

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

КВІТКА С. О., ВОВК О. Ю.

ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Запоріжжя
2024

УДК 621.38 (075)
К 32

Рекомендовано Вченою радою факультету енергетики і комп'ютерних технологій Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» закладів вищої освіти III-IV рівня акредитації (Протокол № 10 від 11 червня 2024 р.)

Рецензенти:

Діордієв В.Т., д.т.н., професор кафедри електротехніки і електромеханіки імені професора В.В. Овчарова, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Лисенко О.В., д.т.н., професор кафедри електроенергетики і електротехнологій, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Квітка С.О.

К 32 Електроніка та мікросхемотехніка: лабораторний практикум / С.О. Квітка, О.Ю. Вовк; ТДАТУ. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. – 175 с.

У лабораторному практикумі наведені лабораторні роботи з використанням програми Electronics Workbench з дослідження напівпровідникових приладів та електронних пристроїв: випрямних діодів, стабілітронів, біполярних та польових транзисторів, тиристорів, підсилювачів електричних сигналів змінного та постійного струмів, генераторів гармонійних коливань та імпульсних сигналів, імпульсних і цифрових пристроїв, виконаних на базі напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем, випрямлячів, згладжувальних фільтрів, стабілізаторів напруги, керованих випрямлячів, конверторів.

Лабораторний практикум призначений для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» закладів вищої освіти III-IV рівня акредитації.

УДК 621.38 (075)

© Квітка С.О., Вовк О.Ю.

© Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, 2024

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ	6
1.1 Випрямні діоди і стабілітрони	6
1.2 Біполярні транзистори	14
1.3 Польові транзистори	24
1.4 Тиристори	34
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ	42
2.1 Підсилювачі на біполярних транзисторах	42
2.2 Підсилювачі на польових транзисторах	51
2.3 Підсилювачі на біполярних транзисторах з від'ємним зворотним зв'язком за струмом	56
2.4 Операційні підсилювачі	60
2.5 Генератори синусоїдальних коливань	69
2.6 Логічні елементи. Тригери	77
2.7 Імпульсні пристрої на операційних підсилювачах	89
2.8 Генератори лінійно змінюваної (пилкоподібної) напруги	103
2.9 Випрямлячі однофазного струму	108
2.10 Випрямлячі з множенням напруги	118
2.11 Параметричні стабілізатори напруги	123
2.12 Компенсаційні стабілізатори напруги	128
2.13 Трифазні випрямлячі	134
2.14 Керовані випрямлячі	142
2.15 Імпульсні перетворювачі постійної напруги (конвертори)	148
ДОДАТКИ	154
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	175

ВСТУП

Електроніка – це галузь науки і техніки, що вивчає фізичні явища в напівпровідникових елементах, електричні характеристики та параметри напівпровідникових приладів, властивості електронних пристроїв і систем, які побудовані на їх базі.

Електроніка має важливе значення у вирішенні сучасних завдань енергетики. Вона посідає одне з перших місць при контролі технологічних параметрів, керуванні різноманітними технологічними процесами, керуванні технічними системами з електроприводами, прийнятті і передачі інформації.

Розвиток сучасної електроніки нерозривно пов'язаний з досягненнями мікроелектроніки, яка, в свою чергу, базується на інтегральній технології. Остання дозволила отримувати вузли електронних пристроїв, перш за все електронно-обчислювальної та інформаційно-вимірювальної техніки, а також пристроїв автоматики, у мікрвиконанні – у вигляді інтегральних мікросхем.

Питаннями побудови електронних пристроїв на інтегральних мікросхемах займається мікросхемотехніка.

Електронні елементи сучасних електронних пристроїв виготовляються промисловістю двох видів: 1) у вигляді окремих дискретних компонентів (діодів, транзисторів, тиристорів та ін.); 2) у вигляді мікросхем (інтегральних схем), в яких з одного корпусу в один функціональний вузол об'єднано ряд окремих елементів, виконаних, як правило, на одному кристалі напівпровідника.

У лабораторному практикумі наведені лабораторні роботи з використанням програми Electronics Workbench для дослідження напівпровідникових приладів та електронних пристроїв: випрямних діодів, стабілітронів, біполярних та польових транзисторів, тиристорів, підсилювачів електричних сигналів змінного та постійного струмів, генераторів гармонійних коливань та імпульсних сигналів, імпульсних і цифрових пристроїв, виконаних на базі напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем, випрямлячів, згладжувальних фільтрів, стабілізаторів напруги, керованих випрямлячів, конверторів.

Застосування комп'ютерних технологій в навчальному процесі, у тому числі і при вивченні електроніки, сприяє підвищенню якості підготовки фахівців. В даний час для схемотехнічного моделювання

аналогових і цифрових електронних пристроїв різного призначення використовується велика різноманітність комп'ютерних програм, таких як Micro-Cap (фірми Spectrum Software), Desing Lab (корпорації Micro-Sim), System View (фірми Elanix), Electronics Workbench (фірми Interactive Image Technologies), Circuit Maker (фірми MicroCode Engineering), Multisim (компанії National Instruments) і ін. Як основний інструментарій авторами вибрана програма Electronics Workbench.

Автори сподіваються, що наведений матеріал допоможе здобувачам вищої освіти зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» краще засвоїти курс дисципліни «Електроніка та мікросхемотехніка», набути практичних навичок з дослідження напівпровідникових приладів та електронних пристроїв.

РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИБЛАДІВ

1.1 ВИПРЯМНІ ДІОДИ І СТАБІЛІТРОНИ

Мета роботи: вивчення будови, принципу дії, вольт-амперних характеристик випрямних діодів і стабілітронів. Дослідження найпростіших електричних кіл з випрямними діодами і стабілітронами.

1.1.1 Загальні теоретичні відомості

Напівпровідниковий діод – це електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з одним електричним переходом і двома виводами, в якому використовуються властивості p - n -переходу.

Напівпровідникові діоди класифікуються:

- за призначенням: випрямні, високочастотні і надвисокочастотні, імпульсні, напівпровідникові стабілітрони, тунельні, обернені, варикапи та ін.;
- за конструктивно-технологічними особливостями: площинні і точкові;
- за типом вихідного матеріалу: германієві, кремнієві, арсенідегалієві та ін.

Випрямний напівпровідниковий діод – це напівпровідниковий прилад, який призначений для перетворення змінного струму в постійний.

Випрямні діоди виконуються на основі p - n -переходу і мають дві області, одна з них є більш низькоомною (містить велику концентрацію домішок), і називається емітером. Інша область, база – більш високоомна (містить меншу концентрацію домішок).

У основі роботи випрямних діодів лежить властивість односторонньої провідності p - n -переходу, яке полягає в тому, що останній добре проводить струм (має малий опір) при його прямому увімкненні і практично не проводить струм (має дуже високий опір) при зворотному увімкненні.

Як відомо, прямий струм діода створюється основними, а зворотний – неосновними носіями заряду. Концентрація основних носіїв заряду на декілька порядків перевищує концентрацію неосновних носіїв, чим і обумовлюються вентильні властивості діода.

Основні параметри випрямних напівпровідникових діодів:

- максимально допустимий (середній) прямий струм $I_{\text{пр MAX}}$ діода;
- максимально допустима зворотна напруга діода $U_{\text{ЗВ MAX}}$;
- постійний зворотний струм $I_{\text{ЗВ}}$, що протікає через діод при зворотній напрузі, рівній $U_{\text{ЗВ MAX}}$;
- максимально допустима потужність P_{MAX} , що розсіюється діодом.

За максимально допустимим значенням середнього прямого струму діоди діляться на малопотужні ($I_{\text{пр MAX}} \leq 0,3 \text{ A}$), середньої потужності ($0,3 \text{ A} < I_{\text{пр MAX}} \leq 10 \text{ A}$) і великої потужності ($I_{\text{пр MAX}} > 10 \text{ A}$).

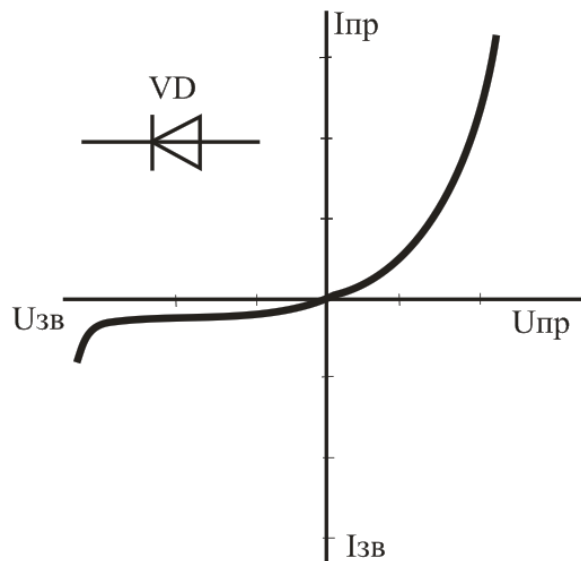


Рисунок 1 – Вольт-амперна характеристика випрямного діода та його умовне графічне позначення

Падіння напруги при пропусканні прямого струму у германієвих діодів складає $U_{\text{пр}} = 0,3 \dots 0,6 \text{ В}$, у кремнієвих діодів – $U_{\text{пр}} = 0,8 \dots 1,2 \text{ В}$.

Допустима зворотна напруга германієвих діодів досягає – $100 \dots 400 \text{ В}$, а кремнієвих діодів – $1000 \dots 1500 \text{ В}$.

Випрямні діоди застосовуються для випрямлення змінного струму (перетворення змінного струму в постійний); використовуються в схемах управління і комутації для обмеження паразитних викидів напруги, як елементи електричної розв'язки електричних кіл і т.д.

Напівпровідниковий стабілітрон – це напівпровідниковий прилад, напруга на якому в області електричного пробою слабо залежить від струму і який використовується для стабілізації напруги.

У напівпровідникових стабілітронах використовується властивість незначної зміни зворотної напруги на *p-n*-переході при електричному

(лавинному або тунельному) пробої.

Основні параметри стабілітронів:

- напруга стабілізації U_{CT} ;
- мінімальний $I_{CT\ MIN}$ і максимальний $I_{CT\ MAX}$ струми стабілізації;
- максимально допустима розсіювана потужність P_{MAX} ;
- диференційний опір на ділянці стабілізації $r_d = \Delta U_{CT}/I_{CT}$;
- температурний коефіцієнт напруги на ділянці стабілізації

$$TKU = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta T \cdot U_{CT}} \cdot 100\%.$$

Стабілітрони використовують для стабілізації напруги джерел живлення, а також для фіксації рівнів напруги в різних схемах.

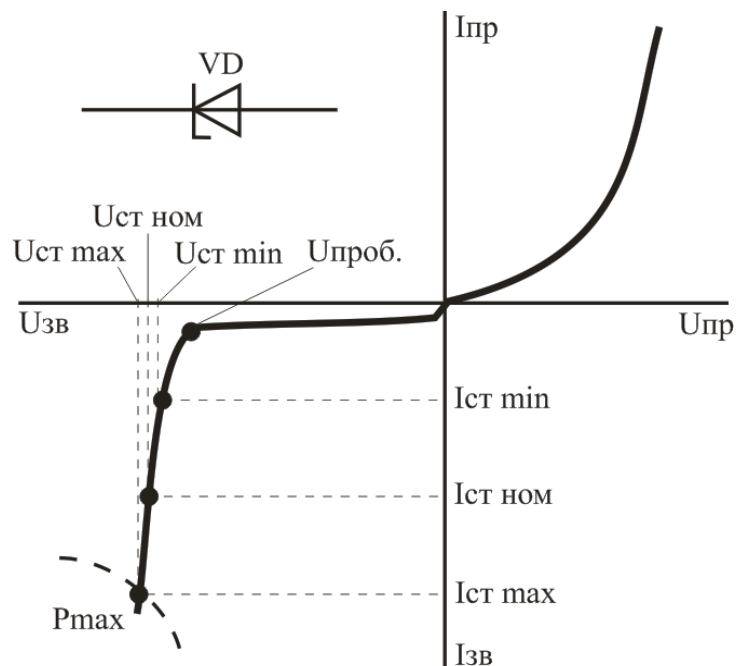


Рисунок 2 – Вольт-амперна характеристика стабілітрона та його умовне графічне позначення

1.1.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення та умовне графічне позначення випрямного діода і стабілітрона.
2. Привести конструкцію та описати принцип дії випрямного діода і стабілітрона.
3. Привести вольт-амперні характеристики випрямного діода і

стабілітрона.

4. Привести схему, що складається з послідовно увімкнених випрямного діода і резистора.

5. Побудувати графіки зміни в часі (часові діаграми) напруг на випрямному діоді U_{mVD} і резисторі U_{mR} при синусоїдальній вхідній напрузі U_{mBX} .

Вихідні дані: амплітудне значення вхідної напруги U_{mBX} , напруга на діоді при прямому включенні $U_{ПР}$, опір резистора R . Варіанти завдань наведені в таблиці А.1 (додаток А).

6. Привести схему, що складається з послідовно увімкнених резистора і стабілітрона.

7. Побудувати графіки зміни в часі (часові діаграми) напруг на резисторі U_{mR} і стабілітроні U_{mVD} при синусоїдальній вхідній напрузі U_{mBX} .

Вихідні дані: амплітудне значення вхідної напруги U_{mBX} , напруга стабілізації стабілітрона $U_{СТ}$, опір резистора R . Варіанти завдань наведені в таблиці А.1 (додаток А).

1.1.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для зняття вольт-амперної характеристики випрямного діода (рисунок 3).

2. Включити схему. Змінюючи напругу джерела живлення E зняти пряму $I_{ПР} = f(U_{ПР})$ і зворотну $I_{ЗВ} = f(U_{ЗВ})$ частину вольт-амперної характеристики випрямного діода. Результати вимірів занести в таблицю 1.

3. За даними таблиці 1 побудувати вольт-амперну характеристику випрямного діода $I = f(U)$.

4. Набрати схему для зняття вольт-амперної характеристики стабілітрона (рисунок 4).

5. Включити схему. Змінюючи напругу джерела живлення E зняти пряму $I_{ПР} = f(U_{ПР})$ і зворотну $I_{ЗВ} = f(U_{ЗВ})$ частину вольт-амперної характеристики стабілітрона. Результати вимірів занести в таблицю 2.

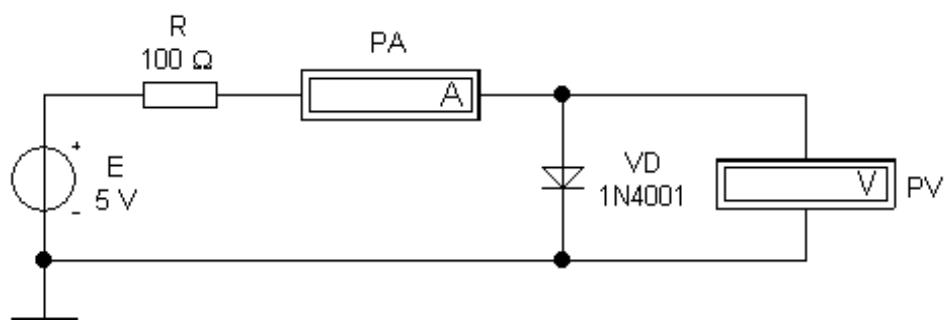
6. За даними таблиці 2 побудувати вольт-амперну характеристику стабілітрона $I = f(U)$.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень випрямного діода

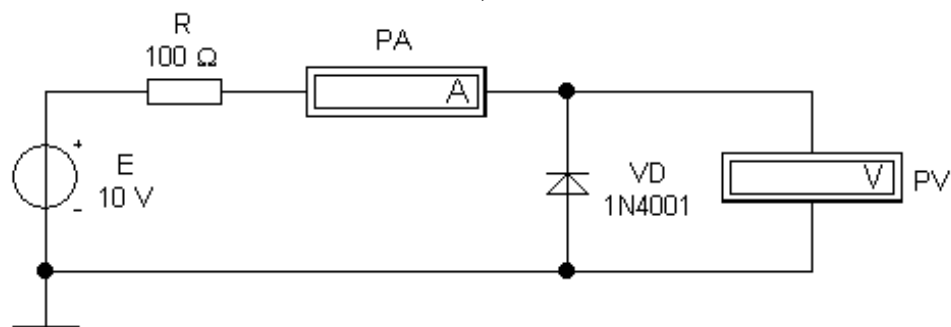
Пряма частина ВАХ випрямного діода							
E, В	0	0,5	1	2	3	4	5
$U_{\text{пр}}, \text{В}$							
$I_{\text{пр}}, \text{мА}$							
Зворотна частина ВАХ випрямного діода							
E, В	0	5	10	15	20		
$U_{\text{зв}}, \text{В}$							
$I_{\text{зв}}, \text{мА}$							

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень стабілітрона

Пряма частина ВАХ стабілітрона							
E, В	0	0,5	1	2	3	4	5
$U_{\text{пр}}, \text{В}$							
$I_{\text{пр}}, \text{мА}$							
Зворотна частина ВАХ стабілітрона							
E, В	0	4	6	10	15	20	25
$U_{\text{зв}}, \text{В}$							
$I_{\text{зв}}, \text{мА}$							



а)



б)

Рисунок 3 – Схема для зняття вольт-амперної характеристики випрямного діода: а – прямої частини; б – зворотної частини

7. Набрати схему для дослідження електричного кола з випрямним діодом (рисунок 5, а).

8. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця А.1, додаток А).

9. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

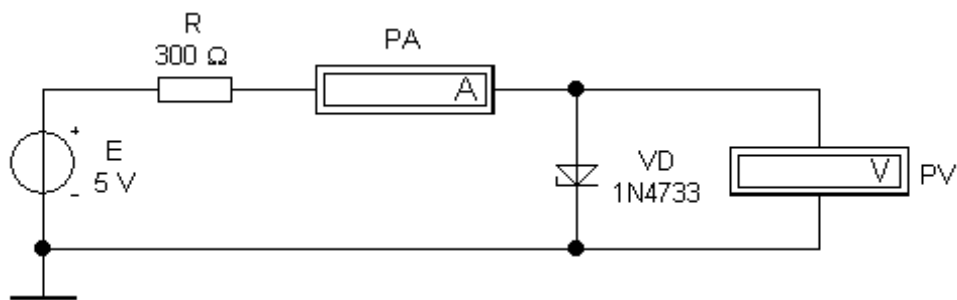
10. Включити схему. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити амплітуди вхідної напруги $U_{m\text{ВХ}}$ і напруги на навантажувальному резисторі $U_{m\text{R}}$. За різницею амплітуд обчислити падіння напруги на діоді $U_{\text{пр}}$. Привести осцилограми напруг (див. рисунок 6).

11. Набрати схему для дослідження електричного кола з стабілітроном (рисунок 5, б).

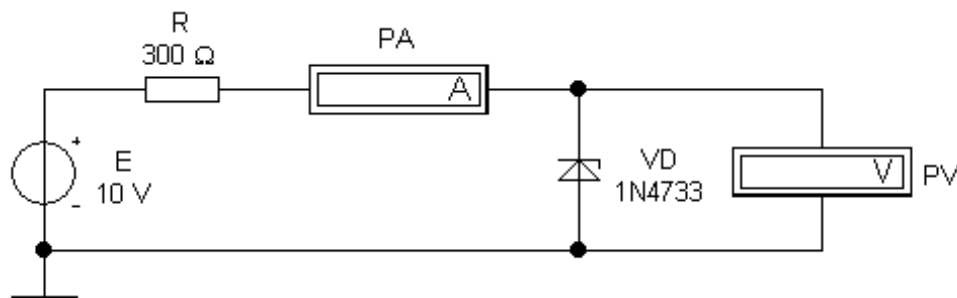
12. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця А.1, додаток А).

13. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

14. Включити схему. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити амплітуду вхідної напруги $U_{m\text{ВХ}}$ і напруги стабілізації стабілітрона $U_{\text{СТ}}$. Привести осцилограми напруг (див. рисунок 7).



а)



б)

Рисунок 4 – Схема для зняття вольт-амперної характеристики стабілітрона: а – прямої частини; б – зворотної частини

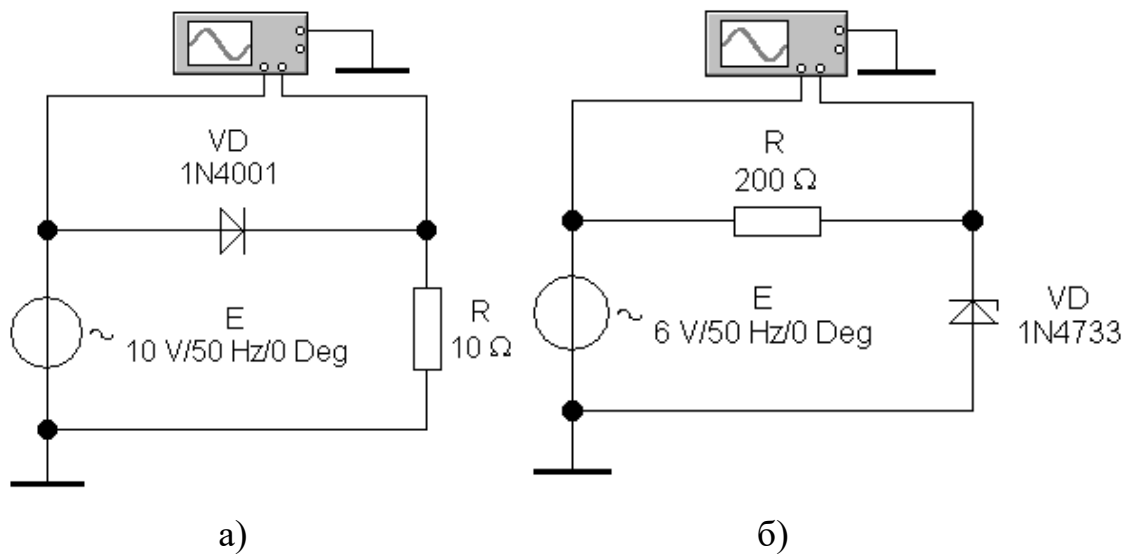


Рисунок 5 – Схема для дослідження електричних кіл:
а – з випрямним діодом; б – з стабілітроном

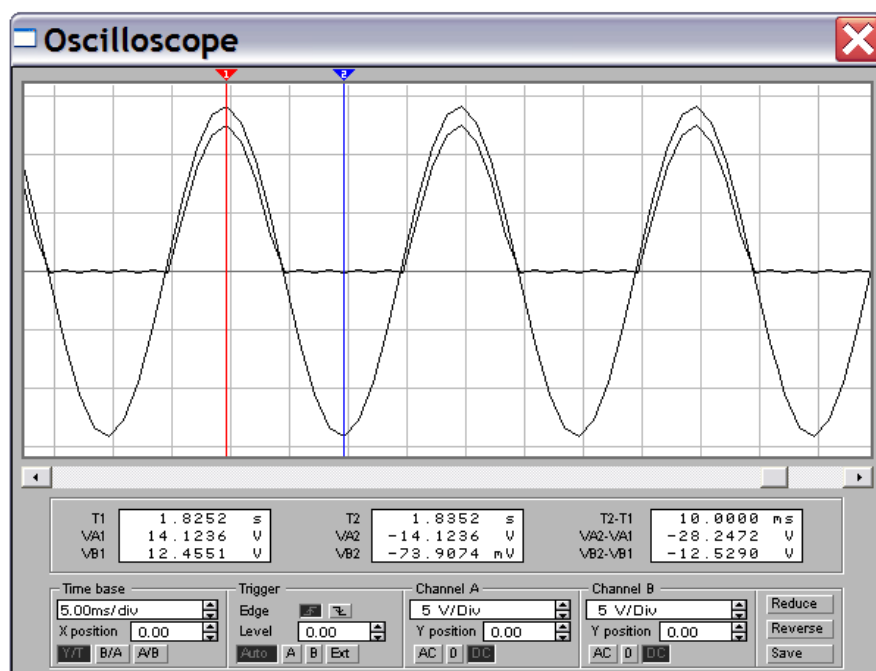


Рисунок 6 – Осцилограми напруг електричного кола з випрямним діодом

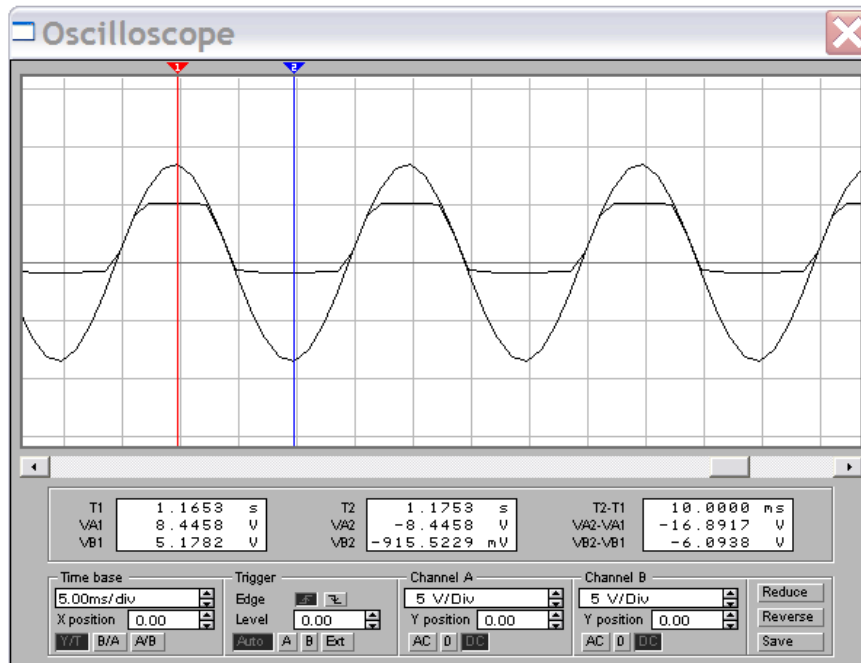


Рисунок 7 – Осцилограми напруг електричного кола з стабілітроном

1.1.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз і порівняння теоретичних та експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Поясніть призначення та принцип дії напівпровідникових випрямних діодів.
2. Назвіть основні параметри випрямних діодів.
3. Наведіть вольт-амперну характеристику випрямного діода.
4. Наведіть умовне графічне позначення випрямного діода.
5. Поясніть, коли застосовується послідовне та паралельне з'єднання випрямних діодів.
6. Поясніть призначення та принцип дії напівпровідникових стабілітронів.
7. Назвіть основні параметри стабілітронів.

8. Наведіть вольт-амперну характеристику стабілітрона.
 9. Наведіть умовне графічне позначення стабілітрона.
 10. Поясніть, коли застосовується послідовне з'єднання стабілітронів.
- Чи можна вмикати паралельно два стабілітрони?

1.2 БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ

Мета роботи: вивчення будови, принципу дії, вольт-амперних характеристик біполярних транзисторів. Дослідження електричних кіл постійного струму з біполярними транзисторами.

1.2.1 Загальні теоретичні відомості

Біполярний транзистор – це напівпровідниковий прилад, що складається з трьох областей провідності, які утворюють два *p-n*-переходи і призначений для підсилення потужності.

Біполярні транзистори, що випускаються в даний час, можна класифікувати за наступними ознаками:

- за матеріалом: германієві і кремнієві;
- за видом провідності областей: типу *p-n-p* і *n-p-n*;
- за потужністю: малої ($P_{\text{MAX}} \leq 0,3 \text{ Вт}$), середньої ($0,3 \text{ Вт} < P_{\text{MAX}} \leq 1,5 \text{ Вт}$) і великої потужності ($P_{\text{MAX}} > 1,5 \text{ Вт}$);
- за частотою: низькочастотні, середньочастотні, високочастотні і понадвисокочастотні.

У біполярних транзисторах струм визначається рухом носіїв заряду двох типів: електронів і дірок (або основними і неосновними носіями заряду). Звідси їх назва – біполярні.

Будова площинного біполярного транзистора показана схематично на рисунку 8.

Транзистор являє собою пластинку германію або кремнію, в якій створено три області з різною електропровідністю.

Середня область транзистора називається базою, одна крайня область – емітером, інша – колектором. Таким чином в транзисторі є два *p-n*-переходи: емітерний – між емітером і базою та колекторний – між базою і колектором.

Емітером називається область транзистора призначенням якої є інжекція носіїв заряду в базу. Колектором називають область,

призначенням якої є екстракція носіїв заряду з бази. Basis є область, в яку інжектуються емітером неосновні для цієї області носії заряду.

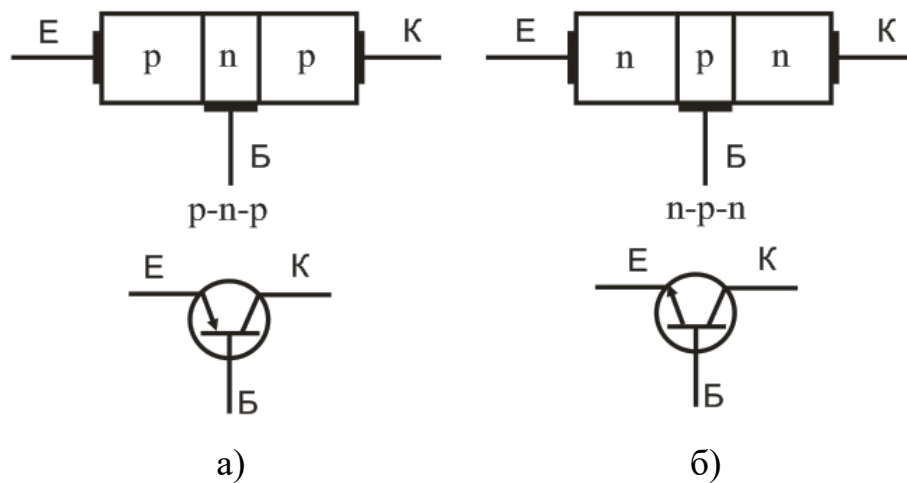


Рисунок 8 – Структура та умовне позначення біполярного транзистора: а – типу $p-n-p$; б – типу $n-p-n$

Від бази, емітера і колектора зроблені виводи. Залежно від того, який з виводів є спільним для входного і вихідного електричних кіл, розрізняють три схеми увімкнення біполярного транзистора: з спільною базою (СБ), з спільним емітером (СЕ), з спільним колектором (СК).

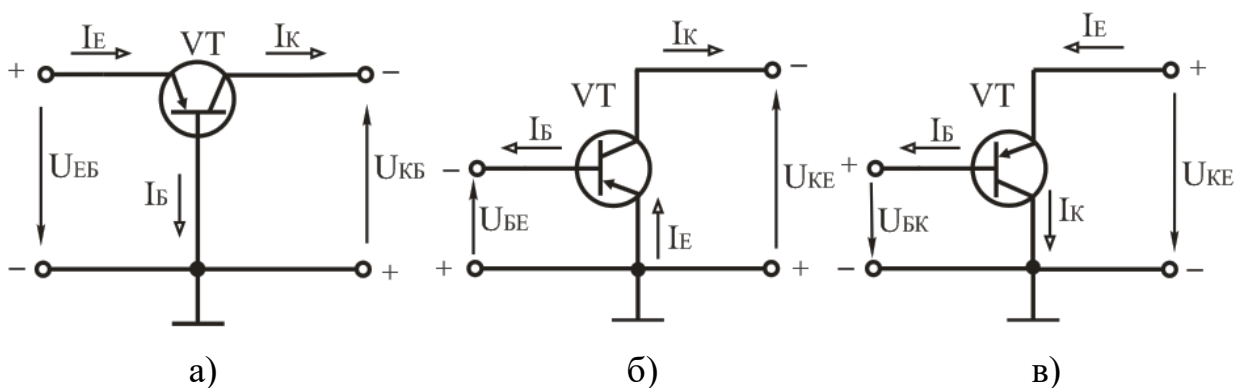


Рисунок 9 – Схеми увімкнення біполярних транзисторів: а – з спільною базою; б – з спільним емітером; в – з спільним колектором

Вхідне, або керуюче, коло призначене для управління роботою транзистора. У вихідному, або керованому, колі отримують посилені коливання. Джерело посилюваних коливань вмикається у вхідне коло, а у вихідне вмикається навантаження.

В транзисторі протікає три струми: струм емітера, колектора і бази. Струм емітера розділяється на струми бази і колектора, тобто

$$I_E = I_B + I_K.$$

Струм емітера для схеми з спільною базою є вхідним струмом, струм колектора – вихідним. Вихідний струм складає частину вхідного, тобто

$$\Delta I_K = \alpha \Delta I_E, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт передачі струму для схеми з СБ;

Оскільки вихідний струм менше вхідного, то коефіцієнт $\alpha < 1$. Зазвичай величина α складає 0,95...0,995.

