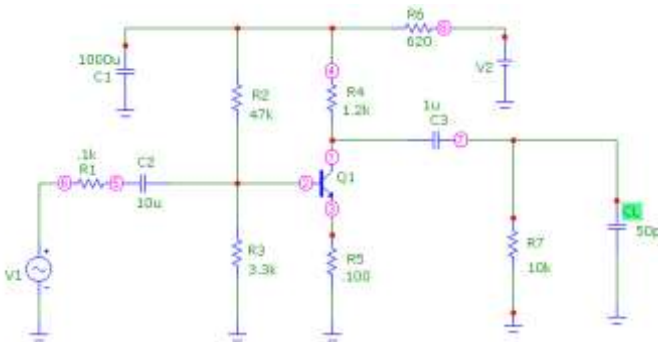


Рисунок 2.29 – Початковий варіант каскаду, що досліджується

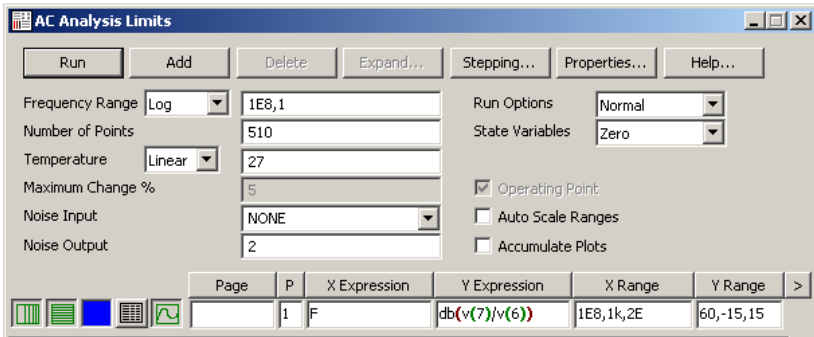


Рисунок 2.30 – Завдання параметрів аналізу АЧХ в ОВЧ

Запустити аналіз частотних характеристик і отримати ЛАЧХ у діапазоні високих частот (рис. 2.31).

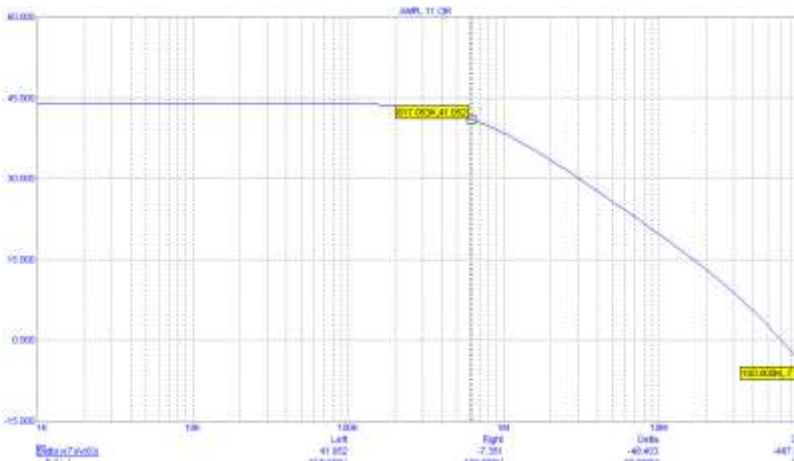


Рисунок 2.31 – Типова ЛАЧХ резисторного каскаду в ОВЧ



**2.4.17** Дослідити вплив ємності навантаження на частотні характеристики каскаду. Задати аналіз частотного режиму (AC). Активізувати опцію Stepping і задати покрокову зміну ємності навантаження у відповідності до рис. 2.32.

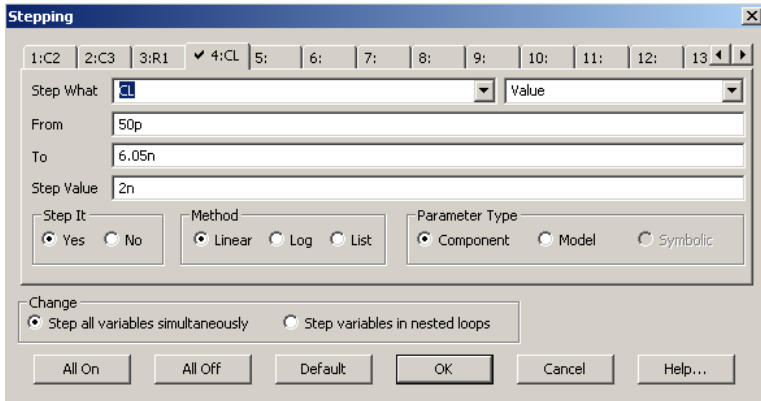


Рисунок 2.32 – Завдання покрокової зміни ємності навантаження CL

Отримати частотні характеристики для різних значень ємності навантаження (рис.2.33).

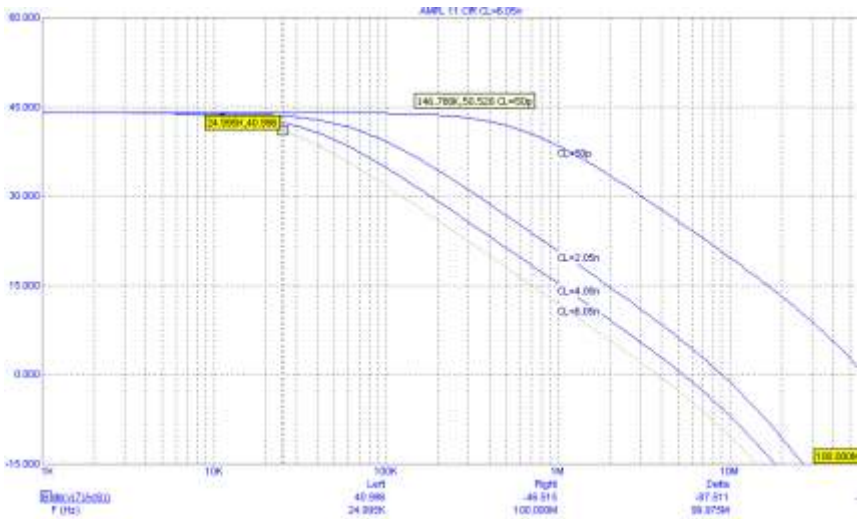


Рисунок 2.33 – ЛАЧХ каскаду в ОВЧ при різних значеннях ємності навантаження

**2.4.18** Дослідження впливу опору навантаження на частотні характеристики в області високих частот. Запустити аналіз частотних характеристик. Відмінити режим покрокової зміни ємності навантаження і задати таку зміну для опору навантаження R7 у відповідності до рис. 2.34.



Рисунок 2.34 – Завдання покрокової опору навантаження R7

Отримати частотні характеристики. Визначити верхню робочу частоту каскаду для значення  $R7 = 100$  Ом (рис. 2.35) і порівняти її з початковою ЛАЧХ (рис. 2.31).

