

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕЛЕКТРОНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»
спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Укладачі: *Заграничний А.В.*
Батрак Л.М., кандидат технічних наук, доцент
Сидоренко С.Б., кандидат технічних наук
Хижняк Т.А., кандидат технічних наук, доцент

Рецензент *Гармаш О.В.*, доцент, кандидат технічних наук,
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Ямненко Ю.С.*, професор, доктор технічних наук

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 23.02.2023 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки
(протокол № 1/2023 від 30.01.2023 р.)*

«Електроніка та електромеханіка. Лабораторний практикум» містить опис п'яти лабораторних робіт, які передбачені навчальною програмою кредитного модуля «Електроніка та електромеханіка». Для зручності студентів інформація по кожній лабораторній роботі оформлена у вигляді закінченого протоколу, що містить титульний аркуш, мету, порядок виконання роботи, схеми експериментів, теоретичні відомості за тематикою роботи, контрольні запитання для самоконтролю засвоєння матеріалу. В першій лабораторній роботі надано детальний опис віртуальних макетів та надано рекомендації щодо роботи з ними, описано принципи побудови схем для дослідження. Окрім того в протоколах наведені таблиці для отриманих експериментальних даних. Даний посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. Загалом матеріал посібника буде корисним для всіх студентів, що вивчають споріднені дисципліни електротехніка, теорія електронних кіл, аналіз електронних схем, аналогова і цифрова схемотехніка та інші, для успішного засвоєння яких потрібне розуміння основних процесів в найпростіших електричних схемах, принципів їх побудови.

Реєстр. № НП 22/23-504. Обсяг 1,71 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© А.В.Заграничний, Л.М. Батрак, С.Б. Сидоренко, Т.А. Хижняк
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

Вступ	4
Лабораторна робота №1	
„Дослідження однофазних випрямлячів”	6
Лабораторна робота №2	
„Біполярний транзистор в схемі RC-підсилювача”	20
Лабораторна робота №3	
„Дослідження ОП з негативним зворотним зв’язком. Розробка інструментального підсилювача”	39
Лабораторна робота №4	
„Логічні інтегральні схеми”	47
Лабораторна робота №5	
„Дослідження схем з позитивним зворотним зв’язком та гістерезисом. Розробка астабільного та моностабільного мультивібраторів”	62
Список рекомендованої літератури для самостійної роботи	69
Перелік посилань.....	70

ВСТУП

Кредитний модуль «Електроніка та електромеханіка» закладає основи розуміння основних енергетичних процесів в електричних колах, дає поняття про представлення реальних електротехнічних пристроїв їх спрощеними моделями – електронними схемами, надає знання щодо основних принципів роботи найпростіших електричних схем та пристроїв.

В процесі виконання лабораторних робіт студенти закріплюють отримані теоретичні знання працюючи з моделями, де з використанням вимірювальних приладів отримують наочне підтвердження теорії та перевіряють теоретичні розрахунки.

Основні завдання циклу лабораторних робіт: експериментальне вивчення законів електротехніки та застосування теоретичних методів розрахунку для аналізу та перевірки експериментальних даних, отриманих при роботі з реальними джерелами енергії та споживачами. Цикл містить п'ять лабораторних робіт.

Теоретичні відомості в протоколах призначені для оптимізації процесу підготовки студентів до виконання робіт.

Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи аналогічні до заходів при роботі з персональними комп'ютерами.

1. Перед початком роботи необхідно:

1.1. Перевірити та оглянути робоче місце. Підготуватись до виконання завдання, ознайомитись з роботою, вивчити послідовність виконання лабораторної роботи.

1.2. З'ясувати всі незрозумілі питання щодо роботи та отримати інструктаж з техніки безпеки у викладача.

1.3. Пересвідчитись у справності обладнання та повідомити викладача про його несправність.

1.4. Робочі місця з дисплеями повинні бути розташовані так, щоб до поля зору працюючого не потрапляли вікна, освітлювальні прилади та

поверхні, які мають властивість віддзеркалювати. Дисплеї повинні встановлюватися під кутом 90—105° до вікон.

1.5. Знати місця розташування засобів пожежогасіння та вміти ними користуватися.

1.6. Знати план евакуації з приміщення в разі виникнення пожежі. Вміти діяти в разі враження електричним струмом або виникнення пожежі.

2. Під час роботи необхідно:

2.1. Утримувати робоче місце в чистоті та порядку.

2.2. При виявленні будь-якої неполадки терміново вимкнути комп'ютер та повідомити про це викладача або лаборанта.

2.3. При виконанні роботи бути уважним, не відволікатися сторонніми справами та розмовами самому, а також не відволікати інших.

2.5. Відстань від очей користувача до екрану повинна становити 500—700 мм. Найбільш вигідне розташування екрану — перпендикулярно лінії зору користувача.

2.6. По закінченні роботи необхідно вимкнути комп'ютер. Прибрати своє робоче місце. Здати лабораторну роботу викладачу та повідомити його про виявлені недоліки у роботі ПК.

Лабораторна робота №1 „Дослідження однофазних випрямлячів”

Мета роботи: ознайомитись з принципом дії однофазного мостового випрямляча, а також однофазного випрямляча з нульовим виводом обмотки трансформатора. Експериментально визначити основні параметри та характеристики цих схем. Дати їх порівняльну оцінку.

I. Порядок виконання роботи

1. Зібрати моделі відповідно до схеми електричної принципової (рис. 1.1) та вашого варіанту (табл 1.1). Визначити залежність середнього значення випрямленої напруги U_d від середнього значення випрямленого струму I_d для випрямляча з нульовим виводом трансформатора (схема 2), а також для мостового випрямляча (схема 1) при активному навантаженні R_H . Побудувати в одній системі координат графіки навантажувальних характеристик цих схем

$$U_d = f(I_d).$$

Визначити їх внутрішній опір $r_i = \Delta U_d / \Delta I_d$ в номінальному режимі при $I_{d\text{ ном}} = 0,6A$.

Таблиця 1.1

Елемент	$U_{\text{джерела}},$ В	$R_H, \text{ Ом}$	L1, мГн	C1, мкФ
Задані значення	220	100	50	10
Розраховані значення ($XX + N_{\text{В}} * N_{\text{Г}}$)				
$R1=R2=R3=R4=R5= 5 \text{ Ом},$ $f = 50 \text{ Гц}$				

$N_{\text{В}}$ – номер варіанту (порядковий номер студента по списку в групі), $N_{\text{Г}}$ – остання цифра номеру групи (наприклад, для групи ЛА-13, $N_{\text{Г}}=3$);

2. При активному навантаженні R_H для обох схем визначити:
а) коефіцієнт пульсації випрямленої напруги

$$K_{\text{П}} = \frac{U_{\sim\text{max}}}{U_d},$$

де $U_{\sim\text{max}}$ - амплітуда змінної складової випрямленої напруги;

б) амплітудне значення зворотної напруги на вентилях випрямляча U_{VDmax} .

Розрахувати коефіцієнт використання вентилів за напругою $K_{VDV} = \frac{U_d}{U_{VDmax}}$.

ПРИМІТКА:

$$U_{\square max} = U_{\square} \cdot \sqrt{2}$$

3. Для обох схем у номінальному режимі ($I_d=0.6$ А) визначити амплітудне значення струму через вентиль при:

- а) активному навантаженні R_H ;
- б) активно-індуктивному $L_1 R_H$;
- в) активно-ємнісному $C_1 R_H$.

4. Для обох схем у номінальному режимі роботи зарисувати осцилограми напруг на основних елементах випрямляча при:

- а) активному навантаженні R_H ;
- б) активно-індуктивному $L_1 R_H$;
- в) активно-ємнісному $C_1 R_H$.

5. Виміряти діючі значення струму та напруги первинної обмотки U_1, I_1 (вольтметром PV1 та амперметром PA1).

6. Розрахувати діюче значення напруги на вторинній обмотці U_2 за відомим амплітудним значення U_{2m} (визначити за осцилограмою напруги вторинної обмотки – п.4) та струму I_2 (виміряти амперметром PA2). Розрахувати типову потужність трансформатора S_T , коефіцієнт використання трансформатора K_{TVp} , коефіцієнт використання вентилів K_{VDV} .

ПРИМІТКА: Часові діаграми у звіті зарисувати одна під одною з однаковим масштабом по осі часу. Обов'язково вказати масштаб по осі напруг та по осі часу (визначається за осцилографом).

Однотипні характеристики для обох схем будувати в одній системі координат.

II. Зміст звіту по роботі

1. Мета роботи.
2. Схеми, що досліджуються.
3. Таблиці з результатами вимірювань.
4. Графіки, осцилограми.
5. Розрахунки необхідних параметрів.
6. Висновки по роботі.

III. Принципова схема макету лабораторної роботи

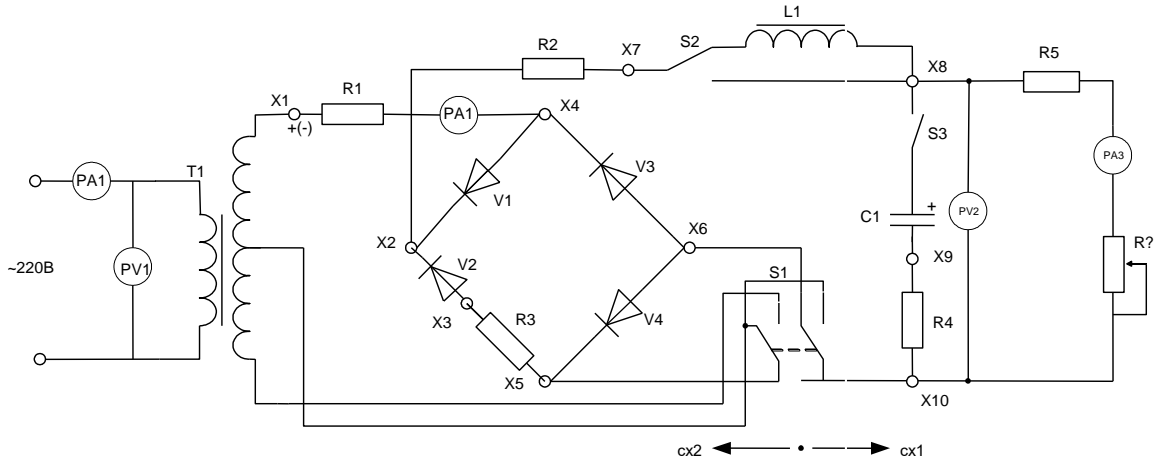


Рис. 1.1. Схема електрична принципова

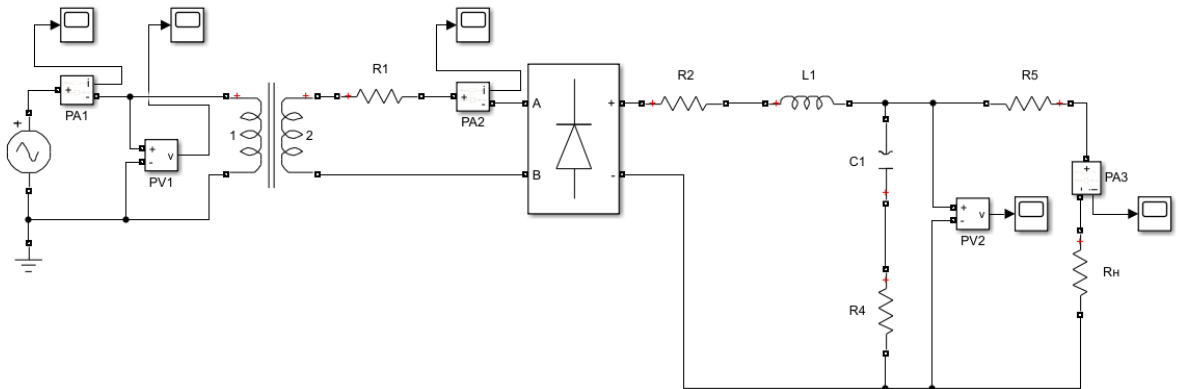


Рис. 1.1.1 Мостова схема в програмному середовищі Matlab Simulink

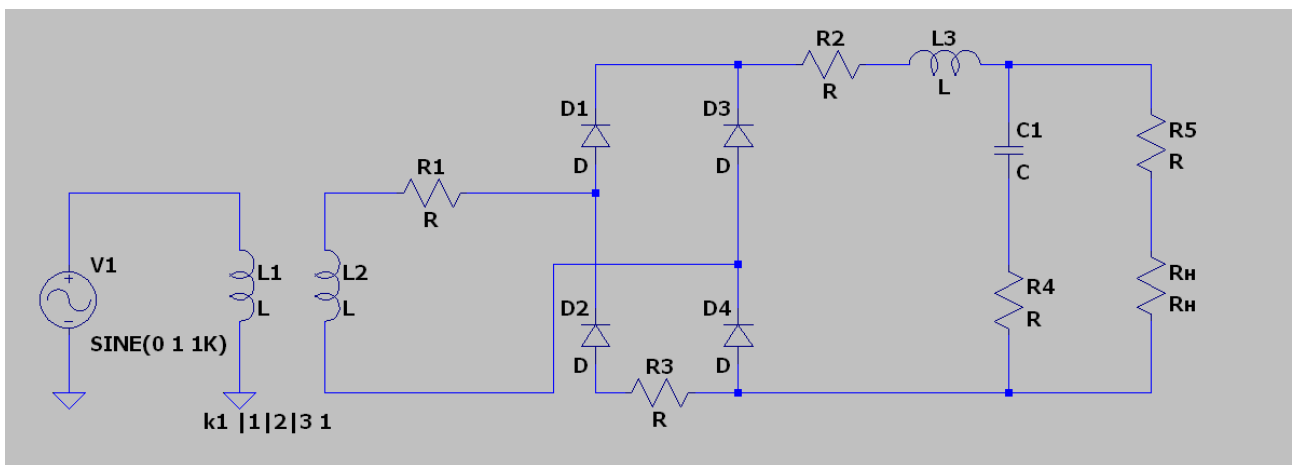


Рис. 1.1.2 Мостова схема в програмному середовищі LTspice

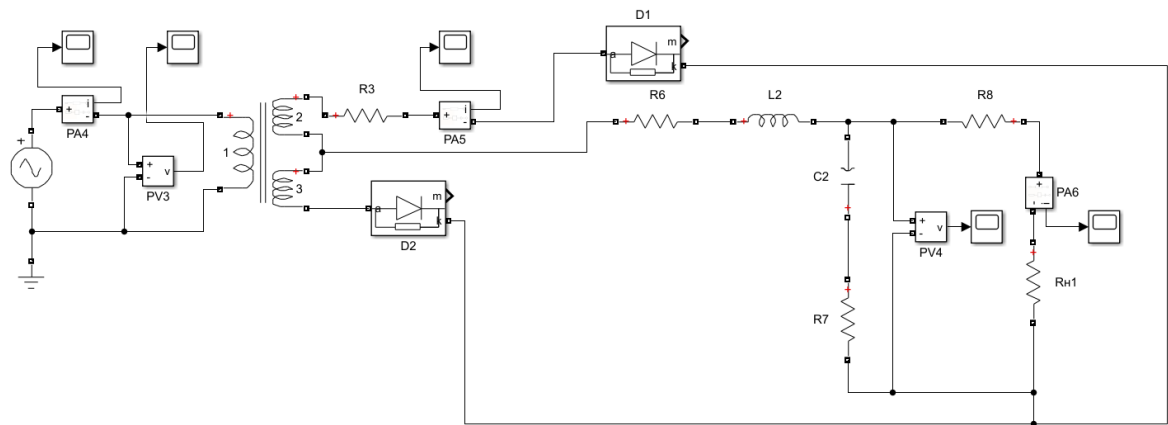


Рис. 1.2.1 Схема з нульовим виводом в програмному середовищі Matlab Simulink

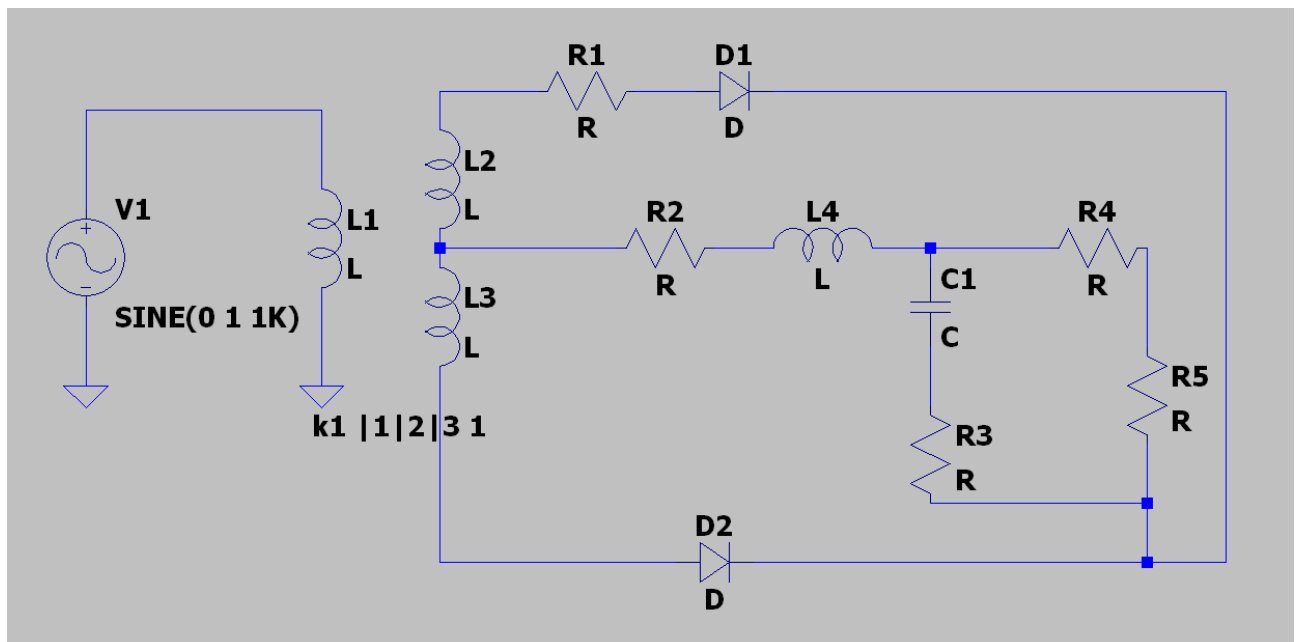


Рис. 1.2.2 Схема з нульовим виводом в програмному середовищі LTspice

IV. Короткі теоретичні відомості

Випрямлячем називається пристрій, що перетворює змінну напругу, полярність якої змінюється, у пульсуючу, полярність якої залишається незмінною. Для одержання постійної напруги з пульсуючої, на виході випрямляча ставлять згладжувальні фільтри. Таким чином, випрямляч разом з фільтром є пристроєм, що перетворює змінну напругу в постійну. При живленні від однофазної мережі застосовують дві основні схеми випрямлячів - мостова (рис.1) і схема з нульовим виводом трансформатора (рис.2) [4].

Мостова схема випрямлення містить чотири вентиля $VD1 \dots VD4$ (рис.1). У позитивний півперіод напруги мережі пропускають струм вентиля $VD1, VD4$, а в негативний - вентиля $VD2$ та $VD3$. При цьому струм у навантаженні весь час протікає в одному напрямку, показаному стрілкою на рис.1. Форма напруги на навантаженні показана на рис.2.б, форма струму у вентилях - на рис.2.в,г.

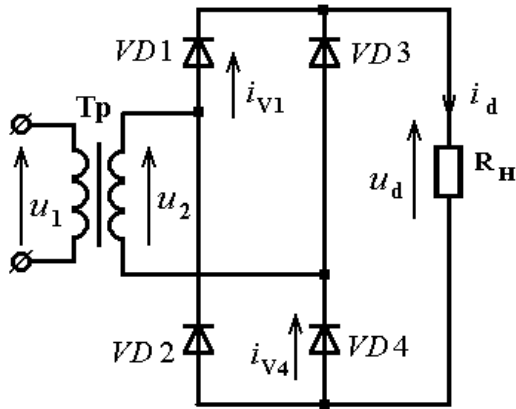


Рис.1

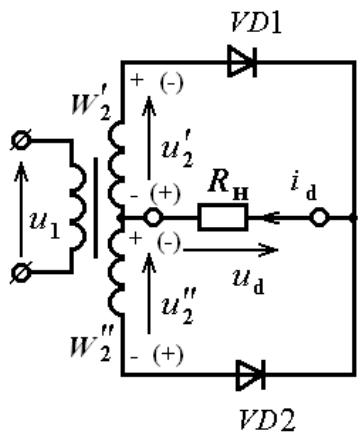


Рис.3

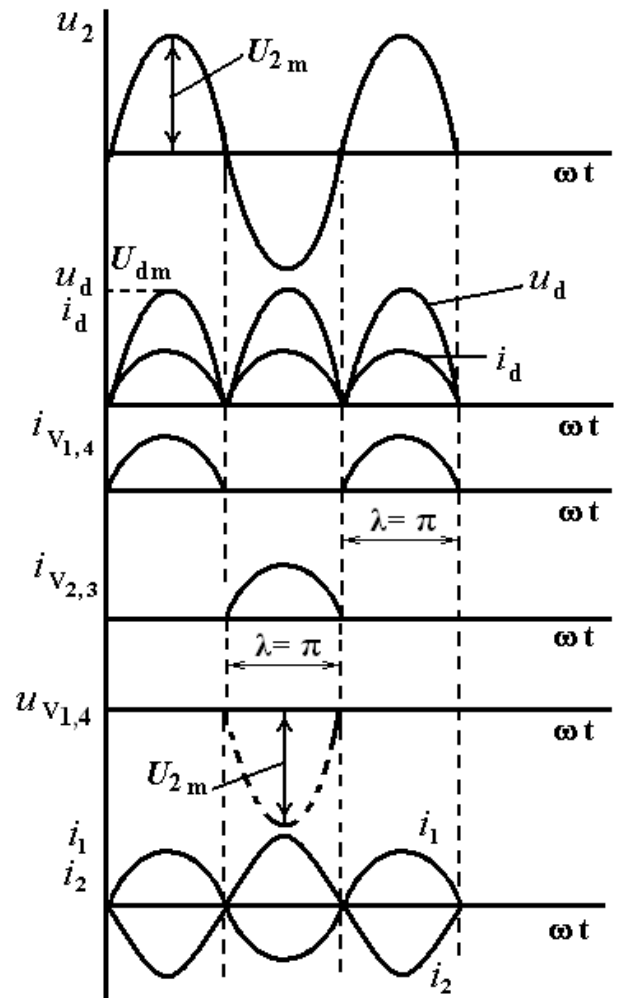


Рис.2

На першому півперіоді вхідної напруги до закритих вентилів $VD2$ та $VD3$ в мостовій схемі прикладена зворотна напруга, яка співпадає з напругою вторинної обмотки трансформатора (рис.2.д). Максимальне значення зворотної напруги на вентилі дорівнює $U_{VDm} = U_{2m}$, де U_{2m} – амплітуда напруги вторинної обмотки трансформатора.

Середнє значення випрямленої напруги визначається як інтеграл від напруги $U_d(t)$ на періоді вхідної напруги (1):

$$U_d = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} u_H(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \cdot \sin \omega t d\omega t = \frac{2U_{2m}}{\pi} \quad (1)$$

Якщо врахувати, що діюче значення напруги на вторинній обмотці пов'язане з амплітудним значенням співвідношенням $U_2 = U_{2m} / \sqrt{2}$, середнє значення випрямленої напруги визначається як $U_d \cong 0.9U_2$.