У схемі з спільним емітером вихідним струмом є струм колектора, а вхідним – струм бази. Коефіцієнт підсилення за струмом для схеми з СЕ

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}, \quad (2)$$

але $\Delta I_B = \Delta I_E - \Delta I_K = \Delta I_E - \alpha \Delta I_E = \Delta I_E (1 - \alpha)$, тоді

$$\beta = \frac{\alpha \Delta I_E}{\Delta I_E (1 - \alpha)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (3)$$

Якщо коефіцієнт α для транзисторів $\alpha = 0,95...0,995$, то коефіцієнт $\beta = 9...99$. Це є найважливішою перевагою увімкнення транзистора за схемою з СЕ, чим, зокрема, визначається більш широке практичне застосування цієї схеми увімкнення у порівнянні з схемою СБ.

Вихідний струм транзистора залежить від вхідного струму. Тому транзистор це напівпровідниковий прилад, який керується струмом.

Зміни струму емітера I_E , що викликані зміною напруги емітерного переходу, повністю передаються в колекторне коло, викликаючи зміну струму колектора I_K . А оскільки напруга джерела колекторного живлення E_K значно більше, чим емітерного E_E , то і потужність, споживана у колі колектора P_K , буде значно більше потужності в колі емітера P_E . Таким чином, забезпечується можливість управління великою потужністю в колекторному колі транзистора малою потужністю, що витрачається в емітерному колі, тобто має місце підсилення потужності.

Статичним режимом роботи транзистора називається режим за відсутності навантаження у вихідному колі.

Статичні характеристики транзистора, увімкненого за схемою з СЕ:

- вхідною характеристикою є залежність (рисунк 10, а):

$$I_B = f(U_{BE}) \text{ при } U_{KE} = \text{const};$$

- вихідною характеристикою є залежність (рисунк 10, б):

$$I_K = f(U_{KE}) \text{ при } I_B = \text{const}.$$

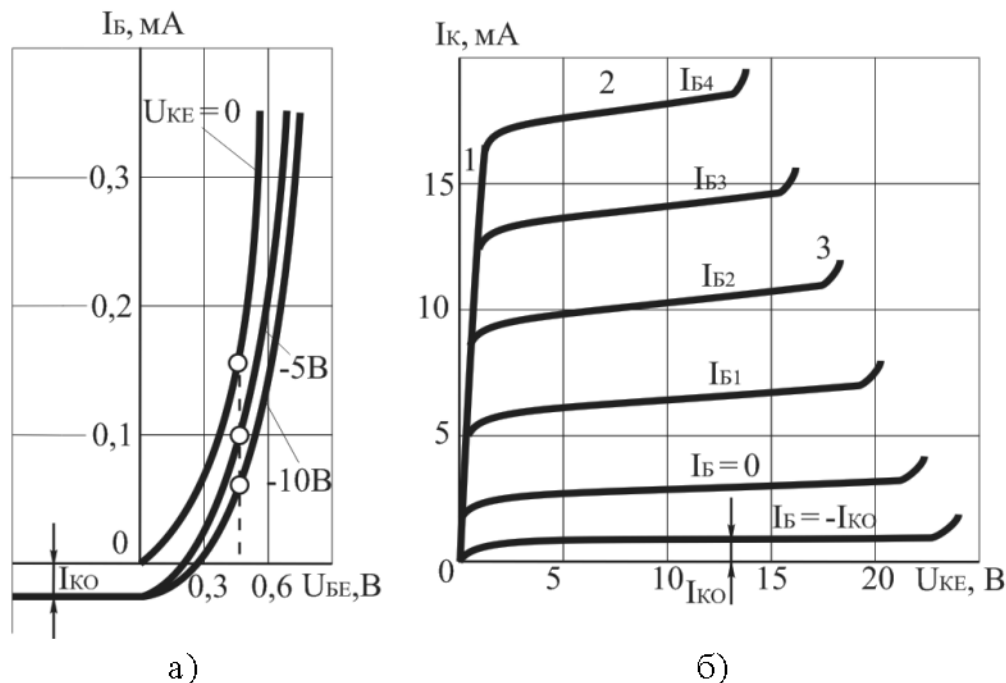


Рисунок 10 – Статичні характеристики біполярного транзистора, увімкненого за схемою з СЕ: а – вхідна; б – вихідна

Для аналізу і розрахунку електричних кіл з біполярними транзисторами використовують так звані h – параметри транзистора, увімкненого за схемою з СЕ. Електричний стан транзистора, увімкненого за схемою з СЕ, характеризується величинами I_B , I_{BE} , I_K , U_{KE} .

В систему h – параметрів входять наступні величини:

1. Вхідний опір h_{11} є опором транзистора змінному вхідному струму при короткому замиканні на виході, тобто за відсутності вихідної змінної напруги.

2. Коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою h_{12} показує, яка частина вихідної змінної напруги передається на вхід транзистора внаслідок зворотного зв'язку в ньому.

3. Коефіцієнт підсилення за струмом (коефіцієнт передачі струму) h_{21} показує посилення змінного струму транзистором в режимі роботи без навантаження.

4. Вихідна провідність h_{22} є провідністю для змінного струму між

вихідними затискачами транзистора.

Для схеми з спільним емітером справедливі наступні рівняння:

$$\begin{aligned}\Delta U_{BE} &= h_{11E} \Delta I_B + h_{12E} \Delta U_{KE}, \\ \Delta I_K &= h_{21E} \Delta I_B + h_{22E} \Delta U_{KE},\end{aligned}\tag{4}$$

де

$$h_{11E} = \Delta U_{BE} / \Delta I_B \quad \text{при} \quad U_{KE} = \text{const};$$

$$h_{12E} = \Delta U_{BE} / \Delta U_{KE} \quad \text{при} \quad I_B = \text{const};$$

$$h_{21E} = \Delta I_K / \Delta I_B \quad \text{при} \quad U_{KE} = \text{const};$$

$$h_{22E} = \Delta I_K / \Delta U_{KE} \quad \text{при} \quad I_B = \text{const}.$$

Біполярний транзистор може працювати в трьох основних режимах, що визначаються полярністю напруги на емітерному та колекторному переходах.

При роботі транзистора в **активному режимі** емітерний перехід зміщений у прямому напрямку, а колекторний – у зворотному.

У **режимі відтинання** (закритий стан транзистора), емітерний та колекторний переходи транзистора зміщені у зворотному напрямку (обидва *p-n*-переходи закриті).

У **режимі насичення** (відкритий стан транзистора), емітерний та колекторний переходи транзистора зміщені у прямому напрямку (обидва *p-n*-переходи відкриті).

Режим роботи, у якому транзистор тривалий час знаходиться в режимах відтинання або насичення, називається ключовим режимом.

У активному режимі транзистор працює як підсилювач сигналу, тобто виконує функції активного елементу електричної схеми (посилення, генерування і т.п.).

Біполярні транзистори є напівпровідниковими приладами універсального призначення і широко застосовуються в різних підсилювачах, генераторах, в імпульсних і ключових пристроях.

Основними елементами схеми (рисунок 11) є джерело живлення E_K , керований елемент – транзистор VT і резистор R_K , які елементи утворюють головне (вихідне) коло підсилювального каскаду.

Решта елементів виконує допоміжну роль. Конденсатор C_P є розділяючим. За відсутності цього конденсатора в колі джерела вхідного

сигналу створювався б постійний струм від джерела живлення E_K .

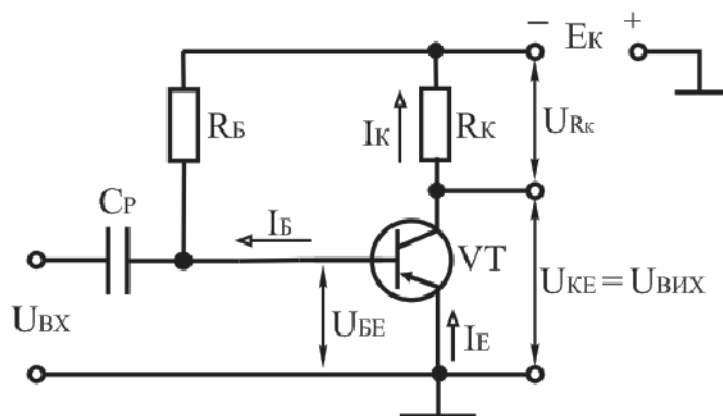


Рисунок 11 – Схема найпростішого підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою з спільним емітером

Резистор R_B , увімкнений в коло бази, забезпечує роботу транзистора в режимі спокою, тобто у відсутності вхідного сигналу. Режим спокою забезпечується струмом бази спокою $I_B \approx E_K / R_B$.

За допомогою резистора R_K створюється вихідна напруга, тобто резистор R_K виконує функцію створення напруги, що змінюється, у вихідному колі за рахунок протікання в ній струму, керованого по колу бази.

Для колекторного кола підсилювального каскаду можна записати наступне рівняння електричного стану

$$E_K = U_{KE} + I_K R_K, \quad (5)$$

тобто сума падіння напруги на резисторі R_K і напруги колектор-емітер U_{KE} транзистора завжди рівна постійній величині – ЕРС джерела живлення E_K .

Процес підсилення ґрунтується на перетворенні енергії джерела постійної напруги E_K в енергію змінної напруги у вихідному колі за рахунок зміни опору керованого елемента (транзистора) у відповідності із законом, що задається вхідним сигналом.

Для колекторного кола підсилювального каскаду (рисунок 11) у відповідності з другим законом Кірхгофа справедливе рівняння (5).

Вольт-амперна характеристика колекторного резистора R_K є лінійною, а вольт-амперні характеристики транзистора є нелінійними

колекторними характеристиками транзистора (рисунок 12, б). На колекторних характеристиках транзистора необхідно провести з точки E_K на осі абсцис вольт-амперну характеристику резистора R_K , що задовольняє рівнянню

$$U_{KE} = E_K - R_K I_K. \quad (6)$$

Цю характеристику будують по двох точках:

- 1) $U_{KE} = E_K$ при $I_K = 0$ на осі абсцис;
- 2) $I_K = E_K/R_K$ при $U_{KE} = 0$ на осі ординат.

Побудовану таким чином вольт-амперну характеристику колекторного резистора R_K називають лінією навантаження.

Точка перетину лінії навантаження з однією з статичних вольт-амперних характеристик називається робочою точкою транзистора. Початкове положення цієї точки за відсутності вхідного змінного сигналу називають точкою спокою – T_O . Точка спокою (робоча точка) T_O визначає струм I_{KC} і напругу U_{KEC} в режимі спокою.

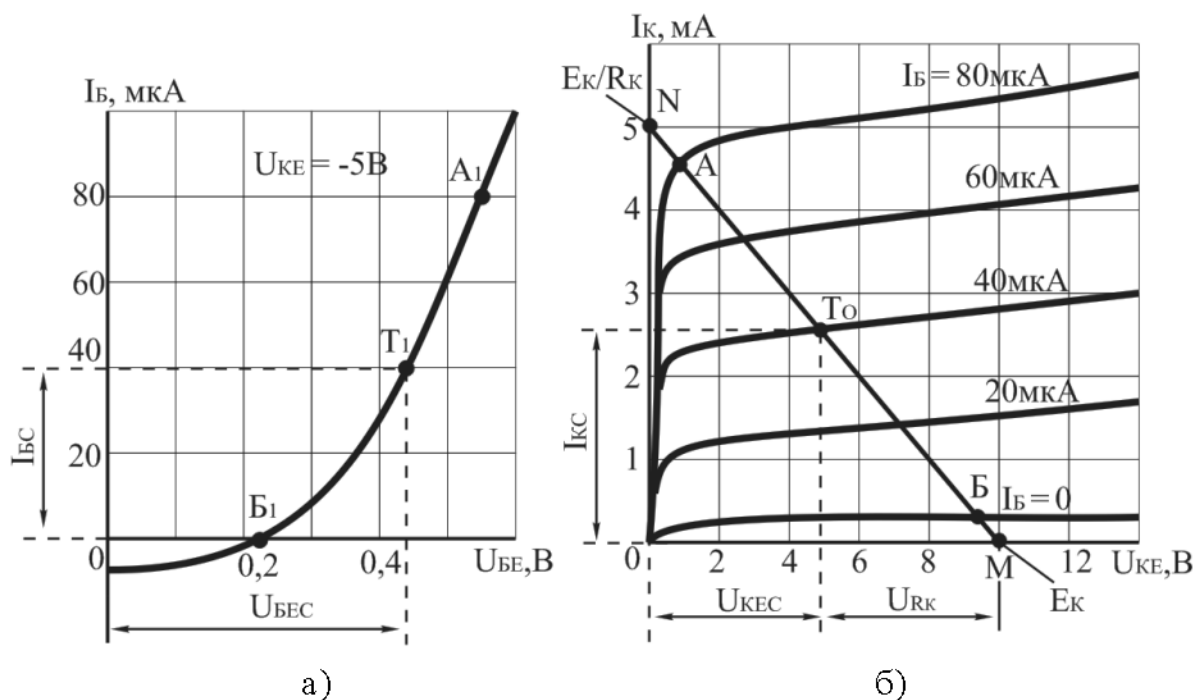


Рисунок 12 – Графоаналітичний розрахунок робочого режиму транзистора за допомогою вхідної і вихідних характеристик

Опір резистора R_B (забезпечує роботу транзистора в режимі спокою), через який від джерела E_K подається постійна напруга на базу

$$R_B = \frac{E_K - U_{BEС}}{I_{BC}}. \quad (7)$$

У активному (підсилювальному) режимі точка спокою транзистора T_O знаходиться приблизно посередині ділянки АБ лінії навантаження.

1.2.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення, умовне графічне позначення та класифікацію біполярних транзисторів.

2. Привести конструкцію та описати принцип дії біполярного транзистора.

3. Побудувати вхідну $[I_B = f(U_{BE})]$ і вихідну $[I_K = f(U_{KE})]$ вольт-амперні характеристики біполярного транзистора, увімкненого за схемою із спільним емітером.

Вихідні дані: координати точок лінійної частини вхідної характеристики: точка 1 ($I_B = 10$ мкА, $U_{BE} = 0,6$ В), точка 2 ($I_B = 100$ мкА, $U_{BE} = 0,7$ В); коефіцієнт підсилення транзистора β , напруга джерела живлення E_K , опір резистора у колі колектора R_K . Струм колектора $I_K = \beta \cdot I_B$ незначно збільшується при збільшенні E_K . Варіанти завдань наведені в таблиці А.2 (додаток А).

4. Привести схему найпростішого підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою із спільним емітером. Описати призначення елементів схеми.

5. Побудувати лінію навантаження каскаду за постійним струмом та визначити параметри режиму спокою: напруга колектор-емітер спокою U_{KES} , струм колектора спокою I_{KS} , струм бази спокою I_{BS} , напруга база-емітер спокою U_{BES} . Робоча точка розташована посередині лінії навантаження.

6. Визначити величину опору резистора в колі бази R_B , що забезпечує режим спокою.

1.2.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для зняття вольт-амперних характеристик біполярного транзистора (рисунок 13).

2. Установити задані параметри елементів схеми.

3. Включити схему. Змінюючи струм бази зняти вхідну $[I_B = f(U_{BE})]$ вольт-амперну характеристику транзистора при фіксованих значеннях напруги колектор-емітер: $U_{KE} = 0$ та $U_{KE} = 10$ В. Далі змінюючи величину напруги джерела живлення E_K зняти вихідну $[I_K = f(U_{KE})]$ вольт-амперну характеристику біполярного транзистора при фіксованих значеннях струму бази: $I_B = 10$ мкА; 50 мкА та 100 мкА. Результати вимірів занести в таблицю 3.