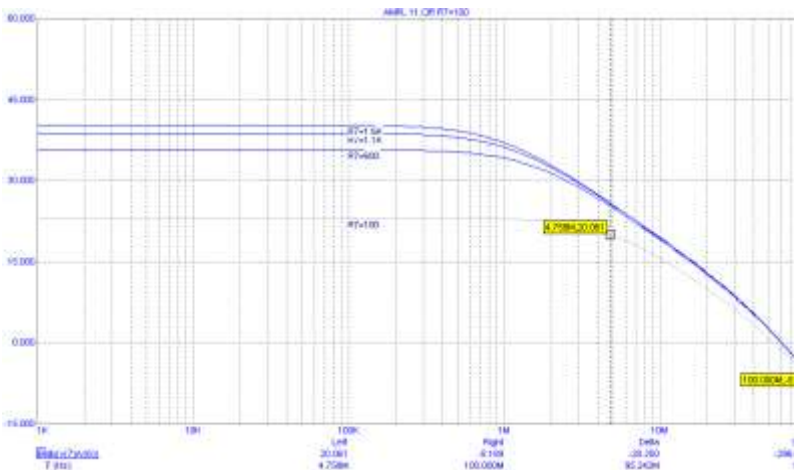


Рисунок 2.35 – ЛАЧХ каскаду при різних значеннях опору навантаження

**2.4.19** Визначення впливу сталої часу вхідного кола на АЧХ в ОВЧ. Збільшити номінал резистора R1 до 1 кОм. Задати режим частотного аналізу і встановити параметри аналізу відповідно до рис.2.30. Відмінити опцію Stepping для усіх елементів схеми. Отримати ЛАЧХ в ОВЧ (рис.2.36).

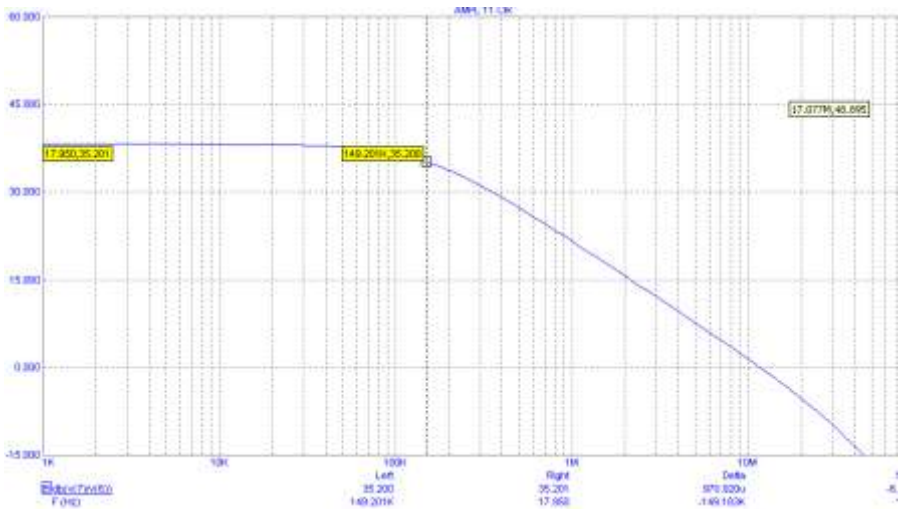


Рисунок 2.36 – ЛАЧХ каскаду в ОВЧ при збільшенні сталої часу вхідного кола

Визначити значення  $f_v$  і порівняти його з результатом за пп.2.3.16. Зробити висновки за пп.2.15...2.3.17.

**2.4.20** Провести порівняльний аналіз частотних властивостей схем СЕ, СБ, СК.

У цьому пункті аналізуються частотні властивості трьох схем включення біполярних транзисторів. З попередніх експериментів доведено, що нижня робоча частота усіх схем включення може бути досягнута належним вибором ємності роздільних конденсаторів. Тому, роздільні ємності для усіх трьох схем були обрані такими, щоб значення  $f_n$  складало приблизно 9...10 Гц. Тоді різниця у частотних властивостях каскадів буде проявлятися саме в області високих

частот. Порівняльний аналіз проведемо для однакового опору навантаження і приблизно однакового режиму з постійного струму.

**2.4.20.1** Побудувати схему каскаду з спільним емітером (рис. 2.37) і отримати ЛАЧХ і ФЧХ в автоматичному режимі. Визначити значення нижньої і верхньої робочих частот (рис. 2.38).

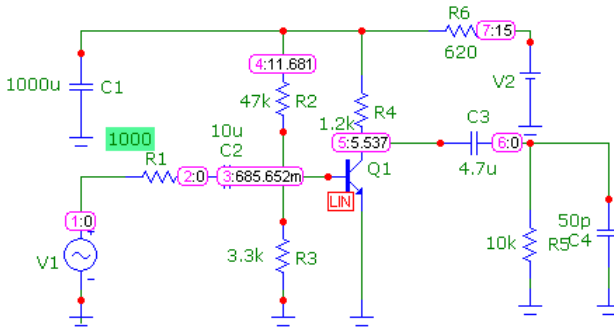


Рисунок 2.37 – Схема каскаду з СЕ для проведення порівняльного аналізу

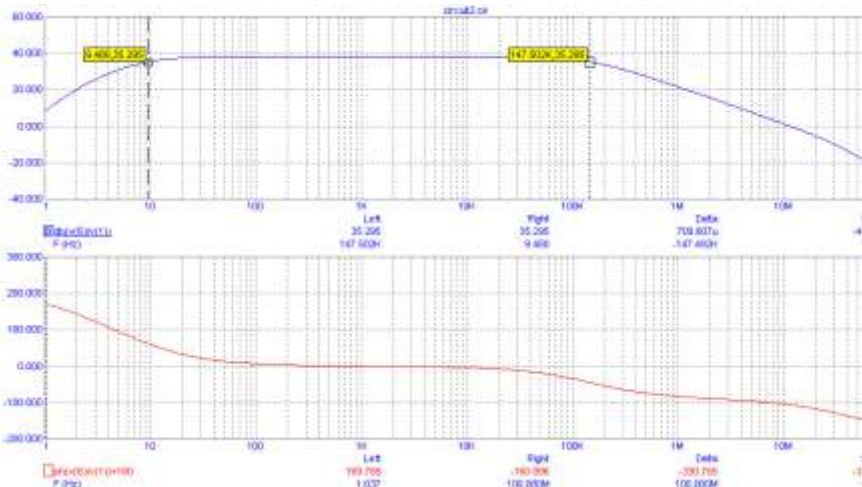


Рисунок 2.38 – ЛАЧХ і ФЧХ каскаду СЕ

Визначити основні чинники в каскаді СЕ, які визначають значення  $f_B$ .

Відзначимо, що МС 9.0 (7.0) дозволяє також будувати і частотну характеристику модуля вхідного опору каскаду від частоти. Повторно запустити режим частотного аналізу. Задати параметри розрахунку відповідно до рис. 2.39.



Рисунок 2.39 – Завдання параметрів аналізу для визначення частотної залежності модуля вхідного опору каскаду СЕ

У такому варіанті завдання на перший графік буде виводитися частотна характеристика вхідного опору каскаду відносно джерела сигналу V1 (тобто, вважається, що джерело сигналу є ідеальним з нульовим внутрішнім опором, а резистор R1 є елементом схемної реалізації каскаду). На другому ж графіку буде представлена залежність безпосередньо вхідного опору класичного каскаду СЕ від частоти. Отримати частотні характеристики. (рис. 2.40).

