

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт з дисципліни

ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ
РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ

для студентів з напрямку підготовки 6.050901 «Радіотехніка»
(усіх форм навчання)

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОНИХ СХЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ
ПРОГРАМИ СХЕМОТЕХНІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
MICRO-CAP

ЧАСТИНА II

2015

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Основи автоматизації проектування радіоелектронної апаратури” для студентів з напрямку підготовки 6.050901 «Радіотехніка» усіх форм навчання. Дослідження електронних схем за допомогою програми схемотехнічного моделювання Міcro-Cap частина II /Укл: В.С. Кабак, С.С. Самойлик - Запоріжжя: ЗНТУ, 2015.-74с.

Укладачі: В.С. Кабак, доцент, д.т.н.
С.С. Самойлик, ст. викладач кафедри РТТ

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

Відповідальний
за випуск: С.С. Самойлик, ст. викладач кафедри РТТ.

Затверджено
На засіданні кафедри «РТТ»
Протокол №7 від 20.02.2015р.

ЗМІСТ

Лабораторна робота №3. Дослідження впливу від'ємного зворотного зв'язку на параметри електронних схем.....	78
Лабораторна робота №4. Дослідження характеристик джерел стабільного струму	123
Лабораторна робота № 5. Дослідження характеристик диференціального каскаду.....	130
Список літературних джерел	148

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

Дослідження впливу від'ємного зворотного зв'язку на параметри електронних схем

Мета роботи - закріпити знання з розділу курсу "Методи машинного аналізу електронних схем", експериментально дослідити можливості програм схемотехнічного моделювання для аналізу впливу різних типів від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ) на параметри підсилювачів.

4.1 Приклади, що використовуються в роботі

Практикум реалізовано шляхом комп'ютерного моделювання на персональному комп'ютері за допомогою Micro-Cap-9.0 (7.0).

4.2 Підготовка до роботи

4.2.1 Вивчити розділ курсу ""Методи машинного аналізу електронних схем".

4.2.2 Ознайомитись з основними типами ВЗЗ та впливом ВЗЗ на якісні характеристики підсилювачів

4.3 Експериментальна частина

4.3.1 Дослідження впливу ВЗЗ послідовно- послідовного типу на параметри підсилювачів

4.3.1.1 За допомогою схемного редактора Micro-Cap-9.0 (7.0) побудувати принципову схему підсилювального каскаду з ВЗЗ послідовно - послідовного типу (Z - типу) з номіналами елементів, що наведені на рис. 4.1 (номінали елементів і напруга живлення відповідають схемі лабораторного стенду з дисципліни "Пристрої підсилення сигналів").

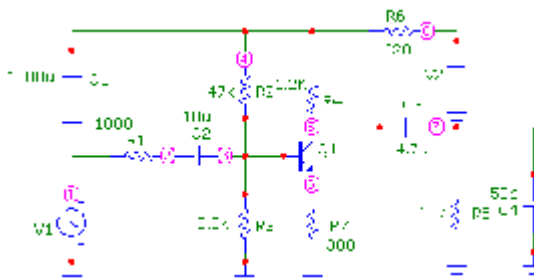


Рисунок 4.1 – Схема каскаду з ВЗЗ Z-типу

Схемотехнічно цей каскад можна розглядати як каскад зі спільним емітером (СЕ), в якому реалізовано емітерну термостабілізацію. Ефект температурної стабілізації досягається завдяки введенню резистора від'ємного зворотного зв'язку R7 в емітерне коло транзистора Q1.

Як джерело сигналу задати джерело гармонічної напруги типу "GENERAL" амплітудою $A=10$ мВ, частотою 1 кГц, внутрішнім опором $R_s=1$ Ом.

4.3.1.2 Провести нумерацію вузлів схеми і визначити параметри режиму каскаду за постійним струмом (режим аналізу "Dynamic DC"). Зафіксувати значення і полярність напруги у вузлах схеми, перевірити режим на лінійність (рис.4.2).

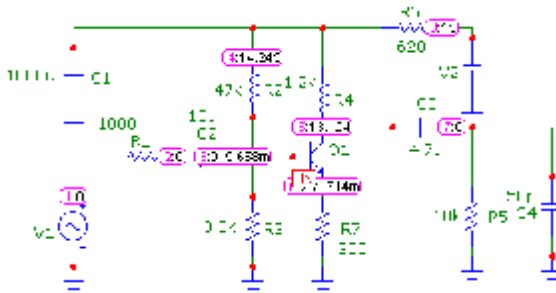


Рисунок 4.2 – Карта напруг з постійного струму у робочій точці

Отримати значення струмів що характеризують точку спокою (рис.4.3).

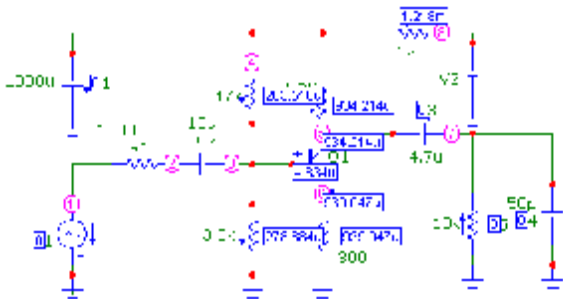


Рисунок 4.3 - Карта струмів для робочої точки

Порівняти результати моделювання з результатами отриманими в схемі лабораторного стенду.

4.3.1.3 Провести перевірку працездатності схеми. Запустити аналіз схеми у часовій області. Вибравши в меню ANALYSIS режим розрахунку перехідних процесів “Transient”, задати параметри аналізу відповідно до рис. 4.4

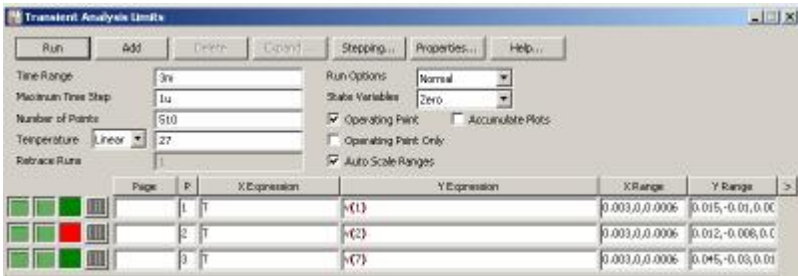


Рисунок 4.4 – Завдання параметрів аналізу і виводу результатів аналізу

Відповідно до такого варіанту завдання на графіки виводяться епюри вхідного та вихідного коливачь, а також епюра у вузлі 2, яка дозволить визначити придушення сигналу у вхідному колі через кінцеве значення вхідного опору каскаду. Запустити аналіз схеми у часовій області натисканням на кнопку “Run”.

Отримати результати розрахунку у вигляді відповідних осцилограм (рис. 4.5). Відобразити епюри у звіті.

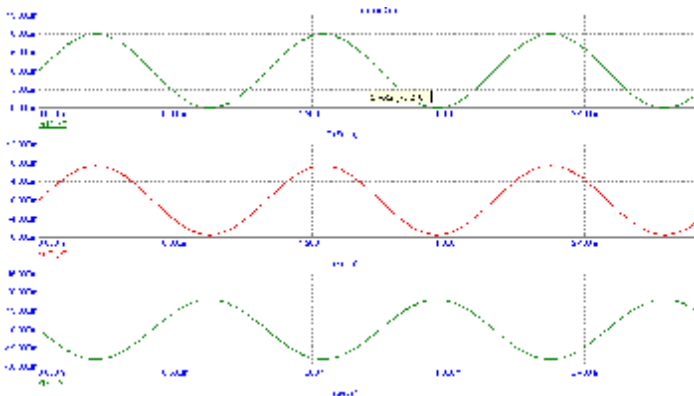




Рисунок 4.5 – Епюри коливачь у контрольних точках схеми

4.3.1.4 За отриманими графіками розрахувати коефіцієнт підсилення схеми в режимі підсилення сигналів змінного струму. Включивши режим курсору і натиснувши на кнопку  (максимум) визначити пікове значення вхідної напруги (наприклад, для додатної півхвилі). Потім вибравши будь-яку точку на епюрі вихідної напруги (від'ємна півхвиля, оскільки схема інвертує сигнал) повторним натисканням на кнопку  визначити амплітуду вихідної напруги. Розрахувати коефіцієнт підсилення з напруги і порівняти його з результатом лабораторної роботи.

4.3.1.5 Визначити вплив ВЗЗ на величину коефіцієнта підсилення з напруги. Повторити аналіз схеми у часовій області. Тільки у вікні завдання параметрів аналізу активізувати опцію “Stepping” і задати зміну опору R7 відповідно до рис. 4.6.

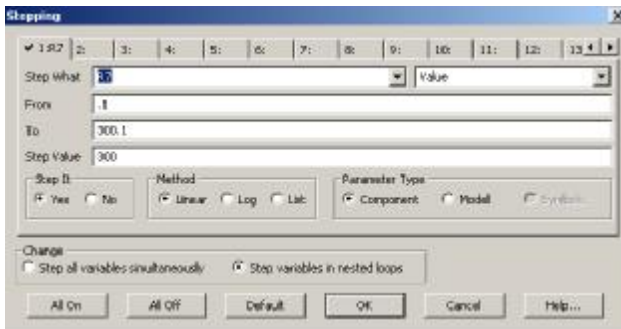


Рисунок 4.6 – Завдання покрокової зміни резистора R7

Отримати відповідні епюри. Підписати кожний графік за допомогою опції “Label Branches” (рис.4.7).

З аналізу епюр вихідного колювання можна зробити перший очевидний висновок: **ВЗЗ послідовно-послідовного типу (Z - типу) зменшує коефіцієнт підсилення з напруги**, оскільки на нижньому (третьому) графіку вихідне колювання за наявності резистора R7=300,1 Ом практично збігається з віссю абсцис (амплітуда вихідного сигналу, як це впливає з рис.4.5 рівняється 24 мВ), у той час як для значення R7=0,1 Ом (тобто зворотний зв'язок практично усунуто) амплітудне значення досягає 790 мВ.

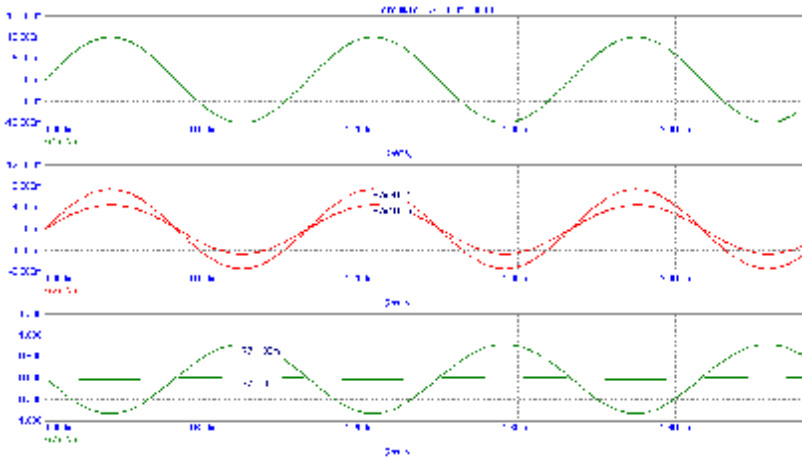


Рисунок 4.7 – Епюри коливань для схеми з V33 (R7=300 Ом) і без V33 (R7=0,1 Ом)

З аналізу графіку залежності у вузлі №2 {V(2)} випливає другий наслідок дії V33 Z-типу: **V33 Z-типу збільшує вхідний опір каскаду**, оскільки напруга у вузлі №2 (за еквівалентною схемою це напруга на вхідному опорі підсилювача) для введеного V33 (R7=300 Ом) збільшилась приблизно у два рази. Це означає що збільшився коефіцієнт передачі вхідного кола $K_{вх} = R_{вх33} / (R1 + R_{вх33})$ через збільшення $R_{вх33}$.

Відзначимо, що проведений у цьому підпункті аналіз якісно демонструє ефект введення V33 до схеми каскаду, але не може використовуватися для кількісної оцінки впливу V33 на характеристики каскаду.

Дійсно, заміна резистора R7 на номінал 0,1 Ом повертає схему до початкового варіанту схеми СЕ, яка досліджувалася у лабораторній роботі №1. Струм спокою колектора для схеми без V33 складає $I_{к0}=5,112$ мА, у той час як при введенні V33 (R7=300 Ом) $I_{к0}=0,934$ мА.

Тому для проведення кількісної оцінки впливу V33 на параметри каскаду необхідно в схемі створити однакові режими роботи з постійного струму схеми з V33 і без V33.

4.3.1.6 Додати до схеми каскаду блокувальний конденсатор C5, підключивши його паралельно резистору зворотного зв'язку R7 (рис.4.8). Номінал ємності обрано з умови, щоб у смузі пропускання

реактивний опір конденсатора був набагато меншим за опір резистора R7 ($X_{C5}=1/(2\pi fC_5)|_{f=1000\Gamma_1}=1/(6,28\cdot 10^3\cdot 220\cdot 10^{-6})=0,34\text{ Ом}$).

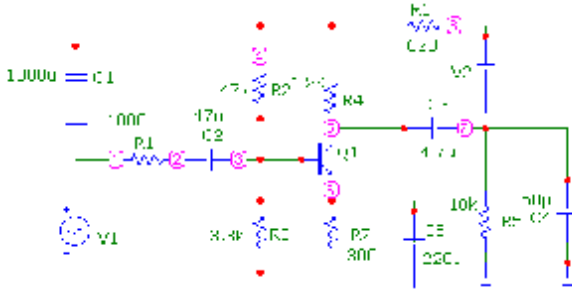


Рисунок 4.8 – Схема каскаду з блокувальним конденсатором C5

Тоді очевидно, що при такому номіналі блокувального конденсатора схема для сигнальної складової у робочій смузі частот практично набуває властивості схеми із заземленим емітером, у той час як для постійної складової ефект зворотного зв'язку зберігається – тобто у схемі відбувається емітерна термостабілізація режиму.

4.3.1.7 Перевірити ефективність емітерної термостабілізації. Повторити аналіз режиму з постійної складової для значення температури $T=+27^{\circ}\text{C}$ ($R7=300\text{ Ом}$). Очевидно, що режим роботи з постійного струму з у такому варіанті тотожний початковому варіанту схеми (рис.4.2). Зафіксувати значення напруги на колекторі і колекторного струму.

Після цього в меню Dynamic DC активізувати опцію Limits і змінити значення температури спочатку на $T=+50^{\circ}\text{C}$ і провести аналіз для нового значення температури. Знову змінити температуру на $T=-50^{\circ}\text{C}$ і повторити аналіз. Зафіксувати відповідні значення напруг і струмів для трьох значень температури. Розрахувати температурну нестабільність колекторного струму як

$$\Delta = \frac{I_{k0|+50^{\circ}\text{C}} - I_{k0|-50^{\circ}\text{C}}}{I_{k0|+27^{\circ}\text{C}}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Необхідно відзначити, що з точки зору ефективності температурної стабілізації подана схема є неоптимальною, оскільки у

практичних схемах падіння напруги на резисторі R5 обирається з умови $U_{R7}=(0,1\dots 0,2)E_{\text{жив}}$. Але, моделювання роботи каскаду з ВЗЗ для наочності спеціально проводиться за умови мінімальної схемотехнічної різниці від базового каскаду зі спільним емітером.

4.3.1.8 Провести порівняльний аналіз схеми з ВЗЗ і без ВЗЗ у часовій області. Застосування в схемі блокувального конденсатора С5 дозволяє провести порівняльний аналіз каскаду з ВЗЗ і без ВЗЗ для однакового режиму роботи транзистора з постійного струму за допомогою опції "Stepping".

Дійсно, якщо покласти значення С5 рівним, наприклад, 1 пФ (це практично монтажна ємність) то в схемі як для постійної, так і для сигнальної складових діє ВЗЗ Z –типу, якщо ж значення ємності блокувального конденсатора встановити рівним відповідно до пп..**4.3.1.6** $C5=220$ мкФ, то для сигнальної складової ВЗЗ зникає.

Параметри аналізу у часовій області задати відповідно до рис.4.9, тільки після активізації опції "Stepping" відмінити її для резистора R7 і задати зміну ємності С5 згідно з рис.4.10.



Рисунок 4.9 – Завдання параметрів аналізу у часовій області



Рисунок 4.10 – Завдання покрокової зміни ємності конденсатора С5

Отримати епюри коливань. (рис.4.11)

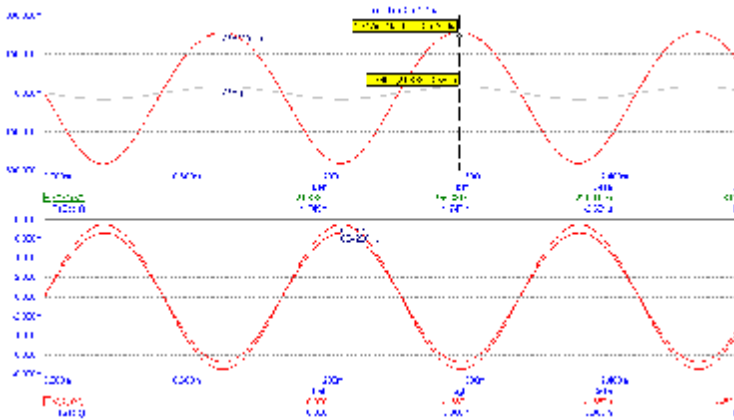


Рисунок 4.11– Епюри коливань схеми з В33 і без В33 за умови однакового режиму з постійного струму

Аналіз графіків свідчить, що в принципі, висновок зроблений у пп.4.3.1.6. підтверджується: **В33 послідовно-послідовного типу зменшує коефіцієнт підсилення з напруги і збільшує вхідний опір схеми.**

За результатами графічних залежностей розрахувати:

1) наскрізний коефіцієнт підсилення з напруги для схеми з В33 $K_{U_{H|C5=1\text{пФ}}}$ і без В33 $K'_{U_{H|C5=220\text{мкФ}}}$ як

$$K_{U_{H|C5=1\text{пФ}}} = \frac{U_{mR5}}{U_{m_{BX}}} = \frac{V7}{V1}, \quad K'_{U_{H|C5=1\text{пФ}}} = \frac{U_{mR5}}{U_{m_{BX}}} = \frac{V7}{V1}; \quad (4.2)$$

2) коефіцієнт підсилення з напруги безпосередньо каскаду з В33 K_U ($C5=1\text{пФ}$) і без В33 K'_U ($C5=220\text{мкФ}$) як

$$K_{U|C5=1\text{пФ}} = \frac{U_{mR5}}{U_{m(V2)}} = \frac{V7}{V2}, \quad K'_{U|C5=220\text{мкФ}} = \frac{U_{mR5}}{U_{m(V2)}} = \frac{V7}{V2}; \quad (4.3)$$

3) визначити наскрізний фактор зворотного зв'язку як

$$F_H = K'_{UH} / K_{UH} \quad (4.4)$$

4) визначити фактор зворотного зв'язку каскаду як

$$F = K'_U / K_U \quad (4.5)$$

4.3.1.9 Дослідити вплив ВЗЗ на частотні характеристики схеми. Запустити режим аналізу схем в частотній області АС. Задати параметри аналізу відповідно до рис.4.12.