У мостовій схемі в первинній обмотці трансформатора при роботі на активне навантаження протікає чисто синусоїдальний струм (рис.2.е). Схема характеризується хорошим використанням вентилів та трансформатора. Тому вона має найширше застосування при випрямленні однофазного струму. При роботі на активно-індуктивне навантаження форма випрямленої напруги не змінюється, а форма струму у вентилях стає більш згладженою і при достатньо великій індуктивності має форму прямокутних імпульсів. При роботі на активно-ємнісне навантаження в цій схемі, як і в інших, з'являється кут відсічки θ , тобто зменшується тривалість протікання струму у вентилях – $\lambda < \pi$. При цьому струм вентилів має форму косинусоїдальних імпульсів з великою амплітудою.

Найсприятливіший режим роботи вентилів у схемі з активно-індуктивним навантаженням.

Найнесприятливіший – у схемі з активно-ємнісним навантаженням. Тому вона застосовується, в основному, у випрямлячах невеликої потужності.

Схема з нульовим виводом трансформатора (рис.3) містить два вентиля $VD1$ та $VD2$ і трансформатор TV , що має дві однакові вторинні обмотки, включені послідовно й узгоджено. У позитивний півперіод напруги мережі (полярність зазначена без дужок), працює вентиль $VD1$, а у негативний півперіод (полярність зазначена в дужках) працює вентиль $VD2$. При цьому струм обох вентилів протікає через навантаження в одному і тому ж самому напрямку. Форма випрямленої напруги та струму такі ж, як і в мостовій схемі (рис.2). Однак, амплітудне значення зворотної напруги на вентилі $U_{VD_{max}}$ в цій схемі у два рази більше, ніж у мостовій схемі, оскільки трансформатор містить дві вторинні обмотки. Напруга на закритому вентилі визначається як сума напруг на вторинній обмотці, підключеній до даного вентиля. Оскільки амплітуда напруги на навантаженні дорівнює U'_{2m} , то $U_{VD_{max}} = 2U'_{2m}$.

Недоліком схеми є погане використання трансформатора, оскільки з двох вторинних обмоток на кожному півперіоді працює лише одна. Основна область застосування цієї схеми – низьковольтні випрямлячі. Тут вона має перевагу перед мостовою схемою, у якій послідовно з навантаженням завжди включено два вентиля, що веде до збільшення втрат і зменшення коефіцієнта

корисної дії. У схемі з нульовим виводом послідовно з навантаженням включено тільки один вентиль, що при низьких випрямлених напругах ($U_d < 10B$) дозволяє одержати більш високий ККД.

Зовнішня характеристика випрямляча або **навантажувальна характеристика** $U_d = f(I_d)$ – це залежність середнього значення випрямленої напруги від середнього значення випрямленого струму, що протікає в навантаженні (рис.4).

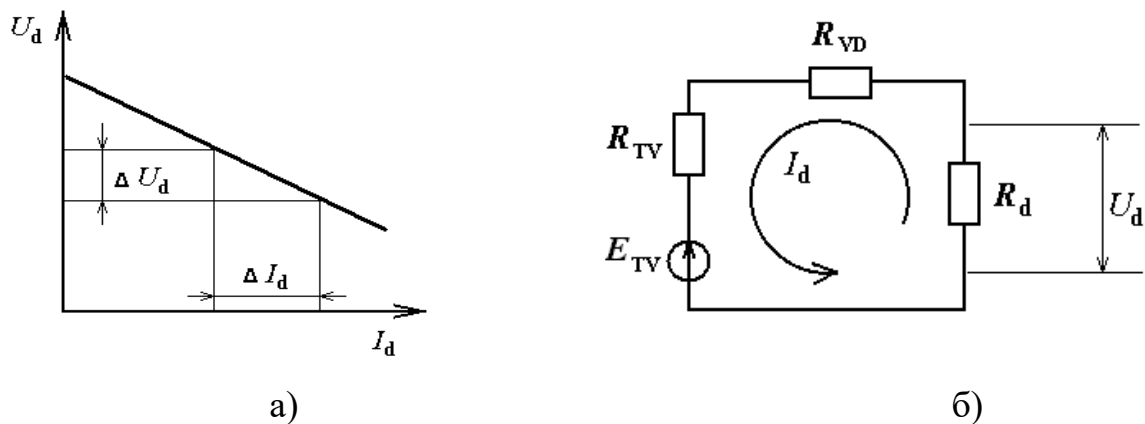


Рис.4

Зміна напруги на виході випрямляча при зміні струму обумовлена наявністю явища комутації вентилів, а також визначається падінням напруги в обмотках трансформатора та на опорах відкритих вентилів. **Комутацією** називається явище переходу струму з одного вентиля, який закривається, на інший вентиль, що відкривається. В реальних схемах відкривання та закривання вентилів відбувається протягом деякого фіксованого проміжку часу, який називається **інтервалом комутації**. Внаслідок наявності втрат на елементах схеми для всіх пристроїв електроживлення навантажувальна характеристика є спадаючою (рис.4.a), тобто при зростанні струму навантаження I_d середнє значення випрямленої напруги U_d зменшується. Це пов'язано з тим, що при збільшенні струму навантаження збільшується падіння напруги на внутрішньому опорі схеми, яким є сумарний опір відкритих вентилів та активний опір обмоток трансформатора.

За навантажувальною характеристикою визначається внутрішній опір (2) схеми за наступним виразом:

$$r_i = \frac{\Delta U_d}{\Delta I_d} \quad (2)$$

Згідно з останнім виразом нахил навантажувальної характеристики залежить від внутрішнього опору схеми.

На рис. 4.б наведена еквівалентна схема заміщення випрямляча без

вихідного фільтру для інтервалу роботи, що відповідає одному півперіоду вхідної напруги. В ній всі елементи замінені їх активними внутрішніми опорами: R_{VD} – внутрішній опір відкритих вентилів, R_{TV} – активний опір вторинних обмоток трансформатора, E_{TV} – джерело напруги, що характеризує напругу на вторинних обмотках трансформатора, R_d – опір навантаження.

В схемі заміщення (рис.4.б) струми та напруги описуються наступними співвідношеннями (3):

$$\begin{aligned} E_{TV} &= I_d (R_{TV} + R_{VD} + R_d), \\ E_{TV} &= I_d (R_{TV} + R_{VD}) + U_d, \end{aligned} \quad (3)$$

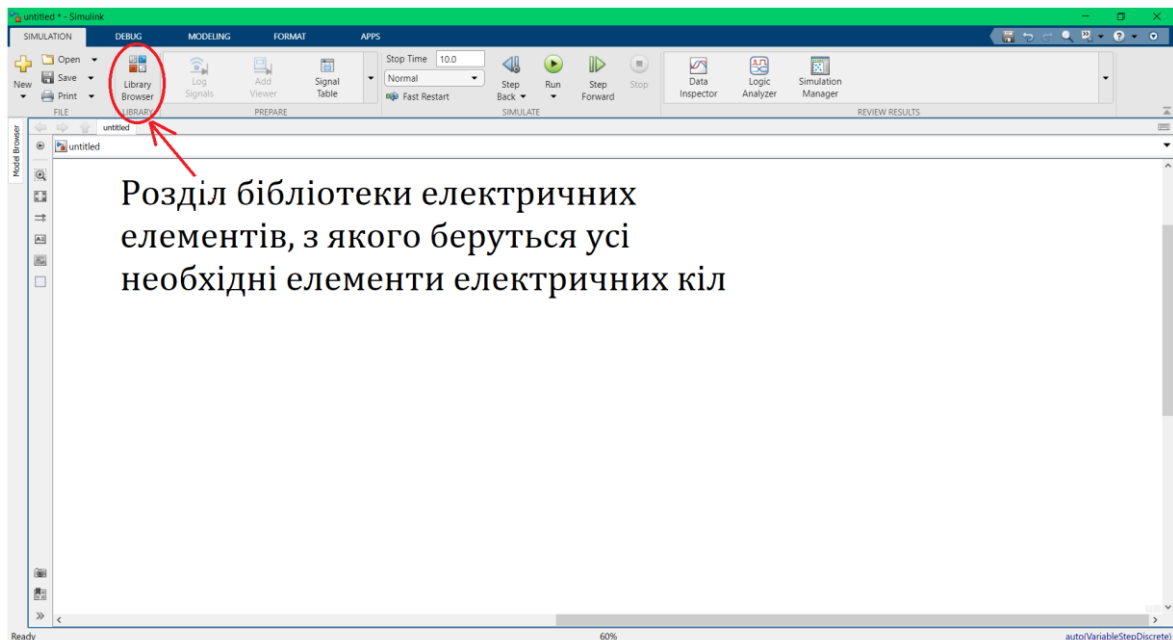
де $U_d = I_d R_d$.

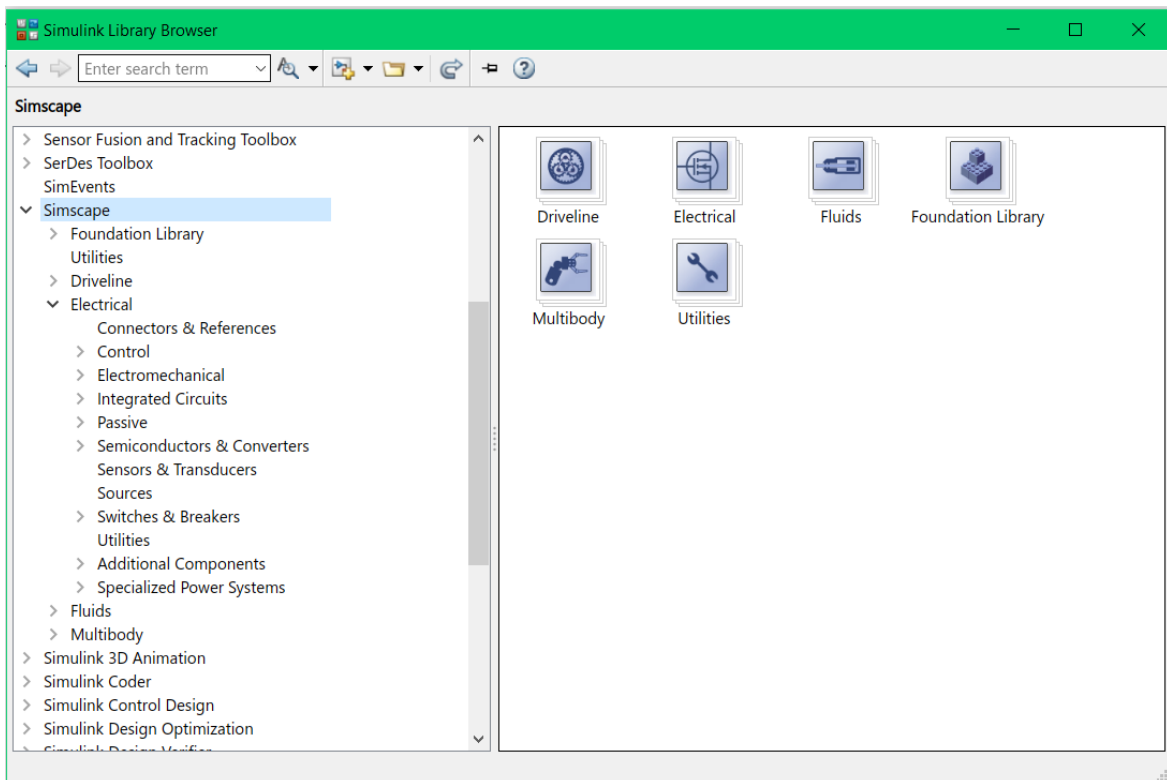
З даних рівнянь виводиться залежність середнього значення випрямленої напруги U_d від середнього значення випрямленого струму I_d (4):

$$U_d = E_{TV} - I_d (R_{TV} + R_{VD}). \quad (4)$$

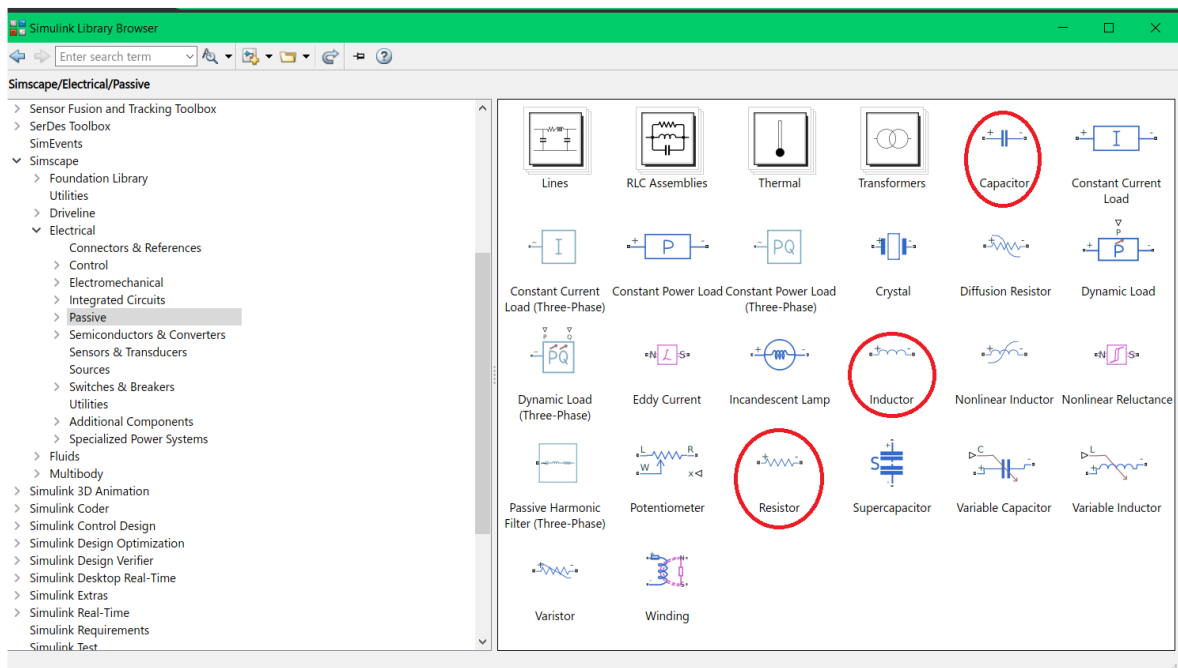
Дане співвідношення пояснює спадаючий характер навантажувальної характеристики.

Використання програмного середовища Matlab Simulink для дослідження електричних кіл [1].

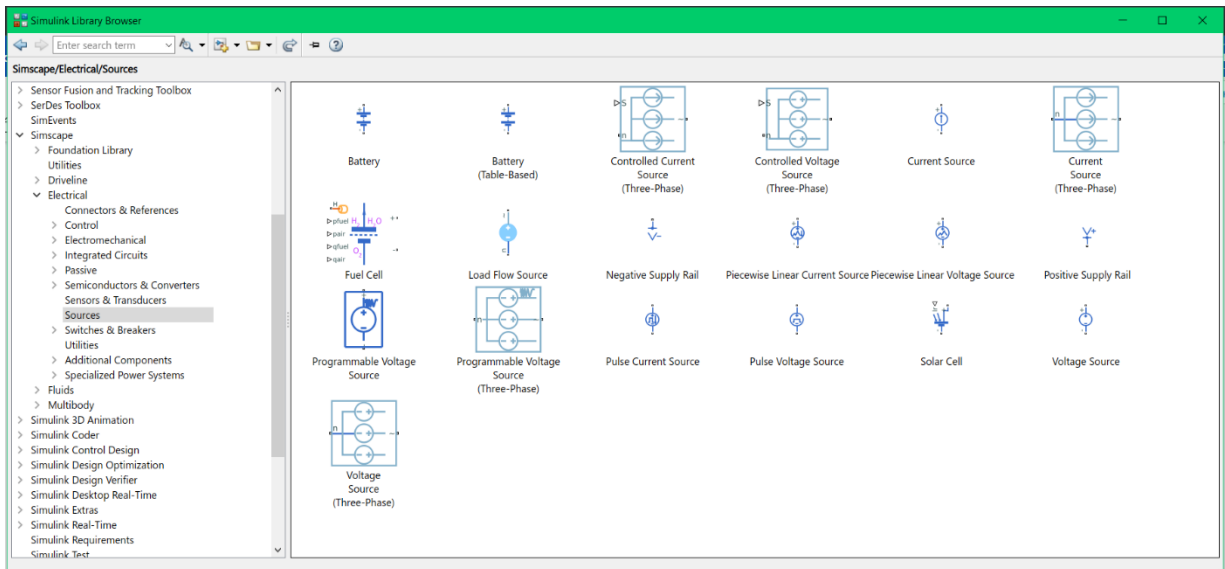




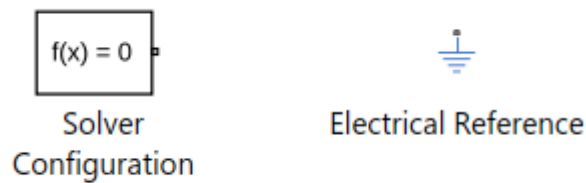
У відкритому вікні в меню зліва потрібно обрати “Simscape/Electrical”.



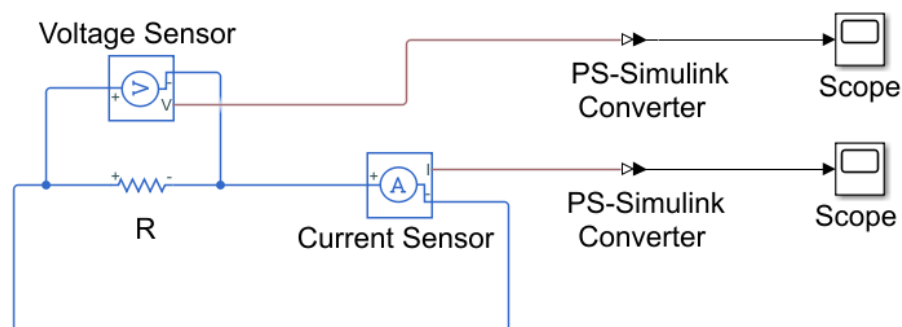
У розділі “Passive” можна обрати основні пасивні елементи кола - резистор, котушка індуктивності, конденсатор. Для того, щоб додати елемент в робочу область, достатньо перетягнути його на потрібне місце.



У розділі “Sources” можна обрати різні джерела напруги або струму, основним є Voltage Source, який можна налаштувати як джерело постійної напруги або джерело синусоїдальної напруги.

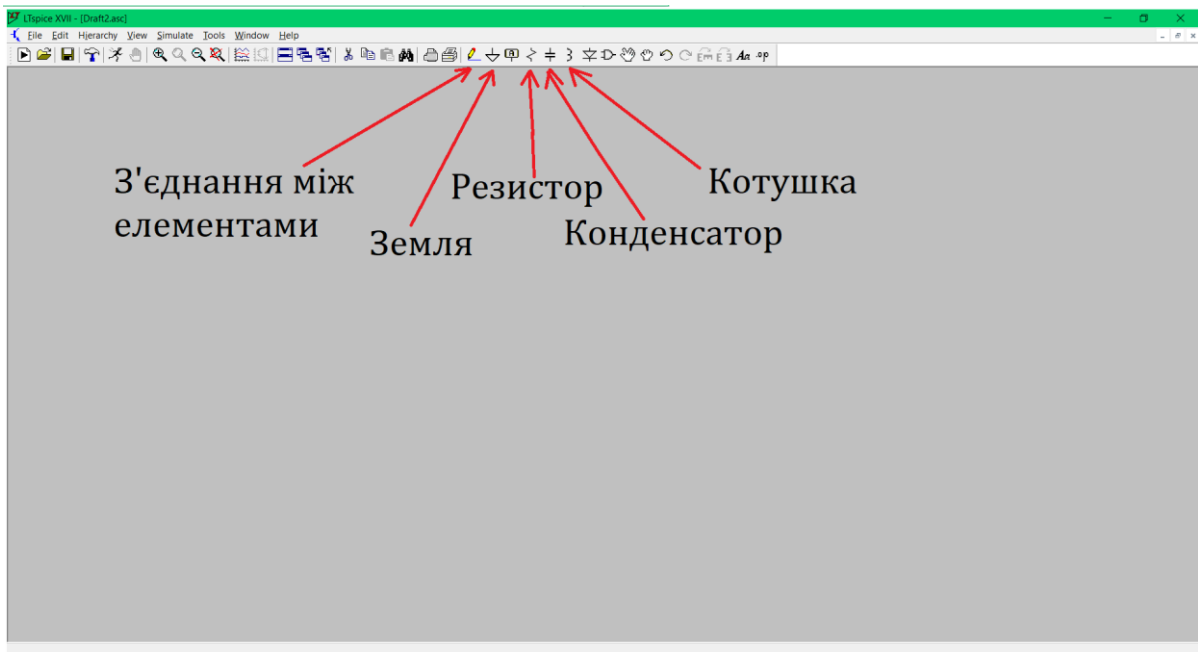


Щоб мати змогу запустити симуляцію, потрібно підключити “Solver Configuration” та “Electrical Reference” в будь-яку точку електричного кола.



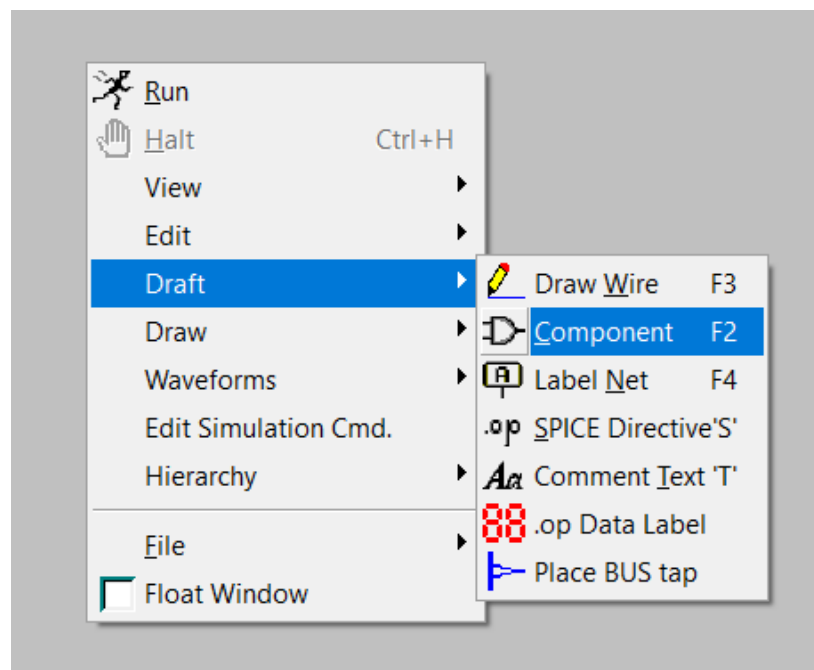
Для виміру форми та амплітуди напруги або струму на конкретному елементі використовуються “Current Sensor” та “Voltage Sensor”, які підключаються аналогічно амперметру та вольтметру відповідно. Для спостереження форми та амплітуди напруги або струму використовується елемент “Scope”, який підключається до вимірювальних елементів через “PS-Simulink Converter”.

Використання програмного середовища LTspice для дослідження електричних кіл [2].