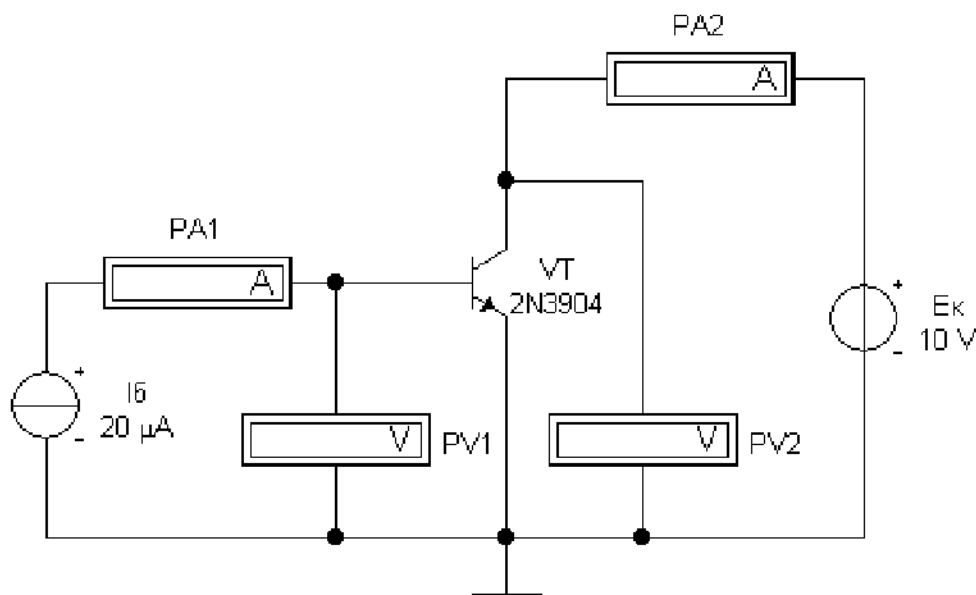


Рисунок 13 – Схема для зняття вольт-амперних характеристик біполярного транзистора, увімкненого за схемою з спільним емітером

Таблиця 3 – Результати експериментальних досліджень біполярного транзистора

Вхідні ВАХ			Вихідні ВАХ			
I_B , мкА	U_{BE} , В		E_K , В	I_K , мА		
	$U_{KE} = 0$	$U_{KE} = 10$ В		$I_B = 10$ мкА	$I_B = 50$ мкА	$I_B = 100$ мкА
10			0,1			
30			0,2			
50			1,0			
70			10			
90			–			
100			–			

4. За даними таблиці 3 побудувати вольт-амперні характеристики біполярного транзистора: $I_B = f(U_{BE})$ і $I_K = f(U_{KE})$.

5. Набрати схему підсилювального каскаду на біполярному транзисторі (рисунок 14).

6. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця А.2, додаток А).

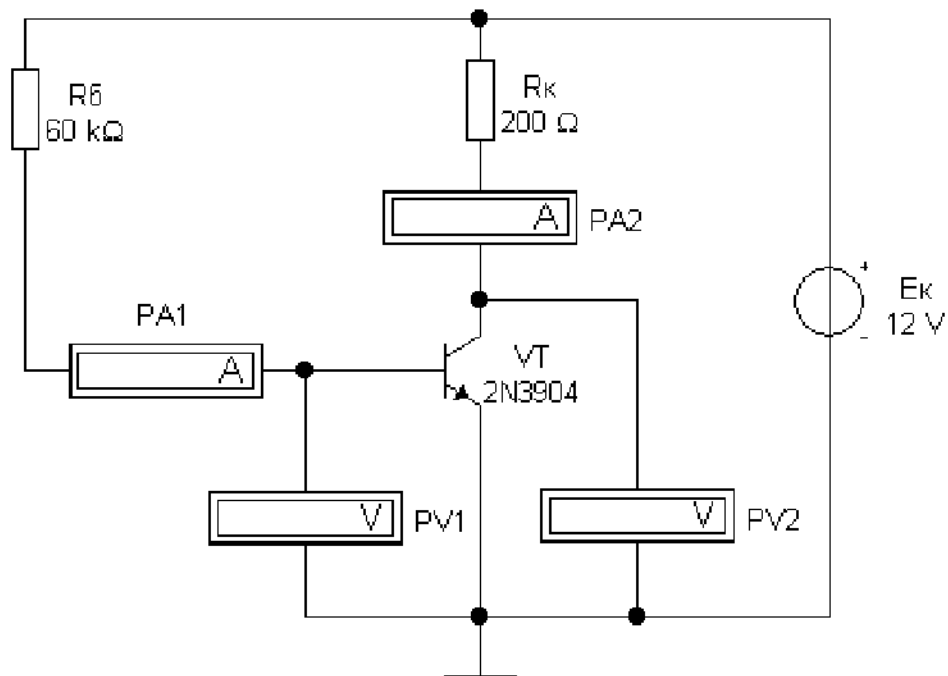


Рисунок 14 – Схема для дослідження підсилювального каскаду на біполярному транзисторі

7. Включити схему. Змінюючи опір резистора R_B , установити параметри режиму спокою, величини яких визначені в п. 1.2.2. Записати показання приладів.

8. Змінюючи опір резистора R_B ($R_B = 2R_B$; $R_B = R_B/2$), записати показання приладів і провести аналіз отриманих результатів.

1.2.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз і порівняння теоретичних та експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Поясніть призначення та принцип дії біполярних транзисторів.
2. Назвіть основні типи біполярних транзисторів та наведіть їх умовне графічне позначення.
3. Наведіть схему увімкнення біполярного транзистора із спільною базою.
4. Наведіть вольт-амперні характеристики біполярного транзистора при увімкненні за схемою із спільною базою.
5. Наведіть схему увімкнення біполярного транзистора із спільним емітером.
6. Наведіть вольт-амперні характеристики біполярного транзистора при увімкненні за схемою із спільним емітером.
7. Назвіть основні параметри біполярних транзисторів.
8. Назвіть режими роботи біполярних транзисторів.
9. Наведіть схему найпростішого підсилювального каскаду на біполярному транзисторі. Поясніть призначення елементів схеми та принцип роботи підсилювального каскаду.
10. Поясніть методику побудови лінії навантаження каскаду за постійним струмом та визначення параметрів режиму спокою.
11. Поясніть, як зміниться положення робочої точки і параметри режиму спокою підсилювального каскаду при зміні: величини опору резистора R_K ; напруги живлення E_K ; коефіцієнта підсилення β ; струму бази I_E ?

1.3 ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ

Мета роботи: вивчення будови, принципу дії, вольт-амперних характеристик польових транзисторів. Дослідження електричних кіл постійного струму з польовими транзисторами.

1.3.1 Загальні теоретичні відомості

Польовий транзистор — це електроперетворювальний прилад, в якому струм, що протікає через канал, керується електричним полем, яке виникає при прикладенні напруги між затвором і витоком, і який

призначений для підсилення потужності електромагнітних коливань.

За способом створення каналу розрізняють польові транзистори із затвором у вигляді керуючого p - n -переходу і з ізольованим затвором (МДН- або МОН-транзистори): вбудованим каналом та індукованим каналом.

Залежно від провідності каналу польові транзистори поділяються на: польові транзистори з каналом p -типу і n -типу. Канал p -типу має діркову провідність, а канал n -типу – електронну.

Польовий транзистор з керуючим p - n -переходом – це польовий транзистор, затвор якого відокремлений в електричному відношенні від каналу p - n -переходом, який увімкнений у зворотному напрямі.

Каналом польового транзистора називають область в напівпровіднику, в якій струм основних носіїв заряду регулюється зміною її поперечного перетину.

Електрод, через який в канал входять основні носії заряду, називають витоком. Електрод, через який з каналу виходять основні носії заряду, називають стоком. Електрод, призначений для регулювання поперечного перетину каналу за рахунок керуючої напруги, називають затвором.

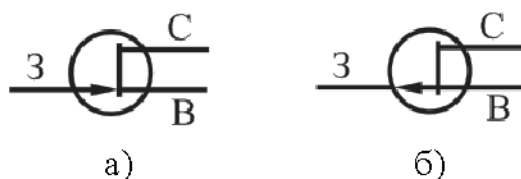


Рисунок 15 – Умовне позначення польового транзистора з керуючим p - n -переходом: а – канал n -типу; б – канал p -типу

Стокові характеристики польового транзистора (рисунок 16, а) відображають залежність струму стоку від напруги U_{CB} при фіксованій напрузі $U_{ЗВ}$: $I_C = f(U_{CB})$ при $U_{ЗВ} = \text{const}$.

Стік-затворна характеристика польового транзистора показує залежність струму I_C від напруги $U_{ЗВ}$ при фіксованій напрузі U_{CB} : $I_C = f(U_{ЗВ})$ при $U_{CB} = \text{const}$ (рисунок 16, б).

При напрузі $U_{ЗВ} = 0$ перетин каналу найбільший, його опір найменший і струм I_C виходить найбільшим. Струм стоку $I_{C\text{поч}}$ при $U_{ЗВ} = 0$ називають початковим струмом стоку.

Напруга $U_{ЗВ}$, при якій канал повністю перекривається, а струм стоку I_C стає дуже малим, називають напругою відтинання $U_{ЗВ\text{вдт}}$.

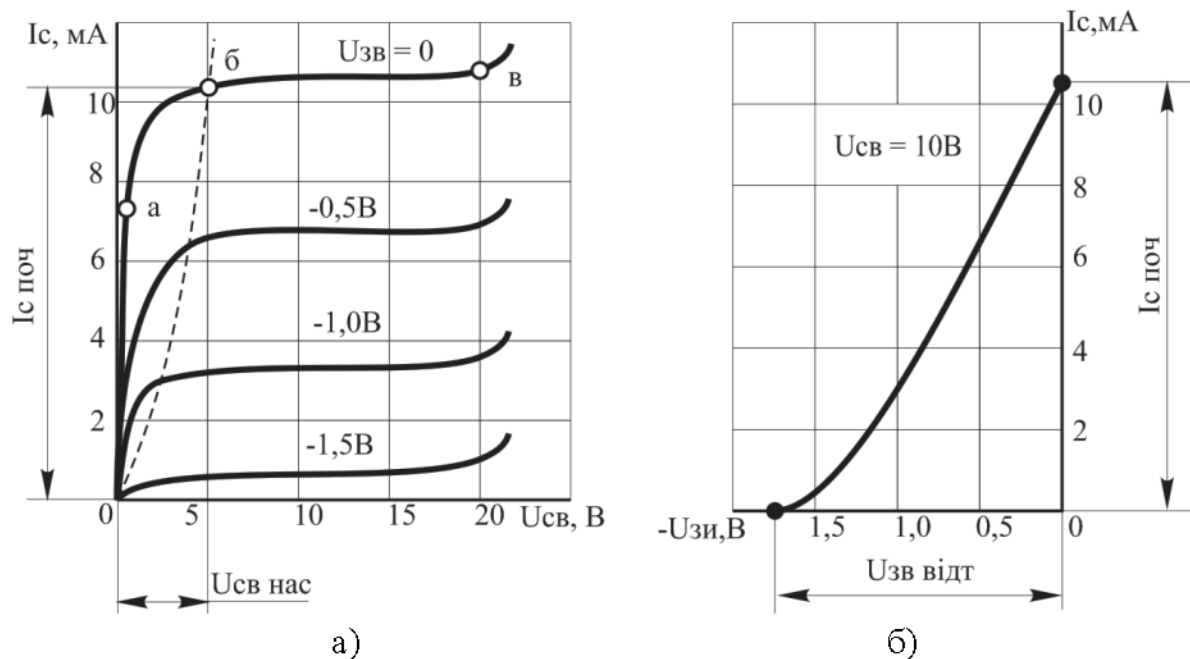


Рисунок 16 – Вольт-амперні характеристики польового транзистора з p - n -переходом і каналом n -типу:
а – стокові (вихідні); б – стік-затворна

Основні параметри:

- максимальний струм стоку $I_{C \text{ max}}$ (при $U_{ZB} = 0$);
- максимальна напруга стік-витік $U_{CS \text{ max}}$;
- напруга відтинання $U_{ZB \text{ відг}}$;
- внутрішній (вихідний) опір r_i – опір транзистора між стоком і витком (опір каналу) для змінного струму;
- крутизна стік-затворної характеристики

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ZB}} \text{ при } U_{CS} = \text{const},$$

відображає вплив напруги затвора на вихідний струм транзистора;

- вхідний опір транзистора $r_{вх}$ визначається опором p - n -переходів, увімкнених у зворотному напрямку.

Вхідний опір польових транзисторів з p - n -переходом досить великий (досягає одиниць і десятків мегаом).

Польовий транзистор з ізолюваним затвором (МДН-транзистор) – це польовий транзистор, затвор якого відокремлений в електричному відношенні від каналу шаром діелектрика.

МДН-транзистори виконують двох типів – з вбудованим та з індукованим каналом.

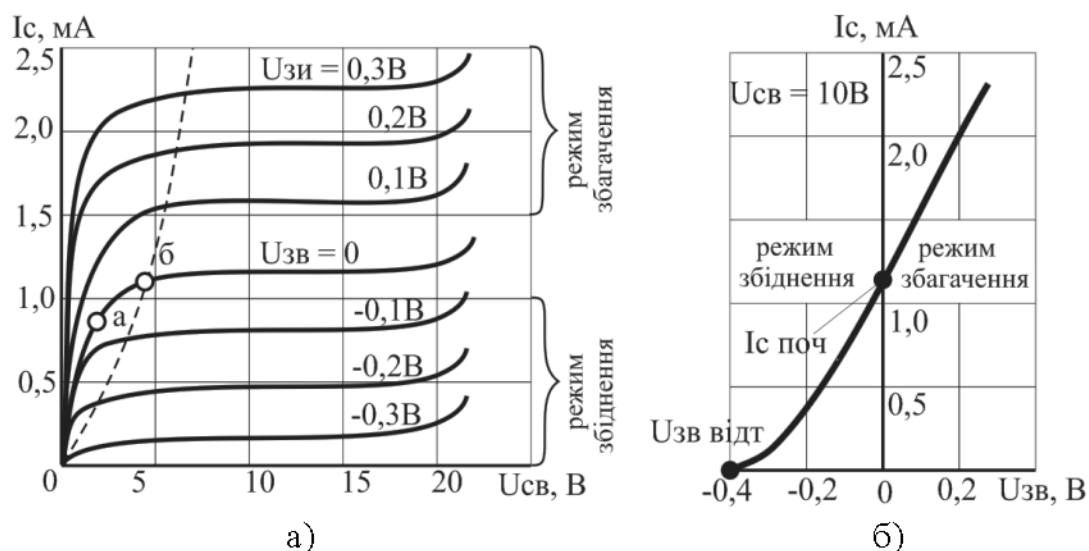


Рисунок 17 – Вольт-амперні характеристики МДН-транзистора з вбудованим каналом n -типу: а – стокові; б – стік-затворна

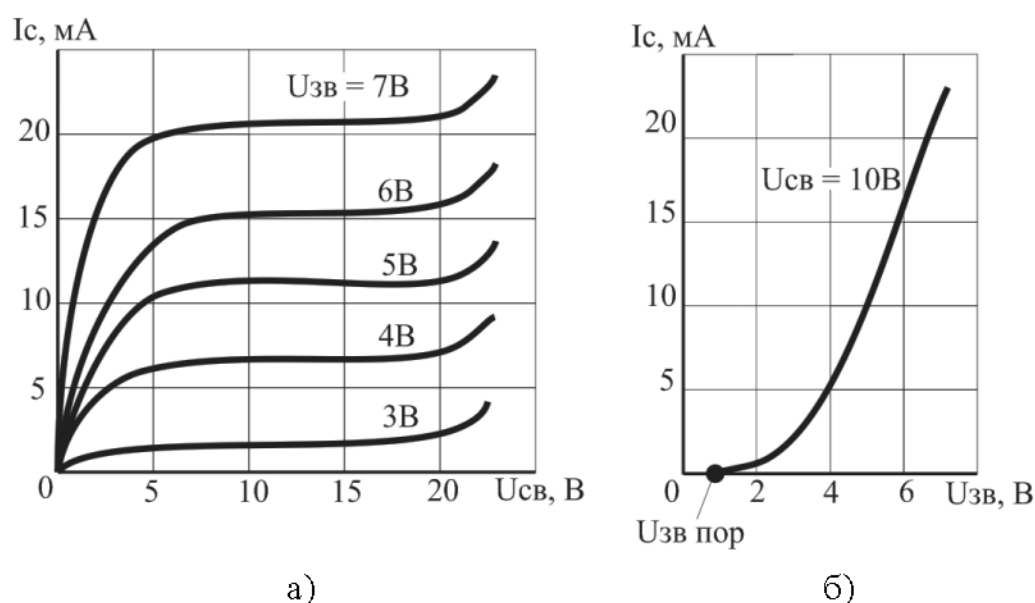


Рисунок 18 – Вольт-амперні характеристики МДН-транзистора з індукованим каналом n -типу: а – стокові; б – стік-затворна

Параметри МДН-транзисторів аналогічні параметрам польових транзисторів з керованим p - n -переходом. Що стосується вхідного опору то МДН-транзистори мають кращі показники, ніж транзистори з керованим p - n -переходом. Вхідний опір у них складає $r_{вх} = 10^{12} \dots 10^{14} \text{ Ом}$.

Польові транзистори застосовуються в підсилювальних каскадах з великим вхідним опором, ключових і логічних пристроях, при виготовленні інтегральних схем та ін.