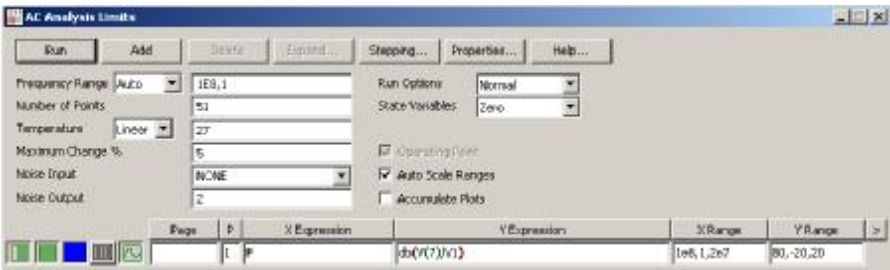


Рисунок 4.12 – Завдання параметрів аналізу в частотній області

Активізувати опцію “Stepping” і задати зміну ємності блокувального конденсатора аналогічно пп.4.3.1.8 (рис.4.10). Отримати частотні характеристики. Підписати ЛАЧХ (рис.4.13).

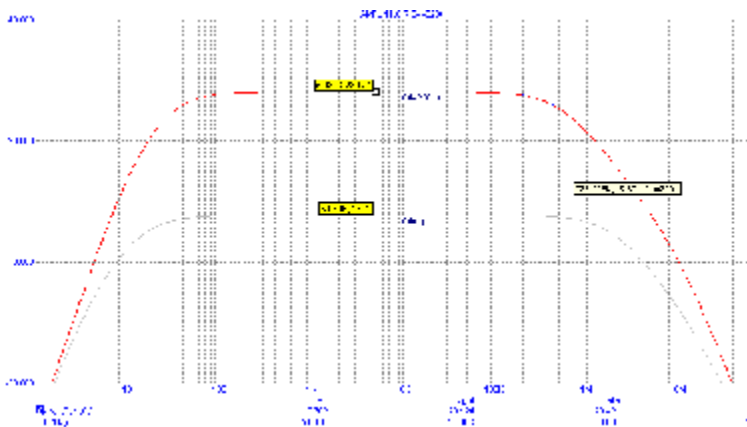


Рисунок 4.13 – ЛАЧХ схеми з ВЗЗ ($C_5=1$ пФ) і без ВЗЗ ($C_5=220$ мкФ)

За допомогою курсору визначити максимальні значення наскрізного коефіцієнта підсилення з напруги у смузі пропускання.

Різниця між отриманими значеннями і характеризує глибину зворотного зв'язку в схемі з ВЗЗ (це значення повинно збігатися з розрахованим значенням F_n за (4.4), якщо його визначити у дБ). Тобто зменшення коефіцієнта підсилення в схемі з ВЗЗ Z-типу відбувається у фактор раз. Для схеми рис. 4.1 фактор F можна розрахувати за виразом

$$F \approx 1 + S \cdot R_7$$

де $S = I_{к0} / \phi_T$ крутість транзистора у точці спокою, $I_{к0}$ – струм колектора у точці спокою, ϕ_T – температурний потенціал. Розрахувати теоретичне значення F і порівняти його з результатами моделювання.

4.3.1.10 Визначити вплив ВЗЗ на смугу пропускання. За допомогою курсору визначити значення нижньої f_n (рис.4.14) і верхньої f_v (рис.4.15) робочих частот для каскаду без ВЗЗ і каскаду з ВЗЗ

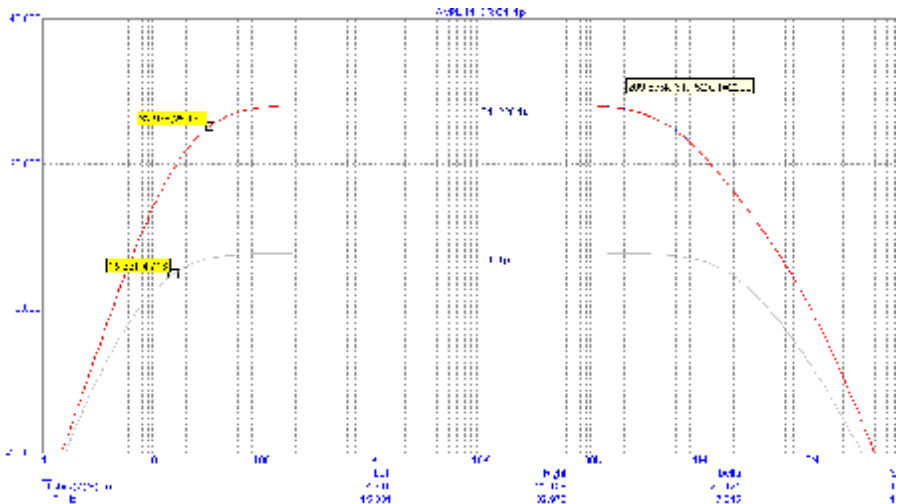


Рисунок 4.14 – Визначення f_n каскаду без ВЗЗ і з ВЗЗ Z-типу

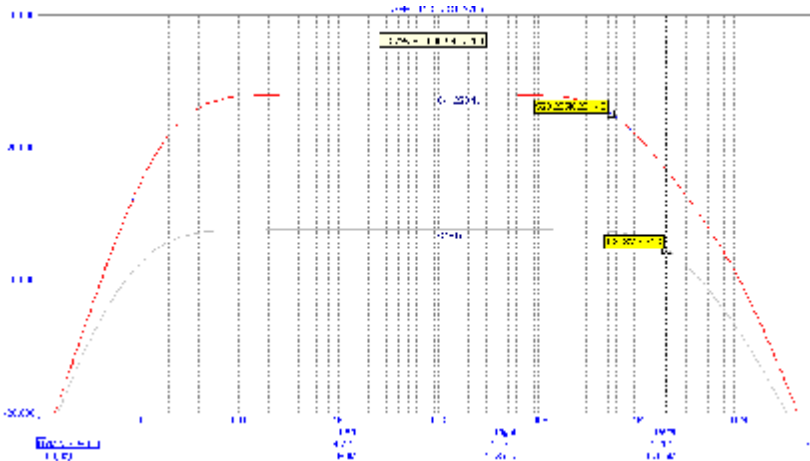


Рисунок 4.15 – Визначення f_b каскаду без V33 і з V33 Z-типу

З порівняння ЛАЧХ рис.4.14, рис.4.15 випливає наступний висновок: V33 Z-типу збільшує смугу пропускання. Але, необхідно, відзначити, що збільшення смуги пропускання як з боку нижніх частот, так і з боку високих частот відбувається не у фактор раз (якого було визначено у п.4.3.1.8), а у дещо менше значення.

4.3.1.11 Оцінити вплив V33 на вхідний опір каскаду.

Повторити аналіз у часовій області. У вікні завдання параметрів аналізу у графі Y Expression задати частотну залежність модуля вхідного опору безпосередньо каскаду (без врахування додаткового резистора R1) (рис.4.16)



Рисунок 4.16 – Завдання аналізу частотної залежності модуля вхідного опору

Отримати частотну залежність модуля вхідного опору (рис.4.17).

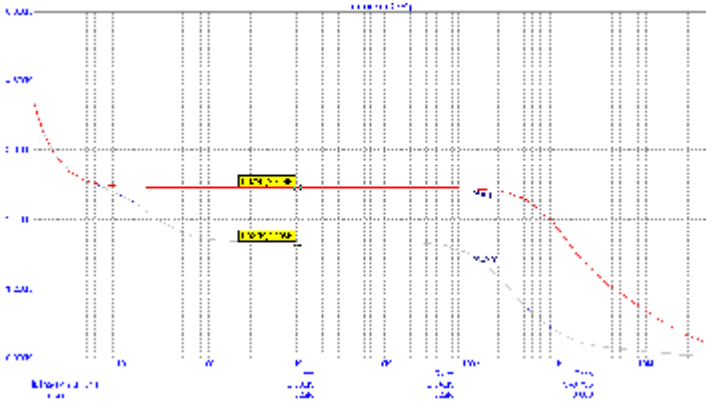


Рисунок 4.17 –Частотна залежність модуля вхідного опору схеми з V33 (C5=1 пФ) і без V33 (C5=220 мкФ)

Висновок з аналізу рис.4.17 очевидний: **V33 Z- типу збільшує вхідний опір у робочій смузі частот і покращує його рівномірність у смузі частот.** Але, знов таки , як і для ЛАЧХ, можна відмітити, що збільшення відбувається не у фактор раз. Пояснить причину відмінності щодо збільшення вхідного опору схеми з V33 в F раз. .

4.3.1.12 Провести гармонічний аналіз схеми. Спочатку проаналізуємо лінійність схеми без V33. Встановити значення ємності блокувального конденсатора C5=220 мкФ (V33 усунено). Задати параметри гармонічного аналізу відповідно до рис.4.18.

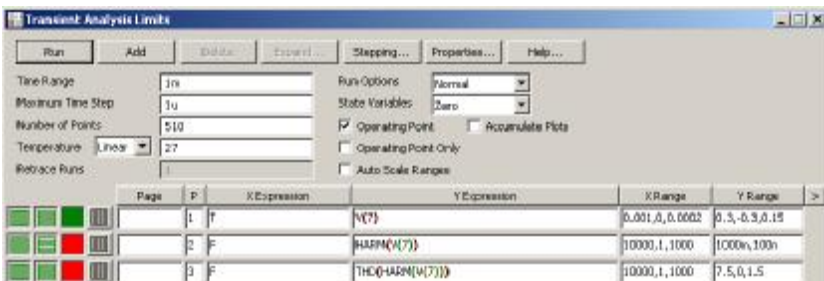


Рисунок 4.18 – Завдання параметрів гармонічного аналізу
Відключити опцію “Stepping”. Отримати епюри вихідного коливання і результати гармонічного аналізу (рис.4.19).

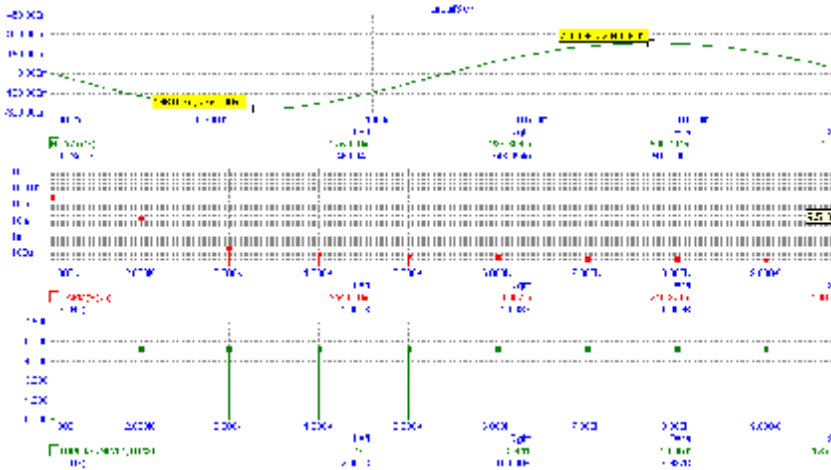


Рисунок 4.19 – Проявлення нелінійних спотворень як асиметрія додатної і від'ємної півхвиль вихідного сигналу

За емпією вихідного коливання визначити амплітуди додатної і від'ємної півхвиль (рис.4.19), а за графіком THD рівень нелінійних спотворень тільки для другої гармоніки і кумулятивне значення для дев'яти гармонік (рис.4.20).

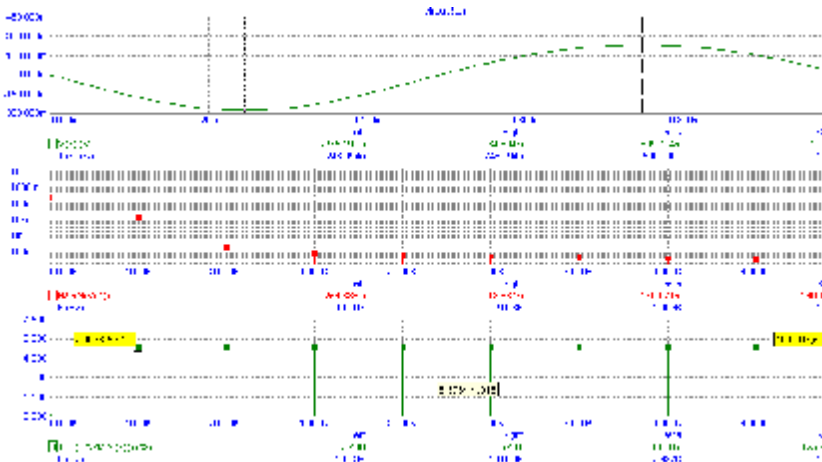


Рисунок 4.20 – Результати гармонічного аналізу схеми без ВЗЗ

4.3.1.13 Ввести зворотний зв'язок. Для цього встановити ємність блокувального конденсатора С5 рівною 1 пФ. Повторити гармонічний аналіз. Визначити асиметрію додатної і від'ємної півхвиль і значення коефіцієнта нелінійних спотворень тільки для другої гармоніки і кумулятивне значення для дев'яти гармонік. (рис.4.21).

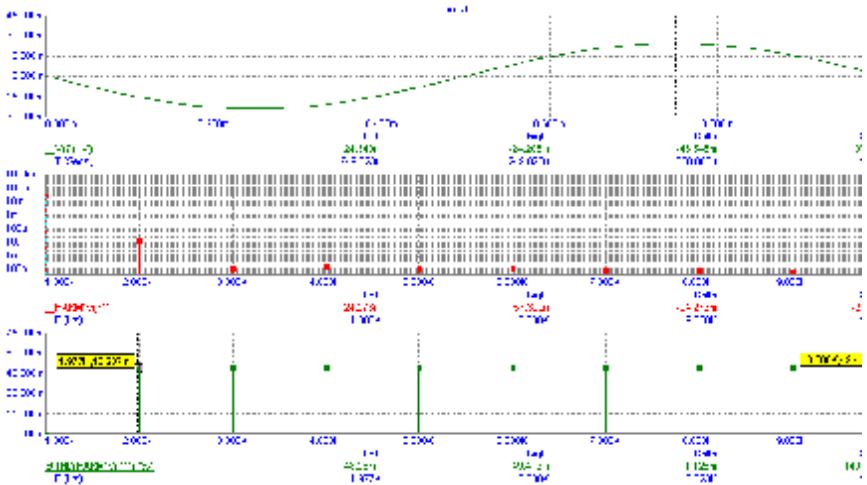


Рисунок 4.21 – Результати гармонічного аналізу схеми з V33

Якщо порівняти значення THD з рис.4.20 і рис. 4.21, то, начебто, можна зробити висновок, що рівень нелінійних спотворень зменшився практично у 100 разів. Але, знов таки, можна відзначити, що таке порівняння не є повністю коректним, оскільки гармонічний аналіз проводився для принципово різних амплітуд вихідного коливання.

4.3.1.14 Для коректного проведення порівняльного гармонічного аналізу необхідно в схемі з V33 збільшити амплітуду сигналу від вхідного джерела сигналу V1 приблизно у 10 разів, тобто задати параметр А моделі джерела рівним 100 мВ. Таке значення впливає з аналізу графіків рис.4.20 і рис.4.21 зі співвідношення між амплітудами вихідного коливання без V33 і з V33. Повторити гармонічний аналіз для нового значення амплітуди вхідного сигналу. Отримати результати аналізу і відобразити їх у звіті (рис.4.22).

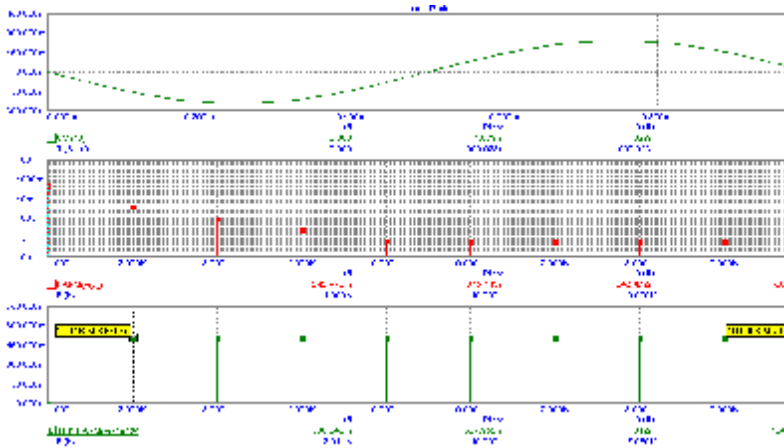


Рисунок 4.22 – Результати гармонічного аналізу схеми з V33 для збільшеного значення амплітуди вхідного сигналу

На підставі аналіз графіків рис.4.22 і рис.4.20 можна зробити висновок, що **нелінійні спотворення в схемі з V33 Z-типу зменшуються практично у фактор раз.**

4.3.1.15 Оцінити вплив неоптимального вибору точки спокою транзистора на максимальний динамічний діапазон вихідного сигналу.

Можна відзначити, що схема каскаду рис.4.1 є неоптимальною не тільки з точки зору термостабільності, але і також з боку максимального динамічного діапазону вихідного сигналу. Так, значення постійної напруги на колекторі транзистора (рис.4.2) $V_5=13,124$ В, а у вузлі №4 $V_4=14,250$ В, тобто потенціал колектора суттєво відрізняється від половини напруги живлення каскаду. Такий вибір режиму впливає на можливості каскаду щодо неспотвореного підсилення додатної півхвилі вихідного сигналу.

Відповідно до рис.4.13 наскрізний коефіцієнт підсилення з напруги для каскаду з V33 рівняється 7,792 дБ, що у разях складає приблизно 2,45. Тобто, якщо подати на вхід каскаду гармонічний сигнал з амплітудою 1 В, то можна, начебто, очікувати, що на виході з'явиться гармонічне коливання з амплітудою 2,45 В. Відповідно змінити в схемі амплітуду джерела V_1 на значення $A=1$ В. Повторити гармонічний аналіз схеми з V33 (рис.4.23). Пояснити отримані результати.

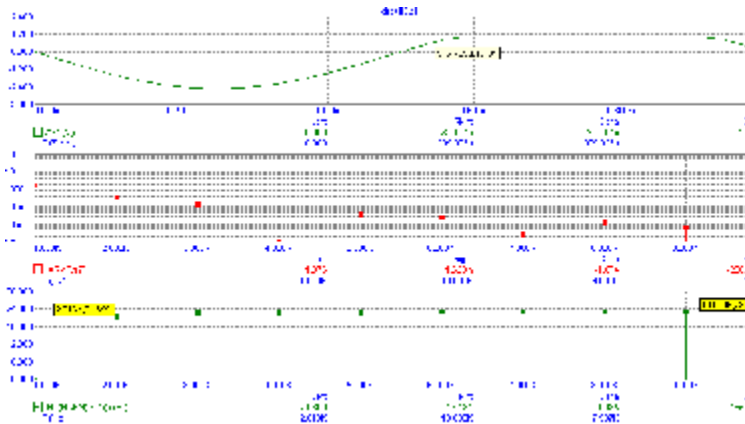


Рисунок 4.23 – Обмеження динамічного діапазону вихідного сигналу через некоректний вибір робочої точки

4.3.1.16 Оцінити вплив ВЗЗ на вихідний опір каскаду.

Як відомо, вихідний опір підсилювача можна визначити з такого співвідношення:

$$R_{\text{вих}} = - \frac{d(U_{\text{вих}})}{d(I_{\text{вих}})} \Big|_{U_{\text{вх}} = \text{const}},$$

де $U_{\text{вих}}$ – вихідна напруга, а $I_{\text{вих}}$ – струм у навантаженні.

