

Лабораторна робота №1

Характеристики та параметри біполярного транзистора

Контрольні запитання

1. Чому при побудові вхідних та прохідних характеристик (п.1 та 2) напруга U задається починаючи з 0.5-0.6 В, а не з нуля?
2. Чим будуть відрізнятися статичні вхідні характеристики для різних значень напруги U_{ke} ?
3. Чи залежатиме початок ділянки насичення на динамічній прохідній характеристиці від величини опору R_k ? Як саме?
4. Якої величини слід очікувати колекторну напругу U_{ke} у режимі насичення?
5. Намалюйте типову вихідну характеристику для схеми СЕ. З яких ділянок вона складається?
6. Як можна по сімейству вихідних характеристик визначити параметри h_{21} та h_{22} в околі робочої точки?
7. Як має впливати підвищення температури на хід вихідної характеристики?
8. Як можна визначити напругу U_{be} та струм I_k транзистора, якщо задані U_{ke} та I_b ?
9. Як можна визначити граничну частоту транзистора? В якому режимі гранична частота буде вище — в статичному чи динамічному?

Завдання

1. Для транзистора, тип якого вказано в вашому індивідуальному завданні, побудуйте вхідну характеристику. Замалюйте її і поставте на ній робочу точку. Визначить в ній режимну напругу U_{be} . Дані щодо режиму вказані в вашому індивідуальному завданні як U_{ke} та I_b .
2. Побудуйте статичну та динамічну прохідні характеристики. Замалюйте їх та нанесіть на них робочі точки.
3. Побудуйте сімейство вихідних характеристик, замалюйте його і позначте на ньому робочу точку. Визначте в ній струм I_k .
4. Вихідну характеристику, що відповідає заданому режимному струму I_k , побудуйте для кількох значень температури. Замалюйте це сімейство.
5. Графічно визначте параметри h_{11} , h_{21} , h_{22} в робочій точці.
6. Побудуйте частотну залежність струму I_k . Замалюйте її та визначте по ній граничну частоту.

Таблиця даних індивідуальних завдань

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип транзистора	2N1711	2N3494	2N3903	2N3634	2N3904	2N3702	2N3947	2N3244	2N4123	2N2907
Провідність	<i>npr</i>	<i>pnp</i>	<i>npr</i>	<i>pnp</i>	<i>npr</i>	<i>pnp</i>	<i>npr</i>	<i>pnp</i>	<i>npr</i>	<i>pnp</i>
U_{ke} , В	12	12	8	10	10	8	8	8	8	12
I_{b0} , мА	40	60	50	150	30	40	30	75	40	40
E_k , В	25	25	20	25	20	20	25	20	20	25

Хід роботи

1. Побудова вхідної характеристики

1. Зібрати схему подану на рис.1. Тип транзистора та значення напруги U_{ke} обираються за варіантом з таблиці. Для цього на панелі елементів натиснути кнопку з зображенням транзистора, обрати тип провідності транзистора BJT_NPN або BJT_PNP , у віконці праворуч обрати свій тип транзистора, нажати *OK*, поставити на поле для збирання схеми. Для вибору джерел постійної напруги (*DC_Power*) та землі (*Ground*) нажати кнопку з зображенням джерела постійної напруги, поставити на поле для схеми. Для зміна номіналу елемента, два рази на ньому клацнути мишею, змінити номінал. Для з'єднання елементів потрібно підвести мишу до вивода елемента, з'явиться хрестик, один раз клацнути лівою кнопкою миші, протягнути лінію до вивода іншого елемента і ще раз клацнути.