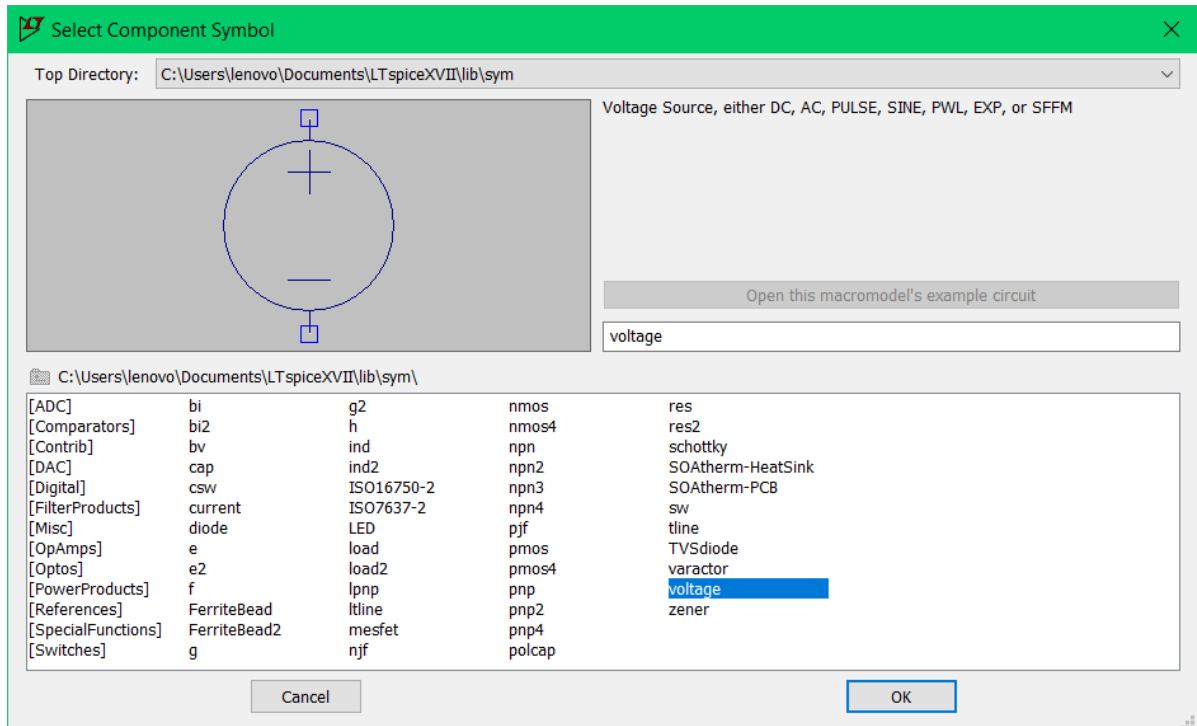
Основні елементи знаходяться на головній частині меню програми. Щоб додати їх в робочу область достатньо перетягнути в потрібне місце.

Щоб запустити симуляцію, до електричного кола має бути підключено елемент “Ground”.

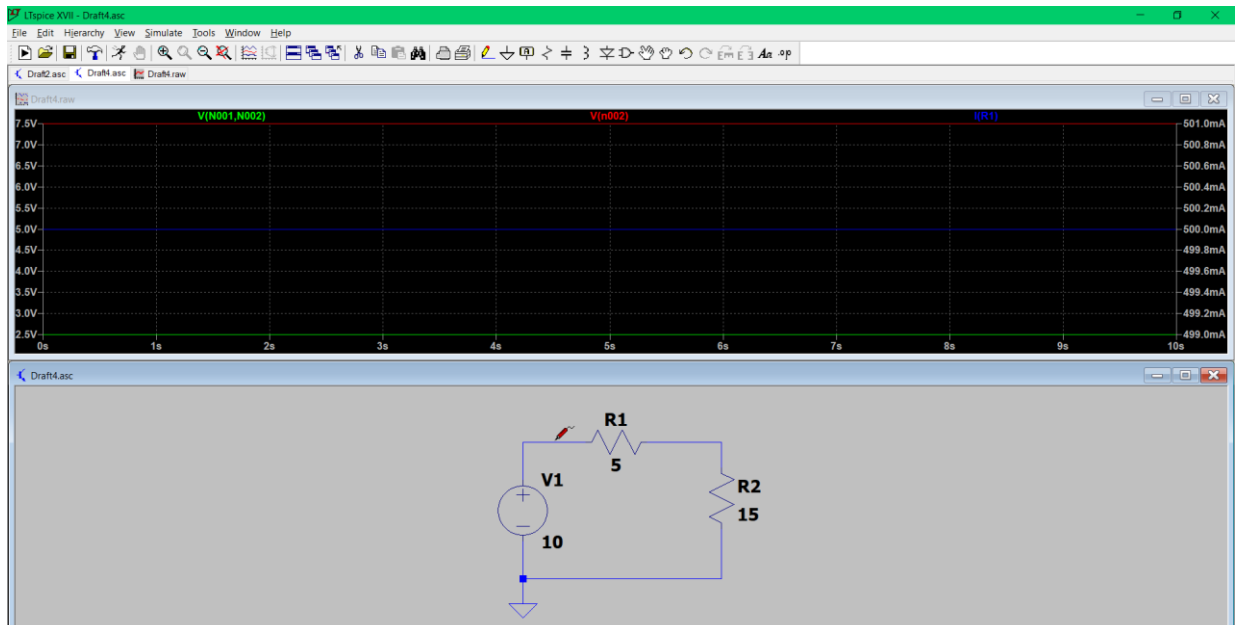


При натисканні правою клав'яшею миші по пустій робочій області

відкривається меню, через яке можна відкрити вікно з усіма доступними елементами.



В даному вікні можна обрати джерело напруги, яке в подальшому можна налаштувати відповідно до потреби, натиснувши праву клавішу мишки по елементу.



Для спостереження форми та амплітуди сигналу потрібно запустити симуляцію. Для виміру напруги на елементі потрібно затиснути ліву клавішу мишки на з'єднанні з одного боку елементу та відпустити з іншого боку. Для виміру струму на елементі достатньо натиснути на елемент.

V. Основні визначення та розрахункові співвідношення

1. Коефіцієнт пульсації - відношення амплітудного значення змінної складової $U_{\square max}$ до середнього значення випрямленої напруги U_d :

$$K_{\Pi} = \frac{U_{\square max}}{U_d}.$$

2. Кут відсічки – половина інтервалу, протягом якого у вентилі випрямляча протікає струм. Для випрямлячів з RC - навантаженням $\theta < \pi/2$.

3. Середнє значення випрямленої напруги

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u_n(t) dt,$$

де T – період напруги на навантаженні $u_n(t)$, $u_n(t) = U_{2m} \sin \omega t$.

4. Діюче значення напруги

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt},$$

де T – період напруги $u(t)$.

5. Розрахункова потужність первинної S_1 та вторинної S_2 обмоток трансформатора

$$S_1 = U_1 \cdot I_1; S_2 = U_2 \cdot I_2,$$

де U_1, U_2 – діючі значення напруг первинної та вторинної обмоток трансформатора; I_1, I_2 – діючі значення струмів первинної та вторинної обмоток трансформатора.

6. Типова потужність трансформатора

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2}$$

7. Коефіцієнт використання трансформатора у схемі випрямляча

$$K_{TVP} = P_d / S_T,$$

де $P_d = U_d \cdot I_d$.

8. Коефіцієнт використання вентиля за напругою у схемі випрямляча

$$K_{VDV} = \frac{U_d}{U_{VDmax}},$$

де U_{VDmax} – амплітудне значення зворотної напруги на вентилі (визначається за осцилографом).

9. Навантажувальна характеристика випрямляча (рис.4) – залежність середнього значення випрямленої напруги U_d від середнього значення струму навантаження I_d : $U_d = f(I_d)$.

10. Внутрішній опір випрямляча визначається з навантажувальної характеристики

$$r_i = \Delta U_d / \Delta I_d .$$

VI. Контрольні запитання

1. Пояснити принцип роботи мостової схеми та схеми з нульовим виводом.
2. Нарисувати форму струмів в елементах схеми випрямляча і навантаження.
3. Навантажувальна характеристика випрямляча. Від чого залежить її нахил?
4. Що таке внутрішній опір випрямляча і як він визначається?
5. Чому в схемі з нульовим виводом трансформатора зворотна напруга на вентиліях в два рази більша, ніж у мостовій?
6. Чому максимальне значення струму у вентилі випрямляча різне для різних видів навантаження при одній і тій самій потужності в навантаженні?
7. У якій схемі кращий коефіцієнт використання потужності трансформатора і чому?
8. У якій схемі кращий коефіцієнт використання вентилів за напругою і чому?
9. Від чого залежить ККД випрямляча і в якій схемі він більший?
10. Порівняти мостову схему випрямляча зі схемою з нульовим виводом трансформатора.

Лабораторна робота №2 „Біполярний транзистор в схемі RC-підсилювача”

Мета роботи – ознайомлення з підсилювальними властивостями транзистора, увімкненого за схемами зі спільним емітером і спільним колектором, вивчення характеристики резистивно-ємнісного RC-підсилювача (схема СЕ) і емітерного повторювача (схема СК).

Порядок виконання роботи

Зібрати модель для дослідження схеми RC-підсилювача (рис 2.1., ключ S1 – в положенні 1).

1. Зняти та побудувати залежність коефіцієнта підсилення RC-підсилювача від опору навантаження $k_U = f(R_H)$ при постійних значеннях частоти генератора сигналів $f_G = (1000 + 100 \cdot N_B \cdot N_G) \text{ Гц}$ і вхідної напруги $U_{BX} = 0.01 \text{ В}$.

Для розрахунку коефіцієнту підсилення k_U вимірюється вихідна напруга $U_{ВИХ}$ при незмінній вхідній напрузі U_{BX} . Коефіцієнт підсилення визначається з формули $k_U = U_{ВИХ} / U_{BX}$. Опір навантаження R_H дискретно змінюється перемикачем ($R_4=100 \text{ Ом}$, $R_5=200 \text{ Ом}$, $R_6=500 \text{ Ом}$, $R_7=800 \text{ Ом}$, $R_8=1000 \text{ Ом}$).

Результати вимірювань занести в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1. Залежність коефіцієнта підсилення від опору навантаження RC-підсилювача

$R_H, \text{кОм}$								
$U_{ВИХ}, \text{В}$								
k_U								

2. Зняти та побудувати амплітудну характеристику RC-підсилювача $U_{ВИХ} = f(U_{BX})$ при $R_H = 0,5 \text{ кОм}$. Вхідну напругу U_{BX} змінювати від 0 до значення $3 \cdot U_{BX \text{ max}}$.

Результати вимірювань занести в таблицю виду табл. 2.2. Крок зміни вхідної напруги (тобто кількість точок в таблиці) вибирати залежно від швидкості зміни вихідної напруги.

Таблиця 2.2. Амплітудна характеристика RC – підсилювача

U_{BX}, B								
$U_{ВИХ}, B$								

3. Зняти та побудувати амплітудно-частотну характеристику підсилювача $k_U = f(f_G)$ при $R_H = 0.5 \text{ кОм}$, $U_{BX} = 0.01 \cdot N_B \text{ В}$, змінюючи частоту генератора сигналів f_G у межах (0,02...20) кГц в наступних діапазонах - (20 Гц...200 Гц), (200 Гц...2 кГц), (2 кГц...20 кГц). В кожному діапазоні обирати свій крок.

Результати вимірювань занести в таблицю виду табл. 2.3. Крок зміни частоти (кількість точок в таблиці) вибирати залежно від швидкості зміни вихідної напруги.

Таблиця 2.3. Амплітудно-частотна характеристика підсилювача

$f_G, \text{кГц}$								
$U_{ВИХ}, B$								
k_U								

Частотну характеристику будувати в напівлогарифмічному масштабі $k'_U = f'(\lg(f_G))$, відкладаючи по осі частот не f_G , а $\lg(f_G)$.

4. Замалювати осцилограми вхідної та вихідної напруг RC – підсилювача при малих ($U_{BX} = 0.01 \text{ В}$) і великих ($U_{BX} = 1 \text{ В}$) вхідних сигналах.

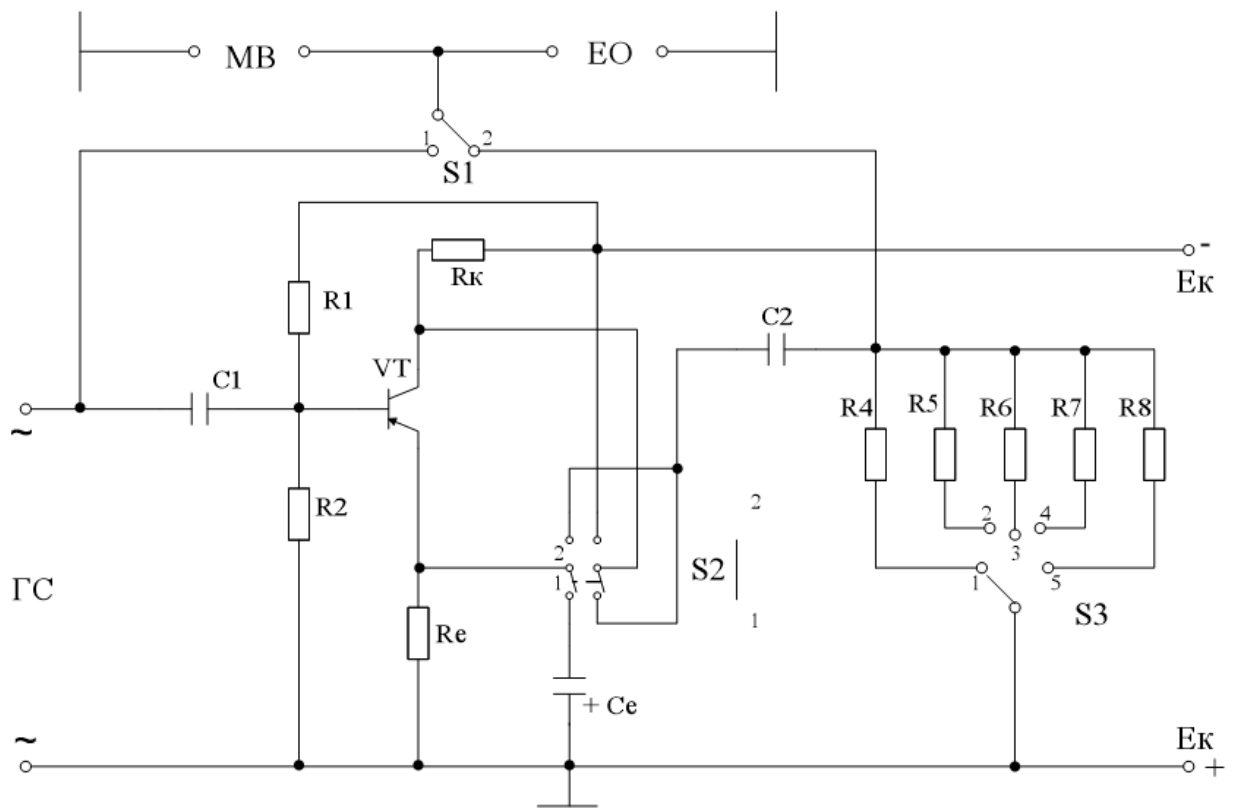


Рис. 2.1. Досліджувана схема підсилювачів

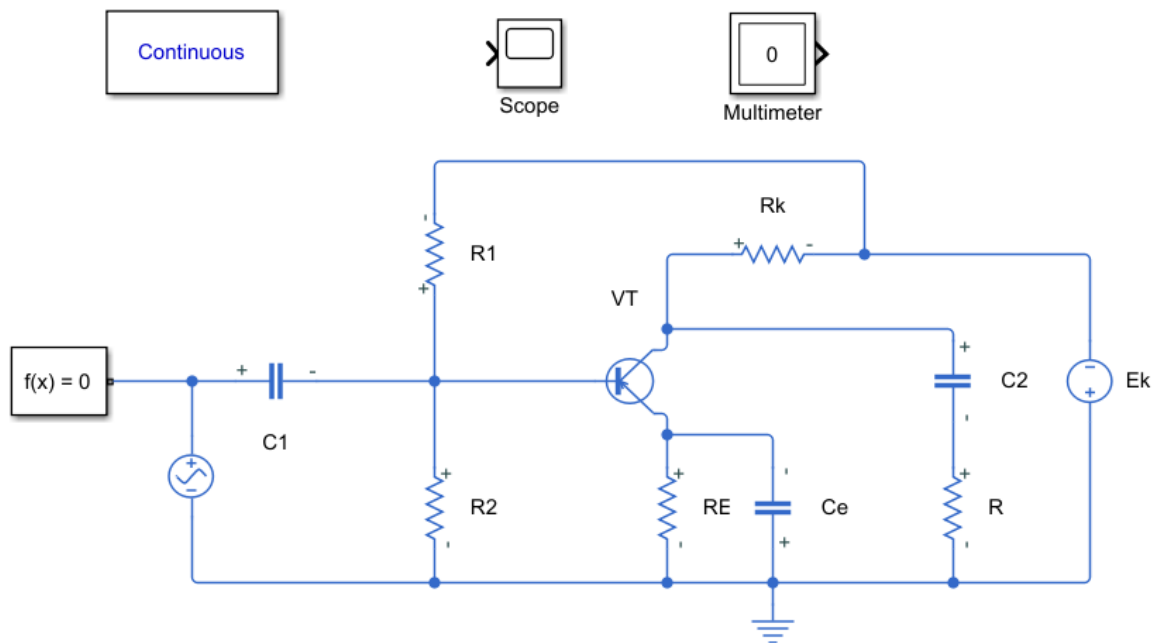


Рис. 2.1.1 Досліджувана схема(ключ S2 в положенні 1) програмному середовищі Matlab Simulink

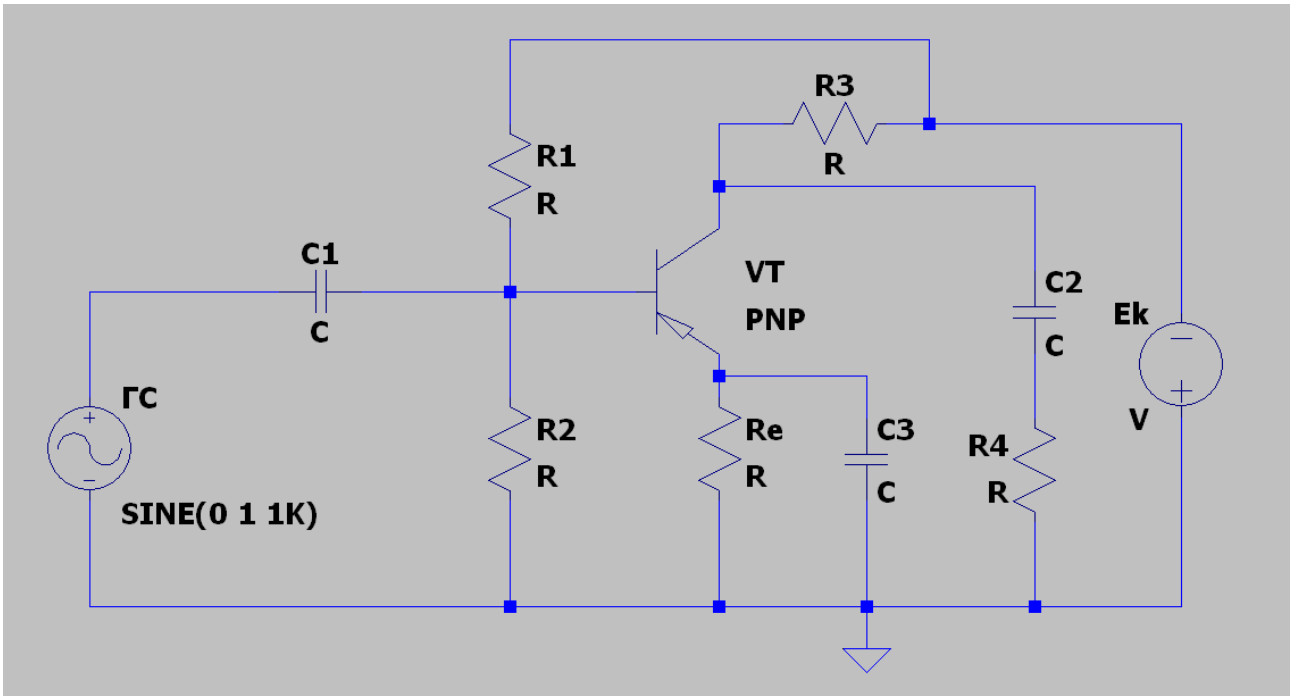


Рис. 2.1.2 Досліджувана схема(ключ S2 в положенні 1) програмному середовищі LTspice
Дослідження схеми емітерного повторювача.

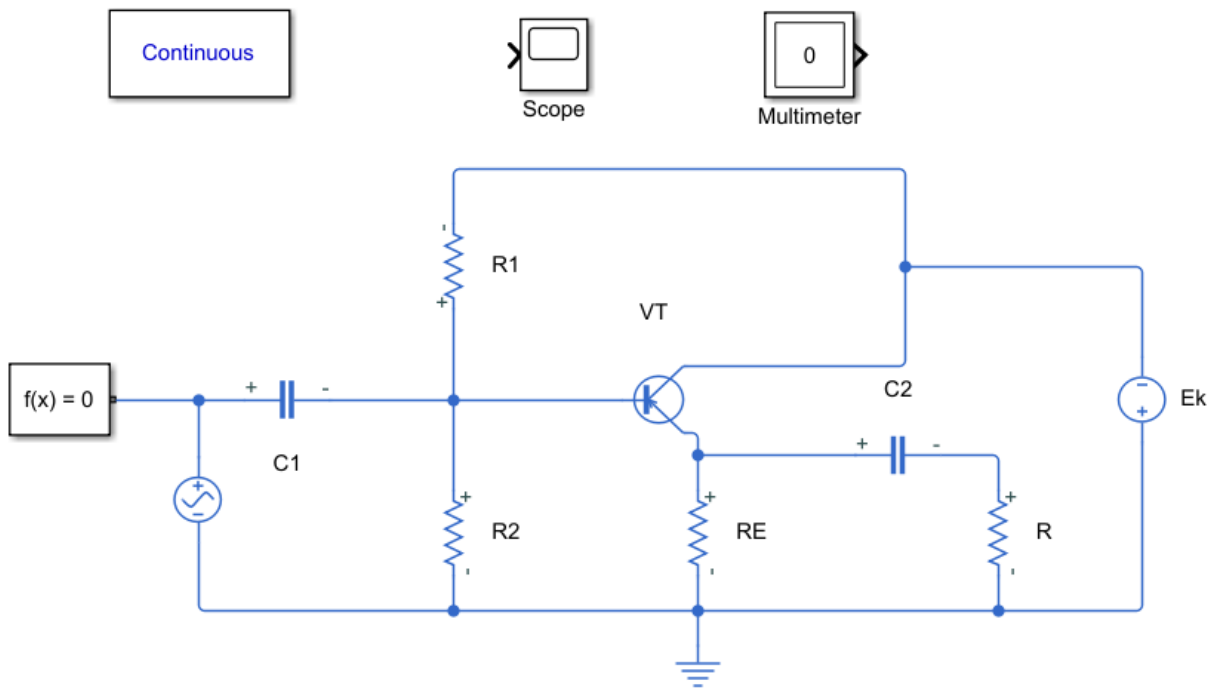


Рис. 2. 2. 1 Досліджувана схема (ключ S2 в положенні 2) в програмному середовищі
 Matlab Simulink

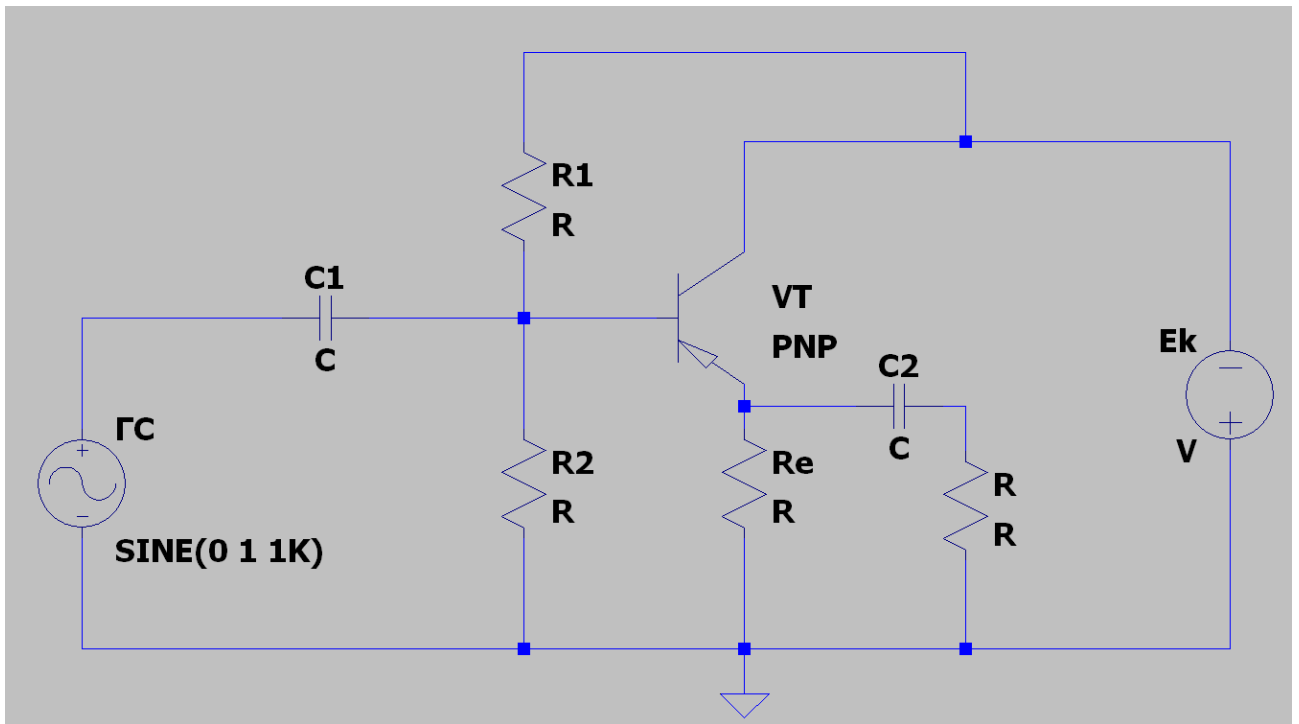


Рис. 2.2.2 Досліджувана схема(ключ S2 в положенні 1) програмному середовищі LTspice

Для даної схеми повторюються всі вимірювання, виконані для попередньої. Однотипні характеристики для обох схем доцільно будувати в одних системах координат, для зручності їх порівняння.