Відповідно до такого визначення можна запропонувати узагальнену функціональну схему для розрахунку $R_{\text{вих}}$ (рис.4.24)

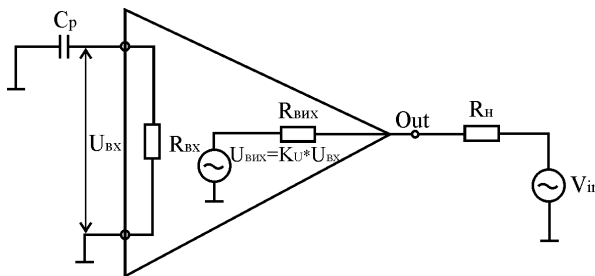


Рисунок 4.24 – Еквівалентна схема для розрахунку вихідного опору підсилювача

Підсилювача на рис.4.24 відображено еквівалентною схемою, що моделює вхідний і вихідний опори схеми, а також еквівалентне джерело напруги у вихідному колі $U_{\text{вих}}$, яке характеризує коефіцієнт підсилення з напруги і, відповідно, визначає вихідну напругу в режимі холостого ходу. Якщо заземлити вхід схеми, а джерело гармонічного сигналу V_{in} підключити до опору навантаження, то, за умови заземлення входу підсилювача, напруга у вузлі Out буде відображати падіння напруги на вихідному опорі підсилювача.

За допомогою схемного редактора побудувати принципову схему підсилювального каскаду з ВЗЗ послідовно - послідовного типу (Z - типу) модифіковану для розрахунку $R_{\text{вих}}$ (рис.4.25). Номінал ємності конденсатора C5 встановити рівним 220 мкФ (ВЗЗ Z- типу для змінної складової усунуто). Параметри джерела гармонічної напруги V1 задати такими ж як і в основній схемі.

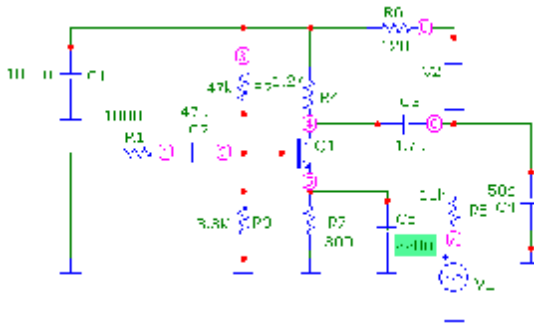


Рисунок 4.25 – Схема модифікована для розрахунку $R_{\text{вих}}$

Запустити аналіз у часовій області. Параметри аналізу задати відповідно до рис.4.26.

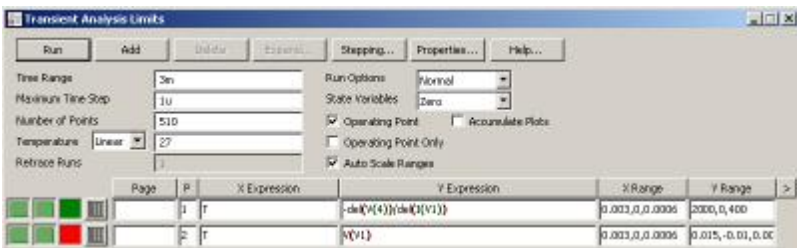


Рисунок 4.26 – Завдання параметрів аналізу у часовій області для розрахунку $R_{\text{вих}}$

Отримати графіки залежностей (рис.4.27).

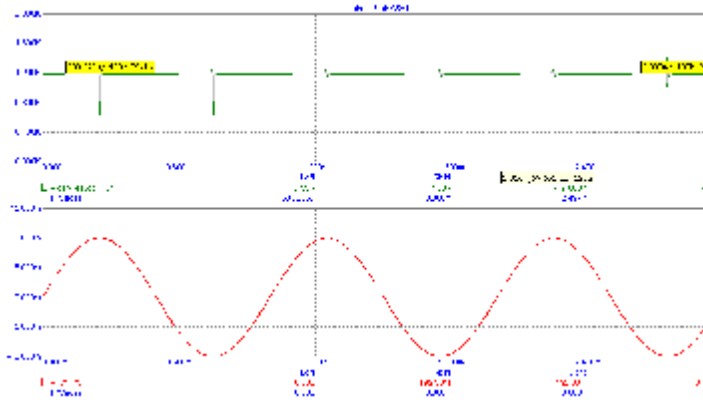


Рисунок 4.27 – Епюри залежності вихідного опору підсилювача без ВЗЗ

Аналіз залежності для вихідного опору свідчить, що $R_{\text{вих}}$ визначається практично опором колекторного навантаження і у часі спостерігається нелінійність вихідного опору, яка особливо проявляється в моменти проходження екстремумів вихідної напруги.

Ввести ВЗЗ Z-типу. Для цього встановити номінал ємності конденсатора С5 рівним 1 пФ. Повторити аналіз. Отримати відповідні графіки (рис.4.28).

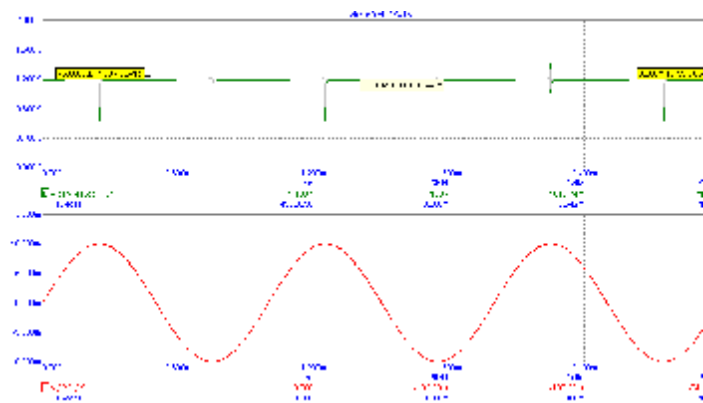


Рисунок 4.28 – Епюри залежності вихідного опору підсилювача з ВЗЗ

Порівняти отриману залежність з аналогічним графіком з рис.4.27. Аналіз поведінки $R_{вих}$ свідчить, що в такій схемі ВЗЗ практично не впливає на величину $R_{вих}$.

4.3.2 Дослідження впливу ВЗЗ паралельно - паралельного типу на параметри підсилювачів

4.3.2.1 За допомогою схемного редактора Micro-Cap-9.0 (7.0) побудувати принципову схему підсилювального каскаду з ВЗЗ паралельно- паралельного типу (Y - типу) з номіналами елементів, що наведені на рис. 4.29.

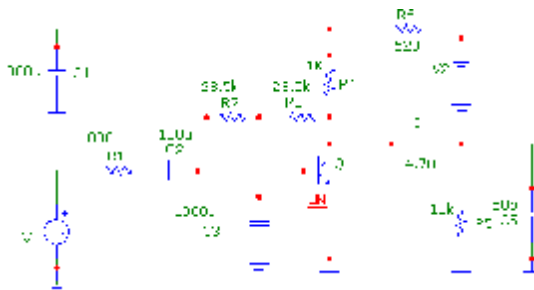


Рисунок 4.29 – Схема каскаду з ВЗЗ Y-типу

Схемотехнічно цей каскад можна розглядати як каскад зі спільним емітером, в якому реалізовано колекторну термостабілізацію. Ефект температурної стабілізації досягається саме завдяки введенню резистора зворотного зв'язку $R_{зз}=R2+R3$ між базою і колектором транзистора Q1, який і реалізує ВЗЗ паралельно- паралельного типу (Y – типу, або ВЗЗ зі струму, що керується напругою).

Для проведення порівняльного аналізу схеми з ВЗЗ і без ВЗЗ в схему включено блокувальний конденсатор C3, який при коректному виборі номіналу ємності усуває зворотний зв'язок для сигнальної складової. Як було показано в п.4.3.1 це дозволяє проводити порівняння схем з ВЗЗ і без ВЗЗ при однаковому режимі каскаду для постійної складової. Як джерело сигналу задати джерело гармонічної напруги типу “GENERAL” амплітудою $A=10$ мВ, частотою 1 кГц, внутрішнім опором $R_s=1$ Ом.

4.3.2.2 Провести нумерацію вузлів схеми і визначити режим каскаду за постійним струмом (рис.4.30, рис.4.31)

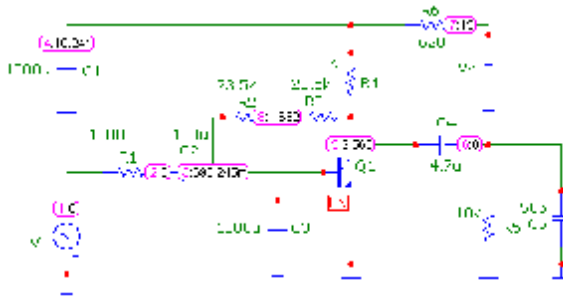


Рисунок 4.30 – Карта напруг з постійного струму у робочій точці

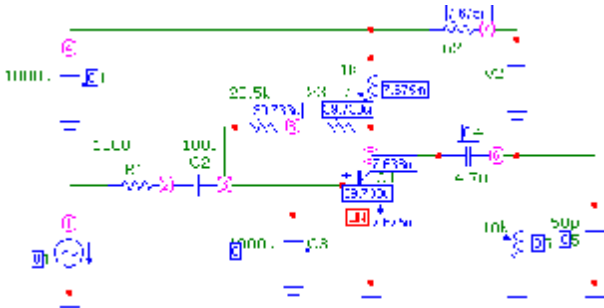


Рисунок 4.31 - Карта струмів для робочої точки

Зафіксувати значення і полярність напруги у вузлах схеми і значення струмів, що характеризують точку спокою, перевірити режим на лінійність (рис.4.30).

4.3.2.3 Перевірити ефективність колекторної термостабілізації. Повторити аналіз режиму з постійної складової для значення температури $T=+50^{\circ}\text{C}$. Зафіксувати нові значення напруги на колекторі і колекторного струму. Змінити температуру на $T=-50^{\circ}\text{C}$ і повторити аналіз. Зафіксувати відповідні значення напруг і струмів для трьох значень температури. Розрахувати температурну нестабільність колекторного струму згідно з (4.1)

4.3.2.4 Провести перевірку працездатності схеми. Запустити аналіз схеми у часовій області (Transient). Завдання на аналіз задати відповідно до рис. 4.32.

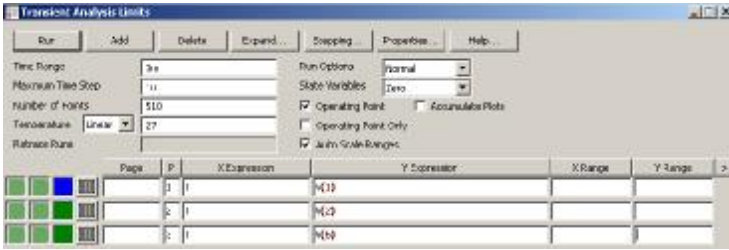


Рисунок 4.32 – Завдання на аналіз у часовій області каскаду з ВЗЗ Y- типу

Отримати результати розрахунку у вигляді відповідних осцилограм (рис. 4.33). Відобразити епюри у звіті.

Звернути увагу на другий графік. Він свідчить про суттєве зменшення сигналу у вхідному колі каскаду через невисоке значення вхідного опору схеми. За отриманими графіками розрахувати наскрізний коефіцієнт підсилення схеми (аналогічно до **п.4.3.1.9**).

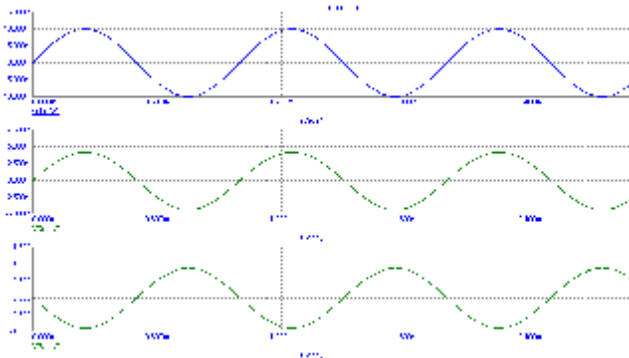


Рисунок 4.33 – Епюри коливаль у контрольних точках схеми

4.3.2.5 Дослідити вплив ВЗЗ на частотні характеристики схеми.

Запустити режим аналізу схем в частотній області АС. Задати параметри аналізу відповідно до рис.4.34.

Активізувати опцію “Stepping” і задати зміну ємності блокувального конденсатора $C3$ відповідно до рис.4.35 ($C3=1$ пФ - ВЗЗ введено, $C3=1000.1$ мкФ – ВЗЗ усунуто для сигнальної складової).

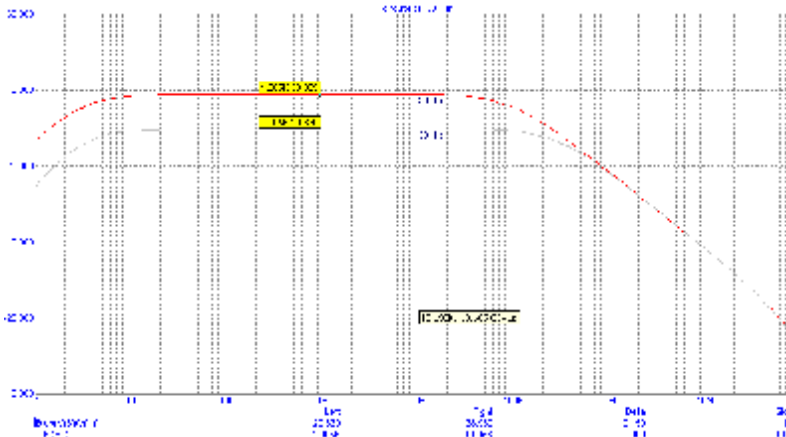
Отримати частотні характеристики. Підписати ЛАЧХ (рис.4.36).



Рисунок 4.34 – Завдання параметрів аналізу в частотній області



Рисунок 4.35 – Завдання покрокової зміни ємності конденсатора C3

Рисунок 4.36 – ЛАЧХ схеми з ВЗЗ ($C_3=1$ пФ) і без ВЗЗ ($C_3=1000$ мкФ)

За допомогою курсору визначити максимальні значення наскрізного коефіцієнта підсилення з напруги у смузі пропускання.

Як видно з аналізу графіків ЛАЧХ введення ВЗЗ зменшує наскрізний коефіцієнт підсилення з напруги. Різниця між максимальними значеннями ЛАЧХ характеризує глибину зворотного зв'язку в схемі.

Але цей ефект необхідно розглянути дещо детальніше, оскільки в технічній літературі стверджується, що під час введення паралельно-паралельного ВЗЗ (Y-типу) коефіцієнт підсилення з напруги не змінюється.

Дійсно, в цьому підпункті отримані частотні характеристики не коефіцієнта підсилення безпосередньо каскаду, а наскрізного коефіцієнта підсилення, який враховує падіння напруги на резисторі R1.

4.3.2.6 Дослідити вплив ВЗЗ Y- типу на коефіцієнт підсилення безпосередньо підсилювального каскаду. Повторити аналіз у частотній області. У вікні завдання параметрів аналізу додатково задати вивід графіка для коефіцієнта підсилення з напруги каскаду, який визначити як $K_U=V(6)/V(3)$, тобто відносно бази транзистора Q1, (рис.4.37).

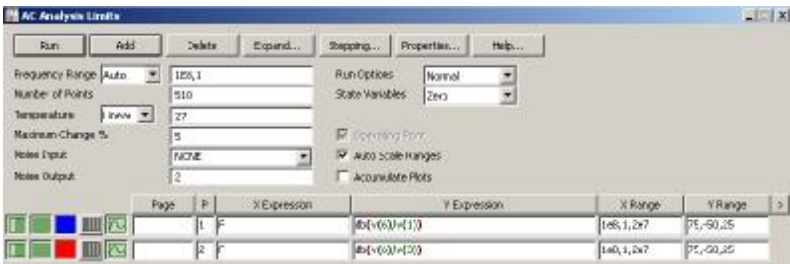


Рисунок 4.37 – Завдання на аналіз частотних характеристик безпосередньо каскаду підсилення

Отримати частотні характеристики наскрізного коефіцієнта підсилення і коефіцієнта підсилення з напруги каскаду з ВЗЗ і без ВЗЗ (рис.4.38).

З аналізу другого графіку очевидно, що дійсно введення ВЗЗ Y - типу безпосередньо для каскаду (тобто від бази транзистора до навантаження) ніяк не впливає на коефіцієнт підсилення з напруги.

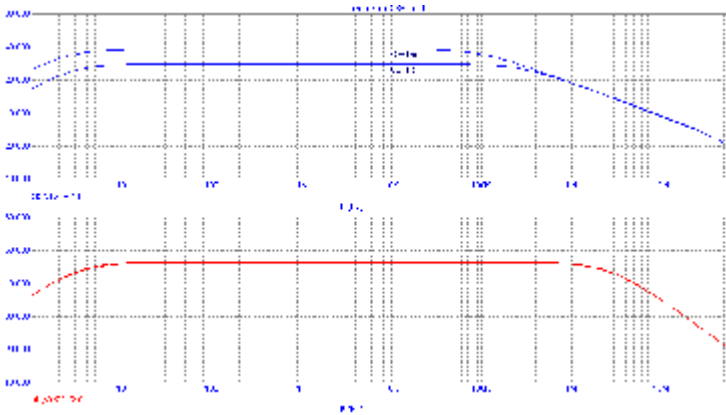


Рисунок 4.38 – ЛАЧХ наскрізного коефіцієнта підсилення і коефіцієнта підсилення безпосередньо каскаду

У той же час наскрізний коефіцієнт підсилення з напруги зменшується у **наскрізний фактор раз, який визначається як різниця між отриманими максимальними значеннями K_{U_n}** (рис.4.36, рис.4.38) і характеризує глибину зворотного зв'язку в схемі з ВЗЗ. Різниця у значеннях K_{U_n} схеми з ВЗЗ і без ВЗЗ пояснюється саме наявністю резистора R1 підключеного до входу каскаду.

Також з аналізу частотних характеристик (другий графік) видно, що верхня робоча частота каскаду за рівнем -3 дБ більша за верхню робочу частоту всієї схеми (наскрізного K_U). Це знову таки пояснюється наявністю резистора R1, який формує сталу часу каскаду вхідного кола в ОБЧ.

Більше того, необхідно відзначити, що наявність резистора R1, якщо опір джерела сигналу близький до нуля, є необхідною умовою ефективної дії ВЗЗ Y – типу. Для перевірки двох останніх висновків задати значення $R1=0,1$ Ом і повторити частотний аналіз (рис.4.39).

Аналіз графіків з рис.4.39 дозволяє зробити висновок, що **ВЗЗ Y-типу є неефективним, якщо опір джерела сигналу близький до нуля**. Це пояснюється тим фактом, що ВЗЗ Y – типу розглядається як зворотний зв'язок зі струму, який керується вихідною напругою. Тому, якщо опір джерела сигналу близький до нуля, то струм зворотного зв'язку замикається саме через джерело і не надходить до бази транзистора, тим самим не впливаючи на його роботу.