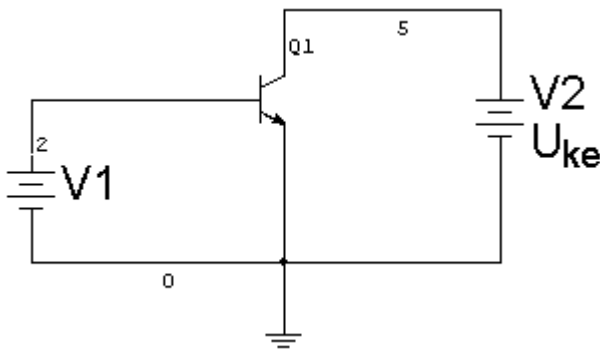




Рис.1. Схема для побудови вхідної характеристики біполярного транзистора

2. За допомогою директиви *Simulate>Analysis>DC Sweep* побудувати вхідну характеристику транзистора (залежність $I_b=f(U_{be})$). Для цього у полі *Source 1 (Analysis parameters)* обрати *vv1* (напруга джерела *V1*). Задати початкове та кінцеве значення зміни параметра *vv1* (від 0В до 2В, інкремент 0.001). У вікні *Output variables* у полі *Variables in circuit* обрати *I(v1)* (струм через *V1*), натиснути *Add*, ця змінна повинна з'явитися у полі *Selected variables for analysis*. Натиснути кнопку *Simulate*. На екрані з'явиться вхідна вольт-амперна характеристика (ВАХ) транзистора. За допомогою курсору (кнопка ) знайти напругу U_{be} яка відповідає струму I_{b0} (заданий в таблиці). Для цього натиснути кнопку , з'являться дві лінії, які можна рухати за допомогою мишки та таблиця, в якій $x1$, $y1$ та $x2$, $y2$ координати перетину ліній з графіком, dx , dy різниці цих координат. Також існує можливість задати точне значення координати, в яке слід встановити курсор. Для цього правою кнопкою мишки клацаємо на курсор, з'явиться таблиця *Set X_value*, *Set Y_value*, задати потрібне значення. Зберегти графік.

2. Побудова статичної прохідної характеристики біполярного транзистора

Для схеми рис.1. побудувати залежність $I_k=f(U_{be})$. Скористатися тією ж директивою, що і в п.1. У полі *Source 1 (Analysis parameters)* обрати *vv1*, а у полі *Variables in circuit* обрати *I(v2)* (струм через *V2*). Натиснути кнопку *Simulate*. За допомогою курсору (так як у п.1) визначити струм I_{k0} який відповідає режимній напрузі U_{be} (знайденого у п.1). Зберегти графік.

3. Побудова динамічної прохідної характеристики біполярного транзистора

Послідовно до колектора транзистора увімкнути резистор (номінал резистора розрахувати за формулою $R_k = (E_k - U_{ke}) / I_{k0}$). Для цього, на панелі компонентів натиснути кнопку із зображенням резистора, обрати потрібний номінал резистора, увімкнути його у схему. Змінити номінал елемента $V2$ на значення E_k . Побудувати ту саму залежність, що і в п.2. Зберегти графік.

4. Побудова сімейства вихідних характеристик біполярного транзистора

Для цього скористатися приладом *IV-Analysis* (знаходиться на панелі інструментів). Відкрити вікно приладу (два рази клацнути на його зображенні мишею). У полі *Components* обрати потрібний тип транзистора. Під'єднати до приладу окремий транзистор. У полі *Sim_param* обрати межі моделювання так, щоб у них потрапляла робоча точка. Запустити моделювання (*Simulate>Run*, або *F5*). Зберегти графіки сімейства вихідних характеристик $I_k = f(U_{ke})$ при кількох значеннях I_{b0} .

5. Визначення h -параметрів біполярного транзистора

Графічно (за допомогою курсорів) з вхідної та сімейства вихідних характеристик визначити h -параметри.