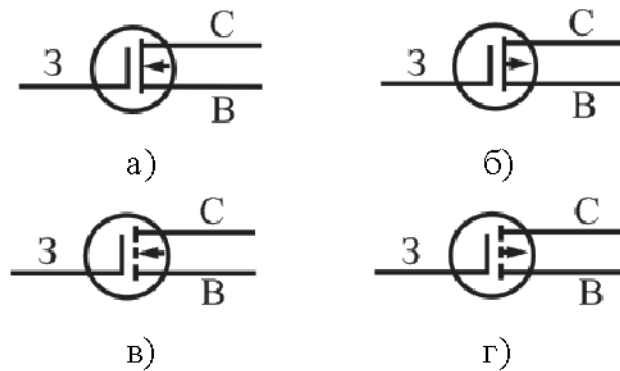


Рисунок 19 – Умовне позначення МДН – транзисторів:

- а) з вбудованим каналом n -типу; б) з вбудованим каналом p -типу;
в) з індукованим каналом n -типу; г) з індукованим каналом p -типу

1.3.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення і класифікацію польових транзисторів.
2. Привести конструкцію, умовне графічне позначення та описати принцип дії польового транзистора з керованим p - n -переходом.
3. Побудувати стік-затворну вольт-амперну характеристику польового транзистора з керованим p - n -переходом за заданим значенням крутизни характеристики S і струму стоку I_C поч. Варіанти завдань наведені в таблиці А.3 (додаток А).
4. Привести конструкцію, умовне графічне позначення та описати принцип дії польового транзистора з ізолюваним затвором індукованим каналом.
5. Побудувати стік-затворну вольт-амперну характеристику польового транзистора з ізолюваним затвором індукованим каналом за заданим значенням крутизни характеристики S і напруги $U_{зв}$ поч. Варіанти завдань наведені в таблиці А.3 (додаток А).
6. Привести конструкцію, умовне графічне позначення та описати принцип дії польового транзистора з ізолюваним затвором вбудованим каналом.
7. Привести стік-затворну вольт-амперну характеристику польового транзистора з ізолюваним затвором вбудованим каналом за заданим значенням крутизни характеристики S і струму стоку I_C поч. Варіанти завдань наведені в таблиці А.3 (додаток А).
8. Привести схеми найпростіших підсилювальних каскадів на польових транзисторах. Описати способи забезпечення режиму спокою.

1.3.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для зняття вольт-амперних характеристик польового транзистора з керованим *p-n*-переходом (рисунок 20).

2. Установити задані параметри елементів схеми.

3. Включити схему. Змінюючи напругу затвор-витік $U_{зв}$ (при фіксованих значеннях напруги стік-витік $U_{св} = \text{const}$) зняти стік-затворну вольт-амперну характеристику транзистора $I_c = f(U_{зв})$. Далі змінюючи напругу $U_{св}$ (при фіксованих значеннях напруги затвор-витік $U_{зв} = \text{const}$) зняти стокові вольт-амперні характеристики транзистора $I_c = f(U_{св})$. Результати вимірів струму стоку I_c занести в таблицю 4.

Примітка: величину напруги $U_{зв}$ змінювати за допомогою джерела живлення E1, величину напруги $U_{св}$ – за допомогою джерела живлення E2.

Таблиця 4 – Результати експериментальних досліджень польового транзистора з керованим *p-n*-переходом

Стік-затворні ВАХ			Стокові ВАХ			
$U_{зв}, \text{В}$	$I_c, \text{мА}$		$U_{св}, \text{В}$	$I_c, \text{мА}$		
	$U_{св} = 1\text{В}$	$U_{св} = 10\text{В}$		$U_{зв} = 0$	$U_{зв} = 1\text{В}$	$U_{зв} = 2\text{В}$
0			0,1			
0,5			0,2			
1,0			1,0			
1,5			10			
2,0			–			
2,5			–			

4. За даними таблиці 4 побудувати вольт-амперні характеристики польового транзистора з керованим *p-n*-переходом: $I_c = f(U_{зв})$ і $I_c = f(U_{св})$.

5. Набрати схему для зняття вольт-амперних характеристик польового МДН-транзистора з індукованим каналом (рисунок 21).

6. Установити задані параметри елементів схеми.

7. Включити схему. Змінюючи напругу затвор-витік $U_{зв}$ (при фіксованих значеннях напруги стік-витік $U_{св} = \text{const}$) зняти стік-затворну вольт-амперну характеристику транзистора $I_c = f(U_{зв})$ і, змінюючи напругу $U_{св}$ (при фіксованих значеннях напруги затвор-витік $U_{зв} = \text{const}$) зняти стокові вольт-амперні характеристики транзистора $I_c = f(U_{св})$. Результати вимірів струму стоку I_c занести в таблицю 5.

Таблиця 5 – Результати експериментальних досліджень польового МДН-транзистора з індукованим каналом

Стік-затворні ВАХ			Стокові ВАХ			
$U_{зв}, \text{В}$	$I_c, \text{мА}$		$U_{св}, \text{В}$	$I_c, \text{мА}$		
	$U_{св} = 1 \text{ В}$	$U_{св} = 10 \text{ В}$		$U_{зв} = 0$	$U_{зв} = 1 \text{ В}$	$U_{зв} = 2 \text{ В}$
1,0			0,1			
2,0			0,2			
5,0			1,0			
10			10			
15			–			

8. За даними таблиці 5 побудувати вольт-амперні характеристики польового транзистора з ізольованим затвором індукованим каналом: $I_c = f(U_{зв})$ і $I_c = f(U_{св})$.

9. Набрати схему найпростішого підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим *p-n*-переходом (рисунок 22).

10. Установити задані параметри елементів схеми: E_c і R_c (таблиця А.3, додаток А), $R_3 = 1 \text{ МОм}$.

11. Включити схему. Резистором R_b установити режим спокою ($U_{св} \approx E_c/2$). Записати показання приладів і величину опору резистора R_b .

12. Набрати схему найпростішого підсилювального каскаду на польовому транзисторі з ізольованим затвором індукованим каналом (рисунок 23).

13. Установити задані параметри елементів схеми: E_c і R_c (таблиця А.3, додаток А).

14. Включити схему. Резисторами R_{31} і R_{32} установити режим спокою ($U_{св} \approx E_c/2$). Записати показання приладів і величину опору резисторів R_{31} і R_{32} . Величини резисторів R_{31} і R_{32} вибирають у межах: десятки – сотні кОм.

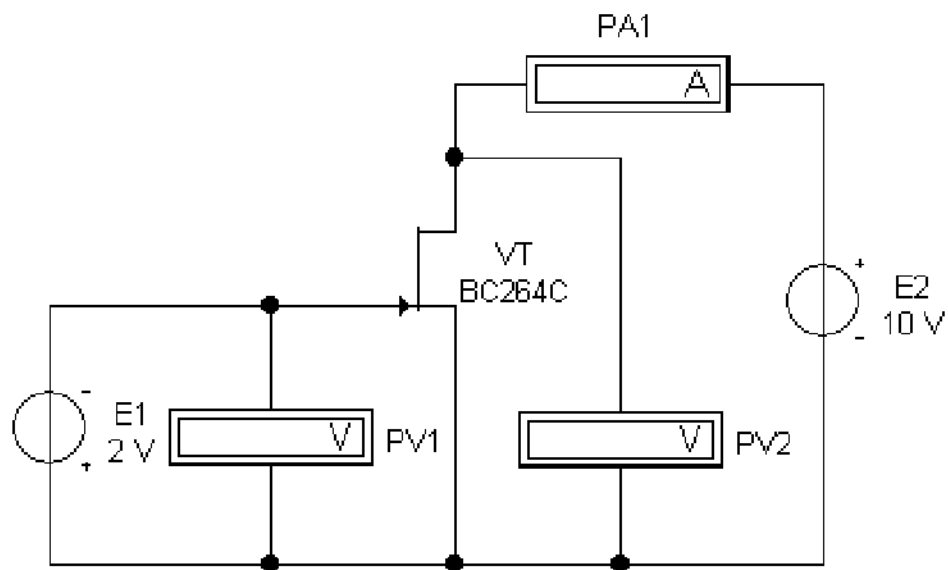


Рисунок 20 – Схема для зняття вольт-амперних характеристик
польового транзистора з керуванням p - n -переходом

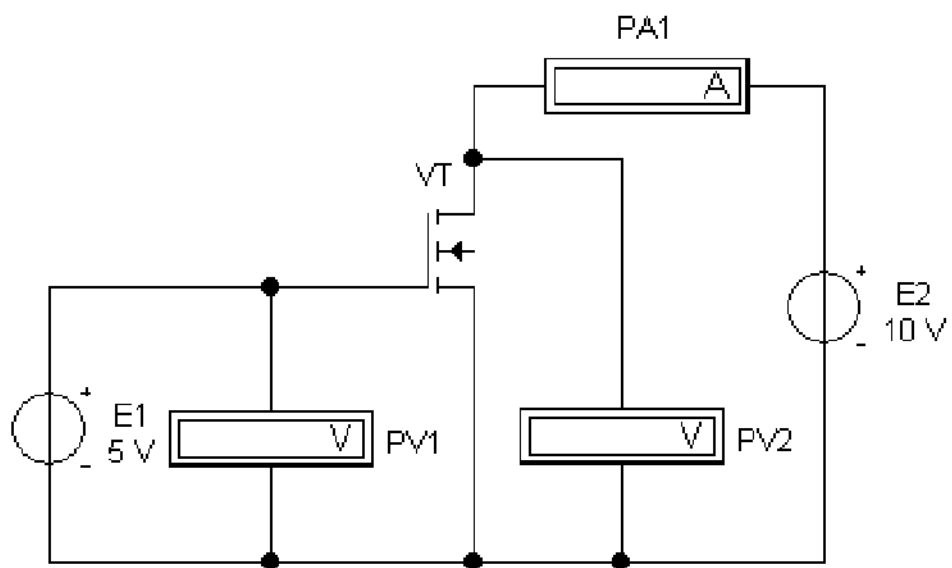


Рисунок 21 – Схема для зняття вольт-амперних характеристик
польового МДН-транзистора з індукованим каналом

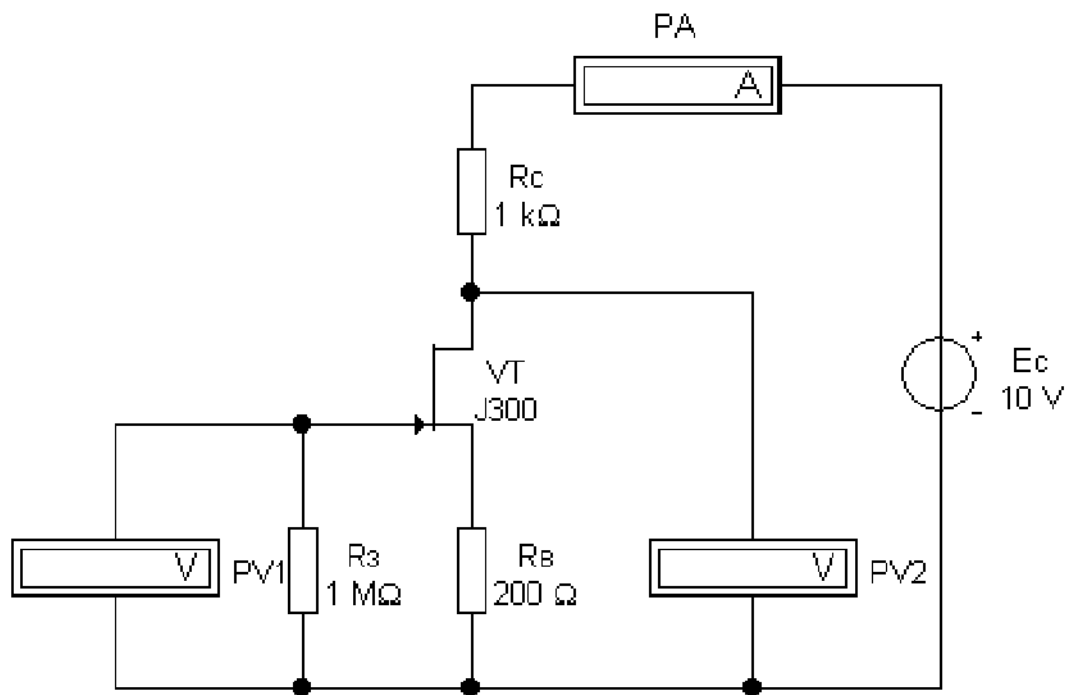


Рисунок 22 – Схема для дослідження підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим $p-n$ -переходом

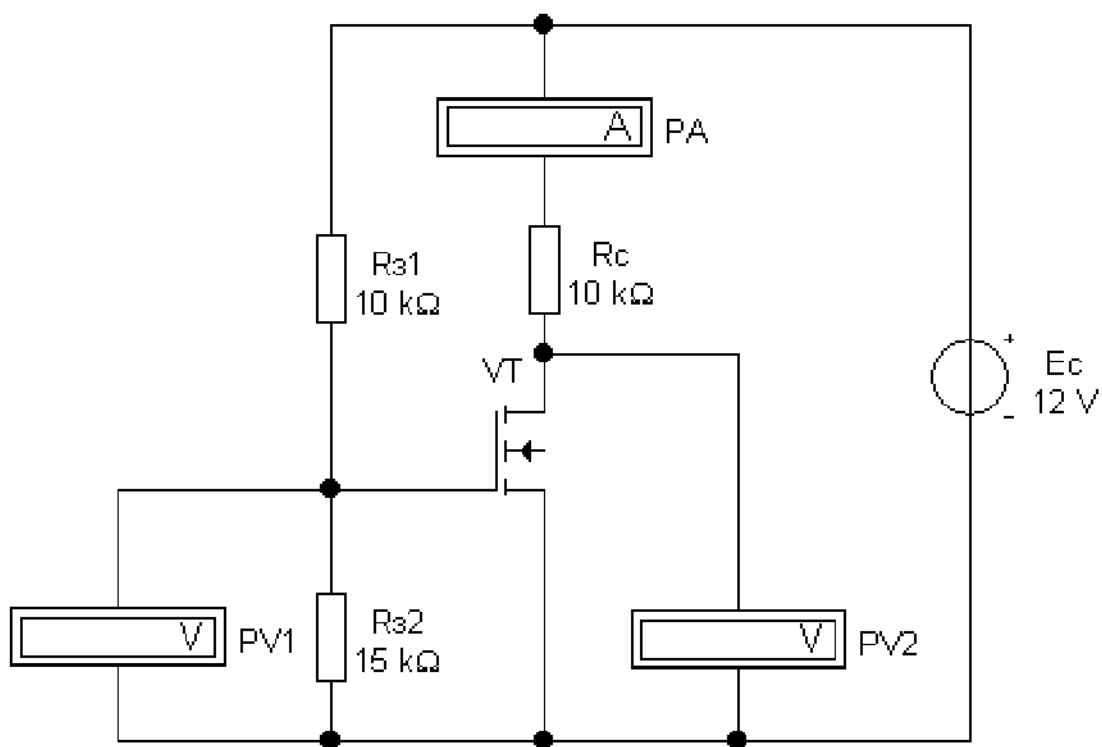


Рисунок 23 – Схема для дослідження підсилювального каскаду на польовому МДН-транзисторі з індукованим каналом

1.3.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз і порівняння теоретичних та експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Поясніть призначення польових транзисторів.
2. Назвіть основні типи польових транзисторів та наведіть їх умовне графічне позначення.
3. Наведіть конструкцію та поясніть принцип дії польового транзистора з керованим p - n -переходом.
4. Наведіть схему вмикання польового транзистора з керованим p - n -переходом із спільним витоком.
5. Наведіть вольт-амперні характеристики польового транзистора з керованим p - n -переходом.
6. Наведіть конструкцію та поясніть принцип дії польового транзистора з ізольованим затвором вбудованим каналом.
7. Наведіть вольт-амперні характеристики польового транзистора з ізольованим затвором вбудованим каналом.
8. Назвіть та поясніть режими роботи польового транзистора з ізольованим затвором вбудованим каналом.
9. Наведіть конструкцію та поясніть принцип дії польового транзистора з ізольованим затвором індукованим каналом.
10. Наведіть вольт-амперні характеристики польового транзистора з ізольованим затвором індукованим каналом.
11. Назвіть основні параметри польових транзисторів.
12. Наведіть схему найпростішого підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим p - n -переходом. Поясніть призначення елементів схеми та принцип роботи підсилювального каскаду.
13. Наведіть схему найпростішого підсилювального каскаду на польовому транзисторі з ізольованим затвором індукованим каналом. Поясніть призначення елементів схеми та принцип роботи підсилювального каскаду.

14. Поясніть методику побудови лінії навантаження підсилювального каскаду за постійним струмом та визначення параметрів режиму спокою.