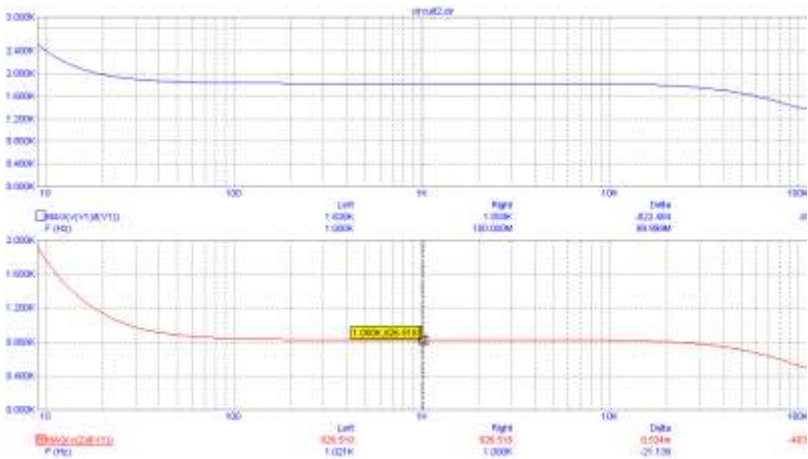


Рисунок 2.40 – Частотні характеристики модуля вхідного опору каскаду СЕ

Переконатися, що значення вхідного опору каскаду СЕ, (що визначене курсором на рис.2.40) збігається з результатом отриманим з аналізу каскаду у часовій області в лабораторній роботі №1. (пп.1.3.14). На верхньому графіці вхідний опір враховує опір резистора R1, тобто порівняно з нижнім графіком крива піднесена на величину 1 кОм догори.

**2.4.20.2** Побудувати схему каскаду зі спільною базою (рис. 2.41). Перевірити карту режимів з постійного струму. Запустити аналіз частотних характеристик. Отримати ЛАЧХ і ФЧХ каскаду(рис. 2.42).

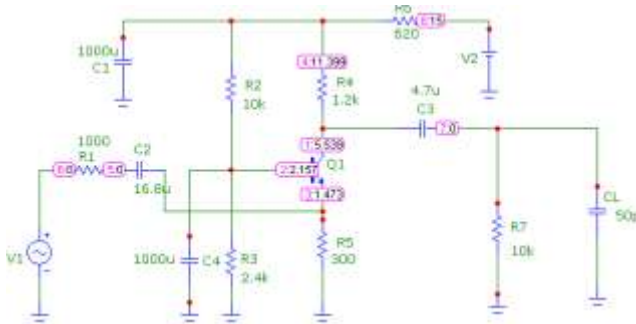


Рисунок 2.41 – Схема каскаду СБ

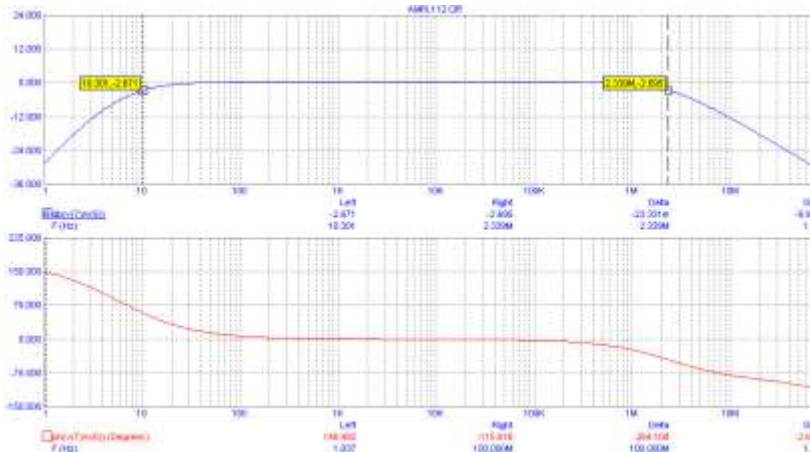


Рисунок 2.42 – ЛАЧХ і ФЧХ каскаду СБ

Визначити значення верхньої робочої частоти. Порівняти отримане значення  $f_v$  каскаду СБ зі значенням  $f_v$  каскаду СЕ. Пояснити відмінність результатів.

Визначити частотну залежність модуля вхідного опору каскаду СБ від частоти. Для цього задати параметри аналізу відповідно до рис. 2.43. Отримати частотні характеристики (рис. 2.44).





Рисунок 2.43 – Завдання параметрів аналізу для визначення частотної залежності модулів вхідного і вихідного опорів каскаду СБ

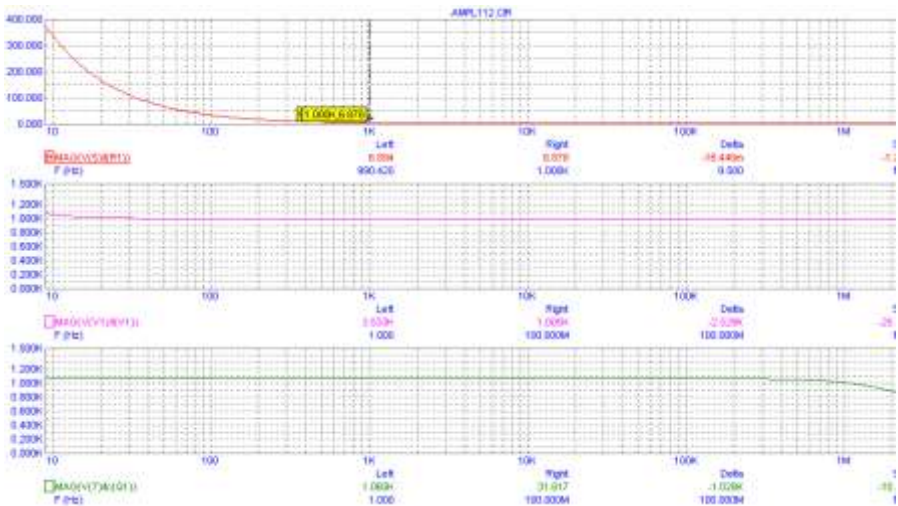


Рисунок 2.44 – Частотні залежності модулів вхідного та вихідного опорів каскаду СБ

У такому варіанті аналізу перші два графіки тотожні за сенсом аналогічним графікам каскаду СЕ, а третій графік дозволяє оцінити частотну залежність вихідного опору у межах смуги пропускання.

Порівняти значення вхідного опору з результатом отриманим у пп.1.3.21, а також з аналогічним параметром каскаду СЕ.

2.4.20.3 Побудувати схему каскаду з спільним колектором (рис. 2.45). Перевірити карту режимів з постійного струму. Запустити аналіз частотних характеристик. Отримати ЛАЧХ і ФЧХ (рис. 2.46).