$$h_{11e} = dU_{be} / dI_b$$

$$h_{22e} = dI_k / dU_{ke}$$

$$h_{21e} = dI_k / dI_b$$

6. Визначення частотної залежності струму колектора

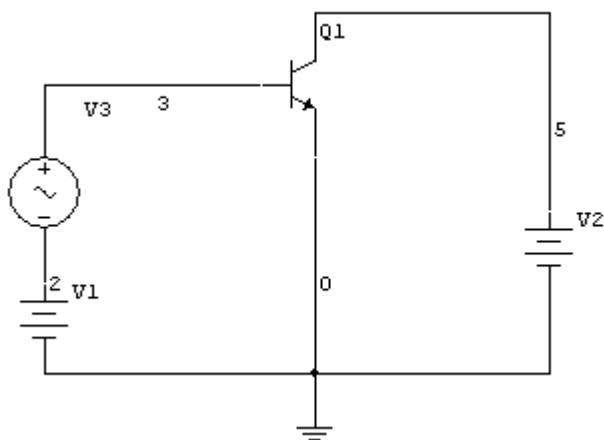


Рис.2. Визначення частотної залежності струму колектора

Для цього у коло бази послідовно до джерела постійної напруги приєднати джерело змінної напруги *AC_Power* (рис.2). Змінити номінал елемента $V1$ на значення U_{be} (визначено у п.1). **Параметри джерела змінної напруги значення не мають.** Скористатися директивою *Simulate>Analysis>AC Analysis*. У вікні *Output variables* у полі *Variables in circuit* обрати струм колектора. Отримати та зберегти графіки залежностей $I_k = f(F)$ та $Phase = f(F)$. Зберегти графіки.

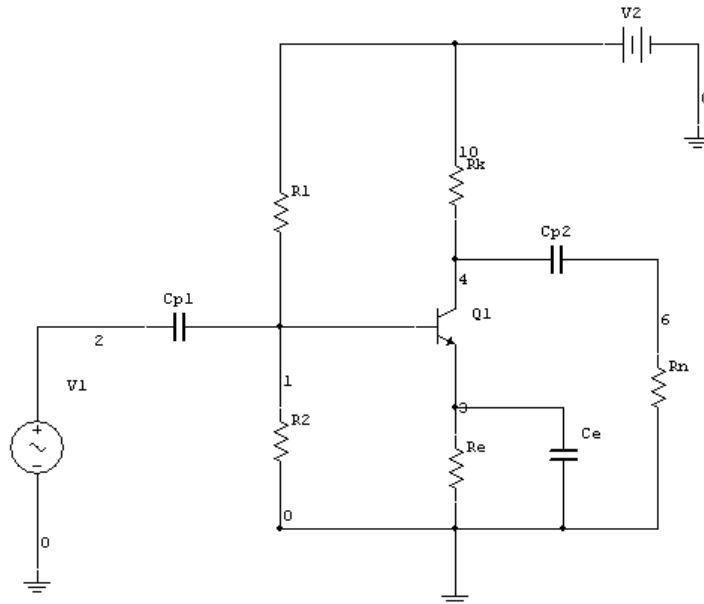
7. Дослідження впливу температури на струм колектора

Для схеми рис.1. (номінал елемента $V1$ відповідає значенню U_{be} , $V2 - U_{ke}$) скористатися директивою *Simulate>Analyses>Temperature Sweep*. Задати межі зміни температури (наприклад, від 0 до 100 °C, кількість точок 10). Побудувати залежність $I_k = f(T)$ при різних температурах. Зберегти графік.

Лабораторна робота №2

Дослідження *RC*-підсилювача

1. Побудувати схему рис.1. Розрахувати елементи схеми рис.1. за формулами (подано нижче). Для цього скористатися файлом *lab2.nb* для пакету *Mathematica*. Значення параметрів для розрахунку взяти з попередньої роботи (R_E – опір емітера (обрати 10 Ом, якщо після розрахунку опір R_K буде від’ємним, зменшити), f_n – нижня частота від якої працюватиме підсилювач (до 1 кГц), n – коефіцієнт запасу (6.28)).



Елементи схеми: R_K , R_{B1} , R_{B2} , C_{P1} , C_{P2} , C_E , k_0 — коефіцієнт підсилення в області середніх частот.