5. Зняти та побудувати залежність коефіцієнта передачі емітерного повторювача (схема зі спільним колектором – СК) від опору навантаження $k_U = f(R_H)$ при $f_T = (1000 + 100 \cdot N_{\beta} \cdot N_{\beta_T}) \text{ Гц}$, $U_{BX} = 1 \text{ В}$, змінюючи R_H в межах (0,5...2) кОм.

Результати вимірювань занести в таблицю 2.4. Графік залежності будувати в одній системі координат із графіком для RC-підсилювача (п.1).

Таблиця 2.4. Залежність коефіцієнта підсилення від опору навантаження емітерного повторювача

$R_H, \text{кОм}$									
$U_{ВИХ}, \text{В}$									
k_U									

6. Зняти та побудувати амплітудну характеристику емітерного

повторювача $U_{ВИХ} = f(U_{ВХ})$ при $R_H = 0,5 \text{ кОм}$, $f_G = (1000 + 100 \cdot N_B \cdot N_G) \text{ Гц}$, змінюючи вхідну напругу $U_{ВХ}$ в межах $(0 \dots 2) \text{ В}$.

Результати вимірювань занести в таблицю 2.5. Для порівняння графік будувати в одній системі координат з аналогічною характеристикою для RC – підсилювача.

Таблиця 2.5. Амплітудна характеристика емітерного повторювача

$U_{ВХ}, \text{В}$								
$U_{ВИХ}, \text{В}$								

7. Зняти та побудувати амплітудно-частотну характеристику емітерного повторювача $k_U = f(f_G)$ при $R_H = 0,5 \text{ кОм}$, $U_{ВХ} = 1 + 0,1 \cdot N_B \text{ В}$, змінюючи частоту f_G в межах $(0,02 \dots 20) \text{ кГц}$.

Результати вимірювань занести в таблицю виду табл. 2.6. Графік будувати в напівлогарифмічному масштабі в одній системі координат з аналогічною залежністю для RC -підсилювача. Кількість точок вимірювання визначається так само, як і для RC -підсилювача.

Таблиця 2.6. Амплітудно-частотна характеристика емітерного повторювача

$f_G, \text{кГц}$								
$U_{ВИХ}, \text{В}$								
k_U								

8. Замалювати форму вхідної та вихідної напруг емітерного повторювача при двох значеннях вхідної напруги $U_{ВХ} = 0,5 \text{ В}$; $U_{ВХ} = 2 \text{ В}$. Порівняти отримані графіки та пояснити отримані результати.

9. За амплітудними характеристиками RC -підсилювача та амплітудного повторювача (п. 2 та п.6) розрахувати динамічні діапазони даних схем за наступною формулою:

$$D = \frac{U_{BX \max}}{U_{BX \min}},$$

попередньо визначивши на графіках точки $U_{BX \max}$ та $U_{BX \min}$ (див. теоретичні відомості до даної лабораторної роботи).

10. За частотними характеристиками (п.3 та п.7) визначити для RC – підсилювача та емітерного повторювача:

- максимальний коефіцієнт підсилення на середніх частотах,
- нижню граничну частоту f_H і верхню граничну частоту f_B на рівні $0,707 \cdot k_{U0}$,
- смугу пропускання підсилювача $\Delta f = f_B - f_H$,
- добротність $Q = k_{U0} \cdot \Delta f \approx k_U \cdot f_B$.

Теоретичні відомості до лабораторної роботи

Підсилювачем називається пристрій, призначений для збільшення потужності електричних сигналів.

Потужність вихідного сигналу відносно потужності вхідного сигналу збільшується за рахунок енергії джерела живлення.

Принцип підсилення полягає в тому, що малопотужний вхідний сигнал керує потоком енергії значно більшої потужності, яка надходить від джерела енергії (джерела живлення) у навантаження. З цією метою між джерелом живлення та навантаженням підключений підсилювальний елемент (наприклад, транзистор), опір якого змінюється під впливом вхідного сигналу. Зміна внутрішнього опору підсилювального елемента веде до перерозподілу енергії між ним та навантаженням. Таким чином змінюється амплітуда вихідного сигналу за законом, що задається вхідним сигналом та властивостями підсилювального елемента [3].

Основними параметрами підсилювача є:

1. **Коефіцієнт підсилення** – це відношення вихідного параметра до вхідного: $k_U = U_{вих} / U_{вх}$ – коефіцієнт підсилення за напругою; $k_I = I_{вих} / I_{вх}$ –

коефіцієнт підсилення за струмом; $k_P = P_{ВИХ} / P_{ВХ}$ – коефіцієнт підсилення за потужністю.

Підсилювач, насамперед, підсилює потужність електричного сигналу.

2. **Вхідний опір** – це опір між вхідними клемми підсилювача для змінного струму: $R_{ВХ} = \Delta U_{ВХ} / \Delta I_{ВХ}$.

3. **Вихідний опір** – це опір між вихідними клемми підсилювача для змінного струму: $R_{ВИХ} = \Delta U_{ВИХ} / \Delta I_{ВИХ}$.

4. **Коефіцієнт корисної дії** (ККД) підсилювача – це відношення потужності, що надходить у навантаження, до потужності, яка споживається від джерела живлення: $\eta = P_H / P_{ДЖ}$. (Примітка: В електричних колах постійного струму потужність визначається як $P = UI$, де U – напруга, I – сила струму. В колах змінного струму добуток миттєвих значень напруги u та струму i є миттєвою потужністю: $p = ui$, тобто потужністю в даний момент часу, яка є змінною в часі величиною).

Процеси в підсилювачі описуються декількома **основними характеристиками**.

Амплітудно-фазочастотна характеристика.

У загальному випадку, вихідна напруга $u_{ВИХ}(t)$ та струм підсилювача $i_{ВИХ}(t)$ зміщенні за фазою відносно вхідної напруги $u_{ВХ}(t)$ та струму $i_{ВХ}(t)$, що обумовлено наявністю в схемах реактивних елементів. У зв'язку з цим, коефіцієнт підсилення за напругою та струмом є величиною комплексною, яка характеризується модулем і фазою: $k_U^g = \dot{U}_{ВИХ} / \dot{U}_{ВХ}$; $k_I^g = \dot{I}_{ВИХ} / \dot{I}_{ВХ}$.

Модуль коефіцієнта підсилення підсилювачів і його фаза залежать від частоти сигналу, який підсилюється.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) – це залежність модуля коефіцієнту підсилення k_U підсилювача від частоти f_r сигналу, який підсилюється: $k_U = f(f_r)$.

Фазочастотна характеристика (ФЧХ) – це залежність фазового зсуву

φ між вхідним і вихідним сигналами від частоти f_T : $\varphi = f(f_T)$.

Приклад АЧХ і ФЧХ показаний на рис. 2.3.

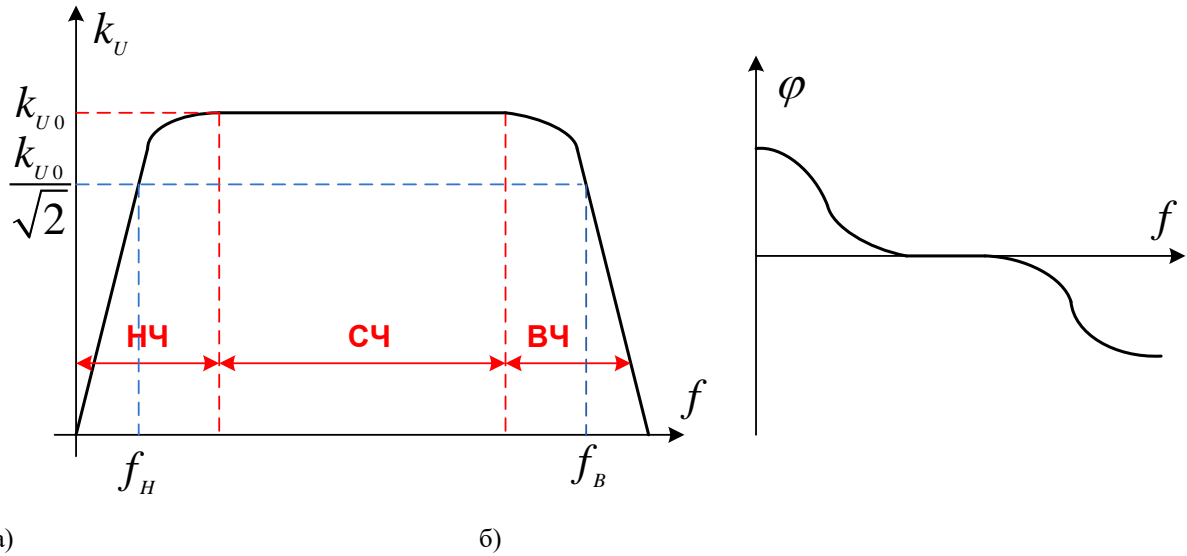


Рис. 2.3 АЧХ (а) та ФЧХ (б) підсилювача

Внаслідок наявності в схемі підсилювача реактивних елементів, а також через частотні властивості транзистора, коефіцієнт підсилення підсилювача має різні значення на різних частотах. Це явище називається **частотними спотвореннями** підсилювача.

Для оцінки частотних спотворень вводиться спеціальний параметр – **коефіцієнт частотних спотворень** M , який дорівнює відношенню коефіцієнта підсилення на середніх частотах (СЧ) k_{U0} до коефіцієнта підсилення k_{Uf} на даній частоті f :

$$M = \frac{k_{U0}}{k_{Uf}}. \quad (5)$$

Частоти, на яких коефіцієнт спотворень M досягає гранично припустимого значення, рівного $\sqrt{2} = 1.41$, називаються **верхньою** f_B та **нижньою** f_H граничними частотами. Граничні частоти згідно виразу (4.1)

визначаються на рівні: $k_{Uf} = \frac{k_{U0}}{M} = \frac{k_{U0}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot k_{U0}$.

Різниця $\Delta f = f_B - f_H$ називається **смужкою пропускання** підсилювача.

Важливою для підсилювача є також *амплітудна характеристика* – залежність амплітуди вихідного сигналу від амплітуди вхідного (рис. 2.4).

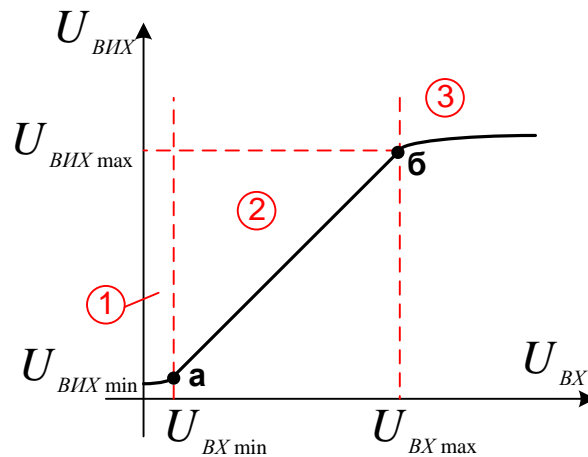


Рис. 2.4 Амплітудна характеристика

Для ідеального підсилювача амплітудна характеристика є прямою лінією, що проходить через початок координат.

Амплітудна характеристика реального підсилювача збігається з характеристикою ідеального лише на ділянці *аб* (див. рис. 2.4).

При вхідних сигналах $U_{ВХ} > U_{ВХ max}$ вихідна напруга підсилювача перестає зростати, оскільки при цьому підсилювач переходить з режиму *A* лінійного підсилення в режим *B* (рис. 2.5). Результатом є спотворення вихідного сигналу.

При вхідних сигналах $U_{ВХ} < U_{ВХ min}$ вихідна напруга підсилювача залишається практично постійною і рівною $U_{ВІХ min}$. Напруга $U_{ВІХ min}$ називається напругою власних шумів підсилювача. *Власні шуми підсилювача* – це паразитні коливання, які спричиняються зовнішніми завадами, не ідеальністю джерел живлення, процесами в елементах перетворювача (наприклад, в реактивних елементах), які сприймаються підсилювачем як корисні сигнали і, відповідно, підсилюються ним. Якщо амплітуда вхідного сигналу буде меншою за амплітуду власних шумів, цей сигнал не буде вирізнений, тому за допомогою підсилювача неможливо підсилювати сигнали з амплітудою $U_{ВХ} < U_{ВХ min}$.

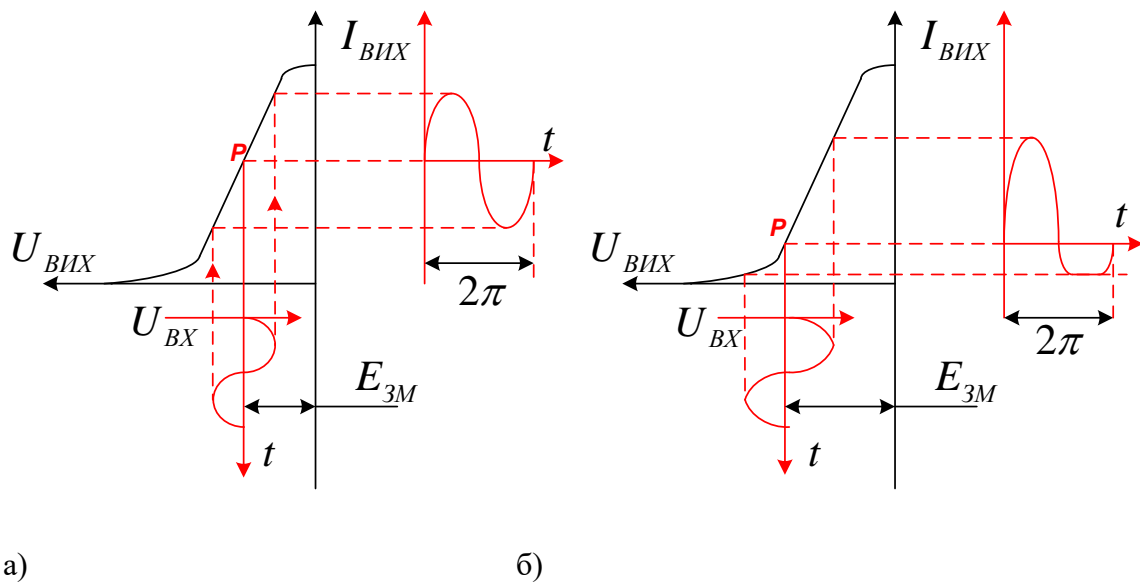


Рис. 2.5. Прхідна характеристика підсилювача $U_{BIX} = f(I_{BX})$, форми вхідного $U_{BX} = f(t)$ та вихідного сигналів $I_{BIX} = f(t)$ для режиму лінійного підсилення **A** (а) та нелінійного підсилення **B** (б).

Відношення $\frac{U_{BX \max}}{U_{BX \min}} = D$ називається **динамічним діапазоном**

підсилювача.

Найбільше поширення одержали підсилювачі, у яких транзистор включений за схемою зі спільним емітером. Такі підсилювачі забезпечують максимальний коефіцієнт підсилення за потужністю.

Підсилювач із резистивно-ємнісним зв'язком (RC – підсилювач) – це багатокаскадний підсилювач, у якому зв'язок між каскадами здійснюється через роздільні конденсатори. На рис. 2.6 зображена схема одного каскаду підсилення.

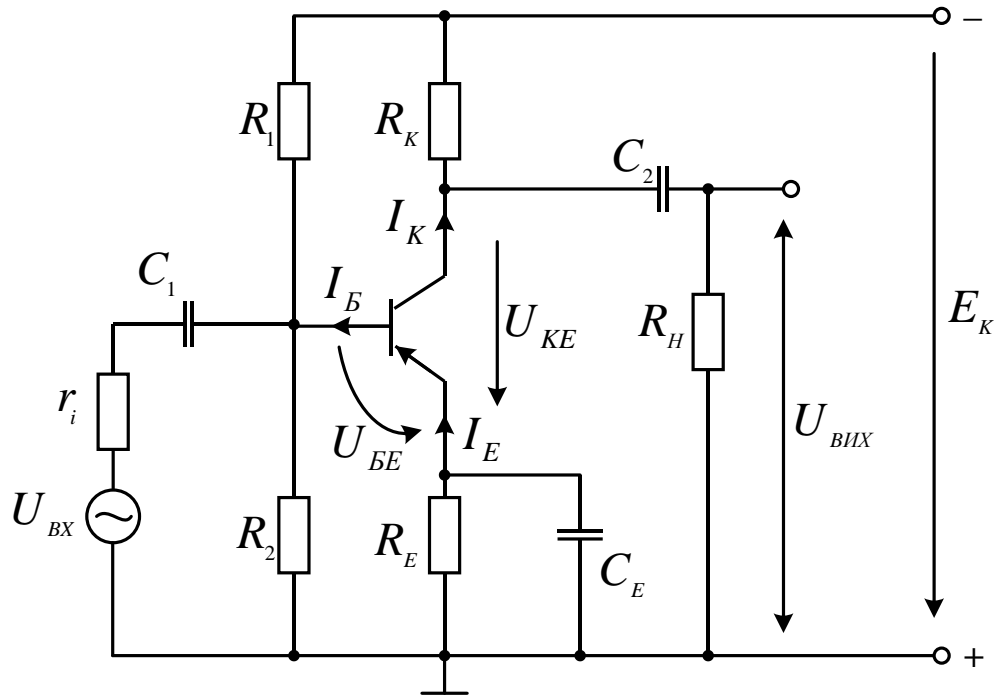


Рис. 2.6 Схема однокаскадного RC – підсилювача

Основним елементом підсилювального каскаду є транзистор VT , який забезпечує підсилення електричного сигналу.

Резистори R_1 , R_2 є входним ділником напруги. Вони визначають напругу зміщення, яка подається у входне коло транзистора між базовим та емітерним виводами. Таким чином задається положення робочої точки на входній ВАХ транзистора, яке в свою чергу визначає положення робочої точки на вихідних ВАХ і визначає клас підсилення підсилювача.

Опір R_K є колекторним навантаженням транзистора. За допомогою цього резистора задається режим роботи колекторного кола транзистора по постійному струму (визначається нахил навантажувальної характеристики, яка будується на вихідних ВАХ транзистора і на перетині якої з цими характеристиками визначається робоча точка для вихідного каскаду – рис. 2.7).

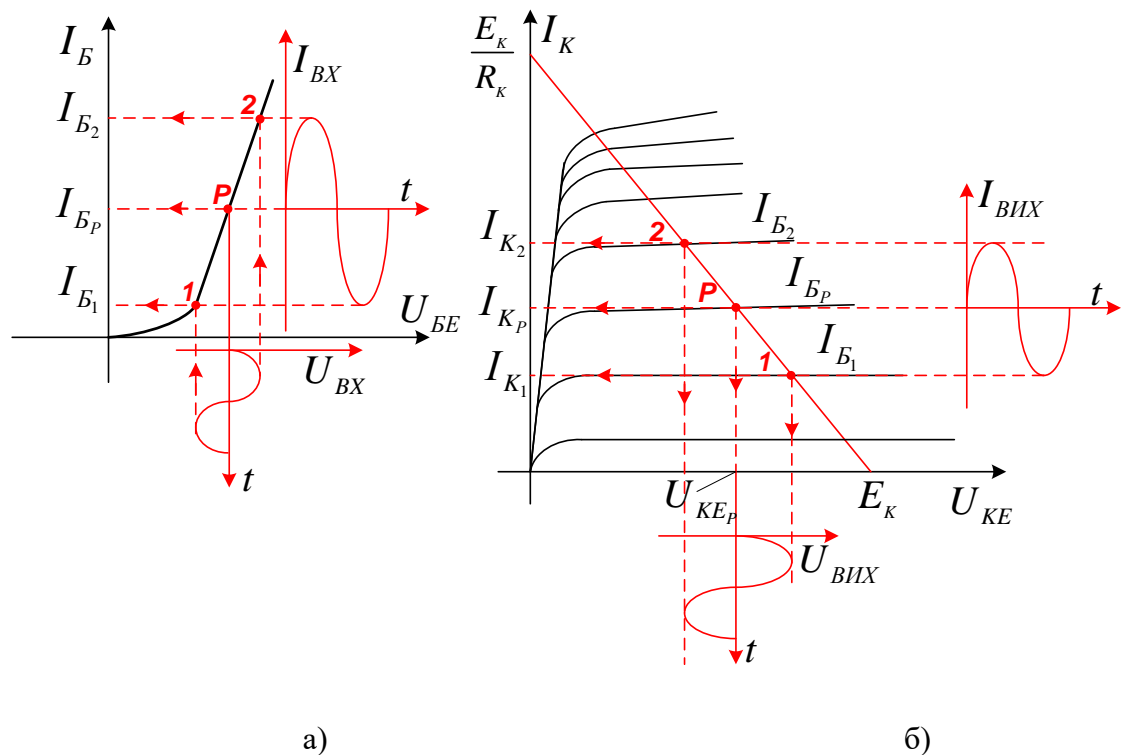


Рис. 2.7. Графічна ілюстрація процесу підсилення в підсилювачі на біполярному транзисторі

Резистор R_E забезпечує негативний зворотний зв'язок по постійному струму і призначений для термостабілізації робочої точки транзистора. Оскільки струм через транзистор в схемі рис. 4.5 протікає знизу вгору, то на емітерному виводі транзистора наявний „-” потенціал. Збільшення температури призводить до зростання теплового струму транзистора I_{K0} (див. л.р. №2), і, як наслідок, до збільшення загального струму колектора: $I_K = \alpha I_E + I_{K0}$. Зростання струму колектора призводить до збільшення струму емітера згідно співвідношення $\Delta I_E = \Delta I_K / \alpha$. Зростання струму емітера викликає збільшення падіння напруги на резисторі R_E і, відповідно, збільшення „-” потенціалу на емітері. Для транзистора $p-n-p$ типу, який використаний в даній схемі, негативний потенціал на емітері призводить до прикривання приладу, і, як наслідок, до зменшення струму колектора. Таким чином здійснюється температурна стабілізація положення робочої точки.