15. Поясніть, як зміниться положення робочої точки і параметри режиму спокою підсилювального каскаду при зміні: величини опору резистора R_C ; напруги живлення E_C ; напруги $U_{зв}$; крутизни вольт-амперної характеристики транзистора S ?

1.4 ТИРИСТОРИ

Мета роботи: вивчення будови, принципу дії, вольт-амперних характеристик тиристорів. Дослідження електричних кіл з тиристорами.

1.4.1 Загальні теоретичні відомості

Тиристор – це електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з трьома або більше p - n -переходами, що має два стійких стани, і вольт-амперна характеристика якого має ділянку з від’ємним диференціальним опором.

Двоелектродний тиристор (диністор) – це тиристор, що має два зовнішніх виводи (анод і катод). Диністор являє собою напівпровідниковий прилад, що складається з чотирьох областей з провідностями p - і n -типу, які послідовно чергуються (рисунок 24). Крайні області p_1 і n_2 називаються емітерами, а середні p_2 і n_1 – базами.

Диністор має три p - n -переходи, причому два з них П1 і П3 (називають емітерними) зміщені у прямому напрямку, а середній перехід П2 (колекторний) – у зворотному напрямку. Крайню область p_1 називають анодом, а крайню область n_2 – катодом.

Диністор може перебувати у двох станах: вимкненому, або закритому, яке характеризується значним падінням напруги на диністорі та протіканням малих струмів через нього, тобто великим опором, і увімкненому, або відкритому, яке характеризується малим падінням напруги на диністорі та протіканням значних струмів через нього, тобто малим опором.

Для вимикання диністора необхідно зменшити прямий струм до значення $I_{А\text{ пр}} < I_{А\text{ утр}}$, (де $I_{А\text{ утр}}$ – струм утримання – мінімальний прямий струм, при якому диністор ще залишається в увімкненому стані) або подати на прилад напругу зворотної полярності.

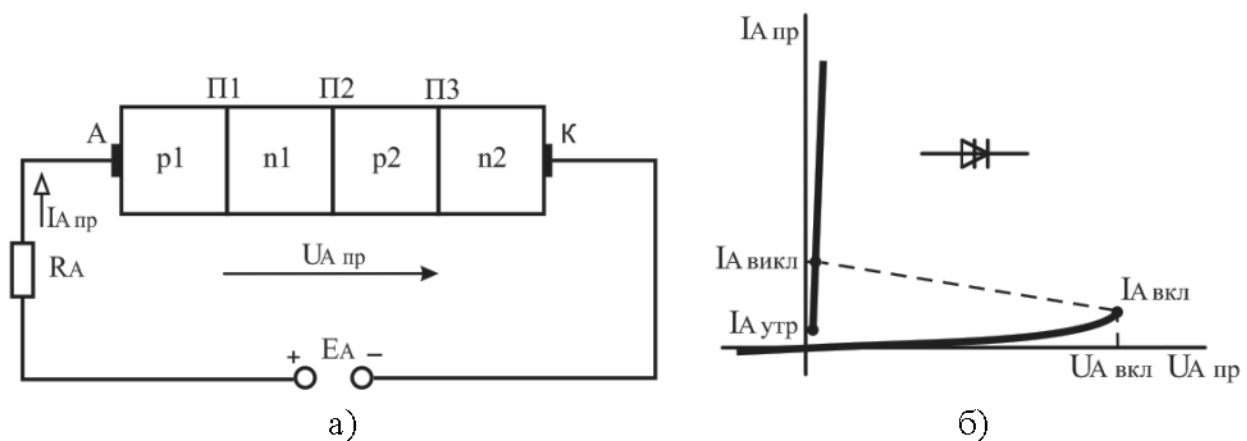


Рисунок 24 – Диністор: а – структура і схема увімкнення;
б – вольт-амперна характеристика та умовне графічне позначення

Триелектродний тиристор (триністор) – це керований напівпровідниковий прилад, що має три зовнішні виводи (анод, катод та керуючий електрод).

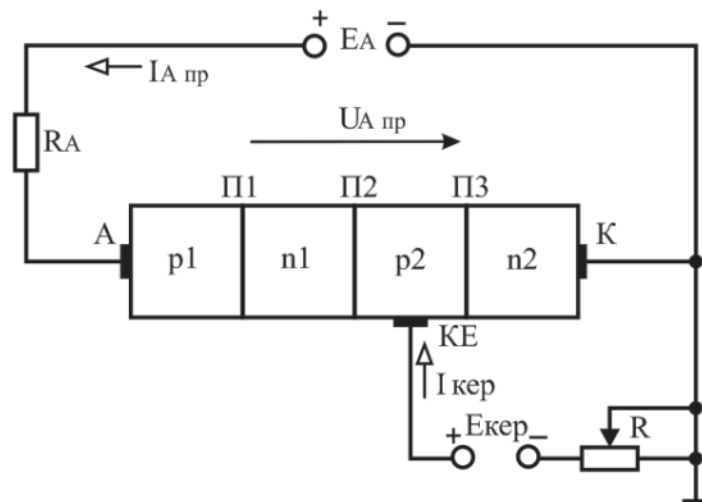
На відміну від диністора триністор має додатковий електрод – КЕ, який називають керуючим.

Від додаткового зовнішнього джерела E_K за рахунок струму керування $I_{кер}$ через керуючий електрод в базу p_2 вводиться додаткова кількість основних носіїв заряду – дірок (рисунок 25, а). Це дозволяє вмикати триністор при меншому значенні $U_{А\text{ вмик}}$, ніж диністор (рисунок 25, б). Подаючи через керуючий електрод пряму напругу на перехід ПЗ, що працює в прямому напрямку, можна регулювати значення напруги $U_{А\text{ вмик}}$. Чим більше струм, що протікає через керуючий електрод $I_{кер}$, тим нижче напруга $U_{А\text{ вмик}}$.

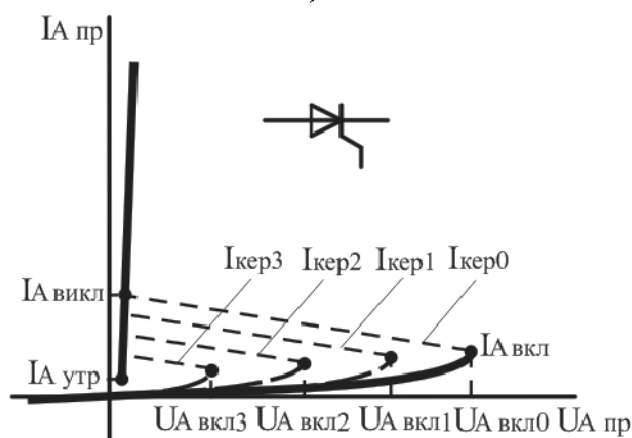
Умова вмикання тріодного тиристора $U_{А\text{ пр}} \geq U_{А\text{ вмик}}$ при $I_{кер} = \text{const}$, $I_{А\text{ пр}} \geq I_{А\text{ вим}}$, де $I_{А\text{ вим}}$ – струм вимикання – мінімальний прямий струм, що підтримує тиристор в увімкненому стані безпосередньо після його вмикання і зняття струму керування.

Для вимикання триністора необхідно зменшити прямий струм до значення $I_{А\text{ пр}} < I_{А\text{ утр}}$ (де $I_{А\text{ утр}}$ – струм утримання – мінімальний прямий струм увімкненого тиристора при розімкненому колі керування) або подати на прилад напругу зворотної полярності.

Симетричний тиристор (симістор) – це керований напівпровідниковий прилад, який має однакові ВАХ при різних полярностях прикладеної напруги і, який проводить струм в обох напрямках.



а)



б)

Рисунок 25 – Триністор: а – структура і схема увімкнення;
б – вольт-амперна характеристика та умовне графічне позначення

Основою симетричного тиристора є кремнієва монокристалічна структура, що складається з п'яти областей з електропровідностями p - і n -типу, які послідовно чергуються, і утворюють чотири p - n -переходи (рисунок 26, а).

Основні параметри тиристорів:

- напруга вмикання $U_{вкл}$ – це пряма напруга, при якій тиристор переходить із закритого у відкритий стан при розімкненому колі керуючого електроду;

- струм вмикання $I_{вкл}$ – це таке значення прямого струму через тиристор, вище за яке тиристор переходить у відкритий стан при розімкненому колі керуючого електроду;

- максимально допустимий струм у відкритому стані $I_{пр\ max}$ – максимальне значення струму у відкритому стані, при якому

забезпечується задана надійність тиристора;

- залишкова напруга $U_{\text{пр}}$ – значення напруги на тиристорі, що знаходиться у відкритому стані при проходженні через нього максимально допустимого струму;

- струм утримання $I_{\text{утр}}$ – мінімальний прямий струм увімкненого тиристора при розімкненому колі керування, нижче за який тиристор переходить у непровідний стан;

- час вмикання $t_{\text{вкл}}$;

- час вимикання $t_{\text{викл}}$.

Застосування тиристорів обумовлене в основному двома їх властивостями: 1 – наявністю ділянки від'ємного диференційного опору; 2 – наявністю двох стійких станів. Перша властивість дозволяє використовувати тиристори в підсилювальних і генераторних схемах, а друга – застосовувати їх в ключових і перемикаючих електронних пристроях різного призначення, в керованих випрямлячах.

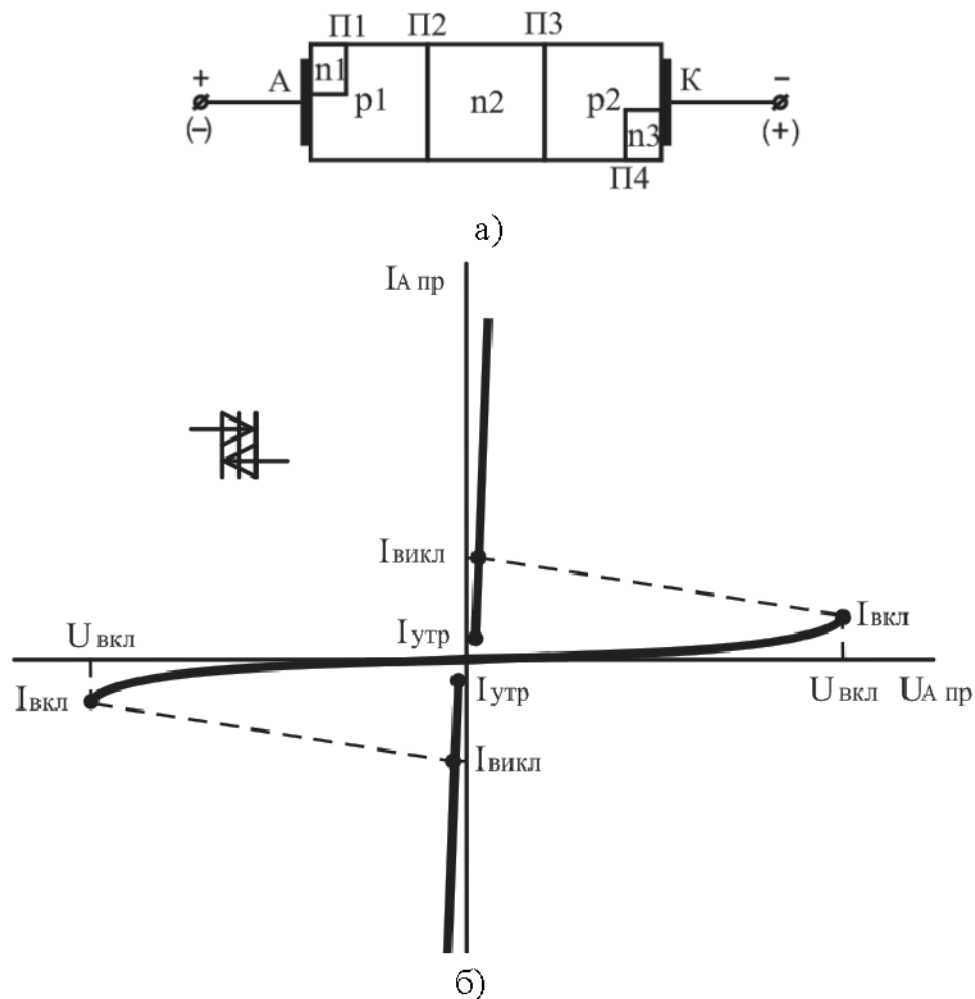


Рисунок 26 – Симістор: а – структура; б – вольт-амперна характеристика та умовне графічне позначення

1.4.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення та умовне графічне позначення тиристорів.
2. Привести конструкцію та описати принцип дії тріодного тиристора (триністора).
3. Привести вольт-амперну характеристику тріодного тиристора.
4. Скласти найпростішу схему однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча з використанням тріодного тиристора. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи. Привести графіки зміни в часі (часові діаграми) струму керування $I_{\text{КЕР}}$, напруги на тиристорі U_{VS} і навантаженні U_{R} при заданих значеннях напруги мережі $U_{\text{МЕР}}$ і кута керування тиристором α . Варіанти завдань наведені в таблиці А.4 (додаток А).

1.4.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для зняття вольт-амперних характеристик тріодного тиристора (рисунок 27).

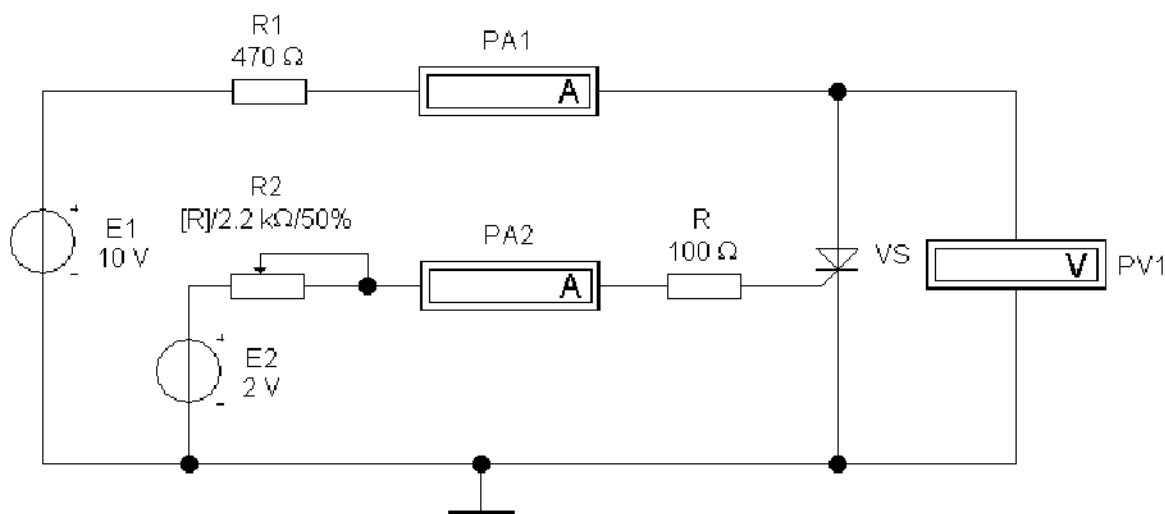


Рисунок 27 – Схема для зняття вольт-амперних характеристик тріодного тиристора

2. Установити задані параметри елементів схеми.
3. Включити схему. Змінюючи напругу джерела живлення E1 зняти вольт-амперну характеристику тріодного тиристора $I_{\text{A ПР}} = f(U_{\text{A ПР}})$ при струмах у керуючому електроді $I_{\text{КЕР}1} = 0,93 \text{ mA}$; $I_{\text{КЕР}2} = 0,97 \text{ mA}$; $I_{\text{КЕР}3} = 1,0 \text{ mA}$ та визначити напругу вмикання тиристора $U_{\text{А ВМИК}}$. Струм керування

$I_{\text{КЕР}}$ встановлюється за допомогою змінного резистора R2 (при натисканні клавіші <R> опір зменшується, при натисканні комбінацій клавіш <shift> – <R> опір збільшується). Результати вимірів занести в таблицю 6.

Таблиця 6 – Результати експериментальних досліджень тріодного тиристора

$I_{\text{КЕР}1} = \quad \text{мА}, U_{\text{АВМІК}1} = \quad \text{В}$							
$E1, \text{В}$							
$U_{\text{АПР}}, \text{В}$							
$I_{\text{АПР}}, \text{мА}$							

4. За даними таблиці 6 побудувати вольт-амперну характеристику тріодного тиристора $I_{\text{АПР}} = f(U_{\text{АПР}})$ при значеннях струму у керуючому електроді: $I_{\text{КЕР}1}$; $I_{\text{КЕР}2}$; $I_{\text{КЕР}3}$.