$$R_K = \frac{E_K - U_{KE0} - (I_{K0} + I_{B0}) \cdot R_E}{I_{K0}}$$

Обираємо струм подільника в колі бази

$$I_{под} = \sqrt{I_{B0} \cdot I_{K0}}$$

$$U(R_{B2}) = U_{BE0} + (I_{K0} + I_{B0}) \cdot R_E$$

$$R_{B2} = \frac{U_{BE0} + (I_{K0} + I_{B0}) \cdot R_E}{I_{под}}$$

$$R_{B1} = \frac{E_K - U(R_{B2})}{I_{под} + I_{B0}}$$

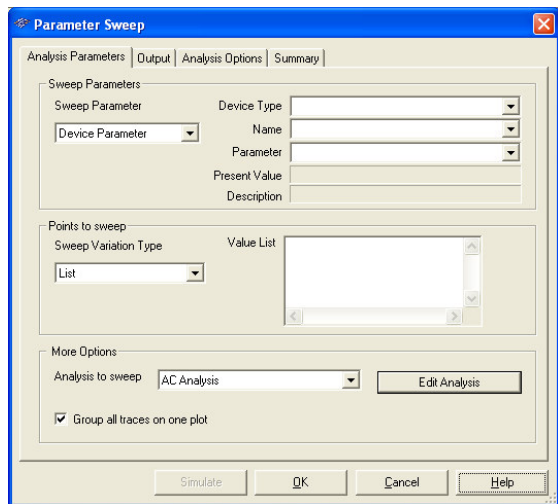
$$R_{BX} = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel h_{11E} = R_B \parallel h_{11E}; \quad R_B = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$C_{P1} = \frac{1}{2\pi \cdot f_H \cdot R_{BX}}$$

$$C_{P2} = n \frac{1}{2\pi \cdot f_H \cdot R_H}$$

$$C_E = \frac{h_{21E}}{f_H \cdot h_{11E}}$$

$$k_0 = \frac{h_{21E}}{h_{11E}} \frac{R'_K}{1 + R'_K h_{22E}}; \quad R'_K = R_K \parallel R_H$$

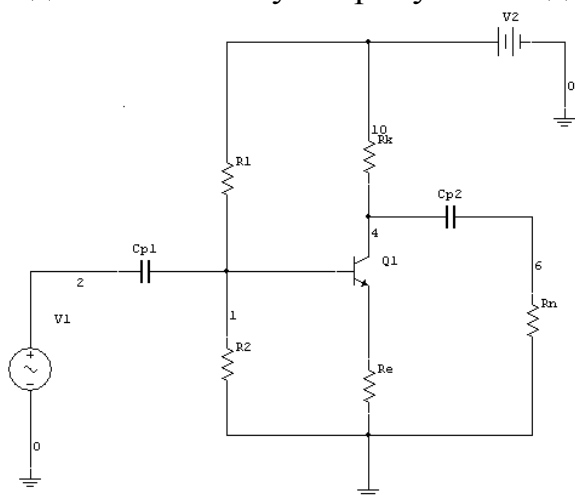


2. Побудувати амплітудно-частотну характеристику підсилювача $U_{вих}=F(f)$ (AC Analysis, масштаб по осі Y змінити на лінійний, в полі *Output* обрати напругу на R_n , тобто V6 (для схеми рис.1)). За допомогою курсорів визначити граничні частоти.

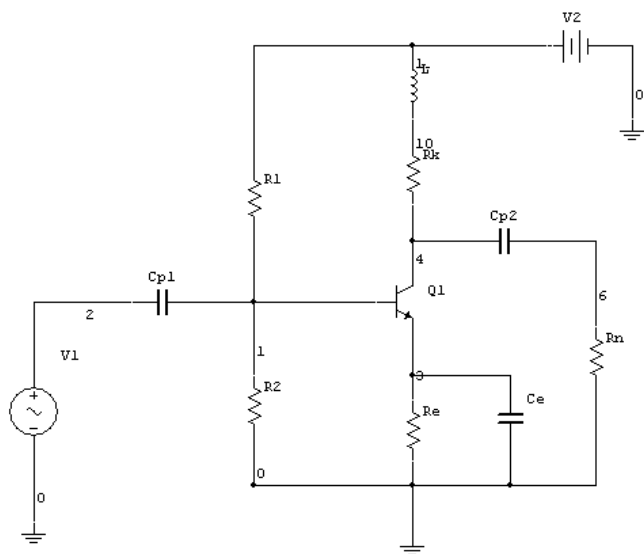
3. Побудувати АЧХ для кількох значень опору навантаження. Для цього скористатися директивою *Simulate>Analyses>Parameter Sweep*.

В полі *Device* обрати *Resistor*, в полі *Name* обрати номер резистора, що відповідає опору навантаження. В полі *Values* задати кілька значень опору навантаження (менше розрахованого, розраховане, більше розрахованого). В полі *Analysis to sweep* обрати *AC Analysis*.

4. Відімкнути емітерну ємність (Рис.2.). Побудувати АЧХ. Порівняти коефіцієнти підсилення та смуги пропускання для схем рис.1 та рис.2.