Конденсатор C_E по змінному струму шунтує резистор R_E і виключає

негативний зворотний зв'язок по змінному струму. Завдяки цьому процеси стабілізації робочої точки реалізуються лише для постійної складової.

Роздільний конденсатор C_1 розділяє джерело вхідного сигналу U_{BX} та вхід підсилювача по постійному струму. Оскільки опір конденсатора для змінного струму є незначним, то на вхід підсилювального елемента подається чисто синусоїдальний сигнал, який в подальшому підсилюється. Крім того, завдяки цьому конденсаторові постійна напруга з резистивного діляника R_1 , R_2 не буде впливати на режим роботи джерела вхідного сигналу U_{BX} .

Конденсатор C_2 виконує аналогічні функції у вихідному колі. У результаті, в навантаження буде надходити виключно змінна складова підсиленого сигналу.

Якщо підсилювач багатокаскадний, то навантаження R_H є вхідним опором наступного каскаду.

Принцип роботи транзисторного підсилювача полягає в тому, що при невеликій зміні вхідного сигналу, який подається між базою і емітером транзистора, струм бази зміниться на деяке значення ΔI_B . При цьому, струм колектора зміниться на значно більше значення $\Delta I_K = \beta \Delta I_B$. Навантаженням транзистора по змінному струму є резистори R_K та R_H , увімкнені паралельно. Отже, еквівалентний опір навантаження транзистора по змінному струму

$$R_{H_{EKВ}} = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}. \text{ Принцип підсилення наочно ілюструє рис. 2.7.}$$

Початкове положення робочої точки P задається відповідним вибором резисторів діляника R_1 , R_2 (рис. 2.6), і визначається значенням напруги у вхідному колі U_{BE_p} . Спроектувавши точку U_{BE_p} на вхідну характеристику $I_B = f(U_{BE})$ визначається положення робочої точки P та струм бази I_{B_p} , що відповідає їй (рис. 2.7.а).

На вихідних характеристиках $I_K = f(U_{KE})$ обирається характеристика, знята для струму I_{B_p} і визначається положення робочої точки як точка

перетину даної характеристики з навантажувальною прямою. Для робочої точки визначаються початкові значення струму I_{Kp} та напруги U_{KEp} (рис.2.7.б).

Під впливом напруги вхідного сигналу змінюється величина струму бази. Проекція амплітудних значень вхідного сигналу на вхідну характеристику дає два значення струму бази I_{B1} та I_{B2} (точки 1 та 2 на рис. 2.7). Зміна базового струму викликає у колекторному колі пропорційну зміну струму колектора (відповідно струми I_{K1} та I_{K2}). Зростання колекторного струму, в свою чергу, призводить до збільшення падіння напруги на еквівалентному опорі навантаження R_{HEKB} [5].

Проекцією точок 1 та 2 на вісь напруг вихідних характеристик здійснюється побудова вихідного підсиленого сигналу $u_{KE}(t)$. З графіків видно, що в схемі відбувається поворот фази синусоїдальної вхідної напруги на 180^0 (вхідна напруга $u_{BE}(t)$ та вихідна напруга $u_{KE}(t)$ знаходяться в протифазі).

Режим роботи підсилювача і клас підсилення визначаються вибором робочої точки P на вхідній і вихідній динамічних характеристиках транзистора. Для одержання максимальної вихідної потужності на навантаженні динамічна навантажувальна характеристика вибирається таким чином, щоб вона перебувала поблизу лінії гранично припустимого режиму P_{kmax} , але не перетинала її. У режимі підсилення класу A робоча точка P вибирається приблизно посередині динамічної навантажувальної характеристики.

Побудовані графіки (рис. 2.7) дозволяють визначити основні параметри підсилювального каскаду (7):

$$R_{\text{ex}} = \frac{\Delta U_{BX}}{\Delta I_{BX}} = \frac{U_{BE \text{ max}} - U_{BEp}}{I_{B \text{ max}} - I_{Bp}}; \quad K_I = \frac{\Delta I_{BIX}}{\Delta I_{BIX}} = \frac{I_{K \text{ max}} - I_{Kp}}{I_{B \text{ max}} - I_{Bp}};$$

$$K_U = \frac{\Delta U_{BIX}}{\Delta U_{BX}} = \frac{U_{KE \text{ max}} - U_{KEp}}{U_{BE \text{ max}} - U_{BEp}}; \quad R_{BIX} \approx R_K. \quad (7)$$

Розглянута схема має АЧХ, показану на рис. 2.5. Зниження коефіцієнта підсилення на низьких частотах (НЧ) пов'язане з наявністю в схемі розділових конденсаторів C_1 , C_2 , а також конденсатора C_E . При зниженні частоти f опір конденсаторів $x_C = 1/(2\pi fC)$ зростає. У результаті, падіння напруги на них збільшується, що призводить до зменшення амплітуди сигналу, що надходить на вхід підсилювального елемента, і, відповідно, підсиленої напруги на навантаженні. В області середніх частот (СЧ) опір конденсаторів C_1 , C_2 , C_E стає зневажливо малим і його можна не враховувати. В області високих частот (ВЧ) починають проявлятися частотні властивості транзистора (почерговий перехід транзистора з режиму насичення в режим відсічки в навпаки – ключовий режим роботи) і його коефіцієнт підсилення падає (оскільки підсилення можливе лише в активному режимі). Розглянута схема підсилювального каскаду підсилює як струм ($I_K = I_B \cdot \beta$, $\beta > 1$), так і напругу ($U_{KE} = U_{BE} + U_{KB}$), завдяки чому вона знаходить широке застосування як складова частина різних транзисторних пристроїв.

Емітерний повторювач – це підсилювальний каскад, зібраний за схемою із спільним колектором (СК). Схема емітерного повторювача наведена на рис. 2.8.

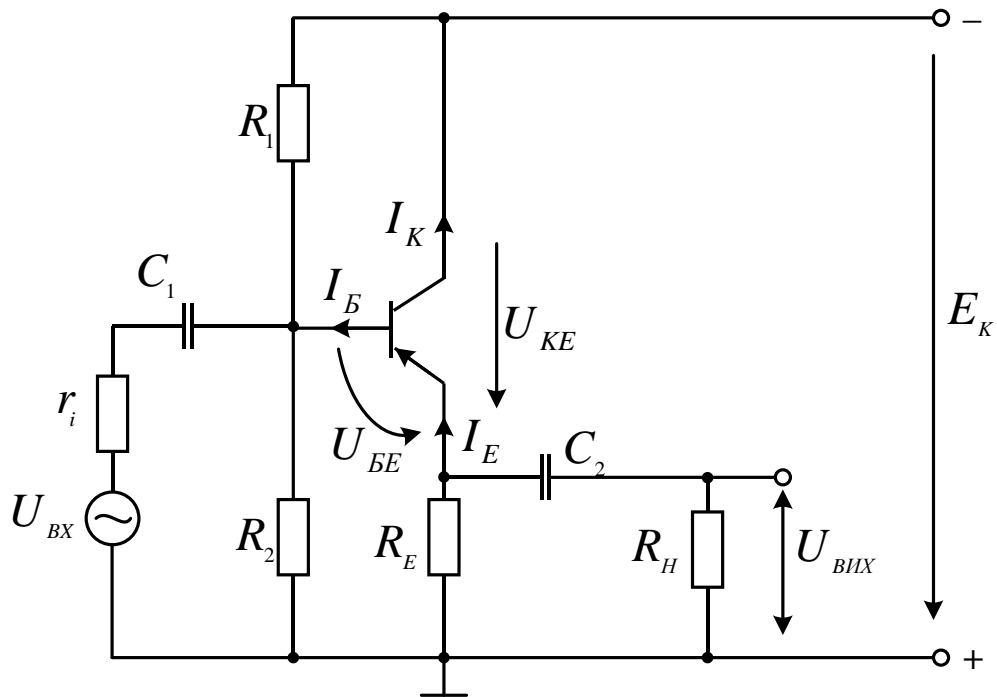


Рис. 2.8. Схема однокаскадного емітерного повторювача

Призначення переважної частини елементів даної схеми аналогічне попередній (рис. 2.6). Але оскільки навантаження в схемі СК вмикається в коло емітера, то резистор R_E є навантаженням схеми по постійному струму і задає робочу точку вихідного кола транзистора. Навантаженням транзистора по змінному струму є паралельно включені опори R_H та R_E . Еквівалентний опір навантаження: $R_{H_{екв}} = R_H R_E / (R_H + R_E)$.

Вихідна напруга підсилювача на рис. 2.8: $U_{ВИХ} = U_{ВХ} - U_{БЕ}$. Оскільки в транзисторі напруга $U_{БЕ}$ дуже мала (в активному режимі перехід база-емітер транзистора відкритий, і падіння напруги на ньому мінімальне), можна вважати, що $U_{ВИХ} = U_{ВХ}$. Отже, емітерний повторювач не підсилює напругу (його коефіцієнт підсилення $k_U \approx 1$). Однак схема забезпечує підсилення струму, оскільки $\Delta I_E = (\beta + 1)\Delta I_B$.

Таким чином, емітерний повторювач забезпечує підсилення струму і потужності.

У схемі емітерного повторювача відсутній шунтувальний конденсатор

C_E . Отже, вся вихідна напруга виділяється на резисторі R_E . Відносно переходу база-емітер транзистора ця напруга включена послідовно і зустрічно із вхідною напругою. Таким чином, у схемі реалізується послідовний негативний зворотний зв'язок по вихідній напрузі. У зв'язку із цим, емітерний повторювач має великий вхідний і малий вихідний опір. Зазначені властивості емітерного повторювача визначають області його застосування.

Емітерний повторювач використовується як підсилювач струму та як елемент узгодження високоомного джерела вхідного сигналу з низькоомним навантаженням.

Оскільки в емітерному повторювачі реалізується глибокий негативний зворотний зв'язок, він відповідним чином впливає на параметри та характеристики підсилювача. Зокрема, поліпшується амплітудно-частотна характеристика і розширюється смуга пропускання, зменшуються лінійні та нелінійні спотворення, однак коефіцієнт підсилення за напругою значно падає.

Контрольні питання

1. Основні режими роботи біполярного транзистора (стан *pn*-переходів для кожного режиму роботи).
2. Визначення підсилювача.
3. Основні параметри підсилювача.
4. Що таке амплітудно-частотна характеристика підсилювача? Зовнішній вигляд.
5. Що таке фазочастотна характеристика підсилювача? Зовнішній вигляд.
6. Що таке амплітудна характеристика? Зовнішній вигляд.
7. Явище частотних спотворень підсилювача. Коефіцієнт частотних спотворень.
8. Пояснити як за експериментально знятими характеристиками визначити смугу пропускання та добротність підсилювача.

9. Вигляд амплітудної характеристики ідеального підсилювача.
10. Пояснити як за експериментально знятими характеристиками визначити динамічний діапазон підсилювача.
11. Чим зумовлений спад амплітудно-частотної характеристики на низьких (НЧ) та високих (ВЧ) частотах?
12. Чим зумовлена відмінність амплітудної характеристики реального підсилювача від ідеальної для високих напруг?
13. Що таке власні шуми підсилювача?
14. Що таке динамічний діапазон підсилювача?
15. По якій схемі увімкнений транзистор в емітерному повторювачі?
16. Які властивості транзистора дозволяють використовувати його як підсилювальний елемент?
17. Чому емітерний повторювач не підсилює напругу?
18. Призначення елементів схем RC -підсилювача та емітерного повторювача.
19. Види зворотного зв'язку в підсилювачах.

Лабораторна робота №3 „Дослідження ОП з негативним зворотним зв'язком. Розробка інструментального підсилювача”

Мета роботи: ознайомитись із операційним підсилювачем; дослідити схеми ввімкнення ОП із негативним зворотним зв'язком; розробити інструментальний підсилювач.

Теоретичні відомості

Операційні підсилювачі із негативним зворотним зв'язком можуть бути ввімкнені у режимі повторювачів, неінвертуючих та інвертуючих підсилювачів. Ідеальний ОП володіє нескінченно великим коефіцієнтом підсилення, входним опором та шириною смуги пропускання. Однак ці параметри в реальних операційних підсилювачах є величинами скінченними, тому слід брати до уваги ці обмеження. Також необхідно звертати увагу на такі параметри ОП, як швидкість наростання сигналу та діапазон насичення [3].

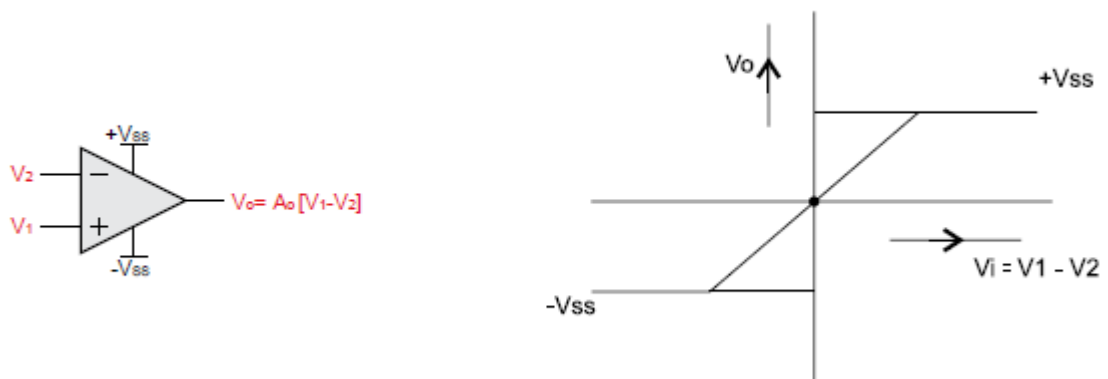


Рис. 3.1

Частотні властивості ОП можна дослідити за допомогою генератора імпульсів. На вхід ОП слід подати синусоїдальний, прямокутний чи трикутний сигнал і змінюючи його частоту спостерігати за допомогою осцилографа зміну форми вихідного сигналу. В схема неінвертуючого ОП

за наявності двоканального осцилографа досить зручно спостерігати перехідний процес.

ОП може бути розглянутий, як джерело напруги, кероване напругою з нескінченно високим коефіцієнтом підсилення напруги. Для скінченної величини вихідної напруги, вхідна напруга практично рівна нулю. На рис.3.1 зображено ОП, що живиться двополярною напругою V_{SS} (8).

$$V_0 = A_0 \cdot (V_1 - V_2)$$

$$V_1 - V_2 = \frac{V_0}{A_0} \quad (8)$$

В наведених вище формулах, A_0 – коефіцієнт підсилення. В реальних ОП A_0 знаходиться в межах від 10^5 до 10^6 , звідки $V_1 \approx V_2$.

Схема ввімкнення ОП в режимі повторювача зображена на рис. 3.2.

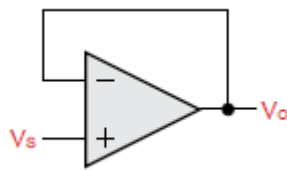


Рис. 3.2. Повторювач на ОП

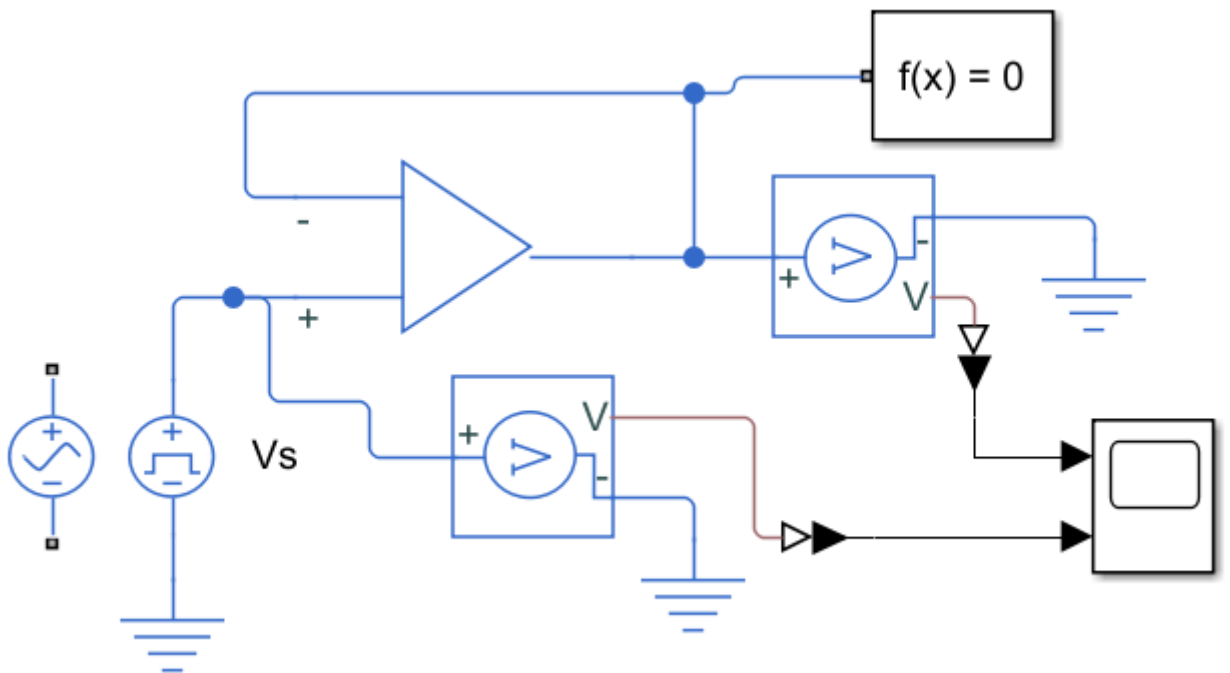


Рис. 3.2.1. Повторювач на ОП в програмному середовищі Matlab Simulink

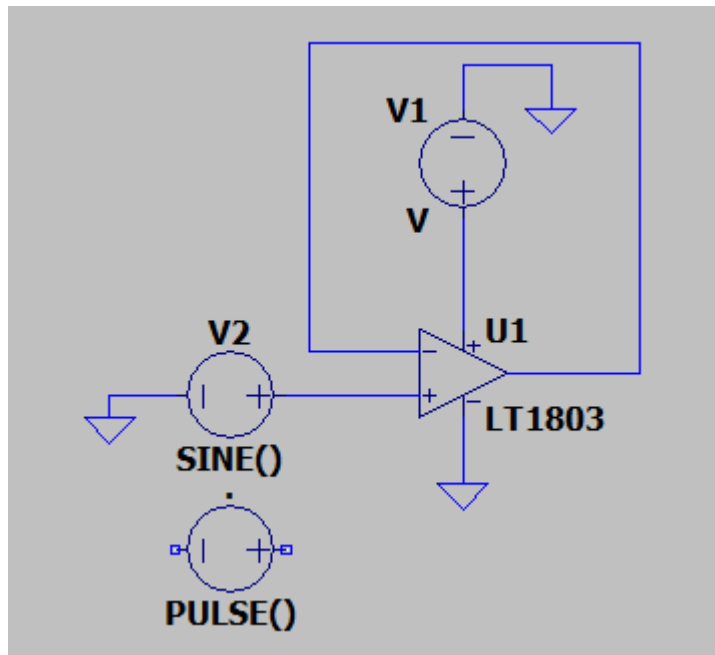


Рис. 3.2.2. Повторювач на ОП в програмному середовищі LTspice

Для такої схеми істинні такі співвідношення (9):

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{A_0}{1 + A_0}$$

$$\frac{V_0}{V_s} \rightarrow 1 \text{ as } A_0 \rightarrow \infty \quad (9)$$

В ОП із замкнутим зворотним зв'язком коефіцієнт підсилення A_0 залежить від частоти відповідно до співвідношення, що зазначене нижче. В ньому ω_{d1} та ω_{d2} називаються доміантними полюсами. Така передаточна функція є типовою для ОП із внутрішньою частотною корекцією.

Передавальна функція для ОП, що працює в режимі повторювача наведена нижче (10):

$$T = \frac{1}{1 + 1/A}$$

$$= \frac{1}{\left(1 + 1/A_0 + s/A_0\omega_{d1} + s/A_0\omega_{d2} + s^2/A_0\omega_{d1}\omega_{d2}\right)}$$

$$= \frac{1}{\left(1 + \left(s/GB + s/A_0\omega_{d2} + s^2/GB \cdot \omega_{d2}\right)\right)} \quad (10)$$

Змінна $GB = A_0\omega_{d1}$, також відома, як ширина смуги пропускання (**gain bandwidth product**) - один із найважливіших параметрів ОП із негативним зворотним зв'язком. Наведена вище передавальна функція може бути записана

наступним чином (11):

$$T = \frac{1}{1 + s/\omega_0 Q + s^2/\omega_0^2}, \quad (11)$$

де

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\frac{\omega_{d2}}{GB}} + \frac{1}{A_0} \sqrt{\frac{GB}{\omega_{d2}}}}, \quad (12)$$

і

$$\omega_0 = \sqrt{GB \cdot \omega_{d2}} \quad (13)$$

Q – добротність (12), $\xi = \frac{1}{2Q}$ – коефіцієнт згасання, а ω_0 – резонансна частота (13).

Залежність амплітуди від $\frac{\omega}{\omega_0}$ а також фази від $\frac{\omega}{\omega_0}$ зображено на рис. 3.3.