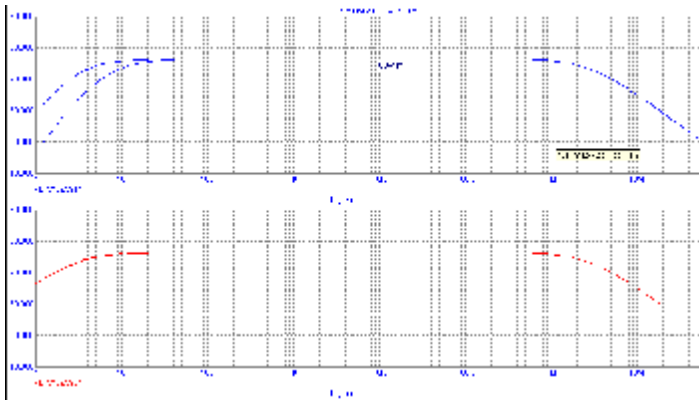


Рисунок 4.39 – Частотні характеристики безпосередньо каскаду підсилення з ВЗЗ Y-типу

4.3.2.7 Дослідити вплив ВЗЗ Y-типу на коефіцієнт підсилення зі струму. Повернути значення R1 до 1 кОм. Запустити аналіз частотних характеристик. Змінити завдання на аналіз відповідно до рис.4.40.



Рисунок 4.40 – Завдання на аналіз у частотній області

У такому варіанті на другому графіку виводиться частотна характеристика коефіцієнта підсилення з струму K_i . Отримати ЛАЧХ (рис.4.41). Підписати характеристики.

Визначити значення глибини зворотного зв'язку F у каскаді за другим графіком.

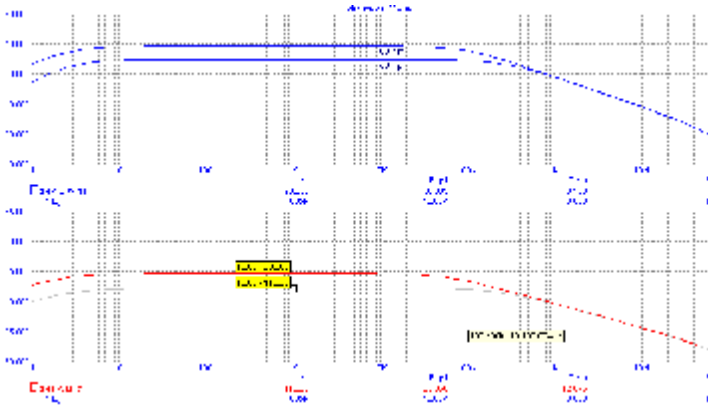


Рисунок 4.41 – Частотні характеристики наскрізного коефіцієнта підсилення з напруги і коефіцієнта підсилення з струму

Висновок з частотної залежності для K_i : **V33 Y- типу зменшує коефіцієнт підсилення зі струму у фактор раз.**

4.3.2.8 Визначити вплив V33 на смугу пропускання. За допомогою курсору визначити значення верхньої (рис.4.42) і нижньої (рис.4.43) робочих частот за ЛАЧХ наскрізного коефіцієнта підсилення з напруги без V33 і каскаду з V33

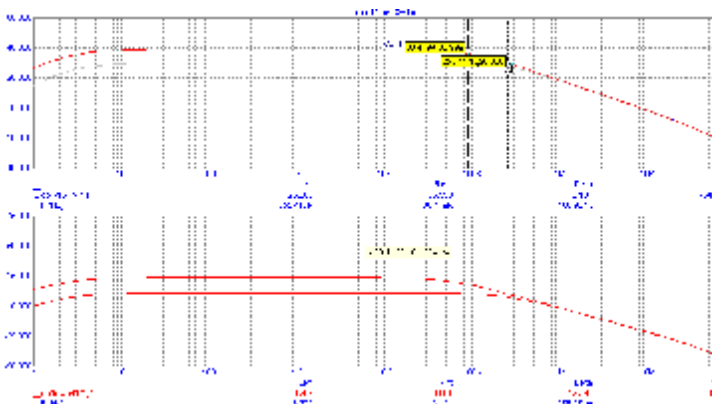


Рисунок 4.42 – Визначення верхньої робочої частоти каскаду з V33 і без V33

Аналіз значень f_v свідчить, що V33 Y – типу розширює смугу пропускання з боку високих частот у F_n раз. У той же час для області

низьких частот розширення смуги для схеми з ВЗЗ не спостерігається, навпаки f_n у каскаді з ВЗЗ трохи менша за f_n схеми без ВЗЗ.

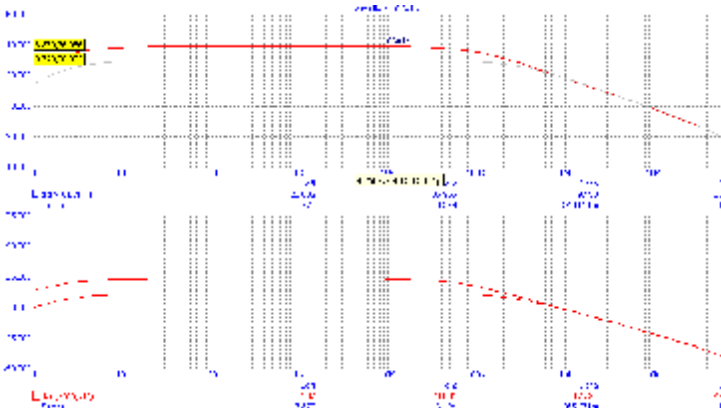


Рисунок 4.43 – Визначення нижньої робочої частоти каскаду з ВЗЗ і без ВЗЗ

Провести аналогічні вимірювання для частотної залежності коефіцієнта підсилення з струму. Переконалися, що розширення смуги пропускання з боку високих частот відбувається у фактор раз F , а з боку низьких частот висновок практично той же самий. Для пояснення поведінки частотних характеристик в ОНЧ необхідно отримати частотні характеристики вхідного опору схеми.

4.3.2.9 Повторно запустити частотний аналіз. Задати параметри аналізу відповідно до рис.4.44.

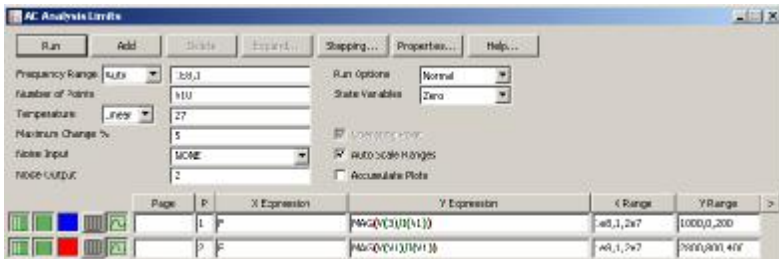


Рисунок 4.44 – Завдання параметрів аналізу вхідного опору схеми

У такому варіанті завдання на першому графіку виводиться частотна залежність модуля вхідного опору самого каскаду (відносно

бази транзистора Q1), а на другому графіку частотна залежність модуля вхідного опору всієї схеми (з урахуванням резистора R1). Отримати частотні характеристики (рис.4.45). Підписати ЛАЧХ.

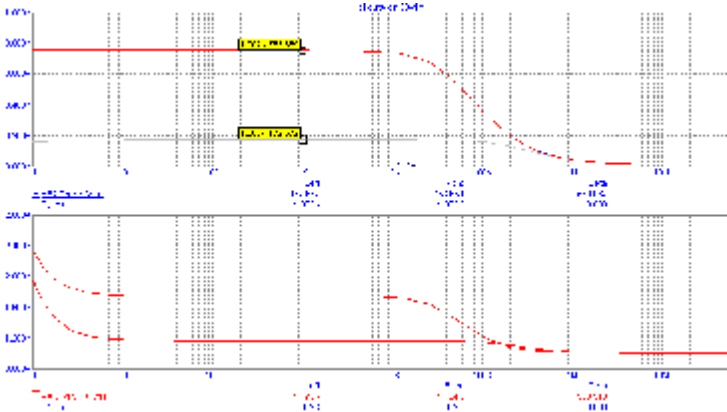


Рисунок 4.45 – Частотні характеристики вхідного опору схеми

З аналізу графіків рис.4.45 впливає наступний фактор впливу зворотного зв'язку на характеристики схеми: **ВЗЗ паралельно – паралельного типу (Y - типу) зменшує вхідний опір схеми. Переконайтеся, що зменшення вхідного опору для першого графіку відбувається у фактор раз F.**

4.3.2.10 Провести гармонічний аналіз схеми. Спочатку проаналізуємо лінійність схеми без ВЗЗ. Встановити значення ємності блокувального конденсатора $C3=1000$ мкФ (ВЗЗ усунуто). Задати параметри гармонічного аналізу відповідно до рис.4.46.

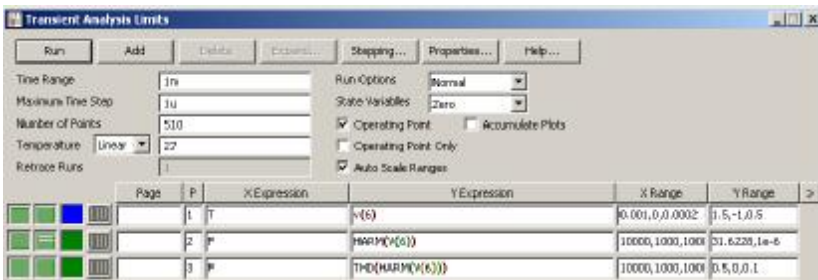


Рисунок 4.46 – Завдання параметрів гармонічного аналізу

Відключити опцію “Stepping”. Отримати епюри вихідного коливання і результати гармонічного аналізу (рис.4.47).

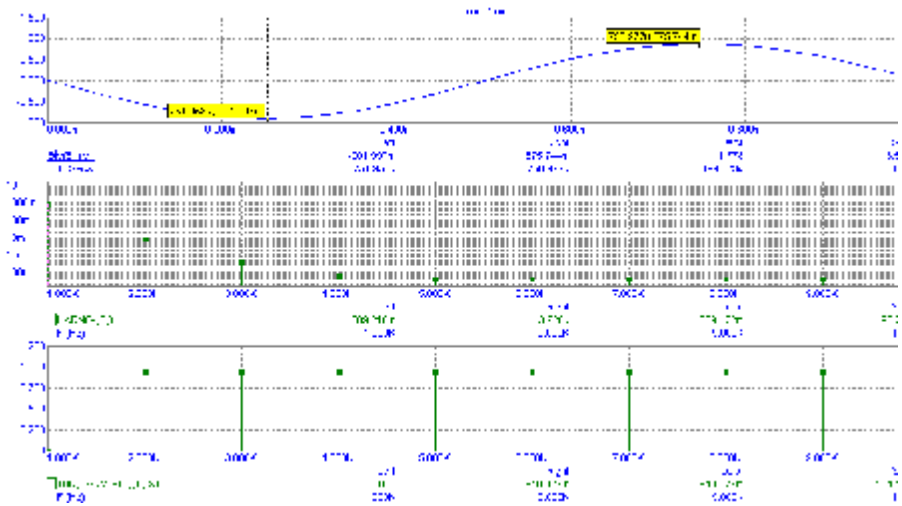


Рисунок 4.47 – Проявлення нелінійних спотворень як асиметрія додатної і від’ємної півхвиль вихідного сигналу

За епюрою вихідного коливання визначити амплітуди додатної і від’ємної півхвиль, а за графіком THD рівень нелінійних спотворень тільки для другої гармоніки і кумулятивне значення для дев’яти гармонік(рис.4.47).

4.3.2.11 Ввести зворотний зв’язок. Для цього встановити ємність блокувального конденсатора С3 рівною 1 пФ. Повторити гармонічний аналіз. Визначити асиметрію додатної і від’ємної півхвиль і значення коефіцієнта нелінійних спотворень тільки для другої гармоніки і кумулятивне значення для дев’яти гармонік. (рис.4.48).

Якщо порівняти значення THD з рис.4.47 і рис. 4.48, то, начебто, можна зробити висновок, що рівень нелінійних спотворень зменшився приблизно у 9 разів. **Як відзначалося у пп. 4.3.1.13, таке порівняння не є повністю коректним, оскільки гармонічний аналіз проводився для принципово різних амплітуд вихідного коливання.**

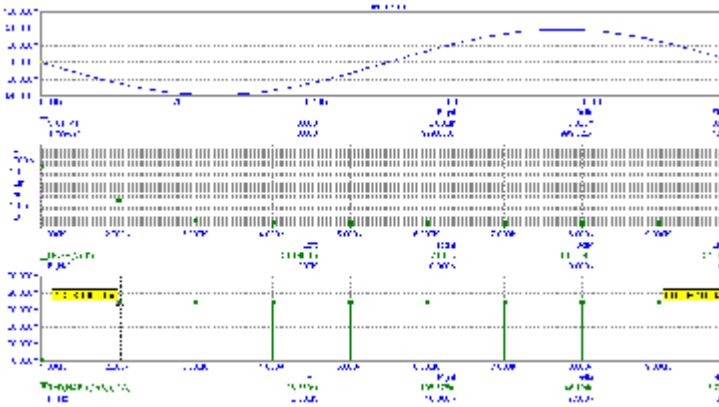


Рисунок 4.48 – Результати гармонічного аналізу схеми з V33

4.3.2.12. Для коректного проведення порівняльного гармонічного аналізу необхідно в схемі з V33 збільшити амплітуду сигналу від вхідного джерела сигналу V1 приблизно у 3 рази, тобто задати параметр A моделі джерела рівним 30 мВ. Таке значення впливає з аналізу графіків рис.4.47 і рис.4.48 зі співвідношення між амплітудами вихідного коливання без V33 і з V33. Повторити гармонічний аналіз для нового значення амплітуди вхідного сигналу. Отримати результати аналізу і відобразити їх у звіті (рис.4.49).

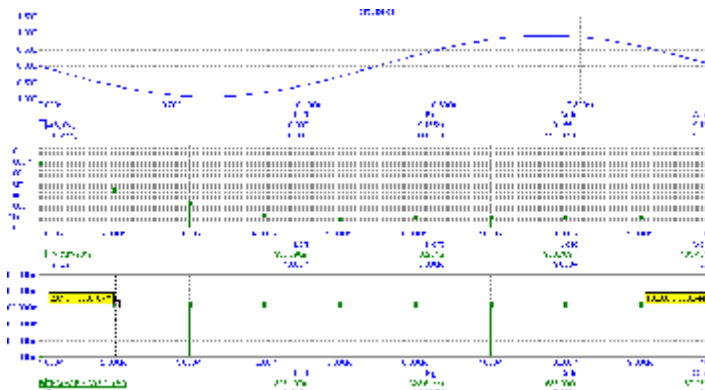


Рисунок 4.49 – Результати гармонічного аналізу схеми з V33 для збільшеного значення амплітуди вхідного сигналу

На підставі аналіз графіків рис.4.49 і рис.4.47 можна зробити висновок, що нелінійні спотворення в схемі з ВЗЗ Y-типу зменшуються у наскрізний фактор раз F_n .

4.3.2.13 Дослідити вплив ВЗЗ Y –типу на вихідний опір. Для визначення вихідного опору схеми за допомогою МС -9.0 (МС – 7.0) необхідно змінити схему дослідження відповідно до рис.4.50.

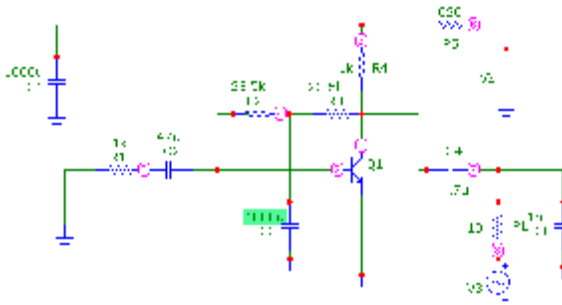


Рисунок 4.50 – Схема для розрахунку вихідного опору

Запустити аналіз у часовій області. Параметри аналізу задати відповідно до рис. 4.51.



Рисунок 4.51 - Завдання на аналіз частотної залежності вихідного опору схеми

Отримати епюри коливань (рис.4.52).

Аналіз графіку для вихідного опору свідчить, що $R_{вих}$ близьке до значення опору колекторного навантаження $R4=1$ кОм (а більш точніше $R_{вих}=R4||r_{ке}||R3$), і проявляє суттєву нелінійність під час проходження екстремумів сигналу джерела V3.

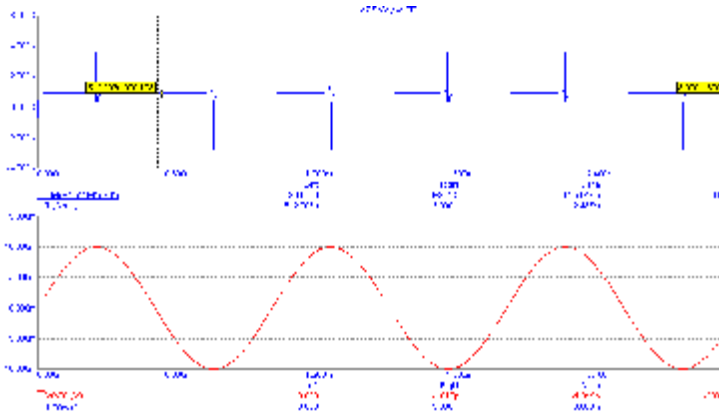


Рисунок 4.52 – Епюри для визначення часової залежності $R_{\text{вих}}$ в схемі без ВЗЗ

Ввести від’ємний зворотний зв’язок. Для цього замінити номінал блокувальної ємності на $C3=1$ пФ. Повторити розрахунок. Отримати епюри коливаль (рис.4.53).

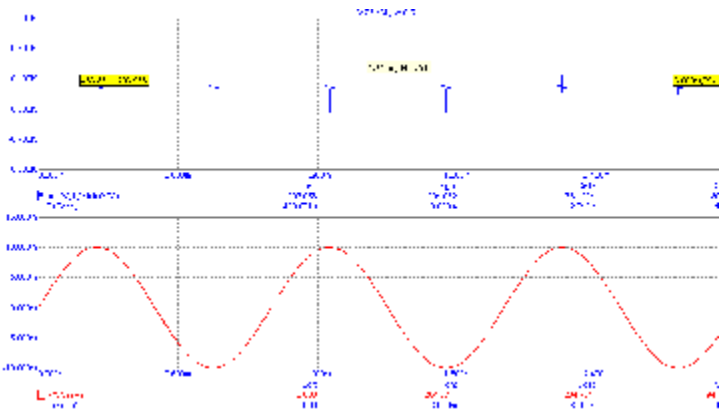


Рисунок 4.53 – Епюри для визначення часової залежності $R_{\text{вих}}$ в схемі з ВЗЗ

Результати розрахунку свідчать, що значення вихідного опору зменшилося приблизно у F_n раз і суттєво зменшилася нелінійність вихідного опору. Висновок: **паралельно-паралельний ВЗЗ зменшує вихідний опір схеми приблизно у F_n раз.**

4.3.3 Дослідження впливу ВЗЗ послідовно- паралельного типу на параметри підсилювачів

4.3.3.1 За допомогою схемного редактора Micro-Cap-9.0 (7.0) побудувати принципову схему багатокаскадного підсилювача з ВЗЗ послідовно- паралельного типу (Н - типу) з номіналами елементів, що наведені на рис. 4.54.