5. Приєднати послідовно до колекторного опору котушку індуктивності (рис.3).



Номінал котушки розрахувати зі співвідношення $L=R_k/2\pi f_g$ (у файлі для розрахунку задати визначену в п.2 верхню граничну частоту). Побудувати АЧХ для кількох значень індуктивності (скористатися тим же прийомом, що і в п.3). Добитися, щоб на графіку АЧХ було явно видно випадки корекції, недокорекції та перекорекції (тобто задати значення індуктивності розраховане, на порядок менше розрахованого та у два рази більше розрахованого).

Дослідження автогенератора

У даній роботі досліджується RC-автогенератор, який, звичайно, використовується для генерації коливань низької частоти.

1. Складові частини RC-автогенератора

У загальному випадку автогенератор складається з підсилювача та кола зворотного зв'язку, причому для сигналу, який обійшов повне коло зворотного зв'язку, мають виконуватися амплітудна (1) та фазова (2) умови самозбудження:

$$k \cdot \beta > 1 \quad (1)$$

$$\varphi_k + \varphi_\beta = 2\pi n \quad (2)$$

де k та φ_k – коефіцієнт передачі та фазовий зсув для підсилювача, β та φ_β – відповідні величини для кола зворотного зв'язку, n – ціле число.

Як підсилювач, у даному генераторі буде використовуватися каскад, що був досліджений у лабораторній роботі № 2 (рис.1).

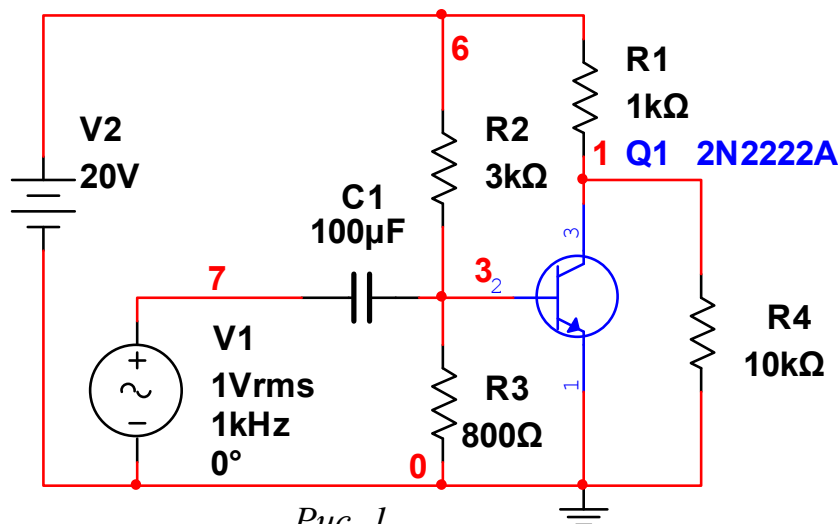


Рис. 1.

Для зручності роботи, коефіцієнт підсилення такого каскаду k має складати порядку 20-100. Фазовий зсув φ_k на середніх частотах буде складати π внаслідок інверсії сигналу транзистором, увімкненим із спільним емітером.

Як коло зворотного зв'язку застосовується фазовообертальне коло, складене з кількох RC-фільтрів нижніх частот (рис.2).

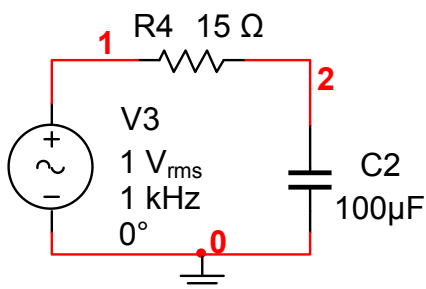


Рис. 2.

Якщо кожен фільтр – ланка даного ланцюжка на якійсь частоті буде забезпечувати фазовий зсув $\varphi_\beta = \pi/3$, то на цій частоті виконається амплітудна умова самозбудження. Якщо на цій частоті коефіцієнт передачі β буде більшим за $1/k$, автогенератор, складений з такого підсилювача та кола зворотного зв'язку, почне генерувати коливання.