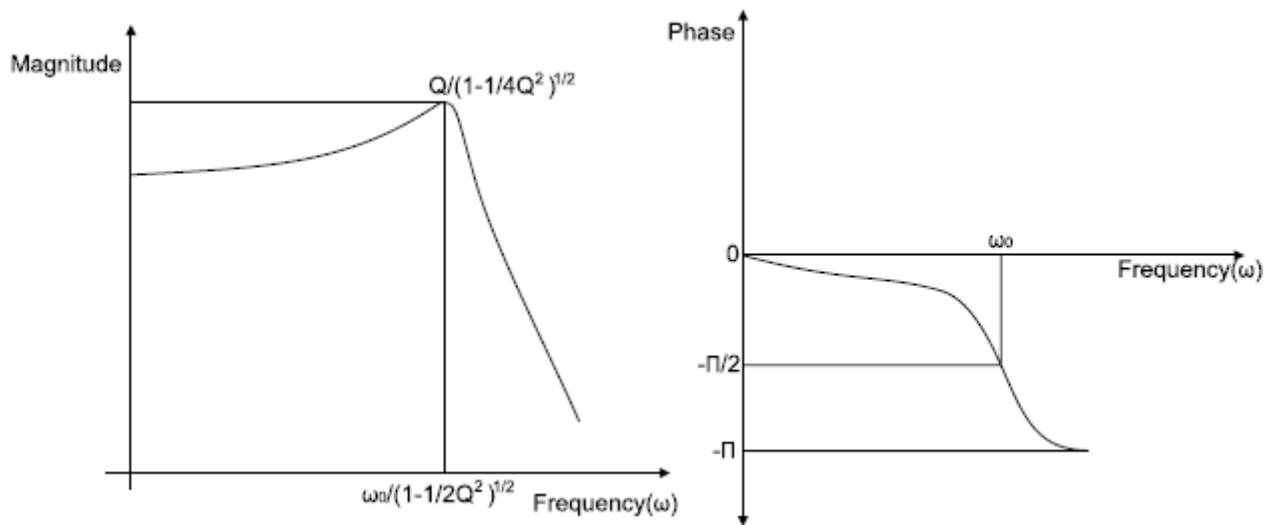


Рис. 3.3

Якщо до ОП, що працює в режимі повторювача, на вхід подати одиничний прямокутний сигнал із амплітудою V_p , а $V_p \cdot GB <$ швидкість наростання, тоді на виході буде сигнал, що зображений на рис. 4 у випадку, коли $Q > \frac{1}{2}$ або $\xi < 1$

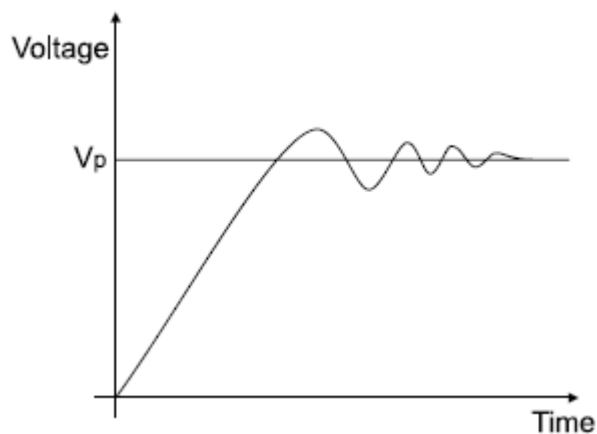


Рис. 3.4

Добротність контура Q приблизно дорівнює кількості видимих вершин на графіку рис. 3.4. Як відомо, швидкість наростання – це максимальне значення, з яким зростає вихідний сигнал ОП. Іншими словами – це максимальна величина відношення $\frac{dV_0}{dt}$. В даній роботі буде досліджено процес, при якому необхідно буде змінювати амплітуду одиничного прямокутного сигналу і досягти такого значення, при якому подальший зріст величини швидкості наростання буде залишатися величиною незмінною.

На рис. 3.5 зображено неінвертуючий (а) та інвертуючий (б) підсилювачі на ОП із коефіцієнтом підсилення 2 [3, 6].



Рис. 3.5. Неінвертуючий (а) та інвертуючий (б) підсилювачі на ОП із коефіцієнтом підсилення 2

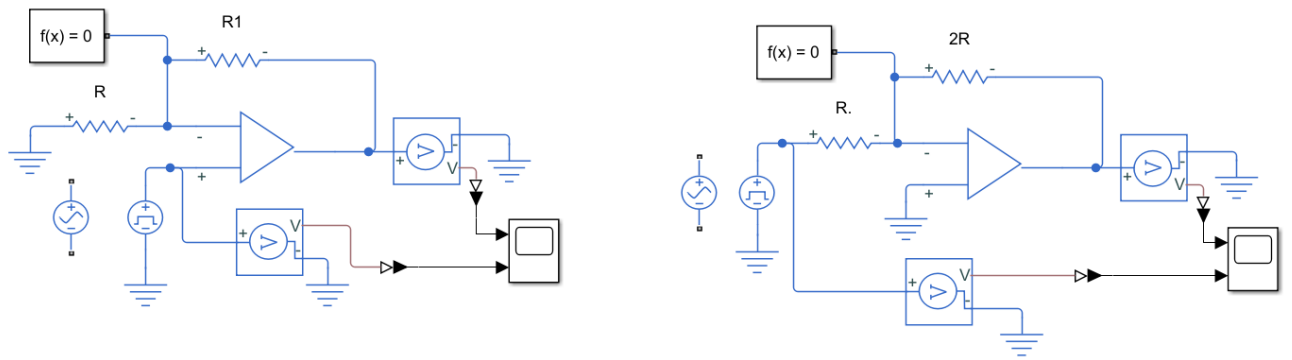


Рис. 3.5.1. Неінвертуючий (а) та інвертуючий (б) підсилювачі на ОП із коефіцієнтом підсилення 2 в програмному середовищі Matlab Simulink

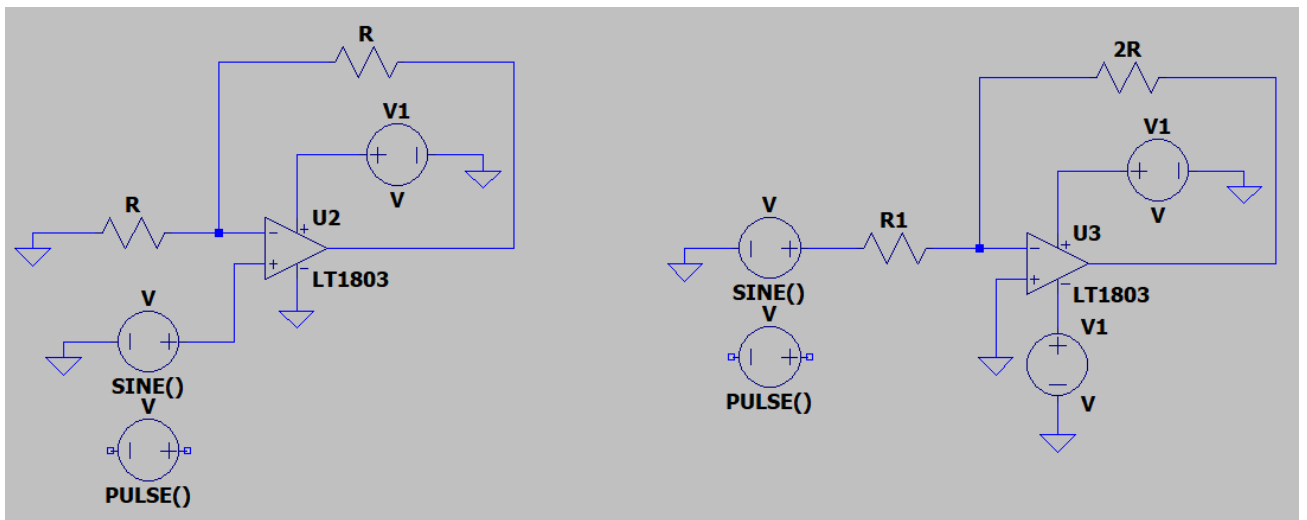


Рис. 3.5.2. Неінвертуючий (а) та інвертуючий (б) підсилювачі на ОП із коефіцієнтом підсилення 2 в програмному середовищі LTspice

На рис. 3.6 зображено інструментальний підсилювач, який виконано на двох ОП.

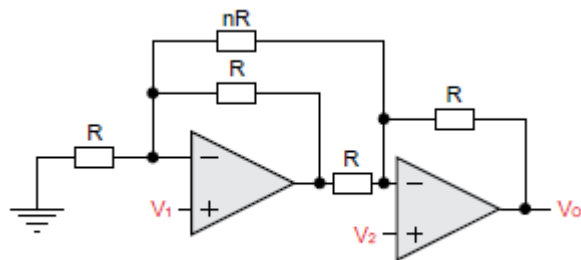


Рис. 3.6. Інструментальний підсилювач на двох ОП

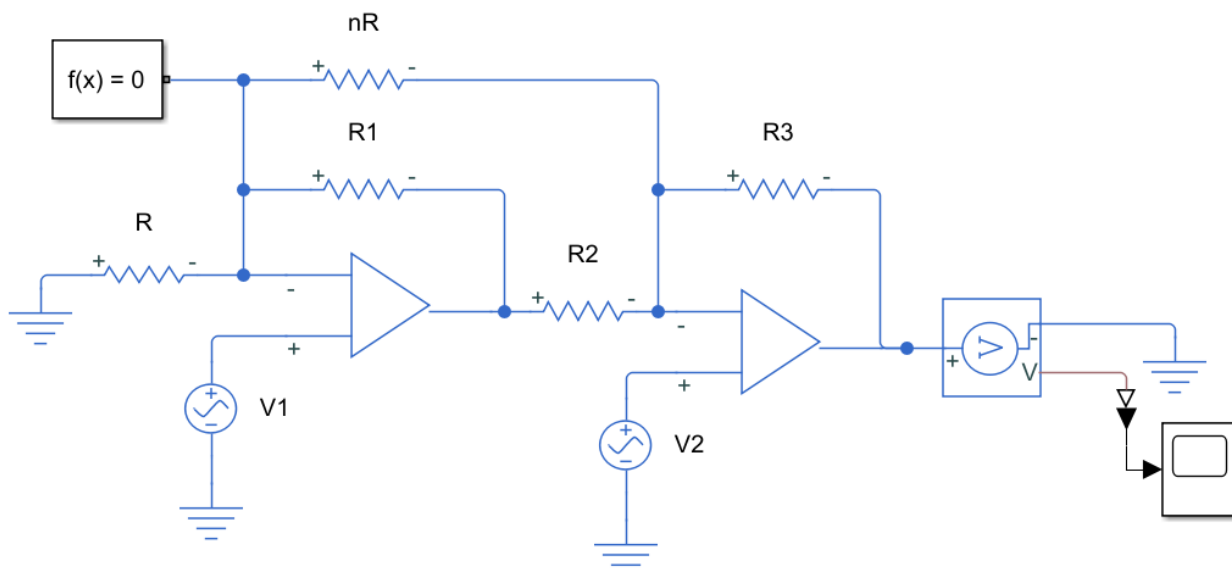


Рис. 3.6.1. Інструментальний підсилювач на двох ОП в програмному середовищі Matlab Simulink

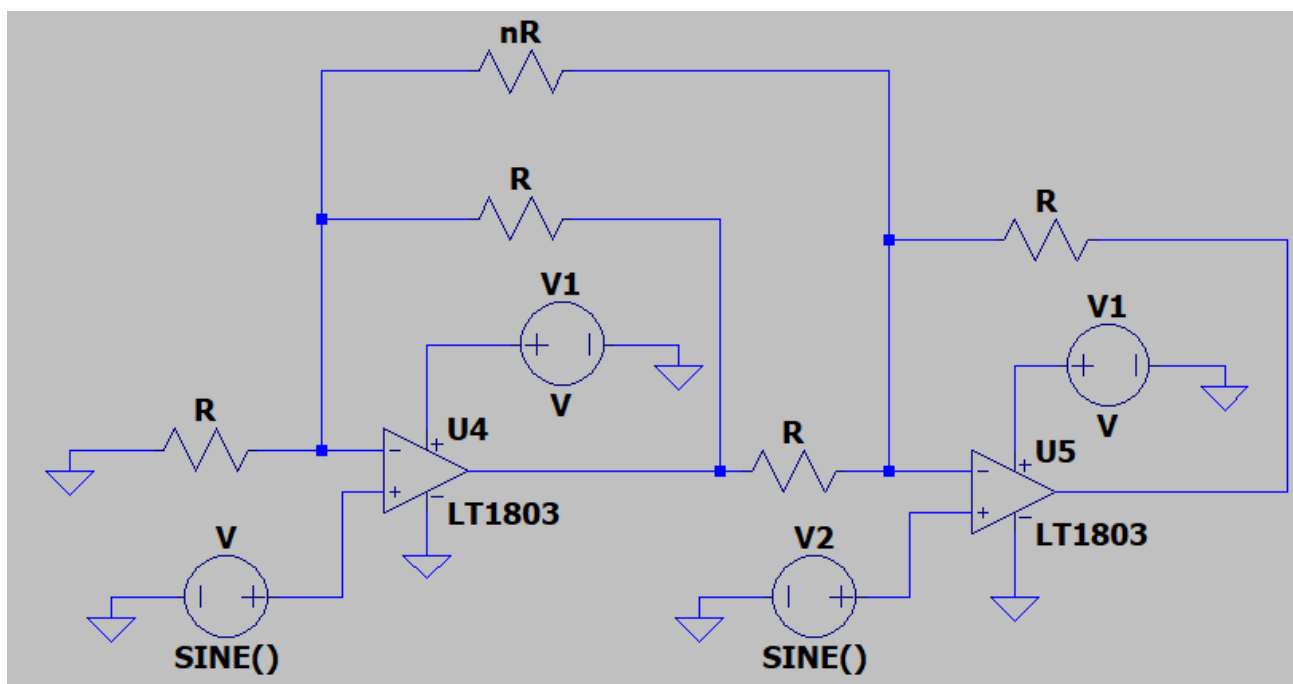


Рис. 3.6.2. Інструментальний підсилювач на двох ОП в програмному середовищі

LTspice

Settings			Settings		
Parameters			Parameters		
Initial value, V1:	0	V	Initial value, V1:	0	V
Pulse value, V2:	1	V	Pulse value, V2:	1	V
Pulse delay time, TD:	1	s	Pulse delay time, TD:	0	s
Pulse rise time, TR:	1e-9	s	Pulse rise time, TR:	1	s
Pulse fall time, TF:	1e-9	s	Pulse fall time, TF:	1	s
Pulse width, PW:	1	s	Pulse width, PW:	1e-12	s
Pulse period, PER:	2	s	Pulse period, PER:	2	s

Рис 3.6.3. Налаштування трикутного (а) та прямокутного (б) сигналу

Завдання для виконання

1. Зібрати модель схеми повторювача на операційному підсилювачі (схема рис.3.2).
2. Подати на вхід схеми синусоїдальний сигнал із $U_{\text{амп}}=N_0^B$ В, $f=N_0^Г$ кГц з генератора імпульсів. Замалювати осцилограми вхідного та вихідного сигналів.
3. Подати на вхід схеми трикутний сигнал із $U_{\text{амп}}=N_0^B$ В, $f=2*N_0^Г$ кГц з генератора імпульсів. Замалювати осцилограми вхідного та вихідного сигналів.
4. Подати на вхід схеми прямокутний сигнал із $U_{\text{амп}}=N_0^B$ В, $f=5*N_0^Г$ кГц з генератора імпульсів. Замалювати осцилограми вхідного та вихідного сигналів.
5. Для прямокутного вхідного сигналу замалювати перехідний процес вихідного сигналу, розрахувати його тривалість та швидкість наростання.
6. Повторити пункти 2 – 5 для схеми інвертуючого підсилювача із $A_0 = 2.2$ (номінали $R=2,2$ кОм), неінвертуючого підсилювача із $A_0 = 2$ ($R=1$ кОм), інструментального підсилювача із $A_0 = 2.9$ ($nR=2,2$ кОм).
7. Подати на вхід першого ОП схеми інструментального підсилювача синусоїдальний сигнал із $U_{\text{амп}}=1$ В, $f=1$ кГц, на вхід другого ОП синусоїдальний сигнал із $U_{\text{амп}}=1$ В, $f=1$ кГц з генератора сигналів. Змінюючи фазу (0° , 45° , 90° , 180° , 360°) першого вхідного сигналу спостерігати зміну амплітуди та зсуву фаз вихідного сигналу. Спостережені дані записати в таблицю та замалювати осцилограми.

Лабораторна робота №4 „Логічні інтегральні схеми”

Мета роботи – ознайомитися з принципом роботи основних логічних елементів і схем на їх базі; за результатами досліджень скласти таблиці істинності для досліджуваних пристроїв; замалювати осцилограми напруг у контрольних точках схем, що досліджуються.

Порядок виконання роботи

Підключити лабораторний стенд до мережі живлення тумблерами на передній панелі лабораторного столу.

Дослідження роботи тривходового логічного елемента 3І-НЕ

1. На входи x_1 , x_2 , x_3 елемента 3І-НЕ подати по чергово всі можливі комбінації сигналів із «1» та «0» (рис. 4.1).

За результатами дослідів заповнити таблицю істинності для логічного елемента 3І-НЕ виду табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Таблиця істинності елемента 3І-НЕ

x_1	x_2	x_3	y
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

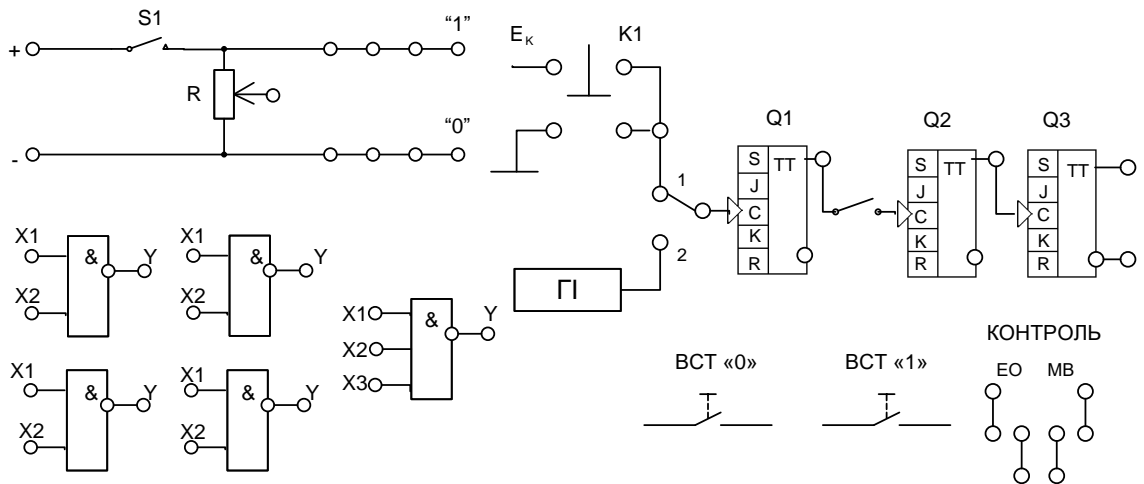


Рис. 4.1. Досліджувана схема: ВСТ – примусове встановлення 0 чи 1, ЕО – електронний осцилограф, МВ – цифровий мультиметр, ГІ- генератор імпульсів

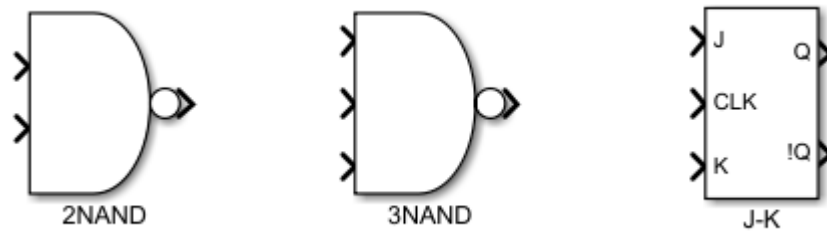


Рис. 4.1.1. Необхідні елементи для побудови схеми в програмному середовищі Matlab Simulink

Дослідження роботи RS-тригера

2. Зібрати схему RS-тригера з чотирьох логічних елементів 2І-НЕ (з'єднання елементів за допомогою провідників показано на рис. 4.2). Подаючи на входи R і S всі можливі комбінації сигналів, заповнити таблицю істинності RS-тригера (табл. 4.2).

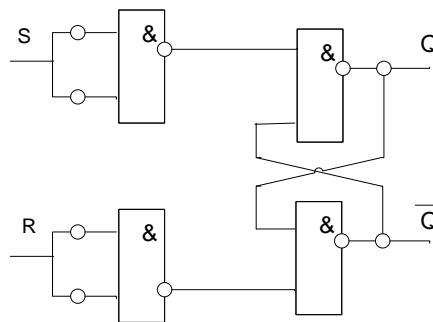


Рис. 4.2. Досліджувана схема: RS-тригер на логічних елементах 2І-НЕ

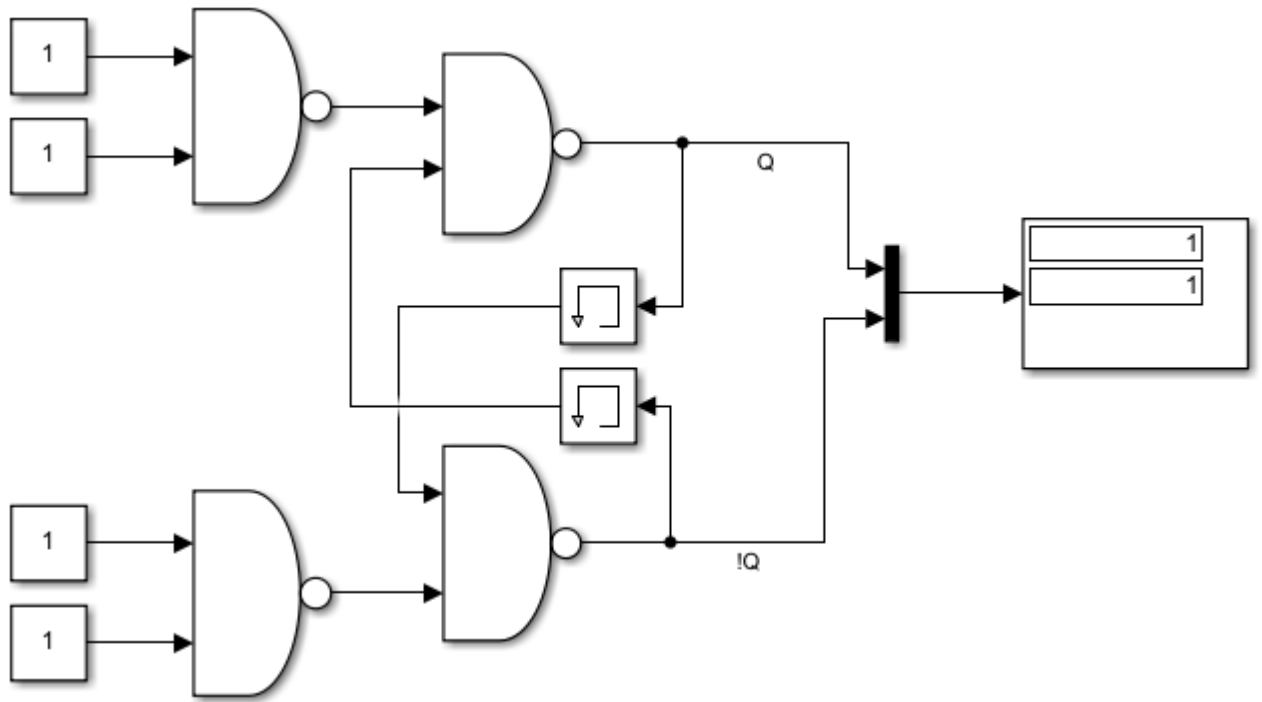


Рис. 4.2.1. Досліджувана схема: RS-тригер на логічних елементах 2І-НЕ в програмному середовищі Matlab Simulink

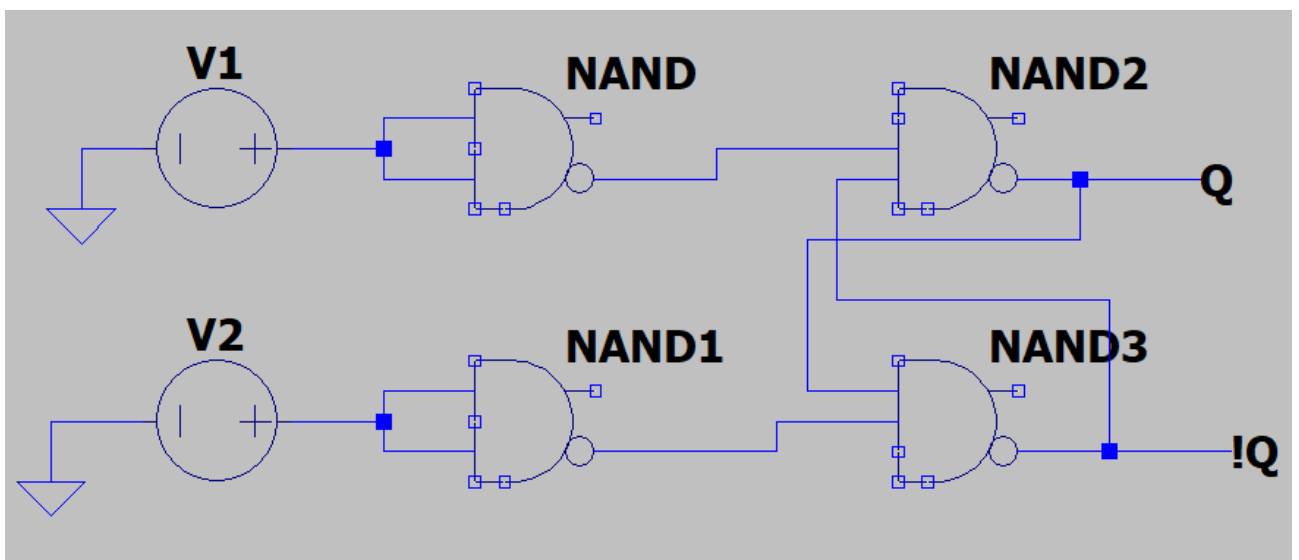


Рис. 4.2.2. Досліджувана схема: RS-тригер на логічних елементах 2І-НЕ в програмному середовищі LTspice

Таблиця 7.2. Таблиця станів RS-тригера

$Q^n *$	S^n	R^n	Q^{n+1}	\bar{Q}^{n+1}
1	0	0		
1	1	0		
1	0	1		
1	1	1		

0	0	0		
0	1	0		
0	0	1		
0	1	1		

* в табл. 4.2 стан Q^n відповідає значенню сигналу на прямому виході RS -тригера до подачі наступної $(n+1)$ -ї комбінації на його входи.