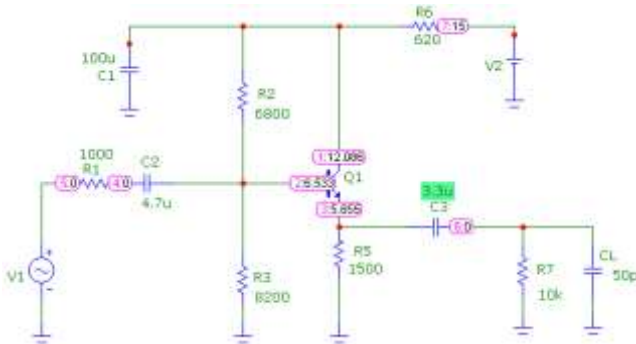


Рисунок 2.45 – Схема каскаду СК

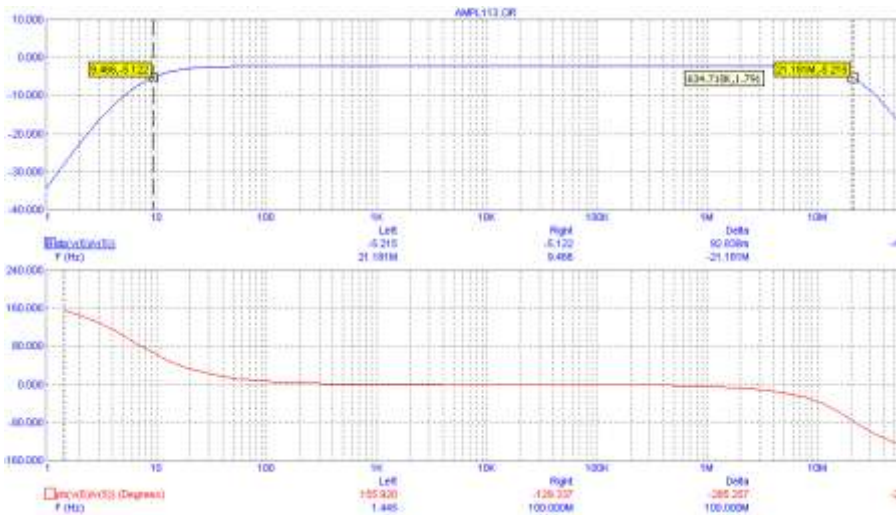


Рисунок 2.46 – ЛАЧХ і ФЧХ каскаду СК

Визначити значення верхньої робочої частоти. Порівняти її з результатами пп.2.4.20.1, 2.4.20.2.

Побудувати частотну залежність модуля вхідного і вихідного опорів каскаду СК від частоти. Для цього задати параметри аналізу відповідно до рис.2.47. Отримати частотні залежності (рис.2.48).

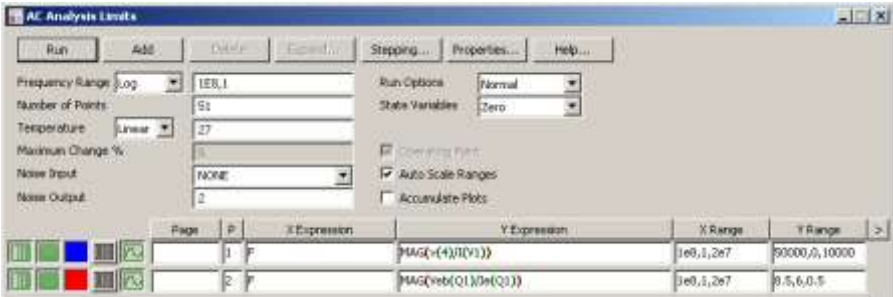


Рисунок 2.47 – Завдання параметрів аналізу для визначення частотної залежності модуля вхідного і вихідного опорів каскаду СК

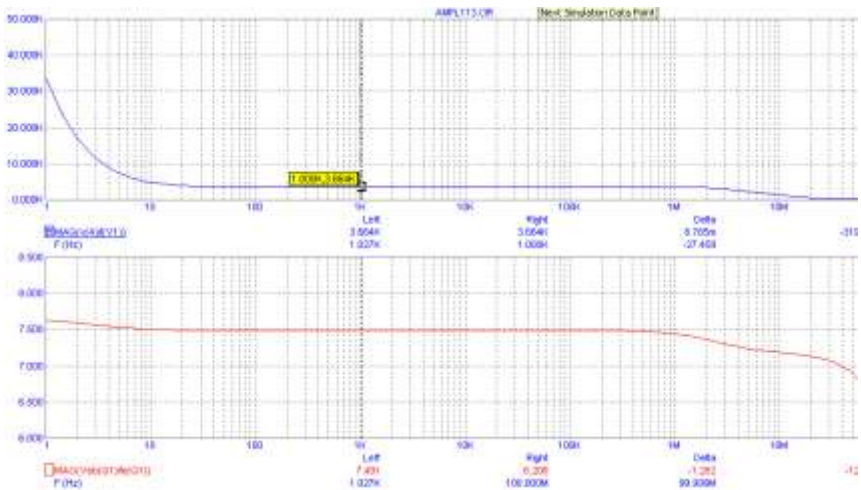


Рисунок 2.48 – Частотні залежності модулів вхідного та вихідного опорів каскаду СК

Відповідно до рис.2.47, рис.2.48 на першому графіку виводиться частотна характеристика модуля вхідного опору, а на другому частотна характеристика модуля вихідного опору.

Необхідно відзначити, що визначення вихідного опору за рис.2.47 є не зовсім коректним, оскільки практично другий графік виводить частотну залежність опору емітерного переходу з боку емітера і не враховує опір джерела сигналу, який у загальному випадку також впливає на вихідний опір схеми СК ( $R_{\text{вихСК}}=R_{\text{дж}}/h_{21e}+1/S$ ). Порівняти значення вхідного і вихідного опорів опору з результатами отриманими у пп.1.3.27, 1.3.28, а також з аналогічними параметрами каскадів СЕ, СБ.

Зробити висновок про частотні властивості схем включення біполярних транзисторів.

## 2.5 Зміст звіту

**2.5.1** Схеми каскадів, що досліджуються. Схеми можливо наводити у форматі, який використовується в програмі МС-9.0 (7.0).

**2.5.2** Результати експериментальних досліджень у вигляді таблиць і осцилограм (епюр, отриманих за допомогою МС-9.0 (7.0)).

**2.5.3** Висновки за результатами роботи.

## 2.6 Контрольні запитання

1. Привести еквівалентну схему резистивного каскаду для діапазону середніх частот. Відповідь обґрунтувати.

2. Привести еквівалентну схему резистивного каскада для діапазону нижніх частот. Відповідь обґрунтувати.

3. Привести еквівалентну схему резистивного каскада для діапазону високих частот. Відповідь обґрунтувати.

4. Вплив емітерної блокувальної ємності на частотні властивості каскаду. Обґрунтувати відповідь.

5. Пояснити принцип дії ефекту Міллера. Його вплив на частотну характеристику.

6. Як зміниться амплітудно-частотна характеристика каскаду у діапазоні нижніх частот зі збільшенням опору навантаження ?

7. Як зміниться амплітудно-частотна характеристика окремого каскаду у діапазоні високих частот при зменшенні опору навантаження?

8. Як зміниться амплітудно-частотна характеристика попереднього каскаду при зменшенні режимного струму (струму спокою) наступного каскаду?

9. Як розрахувати рівень лінійних спотворень у діапазоні нижніх частот багатокаскадного підсилювача, якщо відомі рівні  $M_{нi}$  окремих каскадів?

10. Інерційні властивості біполярних транзисторів. Еквівалентна схема Джіаколетто. Характерні частоти транзисторів та співвідношення між ними.

11. Як розрахувати вихідну ємність резистивного каскаду на біполярних транзисторах?

12. Як розрахувати сталу часу проміжного каскаду у діапазоні низьких частот?

13. Як розрахувати сталу часу проміжного каскаду у діапазоні високих частот?

14. Як розрахувати сталу часу вхідного кола першого каскаду багатокаскадного підсилювача у діапазоні низьких частот?

15. Як розрахувати сталу часу вхідного кола першого каскаду багатокаскадного підсилювача у діапазоні високих частот?

16. Привести частотну характеристику каскаду за умови впливу тільки блокувальної ємності в колі емітера (тобто не брати до уваги вплив розділювальних ємностей на амплітудно-частотну характеристику).

17. Поняття амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик. Ідеальні та реальні характеристики. Пояснить принципову різницю між лінійними та нелінійними спотвореннями сигналу.