2. Схема RC-автогенератора із фазовообертальним колом

На рис.3 зображено схему RC-автогенератора, що складається з підсилювача та фазовообертального кола, про які йшлося вище.

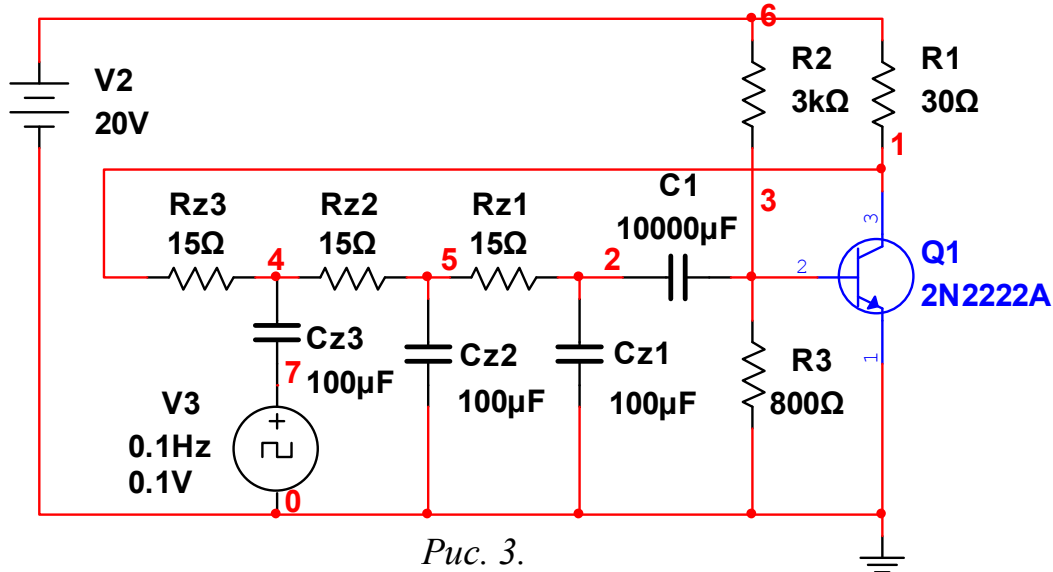


Рис. 3.

У даній схемі резистори зворотного зв'язку R_z повинні мати невеликий опір (близько 10 Ом) для забезпечення виконання амплітудної умови самозбудження. Кількість ланок може становити 3 або більше. Роздільна ємність $C1$ повинна бути досить великою, щоб вона становила малий опір для сигналу на частоті самозбудження автогенератора. Імпульсне джерело $V1$ грає роль початкової флуктуації, від якої починається зростання автоколивань. Його частоту слід обрати дуже малою (щоб півперіод був більший за час моделювання).

3. Вимушена синхронізація автогенератора

Якщо на автогенератор діє зовнішній періодичний ЕРС., він може перейти в режим вимушеної синхронізації, коли частота автоколивань буде рівною частоті джерела ЕРС. Такий режим буде забезпечуватися у випадку, коливання напруги на базі транзистора за рахунок зовнішнього джерела зменшують його середній коефіцієнт підсилення настільки, що перестає виконуватися амплітудна умова самозбудження (1). На рис.4 зображений RC-автогенератор, який розглядався вище, із джерелом ЕРС $V3$. У випадку досить значної амплітуди напруги джерела $V3$ відбувається вимушена синхронізація автогенератора. Ємність $C2$ потрібна для розв'язки колектора транзистора та джерела $V3$ за постійною складовою.