5. Набрати схему для дослідження однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча з використанням тріодного тиристора (рисунок 28).

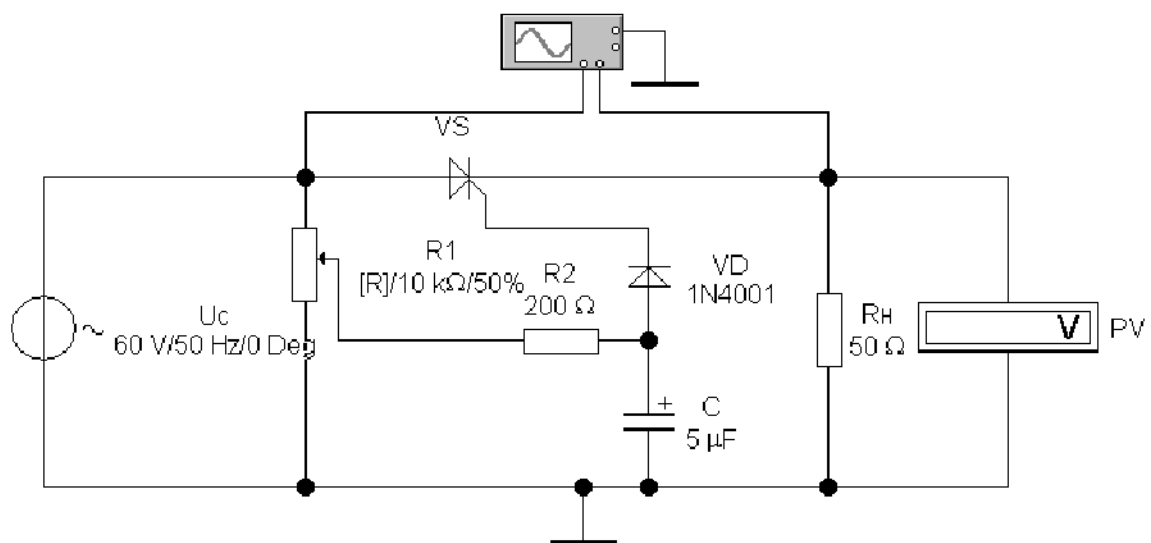


Рисунок 28 – Схема для дослідження однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча

6. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця А.4, додаток А).

7. Лінію, що з'єднує вхід “В” віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

8. Включити схему. Змінюючи опір резистора R1 фазообертача (виконаний на елементах R1, R2, C) через рівні проміжки, простежити за зміною величини випрямленої напруги U_d (вольтметр PV) залежно від

величини кута керування тиристором α (визначається по осцилографу).

9. Привести осцилограми напруги на навантаженні U_d при різних значеннях кута керування тиристором α (див. рисунок 29).

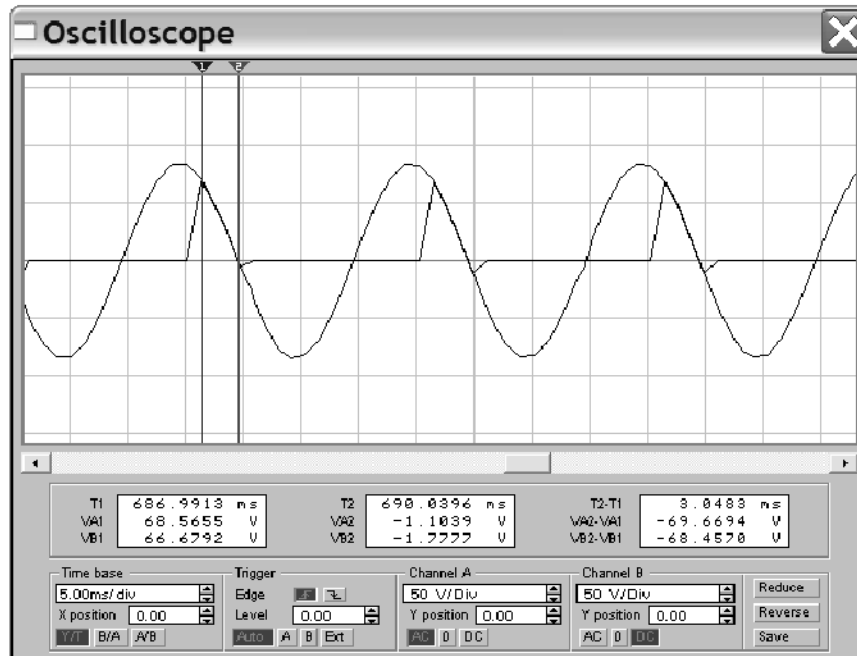


Рисунок 29 – Осцилограми напруг однофазного однапівперіодного керованого випрямляча

1.4.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз теоретичних і експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Поясніть призначення перемикаючих приладів.
2. Наведіть конструкцію та поясніть принцип дії диністора.
3. Наведіть умовне графічне позначення та вольт-амперну характеристику диністора. Поясніть, що таке зона від'ємного опору вольт-амперної характеристики?
4. Наведіть конструкцію та поясніть принцип дії триністора.

5. Наведіть вольт-амперну характеристику та умовне графічне позначення триністора.
6. Наведіть конструкцію та поясніть принцип дії симістора.
7. Наведіть вольт-амперну характеристику та умовне графічне позначення симістора.
8. Назвіть основні параметри тиристорів.
9. Поясніть, які умови необхідно виконати для вмикання та вимикання тиристорів.
10. Наведіть найпростішу схему однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча з використанням триністора. Поясніть за допомогою часових діаграм принцип її роботи.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

2.1 ПІДСИЛЮВАЧІ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

Мета роботи: вивчення принципу роботи і методів розрахунку підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах. Дослідження підсилювачів на біполярних транзисторах, увімкнених за схемою із спільним емітером.

2.1.1 Загальні теоретичні відомості

Підсилювачем називають пристрій, який призначений для збільшення параметрів електричного сигналу (напруги, струму, потужності).

Основні параметри підсилювачів:

- коефіцієнт підсилення за напругою

$$K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}};$$

- коефіцієнт підсилення за струмом

$$K_I = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}};$$

- коефіцієнт підсилення за потужністю

$$K_P = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} = K_U \cdot K_I;$$

- робочий діапазон частот Δf_r ;

- вхідний опір $R_{\text{вх}}$ – опір між вхідними затискачами підсилювача для змінного вхідного струму;

- вихідний опір $R_{\text{вих}}$ – опір між вихідними затискачами підсилювача для змінного струму при відключеному опорі навантаження;

- коефіцієнт корисної дії підсилювача η – відношення потужності, що віддається підсилювачем в навантаження, до потужності, що споживається

від джерела живлення;

- динамічний діапазон D – відношення максимальної вхідної напруги до мінімальної вхідної напруги, при яких нелінійні викривлення не перевищують встановлених норм:

- лінійні викривлення;
- нелінійні викривлення.

Всі підсилювачі можна поділити на два класи – з лінійним і нелінійним режимом роботи.

У підсилювачах з лінійним режимом роботи вихідний сигнал повинен бути близьким за формою до вхідного. Викривлення форми сигналу, що вносяться підсилювачем, повинні бути мінімальними. Залежно від виду амплітудно-частотної характеристики підсилювачі з лінійним режимом роботи поділяють на:

- підсилювачі сигналу, що повільно змінюється (підсилювачі постійного струму (ППС));
- підсилювачі звукових частот (ПЗЧ);
- підсилювачі високої частоти (ПВЧ);
- широкосмугові підсилювачі (ШСП);
- вузькосмугові підсилювачі (ВСП).

Основними елементами схеми (рисунок 30) є джерело живлення E_K , керуючий елемент – транзистор VT і резистор R_K . Ці елементи утворюють головне коло підсилювального каскаду, в якому за рахунок протікання керованого по колу бази колекторного струму створюється підсилена змінна напруга на виході схеми. Решта елементів виконує допоміжну роль. Конденсатори C_{P1} , C_{P2} є роздільними. Функція конденсаторів C_{P1} , C_{P2} зводиться до пропускання змінної складової напруги і затримання постійної складової.

Резистори $R1$, $R2$ використовуються для задання режиму спокою каскаду. Оскільки біполярний транзистор керується струмом, то струм спокою (в даному випадку струм I_{KC}) створюється заданням відповідної величини струму бази спокою I_{BC} . Резистор $R1$ призначений для створення кола протікання струму I_{BC} . Спільно з $R2$ резистор $R1$ забезпечує початкову напругу на базі U_{BC} відносно затискача « $+E_K$ » джерела живлення.

При забезпеченні режиму роботи транзистора необхідно здійснити температурну стабілізацію положення робочої точки (зменшити вплив температури на початкове положення робочої точки). З цією метою в

емітерне коло введений резистор R_E , на якому створюється напруга від'ємного зворотного зв'язку ВЗЗ за постійним струмом U_{RE} . Для усунення ВЗЗ за змінним струмом за наявності вхідного змінного сигналу резистор шунтують конденсатором C_E .

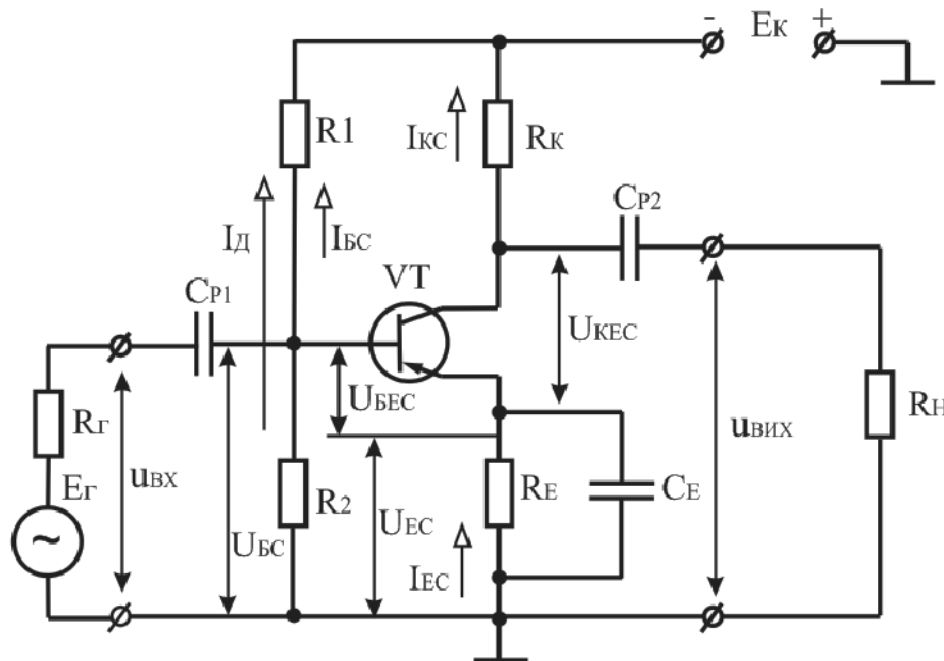


Рисунок 30 – Схема підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою з спільним емітером

Принцип дії каскаду з полягає в наступному. При підключенні до входу підсилювача джерела синусоїдальної напруги e_{Γ} на базі транзистора з'являється синусоїдальна напруга u_{BX} , яка змінює початкову напругу $U_{БЕС}$. Під впливом напруги u_{BX} в колі бази з'являється змінна складова струму $i_{Б\sim}$, яка викликає появу змінної складової струму в колі колектора $i_{К\sim} = \beta \cdot i_{Б\sim}$. За рахунок падіння напруги на резисторі R_K створюється змінна складова напруги на колекторі, яка через конденсатор C_{P2} передається на вихід каскаду – в коло навантаження R_H . Для змінного струму резистори R_K і R_H увімкнені паралельно.

Аналіз каскаду за постійним струмом проводять графоаналітичним методом. Графічні побудови проводяться за допомогою вихідних (колекторних) характеристик транзистора (рисунок 31). На вихідних характеристиках проводять лінію навантаження каскаду за постійним струмом (АБ). Аналітично залежність $U_{КЕС} = f(I_{КС})$ знаходять з рівняння, що характеризує баланс напруги у вихідному колі каскаду

$$E_K = U_{KEC} + I_{KC} R_K + I_{EC} R_E \approx U_{KEC} + I_{KC} (R_K + R_E), \quad (8)$$

звідки

$$U_{KEC} = E_K - I_{KC} (R_K + R_E). \quad (9)$$

Побудову лінії навантаження каскаду за постійним струмом проводять по двох точках, що характеризують режим холостого ходу (точка Б) і короткого замикання (точка А) вихідного кола каскаду. Для точки Б: $I_{KC} = 0$, $U_{KEC} = E_K$; для точки А: $U_{KEC} = 0$, $I_{KC} = E_K / (R_K + R_E)$. Вибравши по вхідній (базовій) характеристиці $I_B = f(U_{BE})$ необхідне значення струму бази спокою I_{BS} , визначаємо координати точки П перетину відповідної вихідної характеристики при $I_B = I_{BS}$ з лінією навантаження каскаду за постійним струмом (рисунок 31).

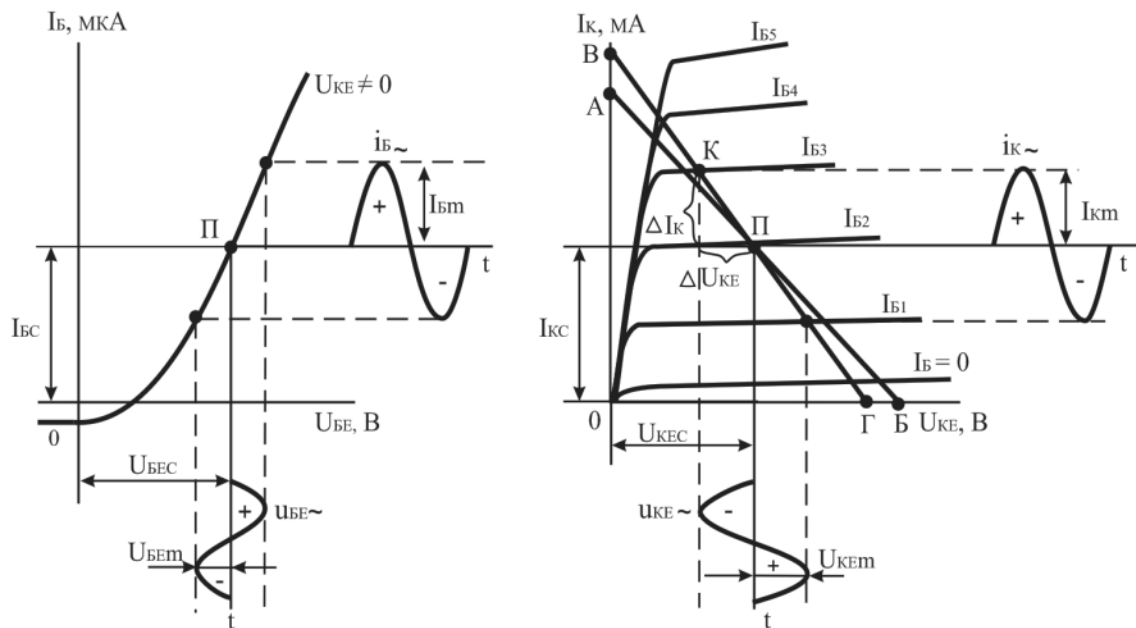


Рисунок 31 – Розрахунок підсилювального каскаду на біполярному транзисторі графоаналітичним методом

Початкове положення робочої точки забезпечується ділником напруги, що складається з резисторів R_1 і R_2 , значення яких визначаються співвідношеннями:

$$R_1 = \frac{E_K - U_{BEс} - U_{EC}}{I_D + I_{BS}} = \frac{E_K - U_{BS}}{I_D + I_{BS}}; \quad (10)$$

$$R_2 = \frac{U_{БЕС} + U_{ЕС}}{I_D} = \frac{U_{ЕС}}{I_D}, \quad (11)$$

де $I_D = (2 \dots 5)I_{БС}$ – струм в колі дільника;

$$U_{ЕС} = (0,1 \dots 0,25)E_K.$$

При визначенні змінних складових вихідної напруги каскаду і колекторного струму транзистора використовують лінію навантаження каскаду за змінним струмом. Опір каскаду за змінним струмом визначається опорами резисторів R_K і R_H , які увімкнені паралельно, тобто

$$R_{H\approx} = R_K \parallel R_H = \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H}. \quad (12)$$

Опір навантаження каскаду за постійним струмом більший $R_{H-} = R_K + R_E$ ніж за змінним струмом $R_{H\approx} = R_K \parallel R_H$.