18. До якого виду спотворень (лінійні чи нелінійні) відносяться фазові спотворення. Як визначаються фазові спотворення сигналу.

19. Як розрахувати сталу часу вихідного каскаду у діапазоні низьких частот та високих частот?

### **3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЗИСТИВНОГО КАСКАДУ У ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ**

#### **3.1 Мета роботи**

Експериментально дослідити властивості резисторного каскаду в зоні малого і великого часу.

#### **3.2 Прилади, що використовуються в роботі**

Лабораторний практикум реалізовано шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою програми схемотехнічного моделювання MS-9.0 (7.0).

#### **3.3 Завдання на підготовку до роботи**

**3.3.1** Вивчити розділ курсу "Аналіз перехідних процесів в програмах схемотехнічного моделювання".

**3.3.2** Ознайомитись з основними еквівалентними схемами підсилювального каскаду в області малого і великого часу.

#### **3.4 Експериментальна частина**

**3.4.1** Відкрити основне вікно програми MS-9.0 (7.0). За допомогою схемного редактора програми MS-9.0 (7.0) побудувати принципову схему підсилювального каскаду на біполярному транзисторі за схемою СЕ (рис. 3.1).

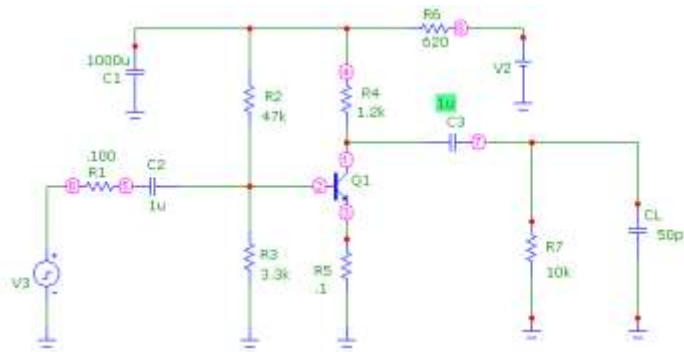


Рисунок 3.1 – Схема каскаду з СЕ, що досліджується

Як джерело вхідного сигналу вибрати джерело імпульсного сигналу V3 з параметрами заданими відповідно до рис. 3.2.



Рисунок 3.2 – Завдання параметрів імпульсного джерела сигналів в ОНЧ

За таких умов вхідний сигнал буде мати вигляд послідовності прямокутних двополярних імпульсів з частотою повторення 40 Гц (період  $P5=0.025$ , відповідно частота  $f=1/(25 \cdot 10^{-6})=40$  Гц), амплітудою 10 мВ, ( $VZERO=-0.01$ ,  $VONE=0.01$ ) тривалістю імпульсів 12,5 мс ( $P3=0.0125$ ), тривалістю фронтів 10 мкс ( $P1=0n$ ,  $P2=10u$ ;  $P3=0,125$ ,  $P4=0,012501$ ).

**3.4.2** Промоделювати поведінку каскаду в режимі підсилення імпульсних сигналів в зоні великого часу

Відкрити директорію Analysis і запустити аналіз перехідних процесів. У вікні завдання параметрів задати час аналізу (Time Range) – 125 мс, що відповідає 5 періодам вхідного сигналу, максимальне значення кроку аналізу 0,1 мкс, кількість точок, що виводиться 510 і встановити опцію автоматичного вибору масштабу графіків (рис.3.3).

У колонці Y Eexpression задати вивід вхідної напруги V(6), вихідної напруги на навантаженні V(7) і напруги на колекторі транзистора VT1 –V(1). Вивід напруги V(1) дозволить окремо проаналізувати вплив вхідного і вихідного роздільних конденсаторів C2 і C3 на форму вихідного коливання.

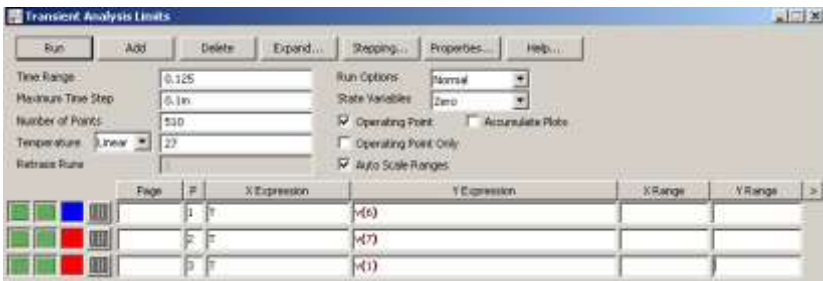


Рисунок 3.3 – Завдання параметрів аналізу каскаду в часовій області для ОНЧ

Отримати епюри відповідних коливань на окремих графіках (рис. 3.4)



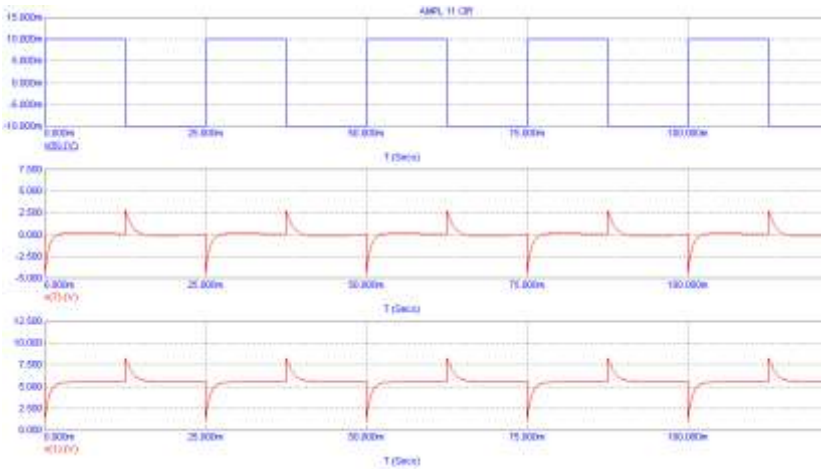


Рисунок 3.4 – Епюри коливань в контрольних точках схеми при  $C2 = 1 \text{ мкФ}$

З аналізу графіків очевидно, що напруга як на колекторі транзистора V1, так і на виході каскаду V7 суттєво відрізняється від вхідної прямокутної напруги (отримали практично інвертуючий диференціатор).

**3.4.3** Аналіз впливу вхідного роздільного конденсатора на форму імпульсів.

Збільшити номінал вхідного роздільного конденсатора C2 до 15 мкФ. Повторити аналіз у часовій області. Отримати епюри коливань і навести їх у звіті (рис. 3.5).

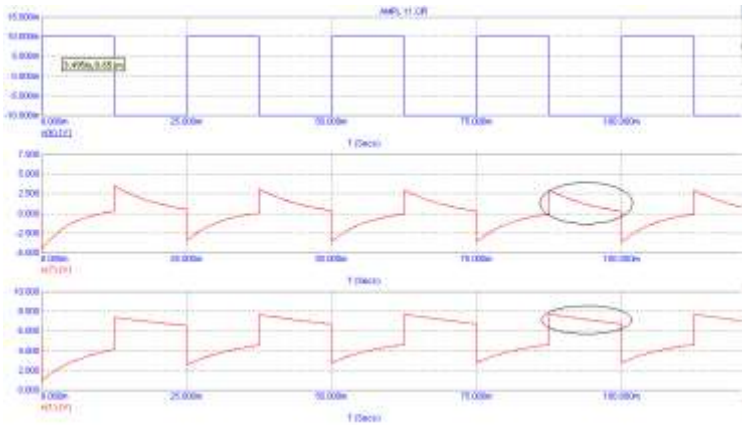


Рисунок 3.5 – Епюри коливань в контрольних точках схеми при  $C2 = 15 \text{ мкФ}$

Очевидно, що форма коливань стала ближче до прямокутної, але з проявленням суттєвого спаду вершини імпульсу. Якщо порівняти епюри на колекторі транзистора і на виході каскаду (обведені овалом на рис. 3.5), то можна зробити висновок, що і вихідний роздільний конденсатор також впливає на форму імпульсу, оскільки спад вершини на навантаженні більший порівняно з колектором транзистора.