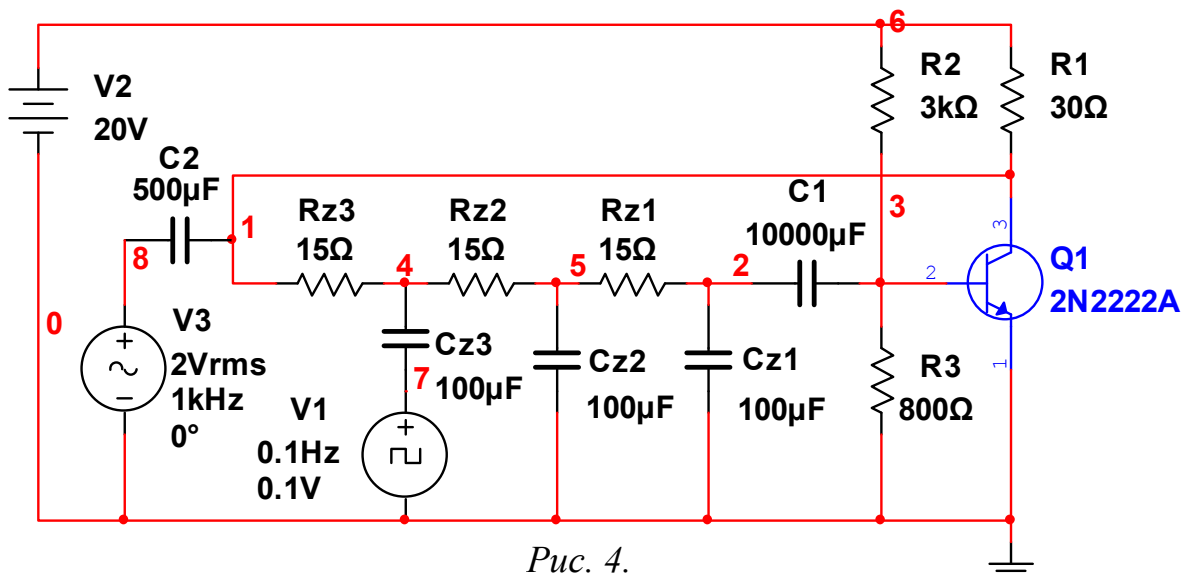


Рис. 4.

4. Конкуренція мод, генерованих автогенераторами

У випадку, коли два автогенератори із різними частотами автоколивань впливають один на одного, кожен з них може стати джерелом вимушеної синхронізації для іншого. На рис.5 показано два RC- автогенератори, пов'язаних між собою через ємність C3. Автогенератори побудовані відповідно на 3 та 4 однакових фазовообертальних ланках. Оскільки кожен генератор тут впливає на інший, має місце взаємний зв'язок. У випадку слабого взаємного зв'язку кожен генератор генерує коливання на своїй частоті, і між цими коливаннями має місце суперпозиція. У випадку сильного взаємного зв'язку Коливання в одному з автогенераторів зростають настільки швидко, що встигають зменшити середній коефіцієнт підсилення транзистора іншого автогенератора раніше, ніж у ньому встигнуть істотно зрости свої автоколивання. У цьому випадку обидва автогенератори генерують одну і ту саму частоту.