Переконатися, що при подачі на входи тригера забороненої комбінації сигналів $S = R = 1$, його робота порушується, і на виходах з'являється комбінація $\bar{Q} = Q = 1$.

Дослідження роботи JK -тригера

3. Подаючи на керуючі входи тригера J і K різні комбінації вхідних сигналів із «1» та «0», переконатися, що стан тригера не змінюється, доки не буде поданий дозволяючий сигнал на синхронізуючий вхід C .

4. Заповнити таблицю істинності JK -тригера виду табл. 4.3, встановлюючи на входах J і K різні комбінації вхідних сигналів із «1» та «0» (при необхідності подавати синхроімпульси).

Таблиця 7.3. Таблиця істинності JK -тригера

Q^n	J^n	K^n	Q^{n+1}	\bar{Q}^{n+1}
1	0	0		
1	1	0		
1	0	1		
1	1	1		
0	0	0		
0	1	0		
0	0	1		
0	1	1		

Дослідження послідовного двійковий трирозрядного лічильника з додаванням

5. Зібрати модель лічильника з трьох JK-тригерів. Заповнити таблицю функціонування лічильника (табл. 4.4).

Таблиця 4.4. Таблиця станів двійкового лічильника

Номер такту	Q_1	Q_2	Q_3
0	0	0	0
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

6. Замалювати осцилограми вхідних (тактових) імпульсів на виході С першого тригера, а також на входах Q_1 , Q_2 , Q_3 . При знятті осцилограм вхідної напруги швидкість розгортки встановити таку, щоб на осцилограмі містилося 10...15 імпульсів. При знятті інших осцилограм швидкість розгортки не змінювати.

7. З кожної функції необхідно прибрати число, яке відповідає номеру варіанта. Якщо номер варіанту перевищує кількість чисел в функції, продовжуємо рахувати по колу, поки не дійдемо до числа, яке треба викинути. Наприклад, для варіанту 3 треба прибрати з функції число «4», для варіанту 13 треба прибрати з функції число «12», для варіанту 23 – число «№Г» (табл. 4.5).

Таблиця 4.5. Таблиця функцій відповідно до варіантів.

№В	
1, 11, 21, 31	$y = \sqrt[15]{0, N_{\Gamma} 4, 6, 7, 8, 12, 14}$ 0
2, 12, 22, 32	$y = \sqrt[15]{0, N_{\Gamma} 4, 5, 7, 8, 12, 14}$ 0
3, 13, 23, 33	$y = \sqrt[15]{0, N_{\Gamma} 4, 6, 8, 12, 14}$ 0

4, 14, 24, 34	$y = \sum_{i=0}^{15} \delta_{i, \{4,6,7,8,10,12,14\}}$
5, 15, 25, 35	$y = \sum_{i=0}^{15} \delta_{i, \{4,6,7,9,12,14\}}$
6, 16, 26, 36	$y = \sum_{i=0}^{15} \delta_{i, \{4,6,7,10,12,14\}}$
7, 17, 27, 37	$y = \sum_{i=0}^{15} \delta_{i, \{4,6,7,11,12,15\}}$
8, 18, 28, 38	$y = \sum_{i=0}^{15} \delta_{i, \{4,6,7,8,12,15\}}$
9, 19, 29, 39	$y = \sum_{i=0}^{15} \delta_{i, \{4,6,7,8,11,12,14\}}$
10, 20, 30, 40	$y = \sum_{i=0}^{15} \delta_{i, \{4,6,8,12,15\}}$

Заповніть таблицю істинності відповідно до наведеної канонічної форми запису алгоритму роботи деякого пристрою та сформууйте логічні функції за даною таблицею істинності у вигляді досконалих форм ДНФ і КНФ.

Сформууйте мінімізовану функцію у формі ДНФ або КНФ, обравши найбільш доцільну з них.

Реалізуйте отриману мінімізовану функцію у вигляді схеми на базі реальних логічних елементів.

Теоретичні відомості до лабораторної роботи

Базовими елементами цифрових пристроїв є *інтегральні логічні елементи*, що реалізують певну логічну функцію [7].

Логічні елементи є сукупністю електронних ключів, виконаних у вигляді інтегральної схеми, яка має в загальному випадку n входів зі значеннями вхідних сигналів $X_1 \dots X_n$, які можуть приймати значення логічного 0 або логічної 1, та m -виходів зі значеннями сигналів $Y_1 \dots Y_m$, які також приймають значення 0 або 1 (рис. 4.3).

Під *логічною одиницею* «1» мають на увазі високий рівень напруги (або її наявність), під *логічним нулем* «0» – її низький рівень (або відсутність напруги). Числові значення високого і низького рівнів напруги визначаються для конкретного типу мікросхеми індивідуально, залежно від особливостей її внутрішньої структури та технологічної реалізації (на базі польових чи біполярних транзисторів, з діодами Шоттки чи зі звичайними випрямними діодами і т.п.). Ці рівні є паспортними даними мікросхеми і вказуються в довідниковій інформації на неї.

Кожен логічний елемент виконує певну логічну функцію, тобто кожній комбінації сигналів на входах відповідає певна комбінація сигналів на виходах.

Для наочності логічну функцію, яка виконується елементом, представляють у вигляді таблиці вхідних і вихідних сигналів, яка називається *таблиця істинності*.

Найбільш простими є базові логічні елементи, що виконують функції **І** (множення), **АБО** (додавання), **НЕ** (інверсія, зміна значення на протилежне).

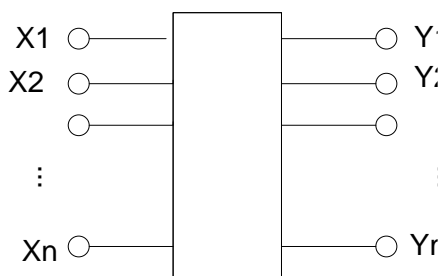


Рис. 4.3. Умовне позначення довільного логічного елемента

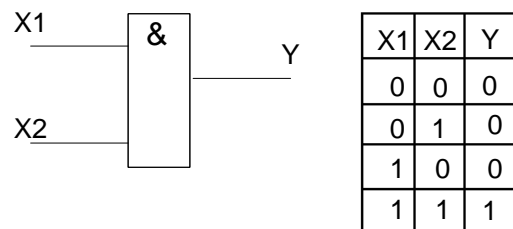


Рис. 4.4. Логічний елемент **І** та його таблиця істинності

Логічний елемент І виконує функцію логічного множення: одиниця з'являється на його виході з'являється лише тоді, коли на всіх входах будуть одиниці (інша назва даного елемента – схема співпадання). Якщо хоча б на одному з входів елемента **І** буде 0, то і на його виході також буде нуль. Умовне позначення логічного елемента **І** та його таблиця істинності наведені на рис. 7.4.

Логічний елемент АБО виконує функцію логічного додавання: одиниця з'являється на виході у тому випадку, якщо хоч би на одному із його входів буде одиниця. Умовне позначення логічного елемента **АБО** і його таблиця істинності наведені на рис. 4.5.

Логічний елемент НЕ виконує функцію логічного заперечення. Значення сигналу на його виході завжди є протилежним до значення сигналу на його вході (*схема інверсії*). Умовне позначення логічного елемента **НЕ** та його таблиця істинності наведені на рис. 4.6. (кружок **О** в умовному позначенні елемента позначає операцію інверсії сигналу, зазвичай ставиться на виході елемента).

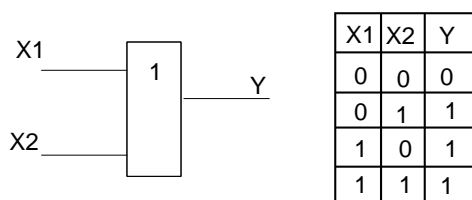


Рис. 4.5. Умовне позначення та таблиця істинності елемента **2АБО**

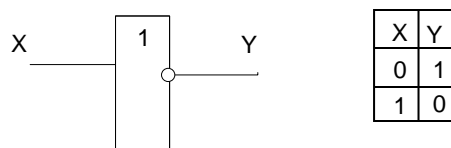


Рис. 4.6. Умовне позначення та таблиця істинності елемента **НЕ**

В назві логічних елементів обов'язково присутня цифра, яка позначає кількість входів елемента – в розглянутих вище прикладах всі елементи мають 2 входи і відповідно назви «2І», «2АБО».

У загальному випадку логічні елементи можуть мати не два, а більше входів.

Широке застосування знаходять логічні елементи, які послідовно виконують кілька логічних функцій, наприклад І-НЕ, АБО-НЕ, І-АБО-НЕ та ін. Умовні позначення цих елементів наведені на рис. 4.7.

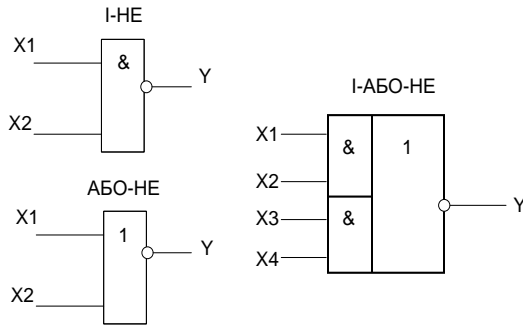


Рис. 4.7. Умовні позначення комбінованих логічних елементів

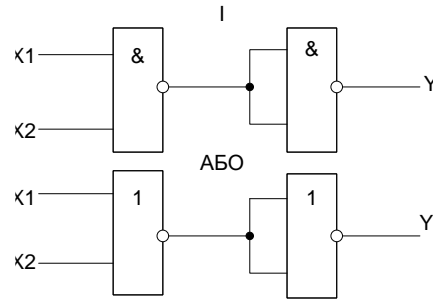


Рис. 4.8. Формування елементів I та АБО на базі 2I-НЕ та 2АБО-НЕ

Доведено, що, маючи два універсальних логічних елементи I-НЕ та АБО-НЕ, можна реалізувати будь-яку, як завгодно складну, логічну функцію.

Так, при об'єднанні входів логічного елемента I-НЕ (АБО-НЕ) зазначені елементи будуть реалізовувати функцію НЕ. Включаючи отриманий у такий спосіб логічний елемент НЕ на вході схем I-НЕ чи АБО-НЕ, формуються логічні функції I та АБО (рис.4.8). Такі комбінації інколи використовуються при складанні схем на базі реальних елементів, коли є обмеження на елементну базу, яка повинна застосовуватися.

Комбінація найпростіших логічних елементів дозволяє будувати більш складні логічні пристрої, наприклад тригери.

Тригер – це пристрій, який має два стійких стани, і здатний зберігати двійкову інформацію, тобто бути елементом пам'яті. Стан тригера не змінюється після закінчення дії вхідних сигналів, оскільки стан тригера залежить не тільки від зовнішніх керуючих сигналів, але і від сигналів кіл зворотних зв'язків, якими охоплено тригер.

За принципом функціонування розрізняють:

1) **RS-тригер** – послідовний пристрій з двома стійкими станами, що має два інформаційні входи S і R такі, що при $S = 1$ і $R = 0$ тригер переходить у стан з $Q = 1$, а при $R = 1$ і $S = 0$ – у стан $Q = 0$;

2) **D-тригер** – це послідовний пристрій з двома стійкими станами, одним інформаційним входом D (*Delay* – затримка) і одним тактовим входом C ;

3) **T-тригер** (рахунковий тригер) – називають пристрій, що змінює свій

стан на протилежний, коли на вхід синхронізації C надходить керуючий (лічильний) сигнал;

4) **JK-тригер** – це універсальний тригер, який при відповідному підключенні може виконувати роль будь-якого з розглянутих раніше тригерів.

За способом керування всі зазначені тригери можуть бути асинхронними та синхронними.

В **асинхронному тригері** перемикання з одного стану в інший здійснюється при надходженні відповідних сигналів на інформаційні входи.

В **синхронних тригерах** для перемикання, крім наявності інформаційних сигналів, необхідна наявність дозволяючого сигналу на синхронізуючому вході C .

Асинхронний **RS-тригер** є найпростішим серед тригерів. Одним із способів його формування є схема на основі двох логічних елементів **2АБО-НЕ** (рис. 7.9). **RS-тригер** має два входи, які служать для встановлення його в нульовий стан (R -вхід – „reset”) та в одиничний стан (S -вхід – „set”), а також два виходи Q (прямий) та \bar{Q} (інверсний). Значення сигналів на виходах завжди є протилежними. Якщо вони співпадають, це свідчить про порушення в роботі тригера.

Часто тригер застосовують як комірку пам'яті. Якщо стан тригера такий, що на виході $Q = 1$, а $\bar{Q} = 0$, то вважають, що в тригері записана „1”. В іншому випадку, вважають, що в тригері записаний „0”. Робота тригера ілюструється таблицею станів, де вказуються значення вхідних сигналів у деякий момент t^n і значення вихідного сигналу на виході Q в наступний момент t^{n+1} (рис. 4.9).

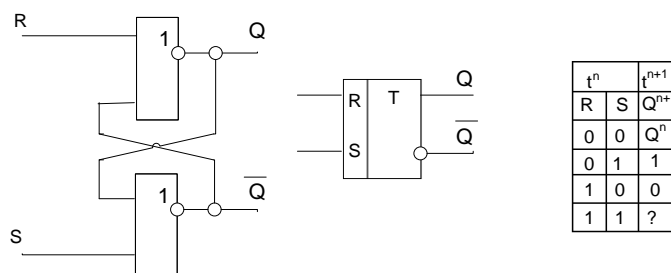


Рис. 4.9. Схема асинхронного **RS-тригера** на елементах **2АБО-НЕ**, його умовне позначення та таблиця станів

Якщо на входи подані сигнали $S = 0$ і $R = 0$, тригер зберігає стан, що був у момент часу t^n . Комбінація сигналів на входах тригера $S = 1$ і $R = 1$ заборонена, оскільки після закінчення дії вхідних сигналів тригер встановиться в стан, передбачити який заздалегідь не можна, якщо невідома внутрішня структура тригера.

Для одержання асинхронного RS -тригера на елементах **2І-НЕ** необхідно скористатися схемою рис. 4.10. В ній вхідні сигнали попередньо інвертуються елементами **2І-НЕ** із закороченими входами, а потім інверсні сигнали \bar{S} , \bar{R} подаються на наступну пару елементів, увімкнених за схемою, подібною до схеми рис. 4.9. Таким чином, таблиці станів тригерів рис. 4.9 та рис. 4.10 будуть однаковими.

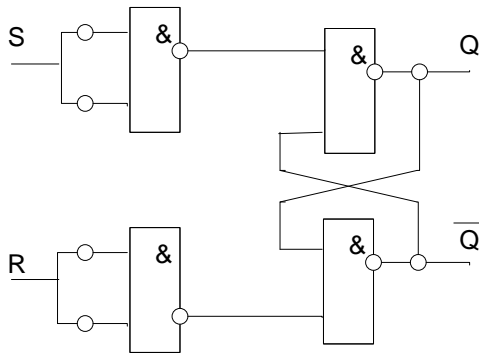


Рис. 4.10. Схема RS -тригера на елементах **2І-НЕ**

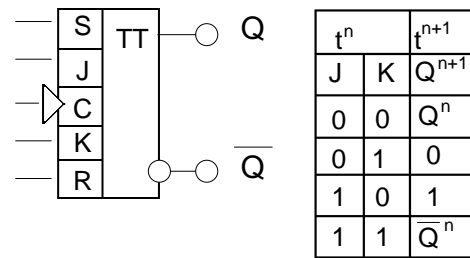


Рис. 4.11. Умовне позначення JK -тригера та його таблиця станів

Універсальний **JK -тригер** при відповідному підключенні може виконувати функції будь-якого тригера. Умовне позначення JK -тригера та його таблиця станів наведені на рис. 4.11.

Робота JK -тригера багато в чому аналогічна роботі RS -тригера – роль входу S виконує J -вхід, а роль входу R – K -вхід.

Основна відмінність JK -тригера полягає в тому, що він не має заборонених комбінацій сигналів на входах J і K . При $J = 1$ і $K = 1$ тригер змінює свій стан на протилежний з надходженням кожного наступного синхроімпульсу на його вхід C .

Наявність тактового (синхронізуючого) входу в JK -тригері свідчить про його належність до синхронних тригерів. За відсутності сигналу на синхронізуючому вході – $C = 0$, тригер не реагує на сигнали, що подаються на входи J і K . При подачі на синхронізуючий вхід $C = 1$ тригер сприймає інформацію, що подається на входи J і K , однак перехід у новий стан тригера не відбувається. І тільки в момент закінчення сигналу на синхронізуючому вході (при переході його з одиничного стану в нульовий, тобто по задньому фронту імпульсу синхронізації) відбувається перемикання тригера в новий стан.

Таким чином, перемикання синхронного JK -тригера здійснюється у два кроки:

- 1) при $C = 1$ відбувається запам'ятовування інформації, що надійшла на входи J і K ;
- 2) при переході сигналу C із „1” в „0” згідно записаної інформації відбувається перемикання тригера в новий стан.

Крім входів J , K та C , JK -тригер звичайно має R - і S - входи, функція яких така ж, як і в RS -тригері. Ці входи функціонують незалежно від синхронізуючого входу C і дозволяють у будь-який момент перевести тригер у стан $Q = 1$ (при $S = 1$) або $Q = 0$ (при $R = 1$).

Якщо на входи J і K тригера подати одиниці $J = K = 1$, а на синхронізуючий вхід C сигнали у вигляді імпульсів напруги, то згідно принципу роботи синхронного JK -тригера, після кожного чергового імпульсу на C -вході тригер буде переходити в протилежний стан. Такий режим відповідає роботі ***T-тригера*** (тригера з рахунковим входом).

T -тригери використовуються при побудові лічильників.

Лічильники імпульсів – це пристрої, призначені для підрахунку кількості імпульсів, що надійшли на вхід. Лічильники бувають з додаванням, з відніманням і реверсивні.

Покази ***лічильника з додаванням*** з приходом чергового імпульсу збільшуються на одиницю. Покази ***лічильника з відніманням*** з кожним

імпульсом зменшуються на одиницю. **Реверсивний лічильник** може працювати в режимі як додавання, так і в режимі віднімання.

Основними параметрами лічильників є коефіцієнт лічби (модуль лічби) і швидкодія.

Модуль лічби показує, яку максимальну кількість імпульсів може підрахувати лічильник.

Швидкодія визначає максимально припустиму частоту проходження імпульсів, що надходять на вхід лічильника.

Оскільки кожен тригер в складі лічильника може приймати тільки два стани «0» або «1», рахунок ведеться у двійковій системі числення.

У лічильниках тригери підключені або послідовно, або паралельно.

Послідовні лічильники характеризуються тим, що керуючими сигналами для старших розрядів служать сигнали, що знімаються з інформаційних виходів молодших розрядів, а лічильні імпульси надходять на вхід першого розряду. В якості розрядів розглядаються окремі тригери. Чим далі тригер від входу схеми, тим вищий розряд він представляє.

В **синхронних (паралельних) лічильниках** тактові імпульси подаються одночасно на вхід синхронізації всіх тригерів, а стан n -го розряду змінюється тільки при певному стані попередніх розрядів (найчастіше це стан логічної 1).

Для підготовки послідовного лічильника до роботи на R -входи тригерів необхідно подати імпульс, який переводить всі тригери в нульовий стан – у лічильнику записується „0”. Це так званий нульовий такт.

У момент закінчення кожного імпульсу на вході C першого тригера, його вихідний стан змінюється на протилежний, тобто формується послідовність імпульсів, яка використовується для синхронізації наступного тригера. Однак, ця послідовність на виході тригера Q_1 буде мати частоту в 2 рази меншу за частоту імпульсів, що надходять на його вхід.

Вихідні імпульси першого тригера є вхідними імпульсами другого, отже, частота імпульсів на виході Q_2 буде в 2 рази меншою, ніж на вході Q_1 ,

або в 4 рази меншою, ніж на вході лічильника.

На виході Q_3 частота імпульсів буде в $2^3=8$ разів менше, ніж на вході лічильника.

Таким чином, із приходом n -го імпульсу на вхід тригера, на його Q виходах у двійковому коді буде записане число n в двійковій системі числення (молодший розряд відповідає виходу Q_1 , а старший – виходу Q_3 для схеми на рис. 4.1).

При послідовному з'єднанні m тригерів максимальне число імпульсів, що може підрахувати лічильник, дорівнює 2^m . Якщо сигнали з виходів лічильника подати на спеціальний пристрій – дешифратор, можна перетворити отримані значення чисел із двійкового в десятковий код.

Лічильники широко застосовуються у пристроях цифрової обробки інформації. Контрольований параметр (час, температура, швидкість і т.д.) перетворюється в імпульси напруги. Ці імпульси подаються на лічильник і їх кількість підраховується за певний проміжок часу. Число імпульсів, підрахованих лічильником, у відповідному масштабі характеризує вимірювану величину.

Контрольні питання

1. Навести умовні позначення основних логічних елементів та їх таблиці істинності.
2. Пояснити принципи роботи основних логічних елементів.
3. Які з логічних елементів необхідно використати аби реалізувати схемотехнічно наступні математичні вирази: $(x_1 + x_2)$, $(x_1 \cdot x_2)$, $(\overline{x_1 + x_2})$, $(\overline{x_1 \cdot x_2})$, \bar{x} ?
4. Використовуючи найпростіші логічні елементи, реалізувати наступні функції:

$$y = \overline{(x_1 \cdot \bar{x}_2 + x_3 \cdot x_2)} + x_3 \cdot x_1, \quad y = \overline{(x_1 + x_2 + x_3)} \cdot (x_1 + \bar{x}_2 + x_3) + x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3,$$

$$y = (\overline{x_1 \cdot x_2 + x_3 \cdot x_2})(x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3).$$

5. В чому відмінність десяткової та двійкової алгебри?
6. Пояснити відмінності побудови RS -тригера на базі елементів $2I-HE$ та $2АБО-HE$. Пояснити як формувалась таблиця станів цього тригера.
7. Принцип роботи RS -тригера. Вказати призначення його інформаційних входів R та S .
8. Довести, що в схемі RS -тригера на базі елементів $2АБО-HE$ при подачі на входи сигналів $S = R = 1$, вихідні змінні будуть мати однакові значення.
9. Яке значення будуть мати вихідні змінні RS -тригера на базі елементів $2I-HE$ при подачі на входи сигналів $S = R = 1$?
10. У чому відмінності синхронного і асинхронного тригерів?
11. У чому відмінність роботи JK -тригера від роботи RS -тригера?
12. Намалювати часові діаграми напруг на входах і виходах JK -тригера, який синхронізується переднім фронтом. Послідовність подачі сигналів на інформаційні входи відповідає таблиці станів.
13. Намалювати часові діаграми напруг на входах і виходах JK -тригера, який синхронізується заднім фронтом. Послідовність подачі сигналів на інформаційні входи відповідає таблиці станів.
14. Пояснити роботу JK -тригера в режимі T -тригера.
15. Основні параметри лічильників імпульсів та області їх застосування.
16. Чому досліджуваний в роботі лічильник здатен порахувати максимум 8 імпульсів? Яким чином можна збільшити цю кількість?
17. Пояснити принцип дії послідовних та паралельних лічильників імпульсів.
18. Який принцип дії лічильників з відніманням?
19. Сформувати таблицю станів для послідовного лічильника на базі 2-х тригерів.