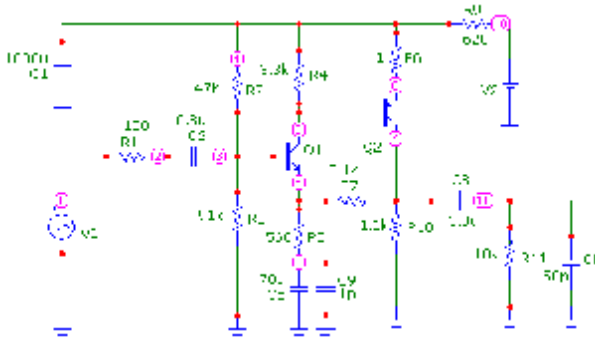


Рисунок 4.54 – Схема двохкаскадного підсилювача з ВЗЗ Н-типу

Звичайно багатокаскадні попередні підсилювачі реалізуються у вигляді двох послідовно включених каскадів зі спільним емітером. Необхідне значення коефіцієнта підсилення з напруги досягається введенням загального ВЗЗ. Елементами чотирьохполюсника зворотного зв'язку виступає подільник з резисторів R7, R5, змінюючи номінальні опори яких можна змінювати коефіцієнт підсилення. Ефект температурної стабілізації досягається завдяки введенню 100% ВЗЗ для постійної складової (коефіцієнт передачі подільника для постійного струму рівняється одиниці, оскільки реактивний опір ємності C5 для сталої складової рівняється нескінченності). Для проведення порівняльного аналізу схеми з ВЗЗ і без ВЗЗ в схему включено блокувальний конденсатор C9, який при коректному виборі номіналу ємності усуває зворотний зв'язок для сигнальної складової, що дозволяє проводити порівняння схем з ВЗЗ і без ВЗЗ при однаковому режимі каскаду для постійної складової.

Як джерело сигналу задати джерело гармонічної напруги типу “GENERAL” амплітудою $A=10$ мВ, частотою 1 кГц, внутрішнім опором $R_s=1$ Ом.

4.3.3.2 Провести нумерацію вузлів схеми і визначити параметри режиму каскаду за постійним струмом (режим аналізу “Dynamic DC”). Зафіксувати значення і полярність напруги у вузлах схеми, перевірити режим на лінійність (рис.4.55). Отримати значення струмів що характеризують точку спокою транзисторів Q1 і Q2 (рис.4.56).

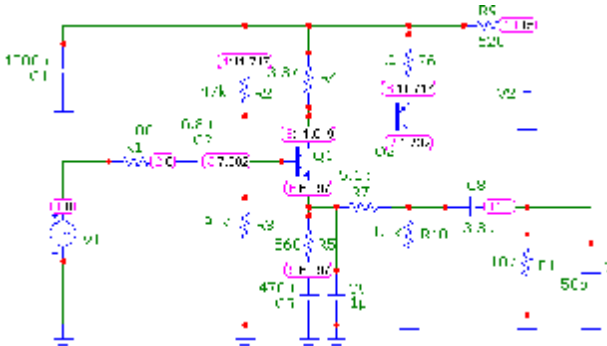


Рисунок 4.55 – Карта режиму з постійного струму

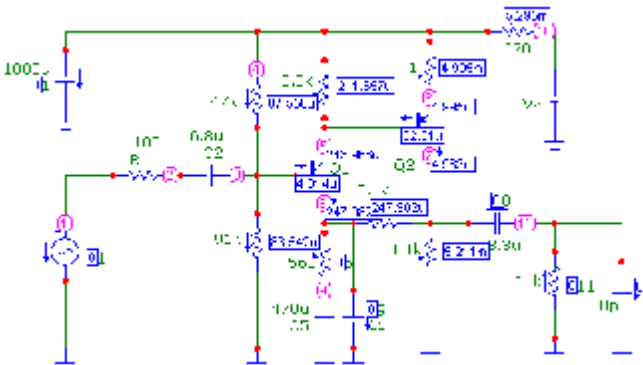


Рисунок 4.56 - Карта струмів для робочої точки

4.3.3.3 Перевірити ефективність термостабілізації, яка відбувається завдяки 100% ВЗЗ Н- типу (коефіцієнт передачі подільника R7, R5, C5 для сталої складової рівняється 1). Повторити аналіз режиму з постійної складової для значень температури $T=+50^{\circ}\text{C}$. і $T=-50^{\circ}\text{C}$. Зафіксувати відповідні значення напруги на

колекторі і колекторного струму. Розрахувати температурну нестабільність колекторного струму згідно з (4.1)

4.3.3.4 Повернути температуру середовища до $+27^{\circ}$. Провести перевірку працездатності схеми. Запустити аналіз схеми у часовій області (Transient). Завдання на аналіз задати відповідно до рис. 4.57.

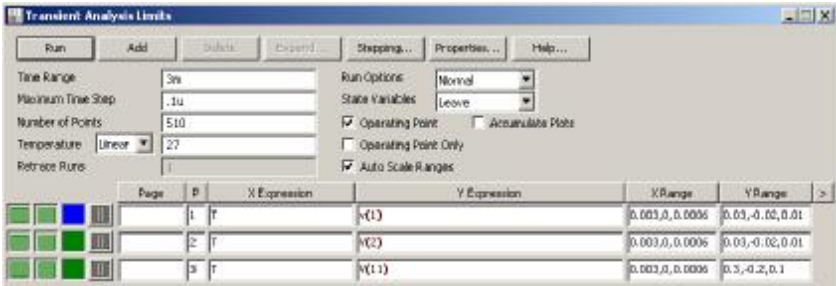


Рисунок 4.57 – Завдання на аналіз у часовій області

Отримати результати розрахунку у вигляді відповідних осцилограм (рис.4.58). Відобразити епюри у звіті.

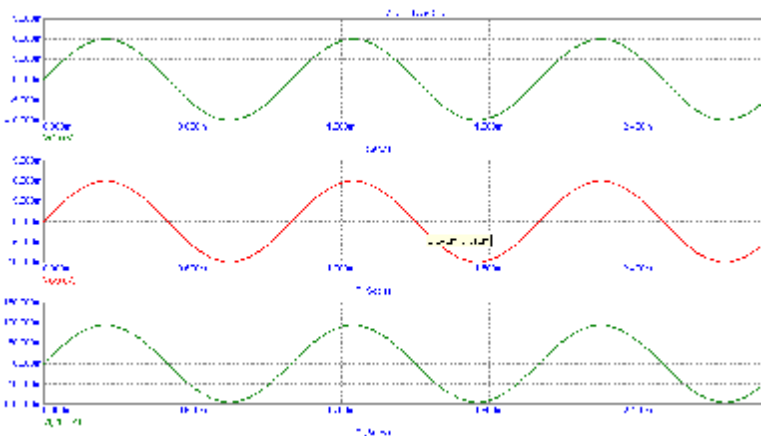


Рисунок 4.58 – Епюри коливань у контрольних точках схеми

Звернути увагу на другий графік. Зміна рівню сигналу у вхідному колі каскаду практично не відбувається, що свідчить про достатньо велике значення вхідного опору схеми, тобто коефіцієнт

передачі подільника у вхідному колі $K_{вх}=R_{вх}/(R_1+R_{вх})$ наближається до одиниці. Також звернути увагу на фазу вихідного коливання.

4.3.3.5 За отриманими графіками розрахувати наскрізний коефіцієнт підсилення схеми (аналогічно до пп. **4.3.1.8**).

4.3.3.6 Дослідити вплив ВЗЗ на частотні характеристики схеми. Запустити режим аналізу схем в частотній області АС. Задати параметри аналізу відповідно до рис.4.59.

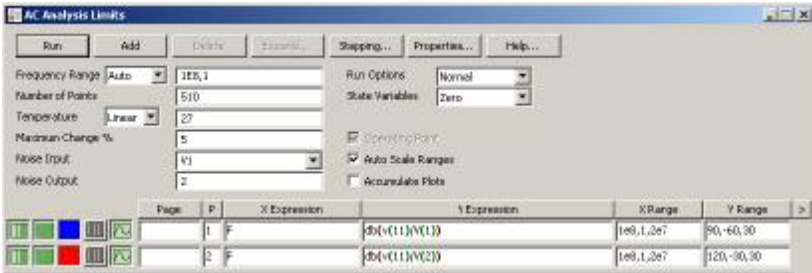


Рисунок 4.59 – Завдання параметрів аналізу в частотній області

Активізувати опцію “Stepping” і задати зміну ємності блокувального конденсатора C9 відповідно до рис.4.60.

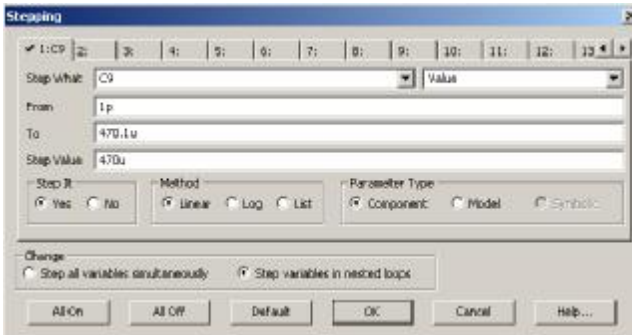


Рисунок 4.60 – Завдання покрокової зміни ємності блокувального конденсатора C9

Для значення ємності $C9=1$ пФ в схемі діє ВЗЗ як для сигнальної, так і для постійної складової, а для $C9=470$ мкФ

залишається ВЗЗ тільки для постійної складової. Отримати частотні характеристики. Підписати ЛАЧХ (рис.4.61).

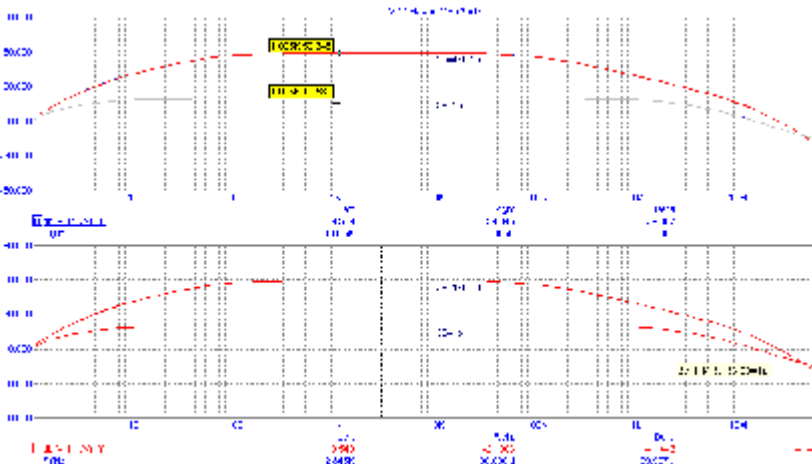


Рисунок 4.61 – ЛАЧХ схеми з ВЗЗ ($C_9=1$ пФ) і без ВЗЗ ($C_9=470$ мкФ)

За допомогою курсору визначити максимальні значення наскрізного коефіцієнта підсилення з напруги (перший графік) і коефіцієнта підсилення схеми (без врахування резистора R1) у смузі пропускання. Аналіз графіків свідчить, що результати вимірювань для обох графіків практично збігаються.

Як видно з аналізу графіків ЛАЧХ введення ВЗЗ Н-типу зменшує коефіцієнт підсилення з напруги. Різниця між максимальними значеннями ЛАЧХ характеризує глибину зворотного зв'язку в схемі.

4.3.3.7 Визначити вплив ВЗЗ на смугу пропускання. За допомогою курсору визначити значення верхньої (рис.4.62) і нижньої (рис.4.63) робочих частот за ЛАЧХ наскрізного коефіцієнта підсилення без ВЗЗ і каскаду з ВЗЗ

Аналіз значень f_b , f_n свідчить, що ВЗЗ Н – типу розширює смугу пропускання як з боку низьких частот, так і з боку високих частот, але розширення смуги пропускання відбувається у число менше за фактор ВЗЗ. Пояснити відмінність результатів.

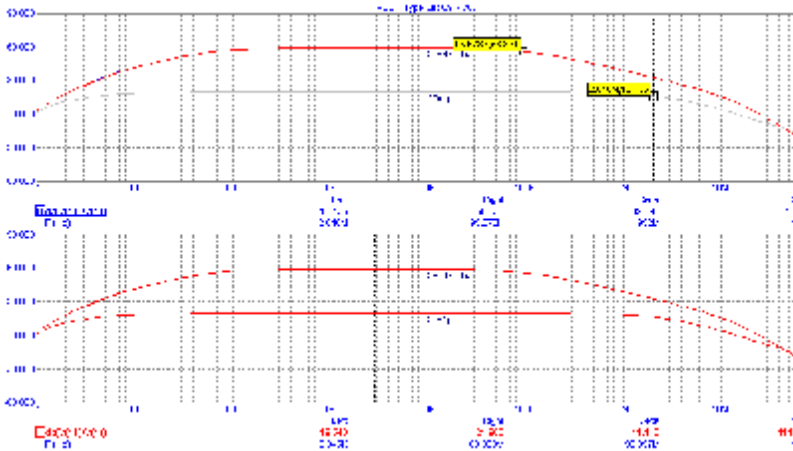


Рисунок 4.62 – Визначення верхньої робочої частоти схеми з V33 і без V33

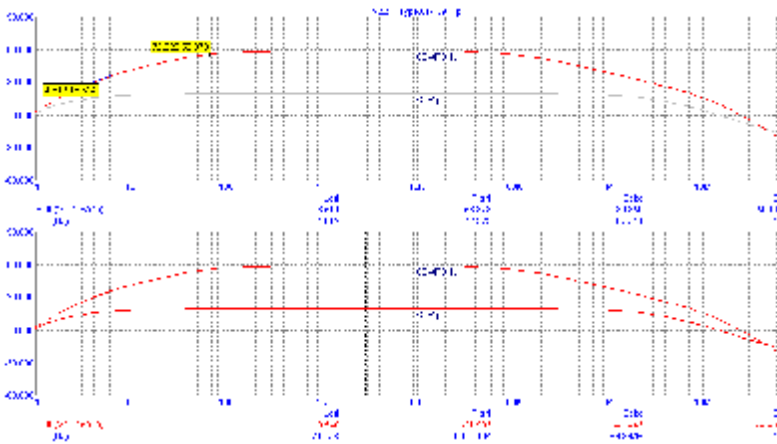


Рисунок 4.63 – Визначення нижньої робочої частоти схеми з V33 і без V33

4.3.3.8 Дослідити вплив V33 Н-типу на вхідний опір. Повторно запустити частотний аналіз. Задати параметри аналізу відповідно до рис.4.64. У такому варіанті завдання на першому графіку виводиться частотна залежність вхідного опору відносно входу схеми, а для другого графіку частотна залежність модуля вхідного опору відносно бази транзистора Q1.



Рисунок 4.64 – Завдання на аналіз частотної залежності вхідного опору

Отримати частотні характеристики і підписати їх (рис.4.65).

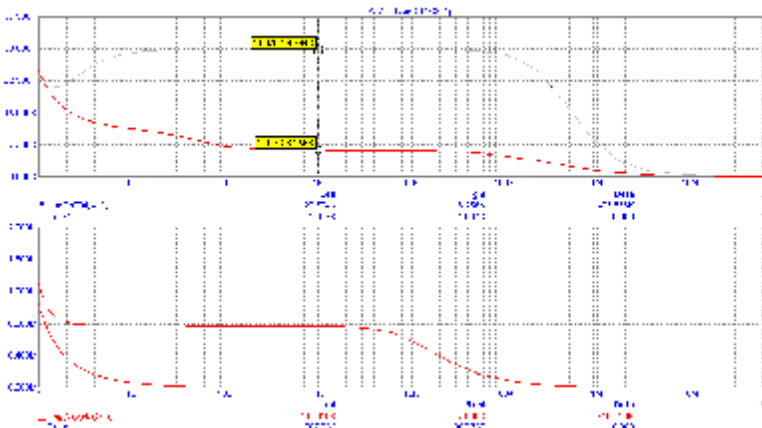


Рисунок 4.65 – Частотні характеристики вхідного опору схеми з V33 і без V33

Якщо проаналізувати перший графік, то очевидно, що для схеми з V33 відбувається збільшення вхідного опору, але не у фактор раз ($F \approx 40 \text{ dB} \approx 100$), а у набагато менше значення. У той же час збільшення вхідного опору відносно бази Q1 на другому графіку свідчить, що вхідний опір збільшився у фактор раз. Обмежуючим фактором щодо збільшення вхідного опору схеми з V33 виступає подільник з резисторів R2, R3, який забезпечує початкове зміщення транзистора Q1. Дійсно, подільник виступає зовнішнім елементом, який не включається у контур зворотного зв'язку. Відповідно він формує для вхідного кола опір

$$R_{\text{под}} = R2 \parallel R3 = \frac{R2 \cdot R3}{R2 + R3} = \frac{47 \cdot 91}{47 + 91} \approx 31 [\text{кОм}],$$

який практично і визначає вхідний опір схеми в цілому.

Висновок: ВЗЗ послідовно-паралельного типу (Н-типу) збільшує вхідний опір у фактор раз, але результуюче значення вхідного опору може обмежуватися схемою зміщення.

4.3.3.9 Провести дослідження впливу ВЗЗ Н-типу на коефіцієнт підсилення зі струму. Повторно запустити частотний аналіз. Задати параметри аналізу відповідно до рис.4.66.



Рисунок 4.66 – Завдання на аналіз частотної характеристики K_i

Отримати частотні характеристики і відобразити їх у звіті (рис.4.67).

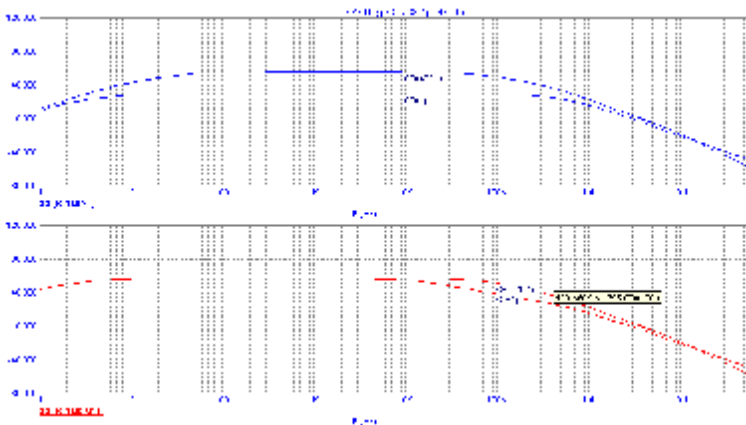


Рисунок 4.67 – Частотні характеристики коефіцієнта підсилення зі струму

Аналіз частотних залежностей на другому графіку свідчить, що ВЗЗ послідовно-паралельного типу не змінює коефіцієнта підсилення зі струму (розбіжність графіків у ОВХ пояснюється частотною залежністю вихідного опору схеми).

4.3.3.10 Провести гармонічний аналіз схеми. Спочатку проаналізуємо лінійність схеми з ВЗЗ. Встановити значення ємності блокувального конденсатора $C3=1$ пФ (ВЗЗ введено). Задати параметри гармонічного аналізу відповідно до рис.4.68.

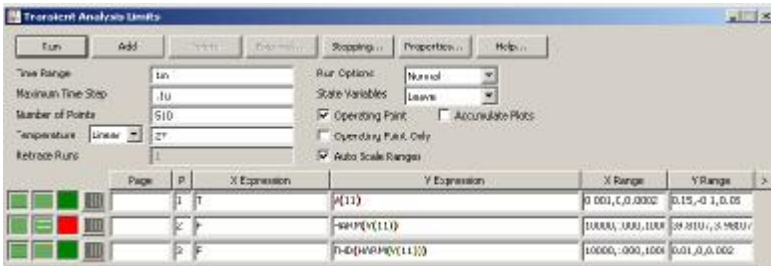


Рисунок 4.68 – Завдання параметрів гармонічного аналізу з включенням ВЗЗ

Відключити опцію “Stepping”. Отримати епюри вихідного колювання і результати гармонічного аналізу (рис.4.69).