Збільшити номінал вхідного роздільного конденсатора  $C2$  до  $68 \text{ мкФ}$ . Повторити аналіз. Отримати епюри коливань (рис. 3.6).

З аналізу рис. 3.6 виходить, що форма коливань на колекторі транзистора вже наближається до прямокутної, у той час як вихідна напруга має суттєвий спад вершини імпульсу.

Додатково можна відзначити, що через збільшення вхідної ємності час установлення коливань на колекторі транзистора суттєво збільшився і вихід на усталений режим відбувається за експонентою (епюра для  $V1$ ).

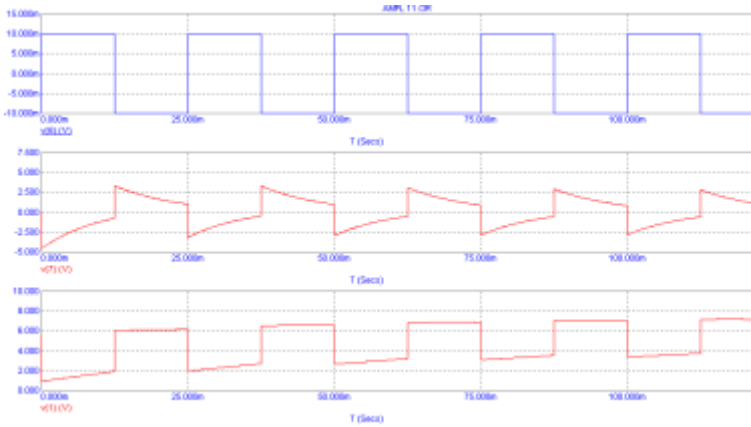


Рисунок 3.6 – Епюри коливань в контрольних точках схеми при  $C2 = 68 \text{ мкФ}$

Для того щоб розглянути епюри в усталеному режимі необхідно змінити параметри завдання на аналіз відповідно до рис. 3.7.

Час аналізу збільшити до 250 мс і задати ручний масштаб графіків з виводом результатів в діапазоні 125 ...250 мс (стала часу вхідного кола каскаду в ОНЧ рівняється  $\tau_{\text{H}} = C2 \cdot (R2 + R_{\text{вхСЕ}}) \approx 68 \text{ мс}$  і для встановлення вихідної напруги необхідний час якнайменше  $3\tau_{\text{H}}$ ).

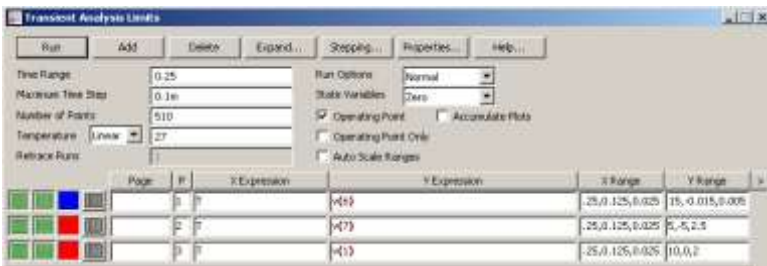


Рисунок 3.7 – Завдання параметрів аналізу з ручним вибором масштабу

Отримати епюри коливань (рис. 3.8).

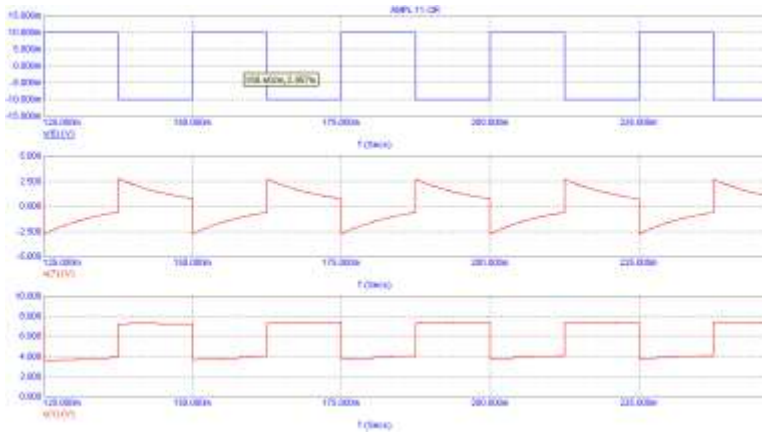


Рисунок 3.8 – Епюри коливань в усталеному режимі при  $C2 = 15 \text{ мкФ}$

З аналізу рис. 3.8 очевидно, що форма коливань на колекторі каскаду близька до прямокутної, але на виході каскаду спостерігається спад вершини імпульсу ( $\Delta \approx 70\%$ ). Це означає, що необхідно збільшити номінал вихідного роздільного конденсатора.

**3.4.4** Аналіз впливу вихідного роздільного конденсатора на форму імпульсів.

Збільшити значення  $C3$  до  $10 \text{ мкФ}$ . Повторити розрахунок.

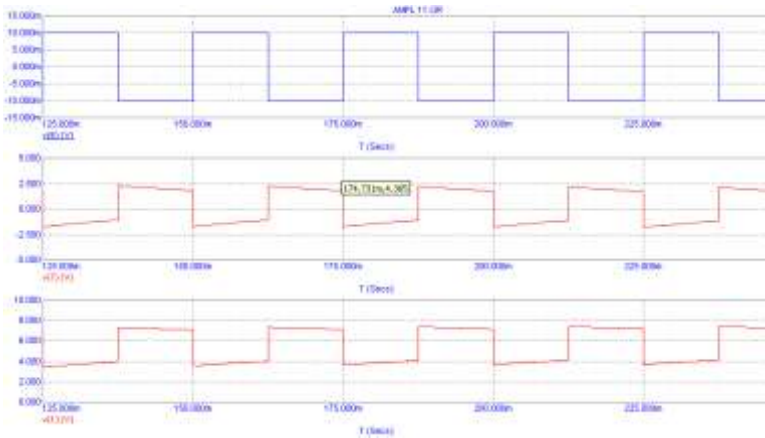


Рисунок 3.9 – Епюри коливань при  $C_2 = 68 \text{ мкФ}$  і  $C_3 = 10 \text{ мкФ}$

Отримати епюри коливань (рис. 3.9). Переконайтеся, що спад вершини не перевищує 10...15 %.

**3.4.5** Аналіз впливу низькочастотної корекції на форму імпульса. Очевидно, що можна досягнути ще менших значень  $\Delta$  шляхом подальшого збільшення номіналу вихідного роздільного конденсатора  $C_3$ . Але можливий й інший варіант покращення форми імпульсу в ОНЧ. – застосування низькочастотної корекції.