Лабораторна робота №5
„Дослідження схем з позитивним зворотним зв’язком та гістерезисом. Розробка астабільного та моностабільного мультівібраторів”

Мета роботи: ознайомитись із поняттям гістерезис та дослідити необхідність його застосування в схемах перемикання.

Теоретичні відомості

Інвертуючий компаратор з позитивним зворотним зв’язком зображено на рис. 5.1.

$$V_0 = -A_0 \cdot (V_i - \beta V_0) \quad (2.1)$$

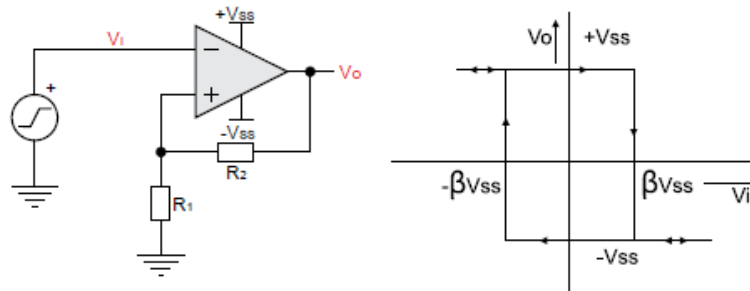


Рис. 5.1. Інвертуючий компаратор з позитивним зв’язком (тригер Шмідта) та його гістерезис-характеристика

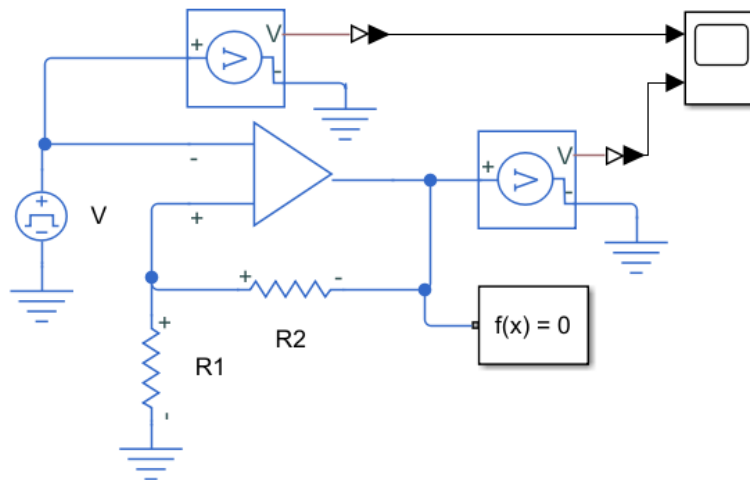


Рис. 5.1.1. Інвертуючий компаратор з позитивним зв’язком (тригер Шмідта) в програмному середовищі Matlab Simulink

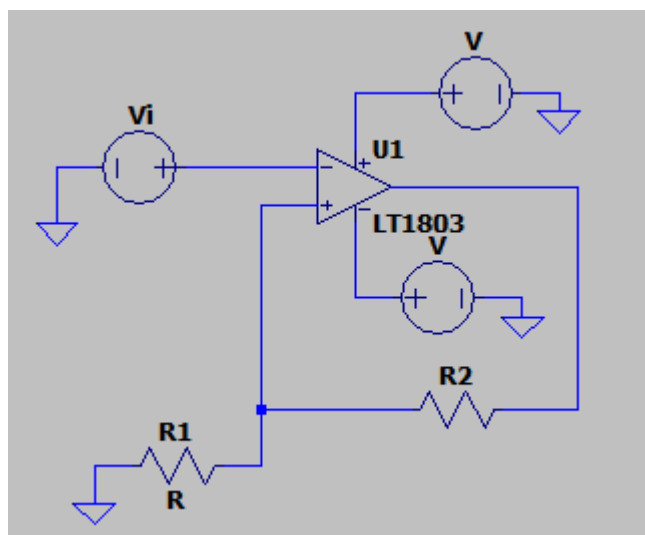


Рис. 5.1.2. Інвертуючий компаратор з позитивним зв'язком (тригер Шмідта) в програмному середовищі LTspice

$$\frac{V_0}{V_i} = -A_0 \cdot \frac{1}{1 - A_0 \cdot \beta}$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (14)$$

Коли $|A_0\beta|=1$ (14), схема рис.5.1. переходить в нестабільний режим роботи. В режимі, коли $|A_0\beta|>1$ схема працює в режимі компаратора із позитивним зворотним зв'язком. Це змішаний режим роботи, в якому вихід схеми може бути стабільним лише у двох станах $+V_{SS}$ та $-V_{SS}$. Коли на вхід схеми надходить сигнал величина якого мінімально вища деякого значення $\beta \cdot V_{SS}$, вона перемикається і на виході отримуємо сигнал із рівнем $-V_{SS}$. Подальший зріст вхідного сигналу не змінює стан виходу схеми, однак при зниженні вхідного сигналу до рівня $-\beta \cdot V_{SS}$, схема перемикається і на виході отримуємо сигнал із рівнем V_{SS} . Введення в схему гістерезису $2 \cdot \beta \cdot V_{SS}$ виключає можливість самовільного перемикання схеми від випадкових завад на вході (наприклад тремтіння контактів реле і т.д.). Цей тип компараторів використовується для управління силовими MOSFET ключами, які працюють в керованих джерелах живлення, широтно – імпульсних модуляторах та підсилювачів класу D. Такий тип ОП

називається інвертуючим тригером Шмідта, а його символічне зображення представлено на рис. 5.2 [6].

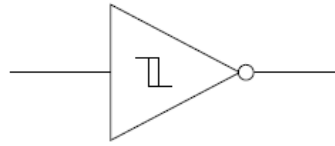


Рис. 5.2. Умовне графічне позначення тригера Шмідта

Схема неінвертуючого тригера Шмідта представлено на рис.3.

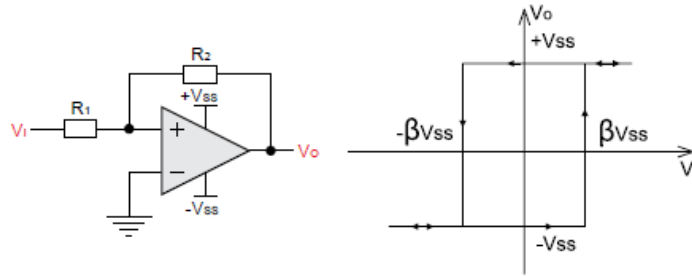


Рис. 5.3. Неінвертуючий тригер Шмідта та його гістерезис-характеристика

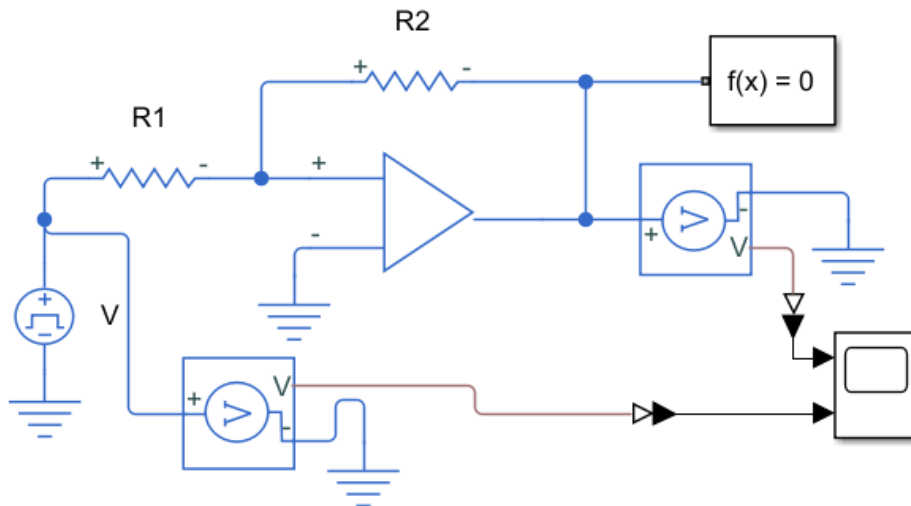


Рис. 5.3.1. Неінвертуючий тригер Шмідта) в програмному середовищі Matlab Simulink

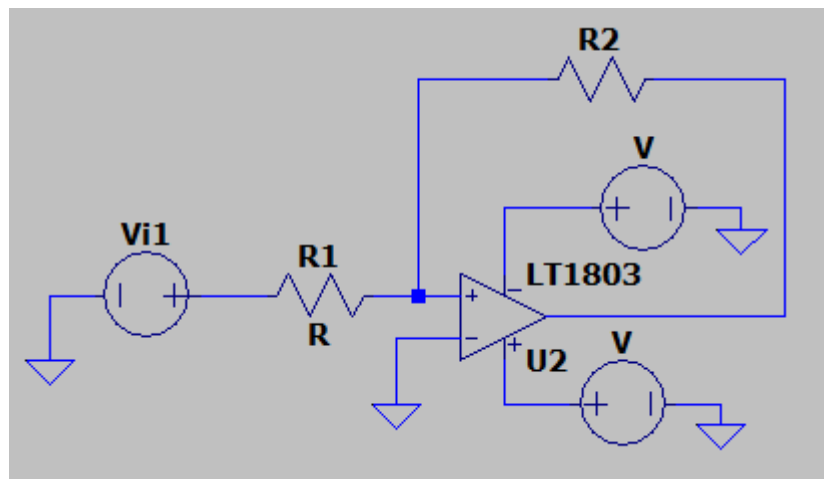


Рис. 5.3.2. Неінвертуючий тригер Шмідта) в програмному середовищі LTspice

Астабільний мультивібратор представлено на рис. 5.4.

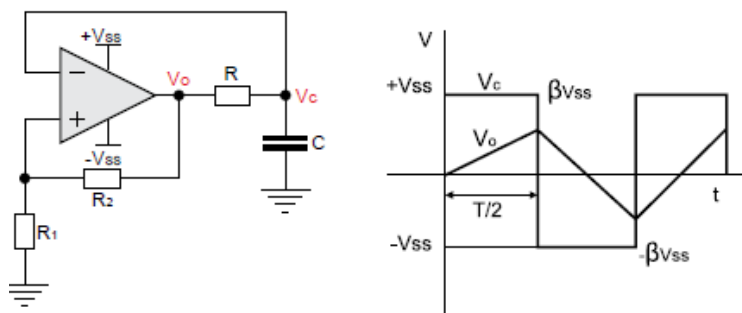


Рис. 5.4. Астабільний мультивібратор та його характеристика

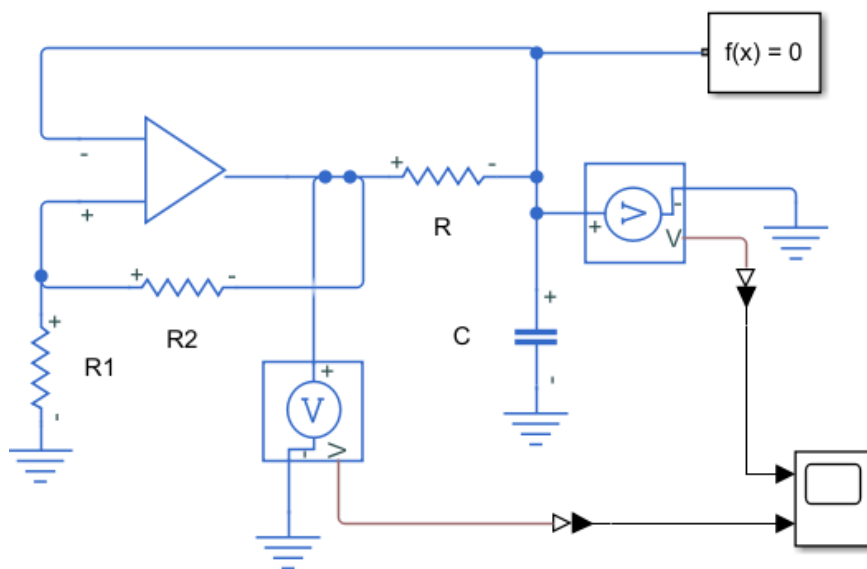


Рис. 5.4.1. Астабільний мультивібратор в програмному середовищі Matlab Simulink

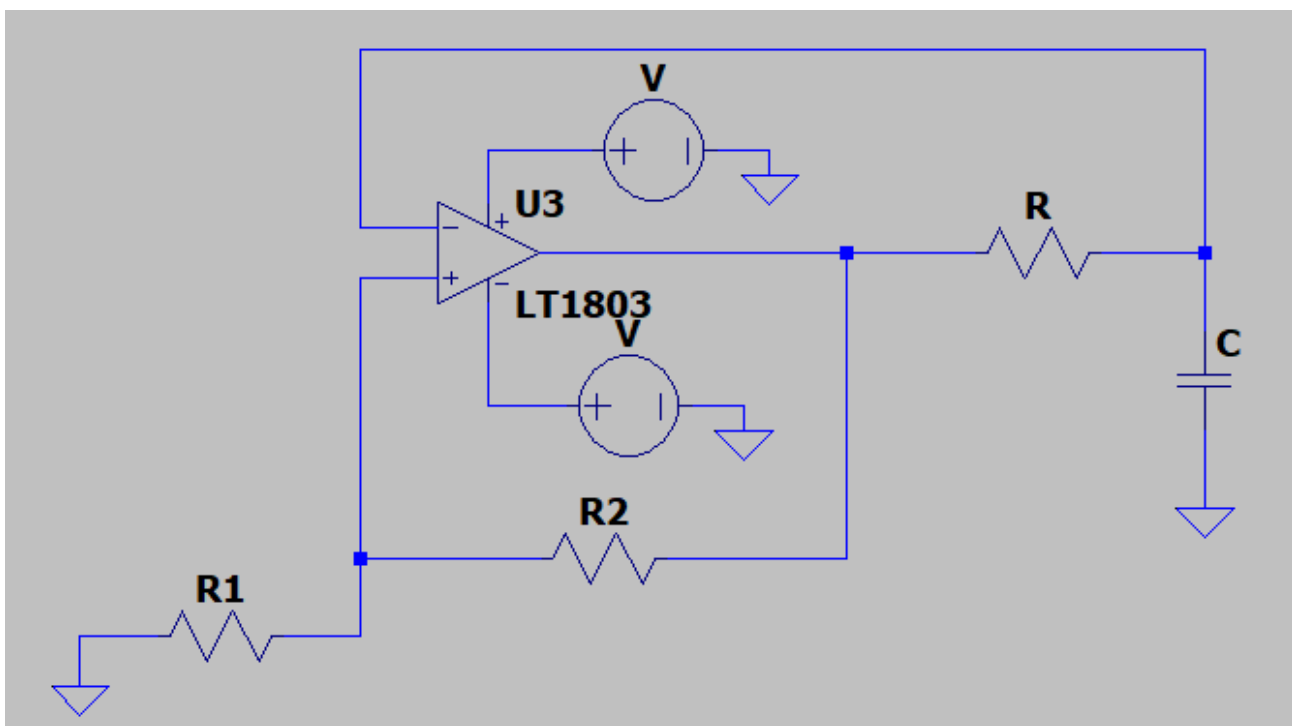


Рис. 5.4.2. Астабільний мультивібратор в програмному середовищі LTspice

Така схема здатна генерувати як прямокутний, так і трикутний сигнали. Коефіцієнт β називається коефіцієнтом підсилення схеми із позитивним зворотним зв'язком. Період згенерованого сигналу розраховується згідно формули (15):

$$T = 2 \cdot RC \cdot \ln\left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta}\right) \quad (15)$$

Моностабільний вібратор

Схема моностабільного вібратора представлена на рис. 5.5.

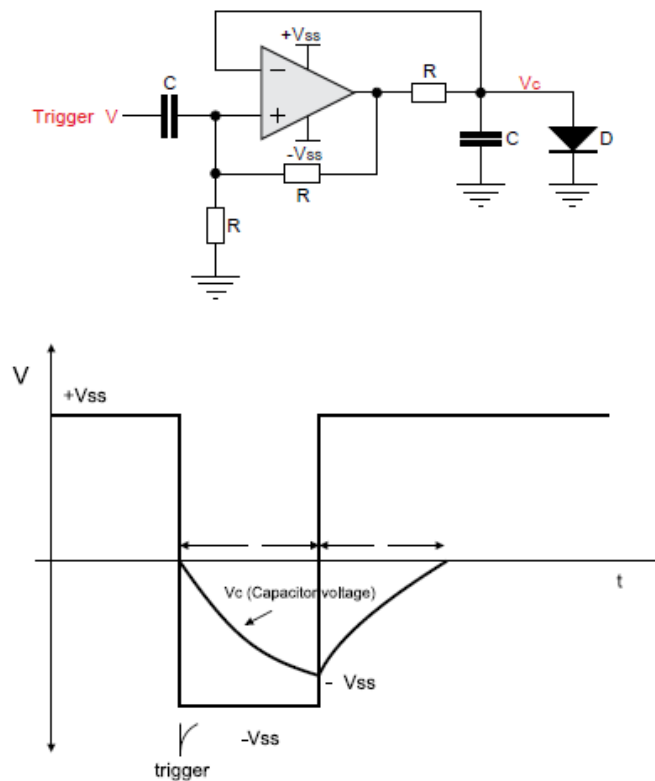


Рис. 5.5. Моностабільний вібратор та його характеристика

Вихід такого вібратора переходить в різнойменні стани за час τ , який розраховується за формулою (16):

$$\tau = RC \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - \beta}\right) \quad (16)$$

Завдання для виконання

1. Зібрати модель операційного підсилювача в режимі нуля-компаратора (“-” на GND, “+” – вхідний сигнал з генератора);
2. Подати на вхід компаратора синусоїдальний сигнал із $U_{\text{амп}}=1$ В, $f=N_{\text{В}}$ кГц. Зняти осцилограми вхідного та вихідного сигналів.
3. Подати на вхід компаратора прямокутний сигнал із $U_{\text{амп}}=1$ В, $f=N_{\text{В}}$ кГц. Зняти осцилограми перехідного процесу, визначити швидкість наростання вихідної напруги та час затримки.
4. Зібрати модель схеми інвертуючого тригера Шмідта із порогом перемикання 3 В, попередньо розрахувавши номінал резистора R_2 при $R_1 = 1$ к.
5. Подати на вхід інвертуючого тригера Шмідта трикутний сигнал $U_{\text{амп}}=2,5$ В, $f=N_{\text{В}}$ кГц. Зняти осцилограми вхідних та вихідних сигналів, визначити поріг перемикання, порівняти із заданим, пояснити відмінності.
6. Зібрати модель схеми інвертуючого тригера Шмідта із порогом перемикання 1 В, попередньо розрахувавши номінал резистора R_2 при $R_1 = 1$ к.
7. Подати на вхід інвертуючого тригера Шмідта трикутний сигнал $U_{\text{амп}}=1,5$ В, $f=N_{\text{В}}$ кГц. Зняти осцилограми вхідних та вихідних сигналів, визначити поріг перемикання, порівняти із заданим, пояснити відмінності.
8. Зібрати модель астабільного мультівібратора за схемою на рис.5.4. Номінали резисторів R_2 та R_1 взяти величини із пункту 4. Прийняти $R = 2,2$ к, $C = 1$ мкФ. Розрахувати частоту генерації по формулі (2.4). Зняти осцилограми напруг на виході тригера Шмідта та на конденсаторі C . Визначити частоту генерації, порівняти із розрахованим значенням, пояснити відмінності.
9. Повторити пункт 8 для номіналів R_2 та R_1 з пункту 6.

10. Зібрати модель схеми неінвертуючого тригера Шмідта, рис. 2.3. Номінали резисторів R_2 та R_1 взяти величини із пункту 4. Подати на вхід неінвертуючого тригера Шмідта трикутний сигнал $U_{\text{амп}} = 3 \text{ В}$, $f = N_{\text{В}}$ кГц. Зняти осцилограми вхідних та вихідних сигналів, визначити поріг переключення. Самостійно розрахувати поріг перемикання схеми, рис 5.3, задаючись номіналами резисторів R_2 та R_1 , $V_{\text{SS}} = 10 \text{ В}$. Порівняти розраховане значення порогу перемикання із вимірним, пояснити відмінності.
11. Повторити пункт 10 для номіналів R_2 та R_1 з пункту 6.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. М.П. Матвієнко, «Основи електроніки», - Київ: Видавництво Ліра-К, 2021. 361 с.
2. Ю. О. Карпов, С. Ш. Кацев, В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький, «Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами», Вінниця: ВНТУ, 2011. 377 с.
3. І.М. Бондаренко, О.В. Бродін, О.Б. Галат, В.П. Карнаушенко, «Твердотільна електроніка», Харків: ХНУРЕ, 2020. 235 с.
4. В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб, «Теоретичні основи електротехніки», Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004. 272 с.
5. М.П. Матвієнко, «Пристрої цифрової електроніки», Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. 390 с.
6. П.Г. Стахів, В.І. Коруд, О.Є. Гамола, В.Я. Чернівчан, Н.П. Мусихіна, «Основи електроніки з елементами мікроелектроніки», Львів: Видавництво "Магнолія-2006", 2020. 224 с.
7. І.М. Бондаренко, О.В. Бородін, В.П. Карнаушенко, «Проектування напівпровідникових приладів та інтегральних схем : навчальний посібник для студентів спеціальностей "Мікро-та наносистемна техніка", "Електроніка", Харків: ХНУРЕ, 2019. 174 с.
8. John Okyere Attia, «Circuits and Electronics: Hands-on Learning with Analog Discovery», Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. 187 pp.
9. Kaveh Niayesh, Magne Runde, «Power Switching Components: Theory, Applications and Future Trends», Springer eBooks - Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2017. 249 pp. (online resource)

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Офіційний сайт розробника програмного пакету MATLAB. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
2. Офіційний сайт розробника програмного пакету LTspice. URL: <https://www.analog.com/ru/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>.
3. І.М. Бондаренко, О.В. Бородін, В.П. Карнаушенко, «Проектування напівпровідникових приладів та інтегральних схем : навчальний посібник для студентів спеціальностей "Мікро-та наносистемна техніка", "Електроніка", Харків: ХНУРЕ, 2019. 174 с.
4. В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. «Теоретичні основи електротехніки. Т. 1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами», Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004. 272 с.
5. Т.А. Хижняк, А.В. Заграничний, «Комп'ютерна електроніка: Розрахункова робота», Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 64 с.
6. П.Г. Стахів, В.І. Коруд, О.Є. Гамола, В.Я. Чернівчан, Н.П. Мусихіна, «Основи електроніки з елементами мікроелектроніки», Львів: Видавництво "Магнолія-2006", 2020. 224 с.
7. М.П. Матвієнко, «Пристрої цифрової електроніки», Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. 390 с.