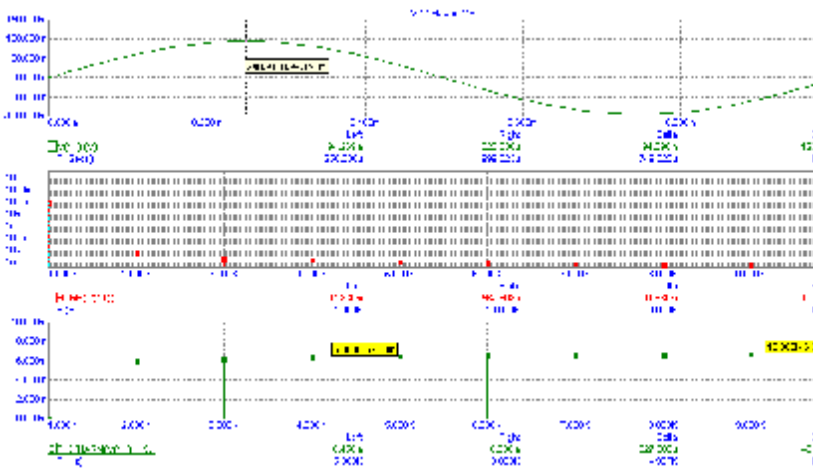


Рисунок 4.69 – Результати гармонічного аналізу схеми з ВЗЗ

За епюрою вихідного коливання визначити амплітуди додатної і від'ємної півхвиль, а за графіком THD рівень нелінійних спотворень тільки для другої гармоніки і кумулятивне значення для дев'яти гармонік.

4.3.3.11 Усунути зворотний зв'язок за змінною складовою. Для цього встановити ємність блокувального конденсатора С9 рівною 470 мкФ. Оскільки коефіцієнт підсилення з напруги без ВЗЗ стає у фактор раз більший ($F=40$ дБ), то для проведення порівняльного гармонічного аналізу схем з ВЗЗ і без ВЗЗ при однаковому рівні вихідного сигналу необхідно зменшити амплітуду вхідного сигналу у фактор раз, тобто задати параметр А джерела **V1** рівним **0,1 мВ**. Повторити гармонічний аналіз. Визначити асиметрію додатної і від'ємної півхвиль і значення коефіцієнта нелінійних спотворень тільки для другої гармоніки і кумулятивне значення для дев'яти гармонік. (рис.4.70).

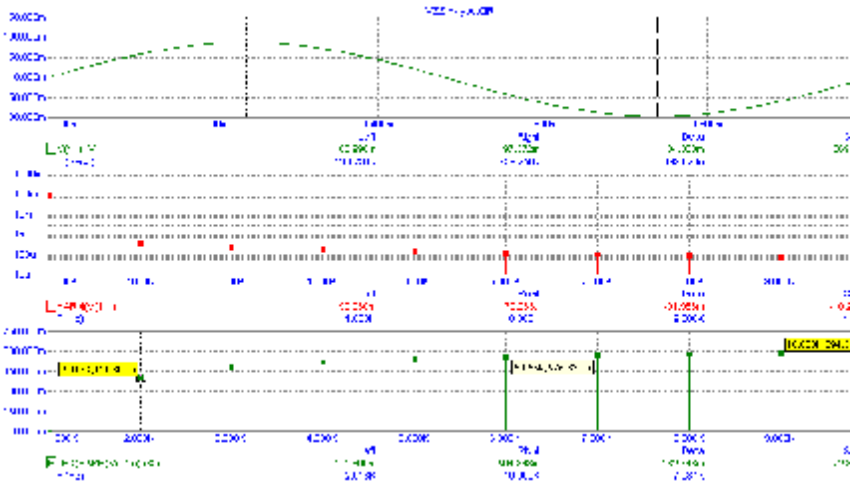


Рисунок 4.70 – Результати гармонічного аналізу схеми без ВЗЗ

На підставі аналіз графіків рис. 4.69 і рис.4.70 можна зробити висновок, що нелінійні спотворення в схемі з ВЗЗ Н-типу зменшуються приблизно у фактор раз F .

4.3.3.12 Дослідити вплив ВЗЗ Н –типу на вихідний опір. Для визначення вихідного опору схеми необхідно змінити схему дослідження відповідно до рис.4.71.

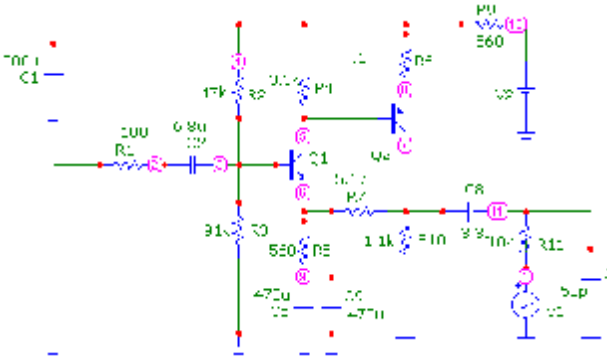


Рисунок 4.71 – Схема для розрахунку вихідного опору

Запустити аналіз у часовій області. Параметри аналізу задати відповідно до рис. 4.72.

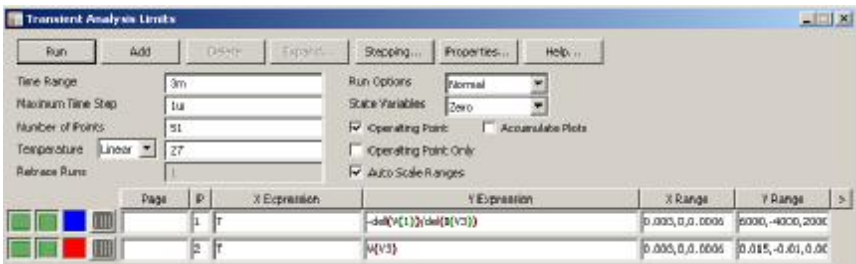


Рисунок 4.72 - Завдання на аналіз частотної залежності вихідного опору схеми

Отримати епюри коливань (рис.4.73).

Аналіз графіку для вихідного опору свідчить, що $R_{\text{вих}}$ в схемі без ВЗЗ близьке до значення опору колекторного навантаження $R4=1,1 \text{ кОм}$ (а більш точніше $R_{\text{вих}}=R4||r_{\text{ке}}||R3$), і проявляє суттєву нелінійність під час проходження максимумів сигналу джерела V1.

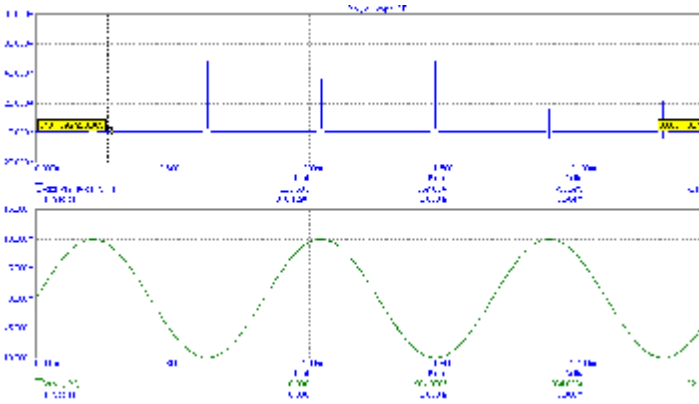


Рисунок 4.73 – Епюри для визначення часової залежності $R_{\text{вих}}$ в схемі без ВЗЗ

Ввести від’ємний зворотний зв’язок. Для цього замінити номінал блокувальної ємності на $C9=1$ пФ. Повторити розрахунок. Отримати епюри коливань (рис.4.74).

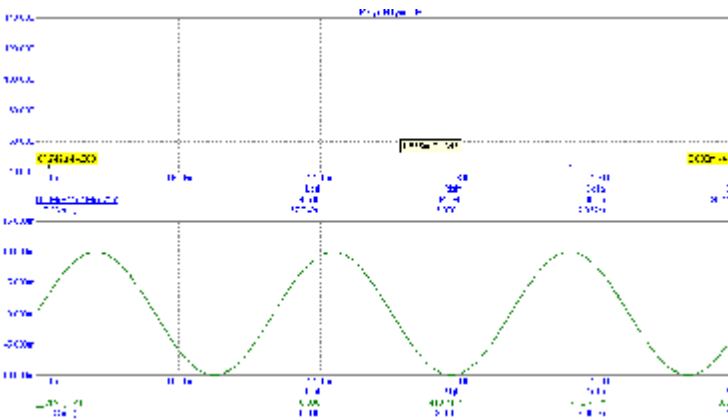


Рисунок 4.74 – Епюри для визначення часової залежності $R_{\text{вих}}$ в схемі з ВЗЗ

Результати розрахунку свідчать, що значення вихідного опору зменшилося приблизно у F раз і суттєво зменшилася нелінійність вихідного опору. Висновок: **послідовно-паралельний ВЗЗ зменшує вихідний опір схеми приблизно у F фактор раз.**

4.4 Зміст звіту

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

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


4.4.3 Висновки за результатами роботи.


4.5 Контрольні запитання


1. Які типи електронних компонентів дозволяє використовувати Micro-Cap-9.0 (7.0)?


2. Як будується принципова схема у форматі Micro-Cap-9.0 (7.0)?

3. Які методи аналізу схем з постійного струму використовуються в Micro-Cap-9.0 (7.0)?

4. Яке функціональне призначення кнопки  в режимі аналізу з постійного струму?

5. Яке функціональне призначення кнопки  в режимі аналізу з постійного струму?

6. Яке функціональне призначення кнопки  в режимі аналізу з постійного струму?

7. Яке функціональне призначення кнопки  в режимі аналізу з постійного струму?

8. Який сенс мають параметри **A**, **F**, **RS** для джерела сигналу гармонічної напруги?

9. Яке призначення параметра **Time Range** в режимі аналізу перехідних процесів?

10. Яке призначення параметра **Maximum Time Step** в режимі аналізу перехідних процесів?

11. Яке призначення параметра **Number of Points** в режимі аналізу перехідних процесів?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

Дослідження характеристик джерел стабільного струму

Мета роботи – закріпити знання з розділу курсу „Методи машинного аналізу електронних схем”, експериментально дослідити можливості програм схемотехнічного моделювання для аналізу основних характеристик джерел стабільного струму (ДСС).

5.1 Прилади, що використовуються в роботі

Практикум реалізовано шляхом комп’ютерного моделювання на персональному комп’ютері за допомогою Micro-Cap-9.0 (7.0).

5.2 Підготовка до роботи

5.2.1 Вивчити розділ курсу „Методи машинного аналізу електронних схем”.

5.2.2 Ознайомитись з принципами схемотехнічної реалізації джерел стабільного струму (ДСС).

5.3 Експериментальна частина

5.3.1 Дослідження найпростішого варіанту ДСС

5.3.1.1 За допомогою схемного редактора побудувати принципову схему джерела стабільного струму з номіналами елементів, що наведені на рис. 5.1 (номінали елементів і напруга живлення відповідають схемі лабораторного стенду з дисципліни “ППС”).

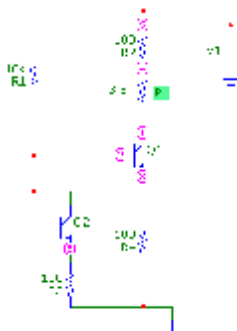


Рисунок 5.1 – Схема джерела стабільного струму

Схемотехнічно цей каскад можна розглядати як каскад зі спільним емітером (СЕ), в якому реалізовано термостабілізацію завдяки

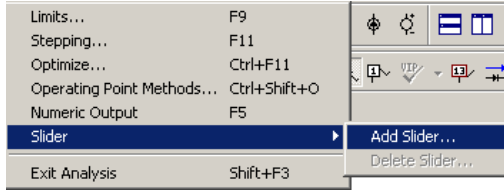


Рисунок 5.3 – Активація опції Slider

Після цього з'явиться вікно в якому необхідно задати елемент, номінал якого буде змінюватися (Parameter – RL), а також мінімальне 0 Ом і максимальне значення опору навантаження -10 кОм. Також задати крок зміни опору у відсотках від номінального значення (Step Percentage Step Size – 0,001%) (рис.5.4).



Рисунок 5.4 – Завдання параметрів зміни опору резистора

Натиснути кнопку ОК. У правому верхньому куті екрану з'явиться панель у вигляді потенціометра з повзунком (рис.5.5).



Рисунок 5.5 – Реалізація потенціометра в Micro-Cap-9.0 (7.0)

Змінюючи положення повзунка від мінімально можливого до максимального у 8...10 точках зафіксувати відповідні значення опору RL і значення струму через опір навантаження I_{RL} . Побудувати залежність $I_{RL} = f(RL)$.

5.3.1.5 За допомогою схемного редактора Micro-Cap-9.0 (7.0) побудувати принципову схему джерела стабільного струму (струмове дзеркало) з номіналами елементів, що наведені на рис. 5.6. Провести нумерацію вузлів схеми.



Рисунок 5.6 – Схема струмового дзеркала

Задати параметри джерела постійного струму П1 (рис.5.7).

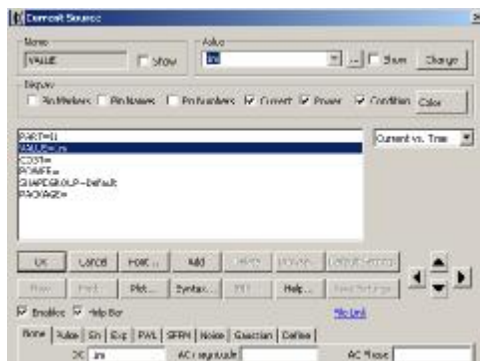


Рисунок 5.7 – Завдання параметрів джерела струму

5.3.1.6 Запустити режим аналізу DC. У відкритшомуся вікні (рис.5.8) у графі Name задати ім'я джерела, яке буде змінюватися – П1,

а у графі Range задати максимальне і мінімальне значення – відповідно 10 мА і 0,0001 мА з кроком зміни 0,5 мА.

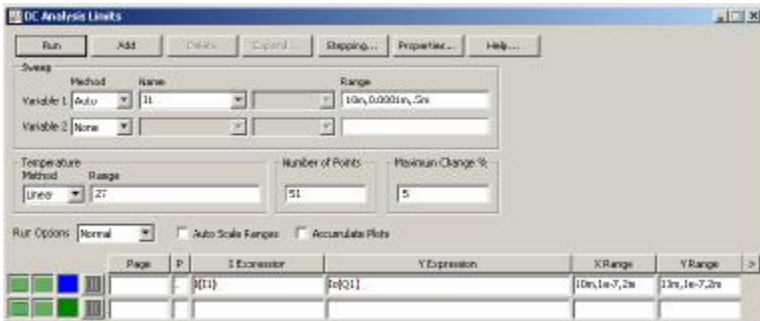


Рисунок 5.8 – Завдання параметрів джерела струму

У колонці X Expression задати значення струму джерела I1, а у колонці Y Expression струм колектора транзистора Q1 (він же і виступає струмом через навантаження I_{RL}).

Натиснути кнопку Run. Отримати графічну залежність (рис.5.9).

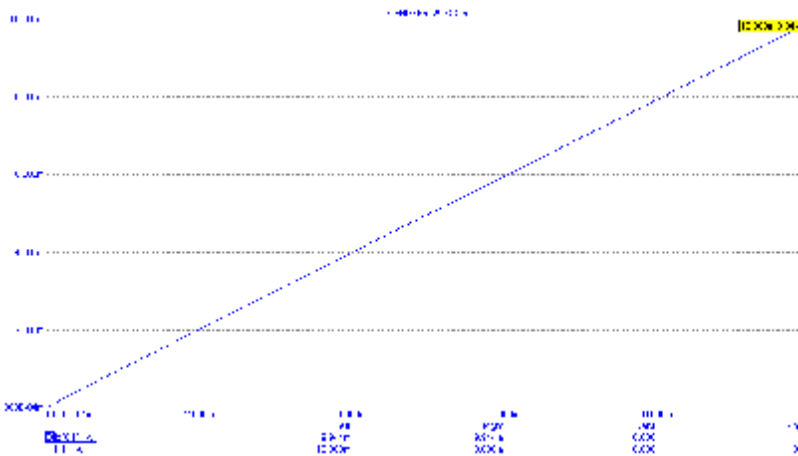


Рисунок 5.9 – Залежність струму у навантаженні від задавального струму

Встановивши курсор у положення, яке відповідає максимальному значенню струму визначити розбіжність між струмом у навантаженні і струмом І1:

$$\Delta = \left| \frac{I(\Pi)_{\max} - I_c(Q1)_{\max}}{I(\Pi)_{\max}} \cdot 100\% \right| \quad (5.1)$$

4.3.1.7 Замінити опір навантаження на R2=1 кОм. Повторити аналіз. Отримати графічну залежність і визначити відсоткову розбіжність струмів.

4.3.1.8 Перевірити можливість масштабування струму у навантаженні. Змінити номінал резистора в емітері Q1 на R4=200 Ом. Отримати графічну залежність. Порівняти з результатами попереднього підпункту.

5.3.1.9 За допомогою схемного редактора Micro-Cap-9.0 (7.0) побудувати принципову схему струмового дзеркала Уілсона з номіналами елементів, що наведені на рис. 5.10. Провести нумерацію вузлів схеми.

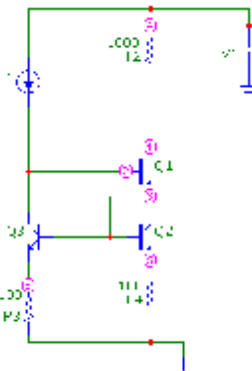


Рисунок 5.10 – Схема струмового дзеркала Уілсона

Запустити режим аналізу DC. Параметри аналізу задати відповідно до рис.5.11.

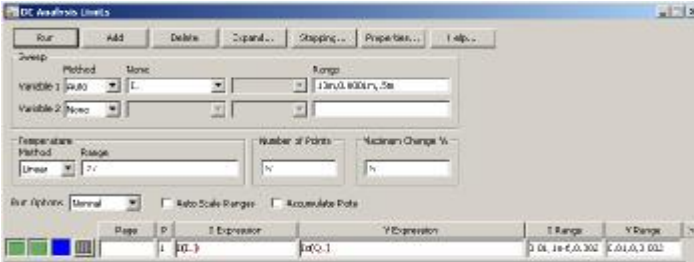


Рисунок 5.11 – Завдання параметрів аналізу

Отримати графічну залежність. Для максимального значення струму визначити розбіжність між струмом у навантаженні і струмом задавального кола Ізгідно з (5.1). Порівняти розбіжність струмів з результатами пп.5.3.1.6.

5.4 Зміст звіту

5.4.1 Схеми каскадів, що досліджуються. Схеми можливо наводити у форматі, який використовується в програмі MS-9.0 (7.0) .

5.4.2 Результати експериментальних досліджень у вигляді таблиць і осцилограм (епюр, отриманих за допомогою MS-9.0 (7.0)).

5.4.3 Висновки за результатами роботи.

5.5 Контрольні запитання

1. Яким виразом визначається коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача?

2. Пояснити відмінність результатів моделювання за пунктами **5.3.1.7, 5.3.1.8**, від ідеальних (характерних для ідеального ОП).

3. З яким коефіцієнтом передачі передається до виходу напруга зміщення ОП?