При цьому схема каскаду не змінюється, тільки необхідно зменшити ємність конденсатора фільтра  $C_1$ . При цьому збільшиться опір навантаження в ОНЧ за рахунок опору резистора фільтра  $R_6$  і відповідно збільшиться стала часу каскаду в ОНЧ. Прийняти  $C_1$  рівним  $47 \text{ мкФ}$  і повторити розрахунок. Отримати форму коливань (рис.3.10) і порівняти епюри вихідних коливань з попереднім пунктом.

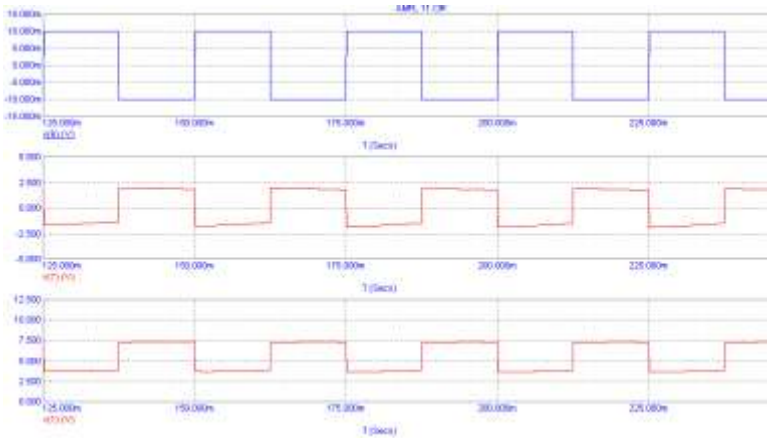


Рисунок 3.10 – Вплив низькочастотної корекції на форму вихідного імпульсу

3.4.5 Аналіз каскаду в режимі підсилення імпульсних сигналів для ОСЧ. Змінити параметри джерела імпульсного сигналу відповідно до рис. 3.11. За таких умов вхідний сигнал буде мати вигляд послідовності прямокутних двополярних імпульсів з частотою повторення 1 кГц (період  $P5=0.001$ , відповідно частота  $f=1/(0,001)=1000$  Г), амплітудою 10 мВ, ( $VZERO=-0.01$ ,  $VONE=0.01$ ) тривалістю імпульсів 0,5 мс ( $P3=0.0005$ ), тривалістю фронтів 10 мкс ( $P1=0\mu$ ,  $P2=10\mu$ ;  $P3=0.0005$ ,  $P4=0.00051$ ).



Рисунок 3.11 – Завдання параметрів імпульсного джерела сигналів в ОСЧ

Відкрити директорію Analysis і запустити аналіз перехідних процесів. У вікні завдання параметрів задати час аналізу (Time Range) –5 мс, що відповідає 5 періодам вхідного сигналу, максимальне значення кроку аналізу 10 мкс, кількість точок, що виводиться 510 і встановити опцію автоматичного вибору масштабу графіків рис. 3.12.



Рисунок 3.12 – Завдання параметрів аналізу каскаду в часовій області для ОСЧ

Отримати епюри вхідних і вихідних коливань (рис. 3.13).

З аналізу рис.3.13 очевидно, що в ОСЧ каскад практично повторює форму вхідних імпульсів з властивою схемі СЕ інверсією сигналу.

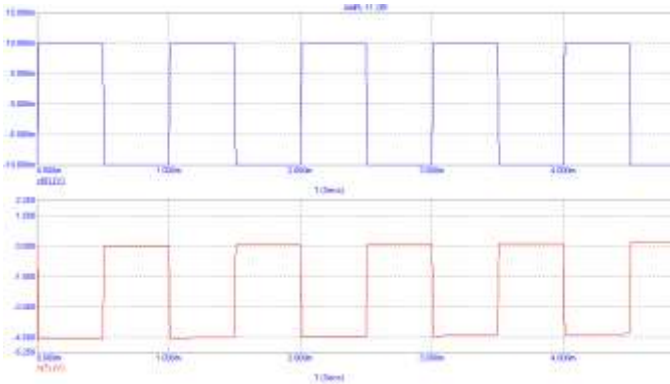


Рисунок 3.13 – Епюри вхідного і вихідного коливань для ОСЧ

Але, необхідно звернути увагу, що вихідні імпульси мають практично тільки від’ємну полярність і начебто на виході присутня стала складова імпульсної послідовності, що в усталеному режимі є неможливим, оскільки конденсатор не пропускає сталої складової.

Аналогічно як і пп.3.3.3 (рис.3.6) причиною виступає перехідний процес встановлення вихідної напруги.

Для наочної демонстрації процесу встановлення збільшити час аналіз (графа Time Range) до 300 мс. Повторити аналіз. Отримати епюри коливань (рис.3.14).



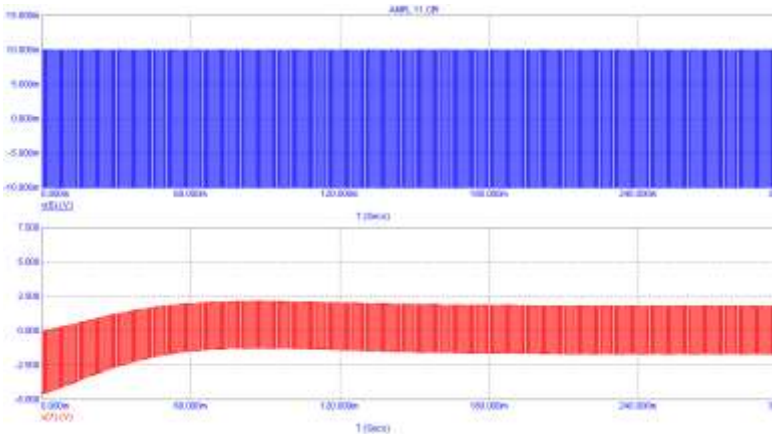


Рисунок 3.14 – Епюри вхідного і вихідного коливань для збільшеного часу аналізу

З аналізу залежностей очевидно, що процес можна вважати усталеним після 40 нс. Тому змінити завдання параметрів відповідно до рис. 3.15 з ручним вибором масштабів графіків.



Рисунок 3.15 – Завдання параметрів аналізу каскаду в часовій області для усталеного режиму

Повторити аналіз. Отримати епюри коливань (рис. 3.16).

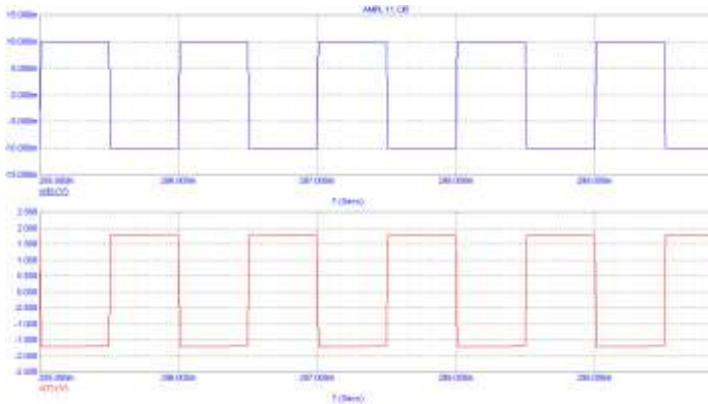


Рисунок 3.16 – Епюри вхідного і вихідного коливаний для ОСЧ в усталеному режимі

**3.3.6** Аналіз каскаду в режимі підсилення імпульсних сигналів в зоні малого часу.

Змінити параметри джерела імпульсного сигналу відповідно до рис.3.17.