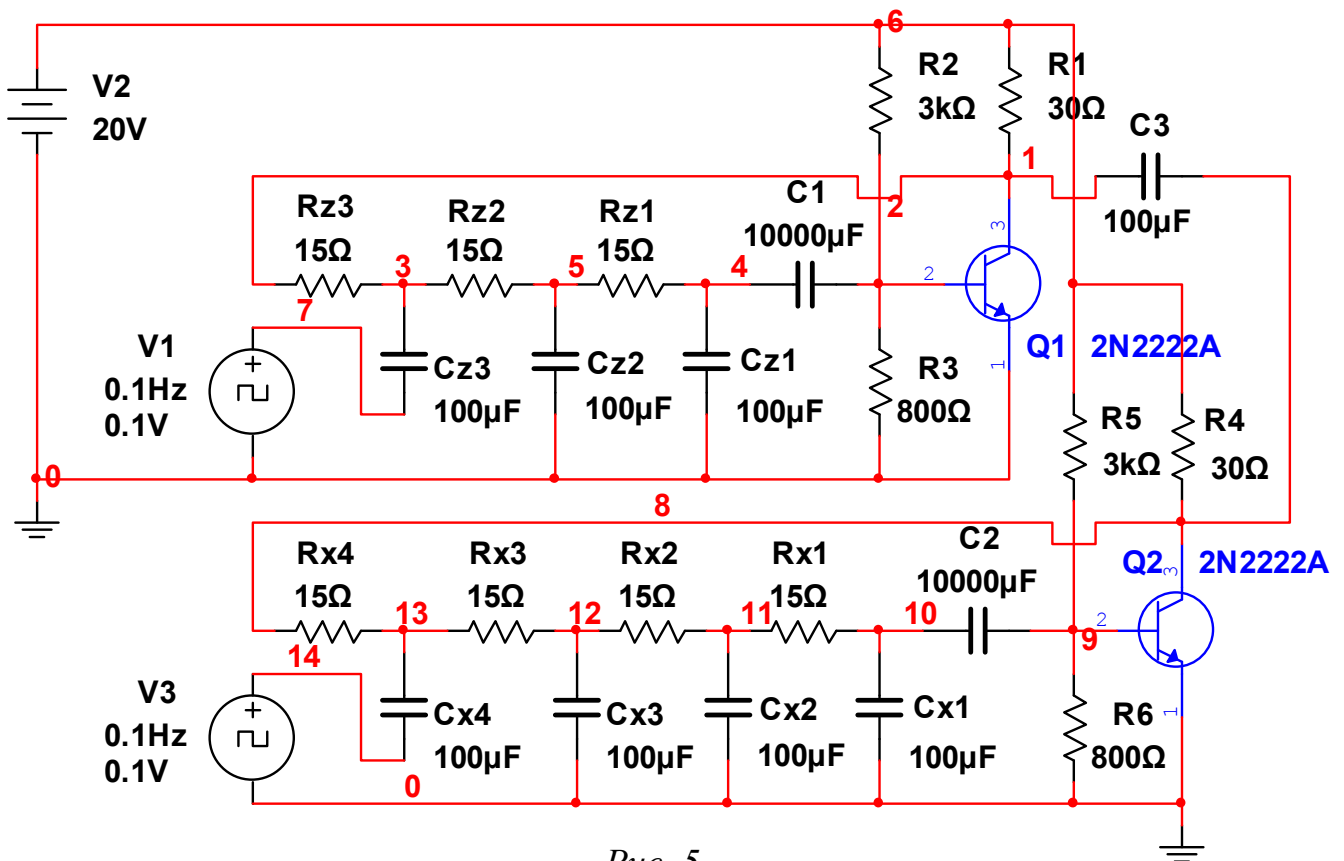


Рис. 5.

Лабораторне завдання.

1. Для свого варіанту транзистора зібрати схему, подібну до рис.1 і забезпечити коефіцієнт підсилення каскаду порядку 20-100 (слід використати результати лабораторної роботи №2).
2. Зібрати схему, зображену на рис.2. Розрахувати теоретично та визначити шляхом моделювання (AC Analysis) граничну частоту фільтра. Розрахувати, на якій частоті буде самозбуджуватися автогенератор із 3 та 4 такими ланками в колі зворотного зв'язку.
3. Зібрати схему RC-автогенератора, зображену на рис.3. Провести аналіз часових залежностей (Transient Analysis) для сигналу на колекторі транзистора. Для свого варіанту транзистора (шляхом зміни R та C в кожній ланці таким чином, щоб гранична частота не змінювалася) забезпечити самозбудження автогенератора. Визначити шляхом моделювання (Transient Analysis) частоту автоколивань, інкремент їхнього зростання та амплітуду встановлених коливань.
4. Повторити п.3 для випадку 4 ланок у фазовообертальному колі.
5. Зібрати схему, зображену на рис.4. Провести аналіз часових залежностей (Transient Analysis) для сигналу на колекторі транзистора. Шляхом зміни амплітуди джерела ЕРС V3 та ємності розв'язки C2 отримати режими наявності та відсутності вимушеної синхронізації. Визначити мінімальне (порогове) значення амплітуди джерела ЕРС V3, при якому відбувається вимушена синхронізація.
6. Зібрати схему, зображену на рис.5. Провести аналіз часових залежностей (Transient Analysis) для сигналів на колекторах транзисторів. Змінюючи ємність зв'язку C3, отримати режими сильного та слабого взаємного зв'язку.
7. Зменшуючи інкремент автоколивань (цього можна досягти шляхом зміни R та C в кожній ланці зворотного зв'язку відповідного генератора таким чином, щоб гранична частота не змінювалася) у автогенераторі, що встановлював свою частоту в режимі сильного взаємного зв'язку в п.6, добитися, щоб свою частоту встановлював інший автогенератор.