4. Як впливає коефіцієнт підсилення ОП на $K_{U_{33}}$ неінвертуючого підсилювача?

5. Як компенсується похибка роботи від напруги зміщення і вхідних струмів ОП для неінвертуючого підсилювача?

6. Яким виразом визначається вхідний опір неінвертуючого підсилювача?

7. Яким виразом визначається вихідний опір неінвертуючого підсилювача?

8. Яким виразом визначається коефіцієнт підсилення інвертуючого підсилювача?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

Дослідження характеристик диференціального каскаду

Мета роботи – закріпити знання з розділу курсу „Методи машинного аналізу електронних схем”, експериментально дослідити можливості програм схмотехнічного моделювання для аналізу основних характеристик диференціального каскаду.

6.1 Прилади, що використовуються в роботі

Практикум реалізовано шляхом комп’ютерного моделювання на персональному комп’ютері за допомогою програми схмотехнічного моделювання Micro-Cap-9.0 (7.0).

6.2 Підготовка до роботи

6.2.1 Вивчити розділ курсу „Методи машинного аналізу електронних схем”.

6.2.2 Ознайомитись з принципами схмотехнічної реалізації диференціальних каскадів (ДК)

6.3 Експериментальна частина

6.3.1 Дослідження ДК з пасивним навантаженням

6.3.1.1 За допомогою схемного редактора Micro-Cap-9.0 (7.0) побудувати принципову схему ДК з номіналами елементів, що наведені на рис. 6.1. Як джерело сигналу задати джерело гармонічної напруги типу “GENERAL” амплітудою $A=1$ мВ, частотою 1 кГц, внутрішнім опором $R_s=1$ Ом. Провести нумерацію вузлів схеми.

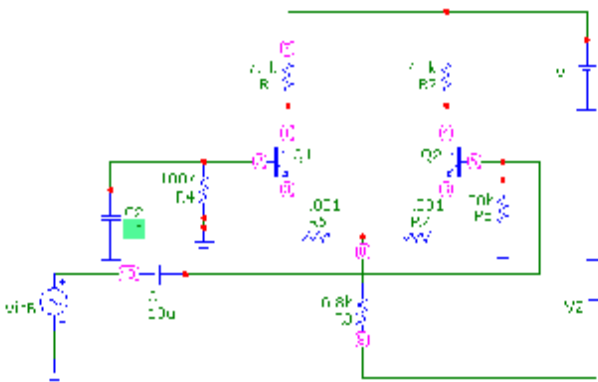


Рисунок 6.1 – Схема класичного диференціального каскаду

6.3.1.2 Визначити параметри режиму каскаду за постійним струмом (режим аналізу “Dynamic DC”). Зафіксувати значення і полярність напруги у вузлах схеми, перевірити режим на лінійність (рис.6.2).

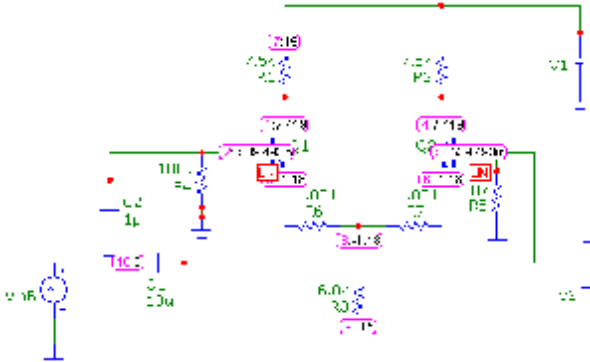


Рисунок 6.2 – Карта напруг у робочій точці

Отримати значення струмів що характеризують точку спокою транзисторів Q1 і Q2 (рис.6.3).

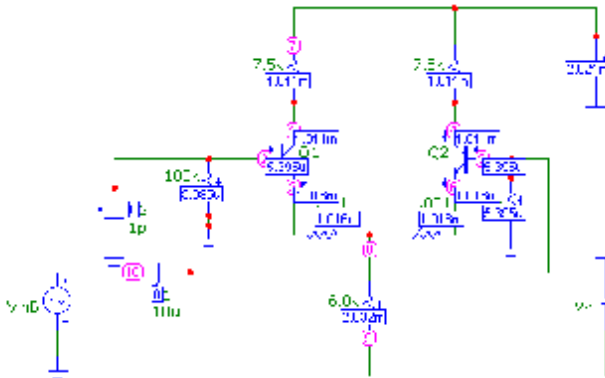


Рисунок 6.3 – Карта струмів у робочій точці

6.3.1.3 Провести перевірку працездатності схеми. Запустити аналіз схеми у часовій області (Transient). Завдання на аналіз задати відповідно до рис. 6.4.

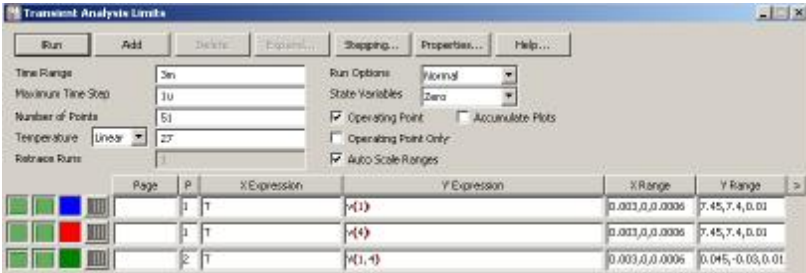


Рисунок 6.4 – Завдання параметрів аналізу у часовій області

Отримати епюри коливань і відобразити їх у звіті (рис.6.5).

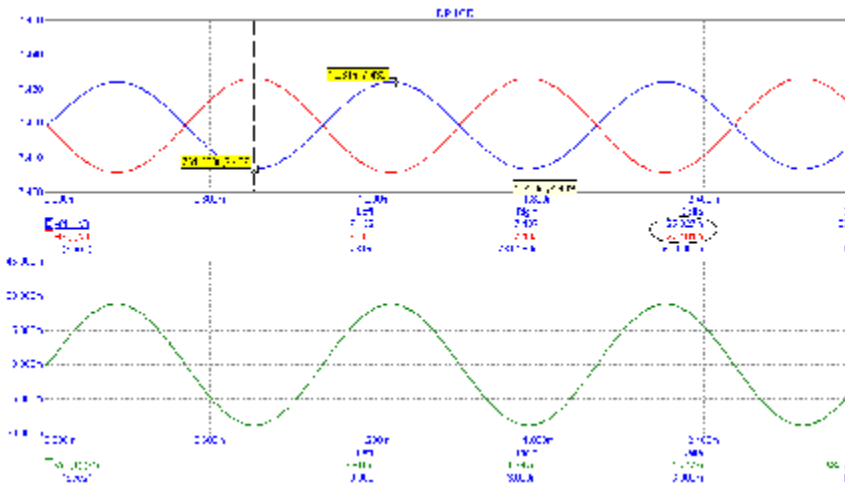


Рисунок 6.5 – Епюри коливань у контрольних точках схеми

Аналіз коливань на першому графіку свідчить, що на колекторах транзисторів Q1, Q2 ДК формуються однакові за амплітудою, але проіфазні коливання (розмах коливань можна визначити за допомогою правого і лівого курсору для екстремальних значень за період у колонці Delta графіку). Розбіжність в амплітуді приблизно у 1 мВ є проявленням нелінійних спотворень у ДК.

Переключити курсори на другий графік. Переконайтеся, що амплітуда коливання між колекторами (симетричний вихід каскаду) у

два рази більша порівняно з несиметричним виходом з колектора кожного транзистора.

Розрахувати коефіцієнт підсилення з напруги для несиметричного виходу ДК. Порівняти його з теоретичним виразом

$$K_{U_{I(II)}} = \frac{U_{V1(V4)}}{U_{V_{in}}} \approx \frac{S_0 R_K}{2}$$

Пояснити суттєву відмінність результатів від теоретичних.

6.3.1.4 Змінити номінал ємності конденсатора C2 на C2=10 мкФ. Тільки тепер схему можна розглядати як диференціальний каскад, оскільки джерело сигналу V_{inB} у разі наявності блокувального конденсатора C2 для змінної складової підключається безпосередньо між базами транзисторів диференціальної пари. Повторити аналіз у часовій області (рис.6.6).

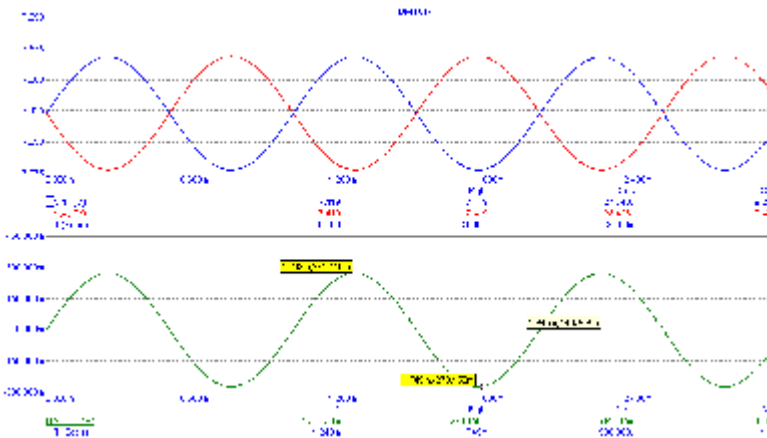


Рисунок 6.6 – Епюри коливань у контрольних точках за наявності блокувального конденсатора C2

Визначити коефіцієнти підсилення ДК для несиметричного і симетричного виходів. Порівняти з результатами попереднього у пп.6.3.1.3. і теоретичними результатами.

6.3.1.5. Провести гармонічний аналіз схеми. Завдання на аналіз задати відповідно до рис.6.7.



Рисунок 6.7 – Завдання гармонічного аналізу схеми ДК

Отримати епюри коливань результати аналізу (рис.6.8).

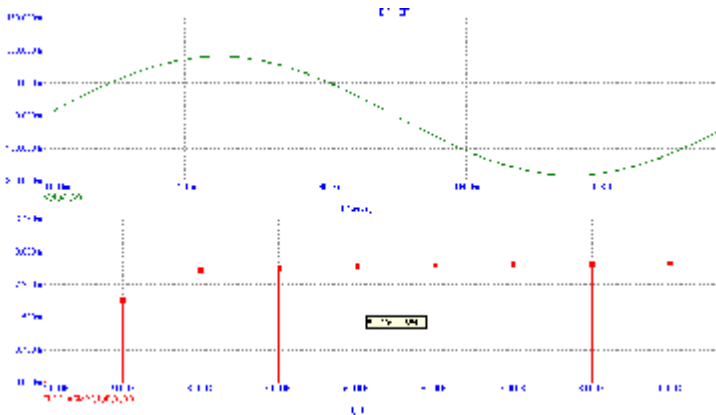


Рисунок 6.8 – Результати гармонічного аналізу ДК з пасивним навантаженням

Порівняти результати гармонічного аналізу з результатами отриманими для каскаду СЕ без зворотного зв'язку **п.4.3.1.14** (рис.4.20) (приблизно однаковий розмах вихідної напруги) і каскаду СЕ з ВЗЗ Z-типу при меншому розмаху вихідної напруги (рис.4.21). Зробити висновок.

6.3.1.6 . Збільшити амплітуду вхідної напруги до $V_{inB}=40$ мВ. Повторити аналіз у часовій області. Завдання на аналіз задати відповідно до рис.6.7.Отримати епюри коливань і відобразити їх у звіті (рис.6.9).

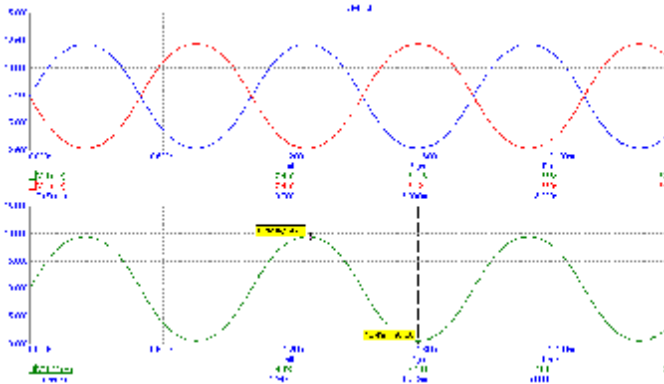


Рисунок 6.9– Елюри коливань при збільшенні вхідної напруги

Визначити коефіцієнти підсилення ДК для несиметричного і симетричного виходів. Порівняти з результатами **пп.6.3.1.5**.

6.3.1.7 Дослідити поведінку ДК в режимі великого сигналу. Висновки попереднього підpunkту стосовно зміни коефіцієнта підсилення під час збільшення амплітуди вхідного сигналу можна продемонструвати наступним експериментом.

Змінити схему дослідження. Вилучити зі схеми джерело вхідного сигналу гармонічної напруги і конденсатор C2. Між базами транзисторів Q1, Q2 підключити джерело постійної напруги V3 з нульовим значенням е.р.с (рис.6.10).

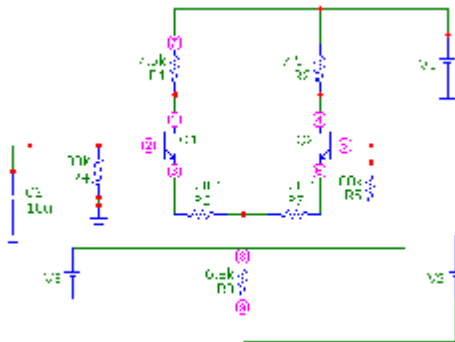


Рисунок 6.10– Схема ДК для аналізу в режимі великого сигналу

Запустити режим аналізу DC. Параметри аналізу задати відповідно до рис.6.11. Згідно з таким завданням задається зміна напруги джерела постійного струму у межах від -120 мВ до +120 мВ з кроком 4 мВ. На графік виводяться залежності струмів колектора транзисторів Q1, Q2 від вхідної диференціальної напруги.

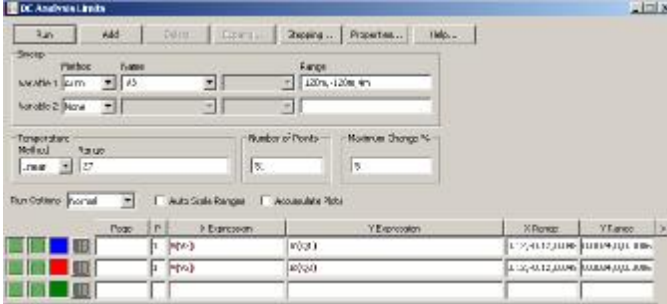


Рисунок 6.11– Завдання параметрів аналізу

Отримати характеристики і відобразити їх у звіті. Визначити діапазон лінійної роботи ДК (рис.6.12).

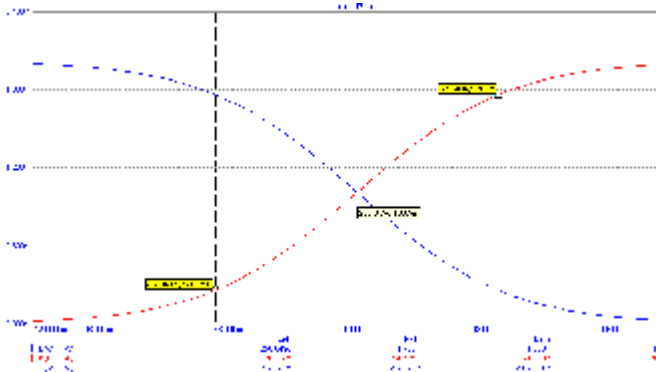


Рисунок 6.12– Характеристики ДК в режимі великого сигналу

6.3.1.8 Ввести в схему ДК місцевий зворотний зв'язок Z-типу.

Для цього задати опори резисторів рівними $R_6=R_7=75 \text{ Ом}$. Повторити

режим аналізу DC. Отримати відповідні графіки (рис.6.13). Визначити діапазон лінійної роботи ДК і порівняти з результатами пп.6.3.1.7.

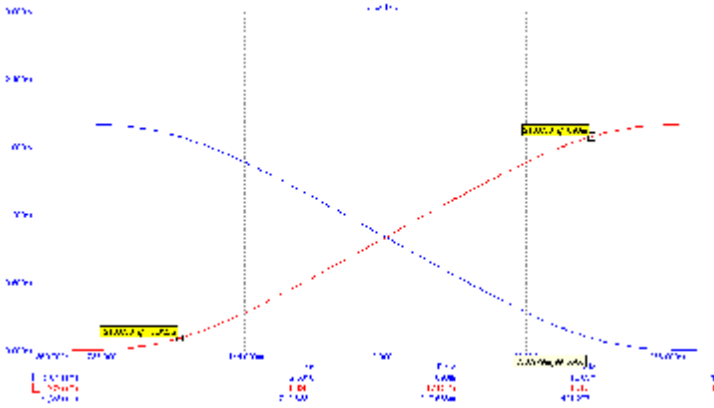


Рисунок 6.13– Характеристики ДК з місцевим ВЗЗ в режимі великого сигналу

6.3.1.9 Повернути схему до початкового варіанту в режимі підсилення диференціального сигналу, але залишити місцевий ВЗЗ (рис.6.14).

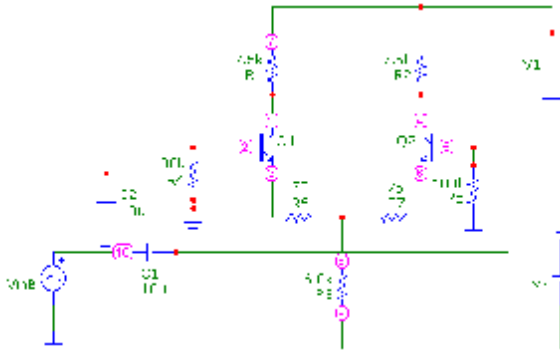


Рисунок 6.14– Схема для аналізу підсилювальних властивостей ДК з місцевим ВЗЗ

Провести аналіз у часовій області. Завдання на аналіз задати згідно з рис.6.15. Отримати епюри коливань і результати гармонічного аналізу. Порівняти з результатами пп.6.3.1.5.

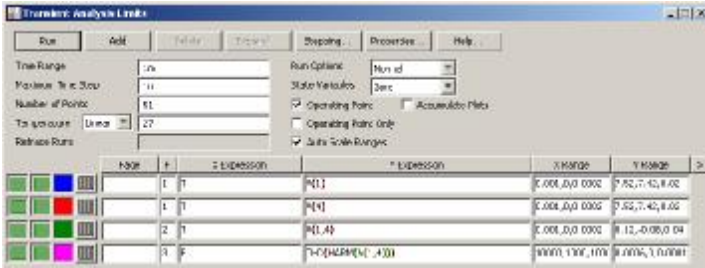


Рисунок 6.15 – Завдання на аналіз в часовій області

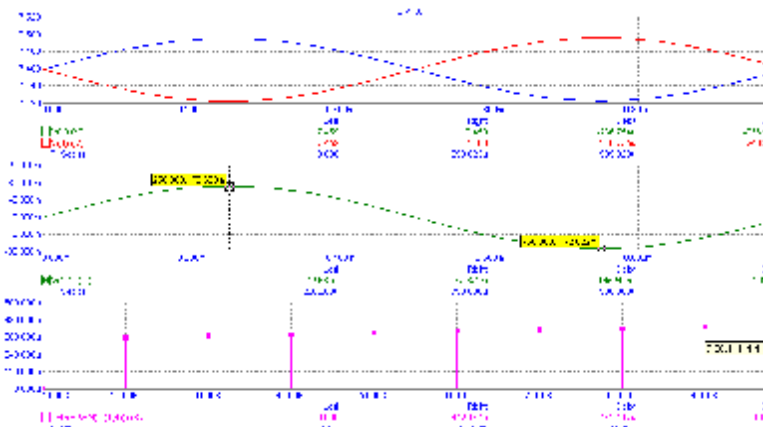


Рисунок 6.16 – Результати гармонічного аналізу

6.3.1.10 Дослідити характеристики ДК щодо придушення синфазного сигналу. Змінити схему каскаду відповідно до рис.6.17.