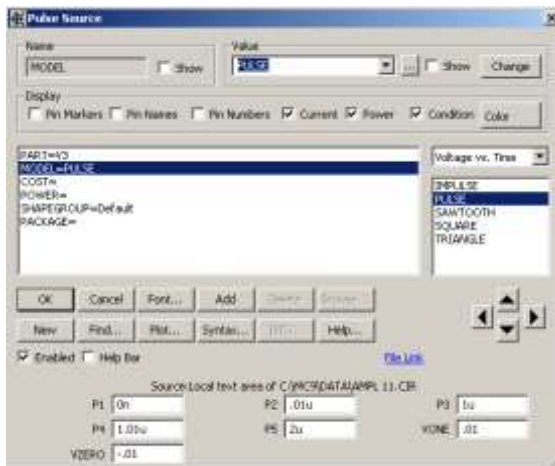


Рисунок 3.17 – Завдання параметрів джерела вхідного сигналу

За таких умов вхідний сигнал буде мати вигляд послідовності прямокутних двополярних імпульсів з частотою повторення 500 кГц (період  $P5=2\mu$ , відповідно частота  $f=1/(2 \cdot 10^{-6})=500$  кГц), амплітудою 10 мВ, ( $VZERO=-0.01$ ,  $VONE=0.01$ ) тривалістю імпульсів 1 мкс ( $P3=1\mu$ ), тривалістю фронтів 0.01 мкс ( $P1=0n$ ,  $P2=0.01\mu$ ;  $P3=1\mu$ ,  $P4=1.01\mu$ ).

Відкрити директорію Analysis і запустити аналіз перехідних процесів. У вікні завдання параметрів задати час аналізу (Time Range) –6 мкс, що відповідає 3 періодам вхідного сигналу, максимальне значення кроку аналізу 0.01 мкс, кількість точок, що виводиться 510 і встановити опцію автоматичного вибору масштабу графіків рис. 3.18.

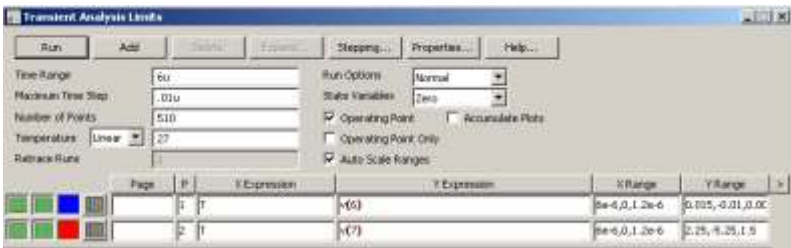


Рисунок 3.18 – Завдання параметрів аналізу для зони малого часу

Отримати епюри вхідних і вихідних коливань (рис. 3.19).

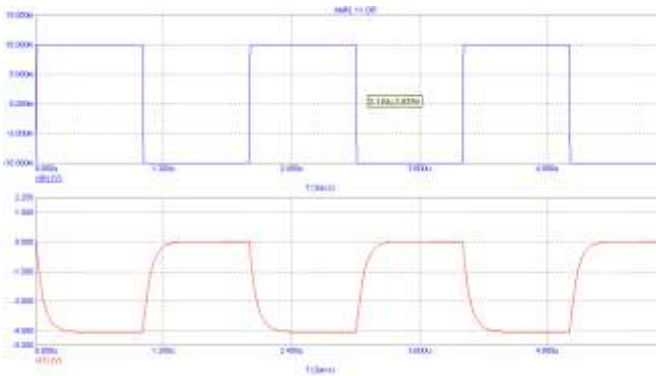


Рисунок 3.19 – Вхідна і вихідна послідовності імпульсів

**3.3.7** Дослідити вплив ємності навантаження на форму вихідних імпульсів. Повторно запустити аналіз перехідних процесів. У вікні завдання параметрів аналізу активізувати опцію Stepping. Задати зміну ємності навантаження у відповідності до рис. 3.20.



Рисунок 3.20 – Завдання зміни ємності навантаження з використанням опції Stepping

Отримати епюри вихідного сигналу (рис. 3.21). Зробити висновок про вплив ємності навантаження на форму імпульсу.

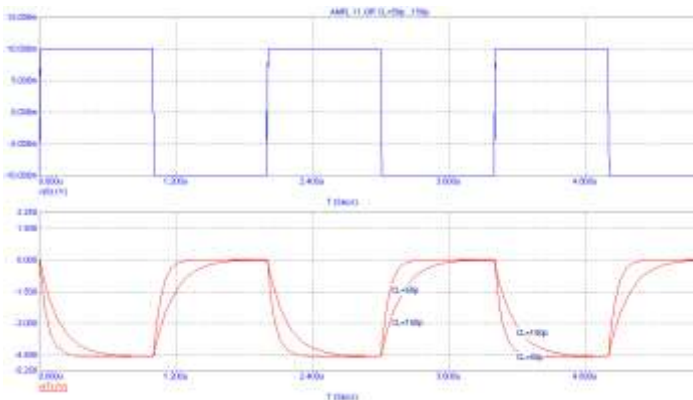


Рисунок 3.21 – Форма вихідних коливань при різних значеннях ємності навантаження

### 3.5 Зміст звіту

**3.4.1** Схеми каскадів, що досліджуються. Схеми можливо наводити у форматі, який використовується в програмі МС-9.0 (7.0).

**3.4.2** Результати експериментальних досліджень у вигляді таблиць і осцилограм (епюр, отриманих за допомогою МС-9.0 (7.0)).

**3.4.3** Висновки за результатами роботи.

### 3.6 Контрольні запитання

1. Що таке перехідні спотворення сигналу? До якого виду спотворень (лінійні чи нелінійні) відносяться перехідні спотворення?

2. Привести еквівалентну схему резистивного каскаду для діапазону середніх частот. Відповідь обґрунтувати.

3. Привести еквівалентну схему резистивного каскаду для діапазону нижніх частот. Які елементи впливатимуть на поведінку каскаду в області великого часу? Відповідь обґрунтувати.

4. Привести еквівалентну схему резистивного каскаду для діапазону високих частот. Які елементи впливатимуть на поведінку каскаду в області  $\nu$ к<sub>п</sub> часу? Відповідь обґрунтувати.

5. Вплив емітерної блокувальної ємності на частотні і часові властивості каскаду. Обґрунтувати відповідь

6. На які параметри імпульсу впливають розділювальні ємності? Обґрунтувати відповідь.

7. На які параметри імпульсу впливає ємність навантаження наступного каскаду? Обґрунтувати відповідь.

8. Зв'язок між часовими характеристиками (тривалість фронту, спад вершини імпульсу) та частотними характеристиками каскаду.

9. Як зміниться спад вершини імпульсу зі збільшенням опору навантаження ?

10. Як зміниться спад вершини імпульсу при зменшенні опору навантаження?

11. Як зміниться тривалість фронту при зменшенні режимного струму (струму спокою) наступного каскаду?

12. Як розрахувати час зростання вихідного сигналу, якщо відомі нижня та верхня робочі частоти полоси пропускання?

13. Як розрахувати рівень лінійних спотворень у діапазоні великого часу багатокаскадного підсилювача, якщо відомі значення  $\Delta$  окремих каскадів?

14. Як розрахувати спад вершини  $\Delta$  вихідного імпульсу, якщо відомі нижня та верхня робочі частоти смуги пропускання?

15. Як розрахувати час зростання багатокаскадного підсилювача, якщо відомі значення  $\tau_i$  окремих каскадів?