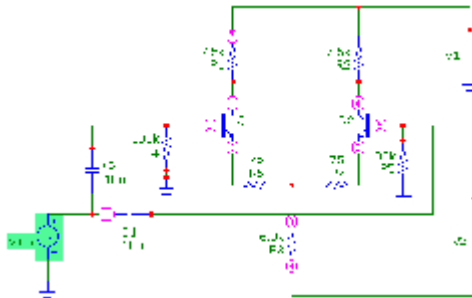


Рисунок 6.17– Схема для аналізу властивостей ДК відносно синфазного сигналу

Амплітуду джерела сигналу VinB встановити рівною 100 мВ. Очевидно, що в такому варіанті схеми до баз обох транзисторів підводиться однакова синфазна напруга. Запустити аналіз схеми у часовій області. Завдання на аналіз задати відповідно до рис.6.18.

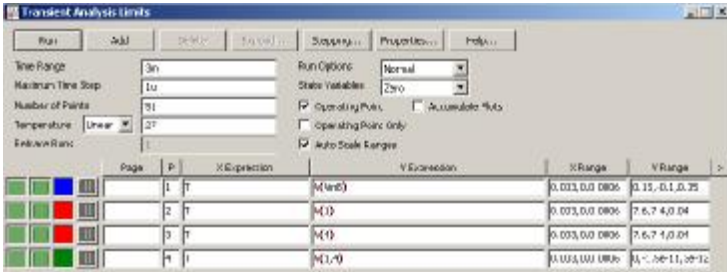


Рисунок 6.18– Завдання на аналіз властивостей ДК відносно синфазного сигналу

Отримати епюри коливань і відобразити їх у звіті (рис.6.19).

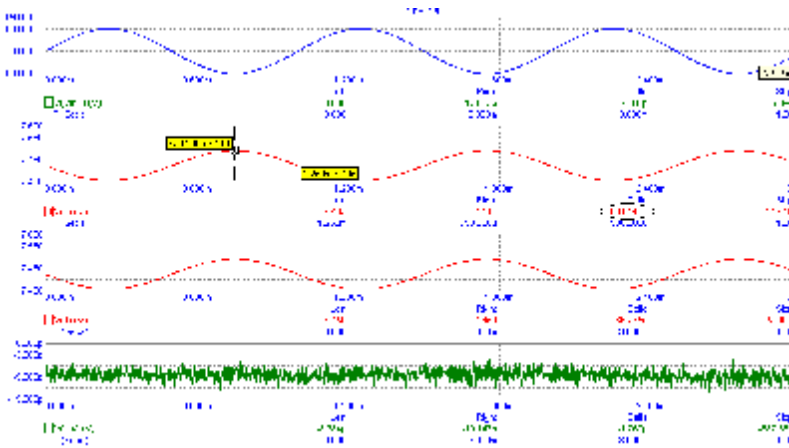


Рисунок 6.19 – Результати аналізу властивостей ДК відносно синфазного сигналу

Визначити коефіцієнт передачі синфазного сигналу як

$$K_{Uc} = \frac{U_{mV(1)}}{U_{mVinB}} = \frac{U_{mV(4)}}{U_{mVinB}} = \frac{(U_{max} - U_{min})/2}{U_{mVinB}} = \frac{\Delta}{U_{mVinB}}$$

6.3.1.11 Замінити спільний резистор в емітерному колі обох транзисторів на джерело стабільного струму (рис.6.20).

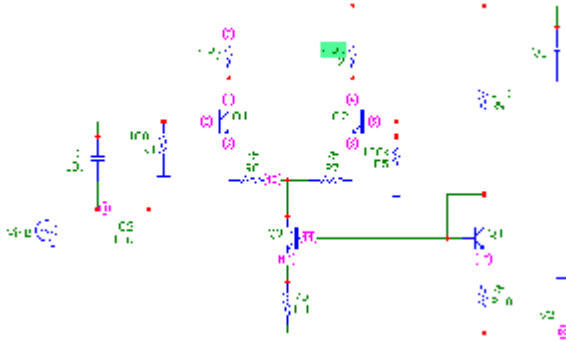


Рисунок 6.20 – Схема ДК з ДСС в емітерному колі

Повторити аналіз у часовій області. Отримати епюри коливань (рис.6.21).

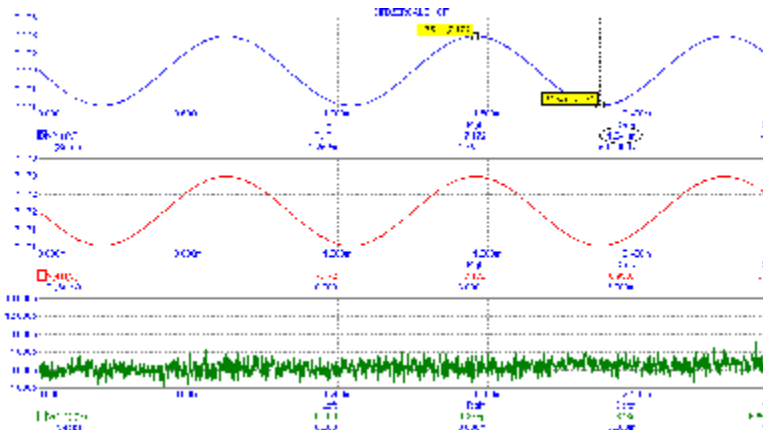


Рисунок 6.21 – Результати аналізу властивостей ДК з ДСС в емітерному колі відносно синфазного сигналу

Визначити коефіцієнт передачі синфазного сигналу і порівняти з результатами попереднього **п.6.3.1.10** Зробити висновок про вплив ДСС в емітерному колі на коефіцієнт передачі синфазного сигналу.

6.3.1.12 Повернути схему з струмовим дзеркалом в емітерному колі до режиму підсилення диференціального сигналу (рис.6.22).

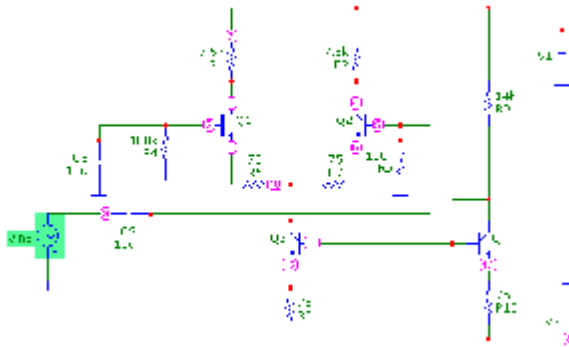


Рисунок 6.22 – Схема ДК з ДСС в емітерному колі в режимі підсилення диференціального сигналу

Запустити аналіз у часовій області. Отримати епюри коливань у контрольних точках (рис.6.23).

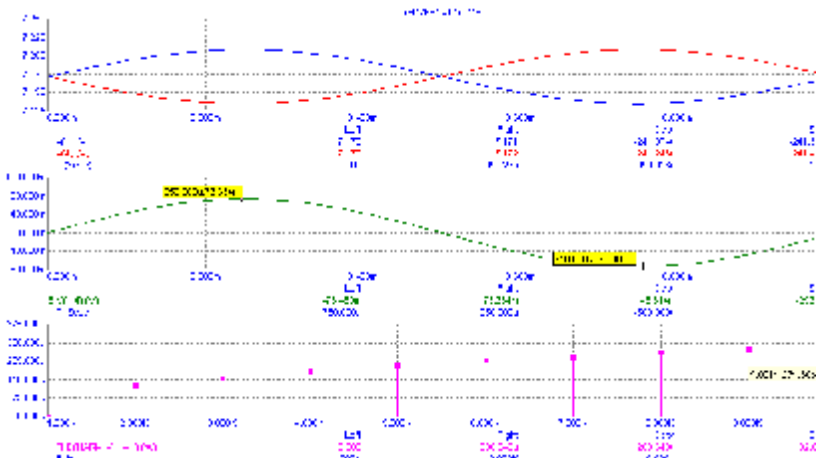


Рисунок 6.23 – Результати аналізу властивостей ДК з ДСС в емітерному колі відносно диференціального сигналу

Визначити коефіцієнт підсилення для диференціального сигналу у варіанті симетричного і несиметричного виходів ДК. Порівняти

результати аналізу з результатами пп.6.3.1.9 (рис.6.16). Зробити висновок про вплив ДСС в емітерному колі на коефіцієнт підсилення для диференціального сигналу.

6.3.2 Дослідження ДК з активним навантаженням

6.3.2.1 За допомогою схемного редактора Micro-Cap-9.0 (7.0) побудувати принципову схему диференціального каскаду з активним навантаженням у вигляді струмового дзеркала (рис. 6.24).

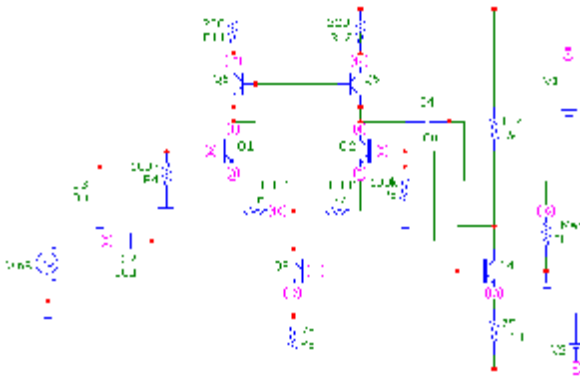


Рисунок 6.24 – Схема ДК з активним навантаженням

6.3.2.2 Провести нумерацію вузлів схеми. Запустити режим аналізу Dynamic DC. Визначити режим роботи з постійного струму (рис.6.25, рис.6.26).

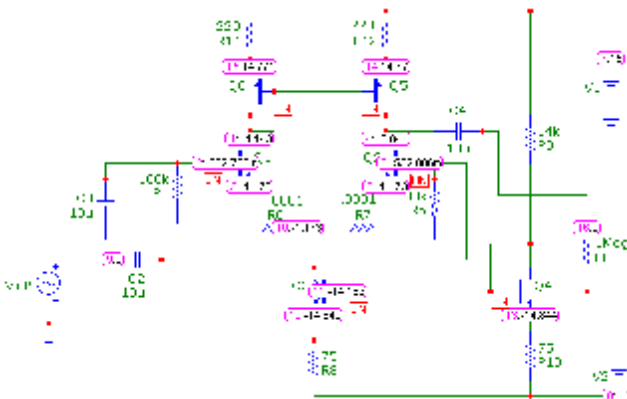


Рисунок 6.25 – Карта напруг у робочій точці

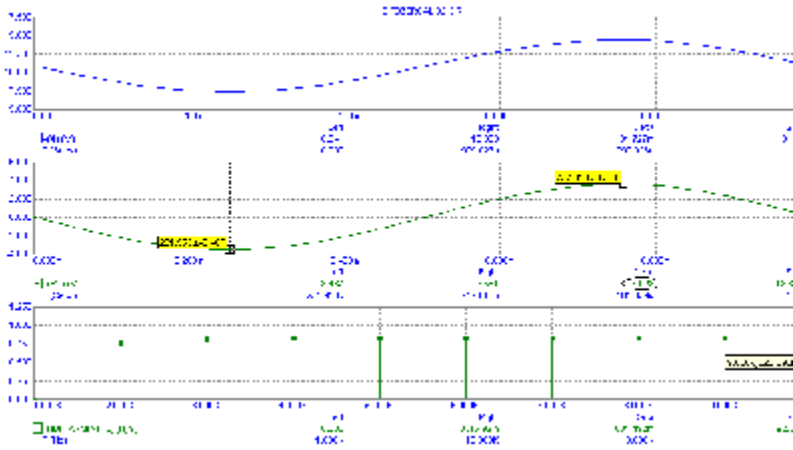


Рисунок 6.28 – Результати аналізу схеми ДК з активним навантаженням

Очевидно, що коефіцієнт підсилення ДК з активним навантаженням суттєво збільшився. Але при цьому також значно збільшився коефіцієнт нелінійних спотворень (хоча він значно менший порівняно з схемою СЕ).

6.3.2.4 Ввести місцевий ВЗЗ Z- типу в схему ДК. Для цього встановити номінал резисторів $R_6=R_7=75$ Ом. Повторно запуснути аналіз у часовій області. У вікні завдання параметрів аналізу активізувати опцію Stepping. Задати зміну опору навантаження RL відповідно з рис. 6.29.



Рисунок 6.29 – Активізація опції Stepping

Отримати епюри коливань. Підписати залежності (рис.6.30).

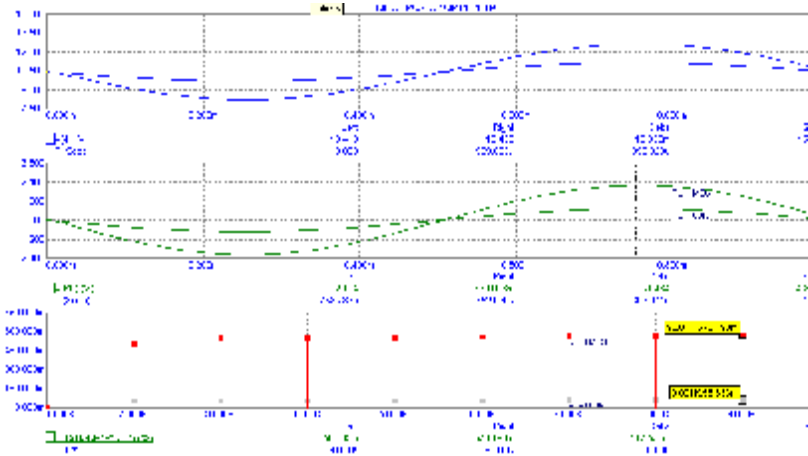


Рисунок 6.30 – Результати аналізу схеми ДК з активним навантаженням при різних значеннях опору навантаження

Зробити висновок про необхідне значення опору навантаження наступного каскаду в схемі ДК з активним навантаженням.

6.3.2.5 Дослідити частотні характеристики ДК з активним навантаженням. Запустити режим аналізу у частотній області (АС). Параметри аналізу задати відповідно до рис. 6.31.



Рисунок 6.31 – Завдання на наліз у частотній області

Активізувати опцію Stepping. Задати покрокову зміну опору навантаження згідно з рис.6.32.

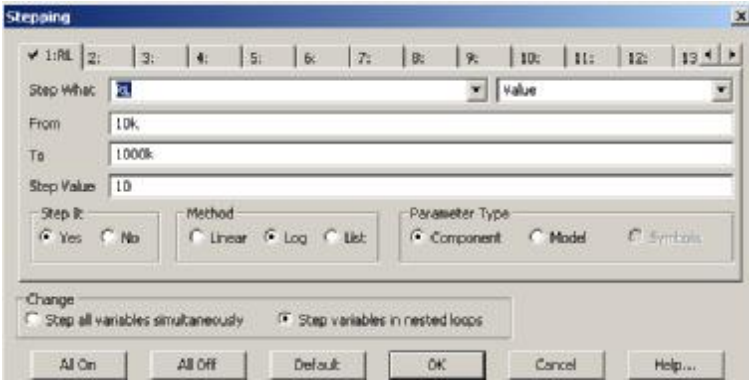


Рисунок 6.32 – Активізація опції Stepping у режимі аналізу частотних характеристик

Отримати частотні характеристики і підписати їх (рис.6.33).

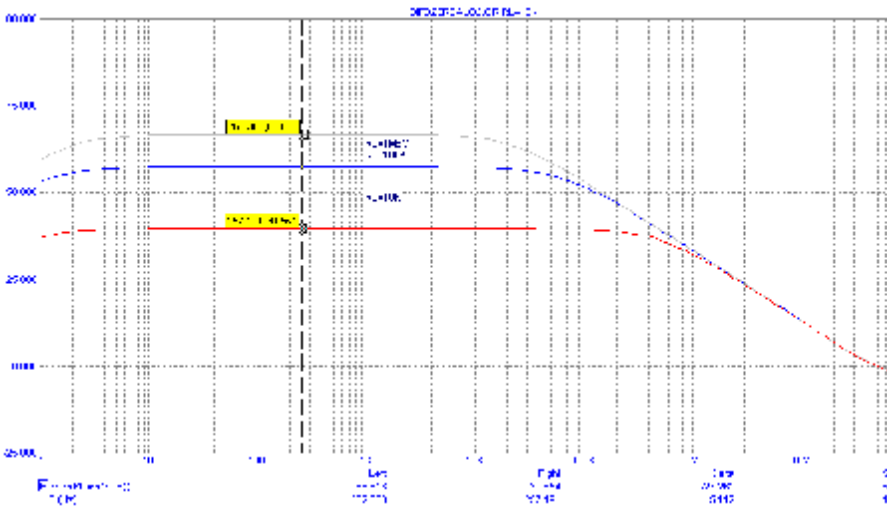


Рисунок 6.33 – Частотні характеристики ДК з активним навантаженням при різних значеннях опору навантаження

Звернути увагу на вплив опору навантаження на верхню робочу частоту каскаду.

6.4 Зміст звіту

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

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


6.4.3 Висновки за результатами роботи.


6.5 Контрольні запитання


1. Які типи електронних компонентів дозволяє використовувати Micro-Cap-9.0 (7.0)?


2. Як будується принципова схема у форматі Micro-Cap-9.0 (7.0)?

3. Які методи аналізу схем з постійного струму використовуються в Micro-Cap-9.0 (7.0)?

4. Яке функціональне призначення кнопки  в режимі аналізу з постійного струму?

5. Яке функціональне призначення кнопки  в режимі аналізу з постійного струму?

6. Яке функціональне призначення кнопки  в режимі аналізу з постійного струму?

7. Яке функціональне призначення кнопки  в режимі аналізу з постійного струму?

8. Який сенс мають параметри **A**, **F**, **RS** для джерела сигналу гармонічної напруги?

9. Яке призначення параметра **Time Range** в режимі аналізу перехідних процесів?

10. Яке призначення параметра **Maximum Time Step** в режимі аналізу перехідних процесів?

11. Яке призначення параметра **Number of Points** в режимі аналізу перехідних процесів?

Список літературних джерел

1. Амелина, М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 [Текст] / М.А. Амелина, С.А. Амелин. - М. : Горячая линия-Телеком, 2007. -464 с. ил. - ISBN 978-5-93517-339-5.
2. Разевиг В. Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-CAP 7 [Текст] / В. Д. Разевиг. - М. : Горячая линия-Телеком, 2003.-368 с.
3. Micro-Cap 11.0 Electronic Circuit Analysis Program Reference Manual Copyright 1982-2014 by Spectrum Software 1021 South Wolfe Road Sunnyvale, CA 94086 94086 [Электронный ресурс] URL: <http://www.spectrum-soft.com/index.shtm>
4. Micro-Cap 11.0 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide Copyright 1982-2014 by Spectrum Software 1021 South Wolfe Road Sunnyvale, CA 94086 [Электронный ресурс] URL: <http://www.spectrum-soft.com/index.shtm>