Оскільки за наявності вхідного сигналу напруга і струм транзистора являють собою суми постійних і змінних складових, лінія навантаження за змінним струмом проходить через точку спокою П (рисунок 31). Нахил лінії навантаження за змінним струмом (ВГ) буде більший, ніж за постійним струмом. Лінію навантаження за змінним струмом будують за відношенням припущення напруги до струму:

$$\Delta I_K = \frac{\Delta U_{KE}}{R_{H\approx}}. \quad (13)$$

Задану величину ΔU_{KE} відкладають ліворуч від точки спокою П (рисунок 31), визначене значення ΔI_K відкладають вгору від струму $I_{КС}$ (точка К). З'єднавши точки К і П прямою отримують лінію навантаження ВГ за змінним струмом.

Під час подачі на вхід каскаду напруги $u_{вх}$ в базовому колі транзистора створюється змінна складова струму $i_{Б-}$, яка пов'язана з напругою $u_{вх}$ вхідною характеристикою транзистора. Оскільки струм колектора через коефіцієнт β пропорційно залежить від струму бази, в колекторному колі транзистора створюється змінна складова струму $i_{К-}$ і змінна вихідна напруга $u_{вих}$, яка пов'язана із струмом $i_{К-}$ лінією

навантаження за змінним струмом. Робоча точка переміщується вниз від точки спокою П при позитивній півхвилі вхідної напруги і вгору – при негативній півхвилі.

2.1.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення, класифікацію та основні параметри підсилювачів на біполярних транзисторах.

2. Привести схему підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою із спільним емітером (режим підсилення класу А). Описати призначення елементів схеми.

3. Виконати розрахунок підсилювального каскаду графоаналітичним методом:

- побудувати вхідну $I_B = f(U_{BE})$ і вихідну $I_K = f(U_{KE})$ вольт-амперні характеристики біполярного транзистора, увімкненого за схемою із спільним емітером;

- побудувати лінію навантаження підсилювального каскаду за постійним струмом;

- визначити параметри режиму спокою: U_{KEC} , I_{KC} , U_{BEC} , I_{BC} ;

- визначити величину опору резистора R_B , що забезпечує режим спокою каскаду;

- побудувати лінію навантаження підсилювального каскаду за змінним струмом;

- побудувати графіки зміни струмів бази I_B і колектора I_K , напруг колектор-емітер U_{KE} і база-емітер U_{BE} при синусоїдальній вхідній напрузі (величина амплітуди вхідної напруги не повинна виходити за межі лінійної частини вхідної вольт-амперної характеристики транзистора).

Вихідні дані: координати точок лінійної частини вхідної вольт-амперної характеристики біполярного транзистора $I_B = f(U_{BE})$; значення коефіцієнта підсилення транзистора β , напруги джерела живлення E_K , опору резистора в колі колектора R_K наведені в таблиці А.2 до лабораторної роботи № 2. Варіанти значень опору навантаження R_H наведені в таблиці А.5 (додаток А).

4. Визначити коефіцієнти підсилення каскаду за напругою K_U , струмом K_I і потужністю K_P .

2.1.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для дослідження підсилювального каскаду на біполярному транзисторі (рисунок 32).
2. Установити задані параметри елементів схеми і віртуального генератора.
3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.
4. Включити схему. Перемикачем S відключити генератор від входу підсилювача. Резистором R_B установити параметри режиму спокою, значення яких визначені в п. 2.1.2. Записати показання приладів.
5. Перемикачем S підключити генератор до входу підсилювача. Записати показання приладів. За допомогою візирних ліній осцилографа визначити амплітуди напруг на вході $U_{m\text{ вх}}$ та виході $U_{m\text{ вих}}$ підсилювального каскаду. Привести осцилограми напруг (див. рисунок 33).
6. За експериментальними даними визначити коефіцієнти підсилення каскаду за напругою K_U , струмом K_I і потужністю K_P .
7. Збільшити вхідну напругу до $U_{\text{вх}} = 0,1\text{В}$. Привести осцилограми напруг (див. рисунок 34). Пояснити причину викривлення вихідної напруги підсилювального каскаду.

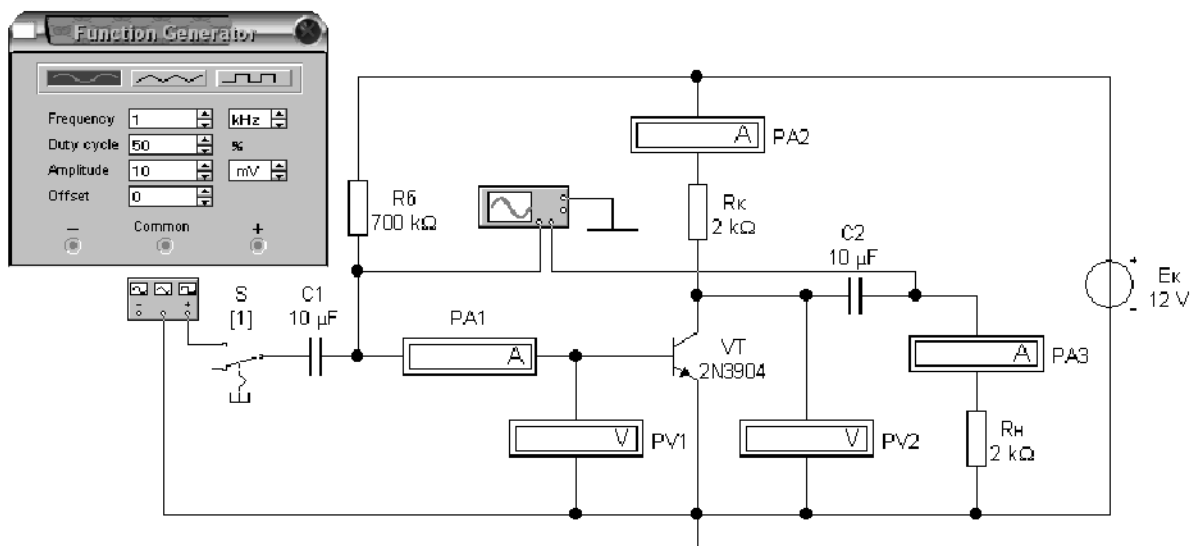


Рисунок 32 – Схема для дослідження підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою з спільним емітером

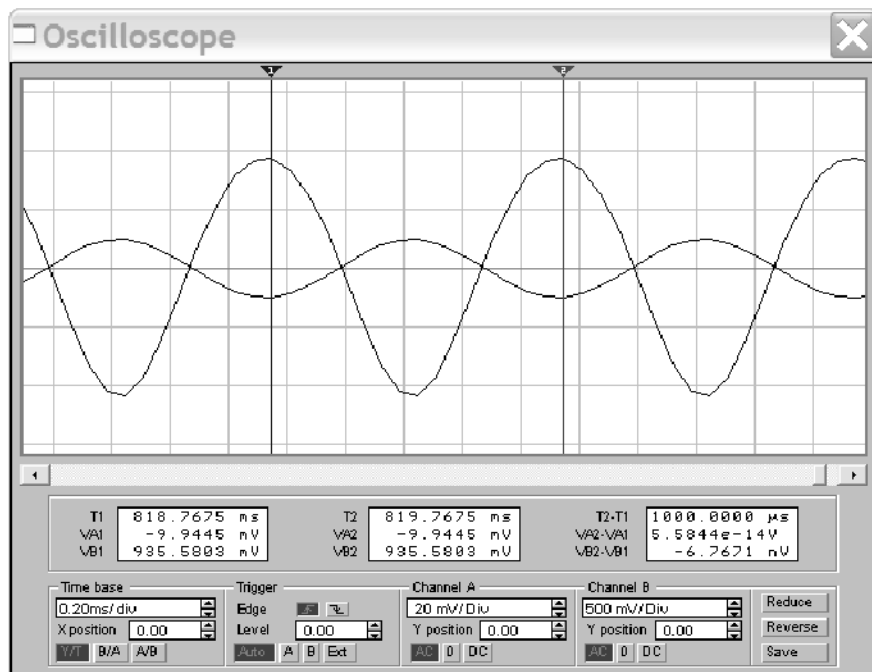


Рисунок 33 – Осцилограми напруг підсилювального каскаду на біполярному транзисторі при $U_{BX} = 10$ мВ

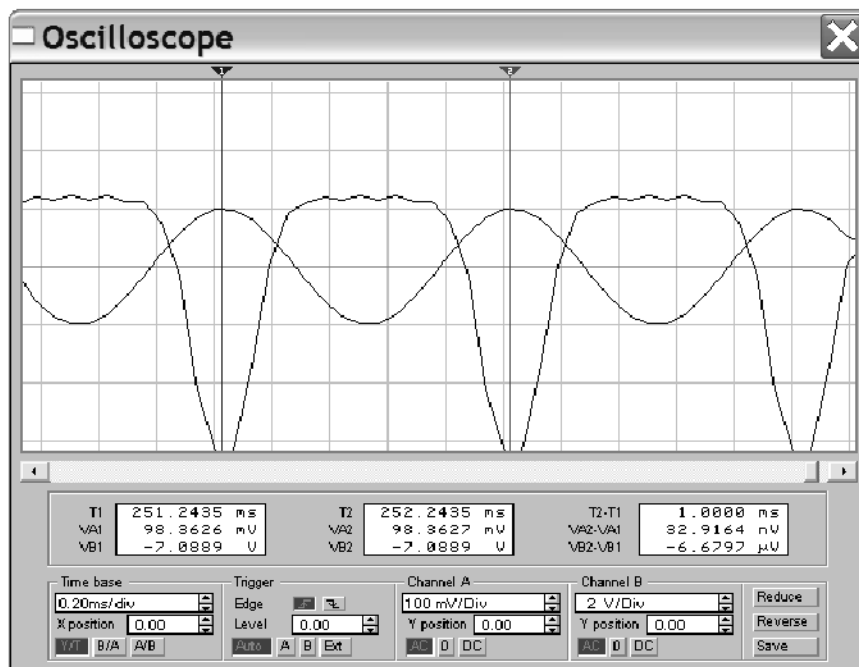


Рисунок 34 – Осцилограми напруг підсилювального каскаду на біполярному транзисторі при $U_{BX} = 100$ мВ

2.1.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз теоретичних і експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Поясніть призначення підсилювачів.
2. Наведіть класифікацію підсилювачів.
3. Назвіть основні параметри підсилювачів.
4. Назвіть режими роботи підсилювальних каскадів та поясніть чим вони забезпечуються.
5. Наведіть визначення режиму спокою підсилювального каскаду.
6. Наведіть схеми задання режиму спокою підсилювального каскаду і поясніть принцип їх дії.
7. Поясніть, чому виникає потреба в температурній стабілізації підсилювального каскаду і як вона забезпечується?
8. Поясніть при якому способі увімкнення біполярного транзистора можна забезпечити найбільше підсилення потужності в підсилювальному каскаді?
9. Наведіть схему підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою з спільним емітером. Поясніть призначення елементів схеми та принцип роботи підсилювального каскаду.
10. Поясніть методику побудови лінії навантаження каскаду за постійним струмом та визначення параметрів режиму спокою.
11. Поясніть методику побудови лінії навантаження каскаду за змінним струмом та визначення коефіцієнтів підсилення каскаду за напругою K_U , струмом K_I і потужністю K_P .
12. Поясніть, як зміниться положення робочої точки і параметри режиму спокою підсилювального каскаду при зміні: величини опору резистора R_K ; напруги живлення E_K ; коефіцієнта підсилення β ; струму бази I_B ?

2.2 ПІДСИЛЮВАЧІ НА ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРАХ

Мета роботи: вивчення принципу роботи і методів розрахунку підсилювальних каскадів на польових транзисторах. Дослідження підсилювачів на польових транзисторах, увімкнених за схемою з спільним витоком.

2.2.1 Загальні теоретичні відомості

Основними елементами каскаду (рисунок 35) є джерело живлення E_C , транзистор VT і резистор R_C .

Навантаження підключене через розділюючий конденсатор C_{P2} до стоку транзистора. Решта елементів каскаду виконує допоміжну роль. Резистори R_3 , R_B призначені для задання напруги $U_{ЗВС}$ в режимі спокою. Резистор R_B виконує функцію формування напруги автоматичного зміщення, що подається на затвор, а також створює в каскаді від'ємний зворотний зв'язок за постійним струмом, який призначений для стабілізації режиму спокою при зміні температури. Конденсатор C_B призначений для виключення ВЗЗ за змінним струмом. Розділюючий конденсатор C_{P1} забезпечує зв'язок каскаду з джерелом вхідного сигналу.

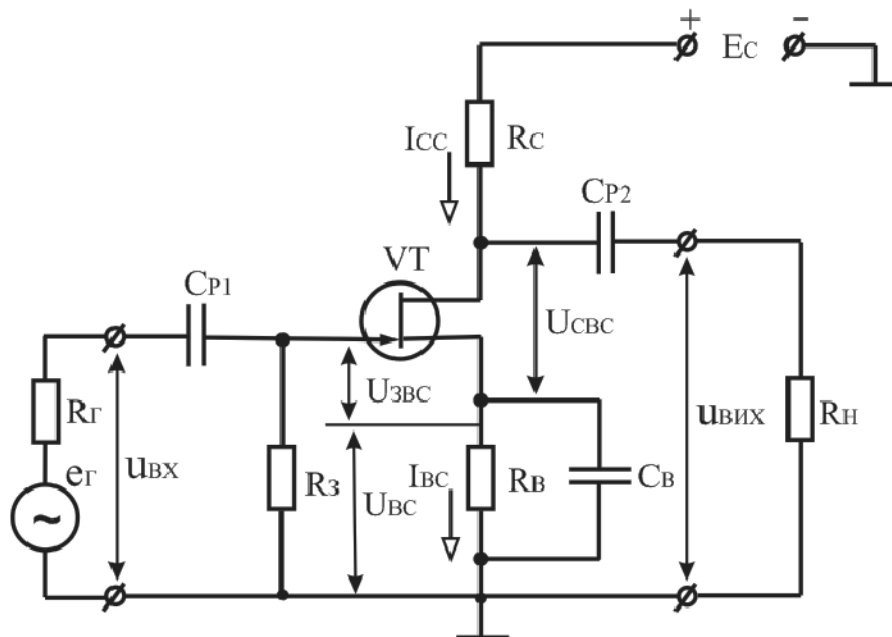


Рисунок 35 – Схема підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керуючим p - n -переходом з спільним витоком

Аналіз роботи підсилювального каскаду на польовому транзисторі проводимо використовуючи графоаналітичний метод. Рівняння електричної рівноваги для кола стік-витік в режимі спокою має вигляд

$$E_C = U_{CVC} + I_{CC}(R_C + R_B), \quad (14)$$

звідки

$$U_{CVC} = E_C - I_{CC}(R_C + R_B). \quad (15)$$

Струм стоку спокою I_{CC} і напруга стік-витік спокою U_{CVC} визначаються напругою затвор-витік транзистора $U_{ЗВС}$, що відповідає точці спокою. Точка спокою П розміщується на лінії навантаження за постійним струмом, яка проходить через точки А і Б (рисунок 36). Для точки А: $I_C = 0$, $U_{CV} = E_C$; для точки Б: $U_{CV} = 0$; $I_C = E_C / (R_C + R_B)$. Лінія навантаження за змінним струмом (пряма ВГ) визначається опором

$$R_{H\sim} = R_C \parallel R_B = \frac{R_C \cdot R_B}{R_C + R_B}. \quad (16)$$

Елементами, які призначені для створення напруги $U_{ЗВС}$ в режимі спокою, є резистори R_B і R_3 . Необхідні величини і полярність напруги отримують на резисторі R_B в результаті протікання через нього струму $I_{VC} = I_{CC}$. У зв'язку з цим вибір резистора R_B проводять за співвідношенням

$$R_B = \frac{U_{ЗВС}}{I_{CC}}. \quad (17)$$

Резистор R_3 призначений для забезпечення потенціалу затвора рівним потенціалу нижнього виводу резистора R_B , тобто для подачі напруги $U_{ЗВС}$ з резистора R_B між затвором і витоком транзистора. Значення R_3 приймають 1 ... 2 МОм.

Під час подачі на вхід підсилювального каскаду змінної напруги $u_{вх}$ з'явиться змінна складова струму стоку i_c (рисунк 36). Зміна цього струму призводить до зміни напруги U_{CB} між стоком та витоком. Його змінна складова u_c , яка дорівнює за величиною та протилежна за фазою падінню напруги на резисторі R_C , є вихідною напругою підсилювального каскаду.

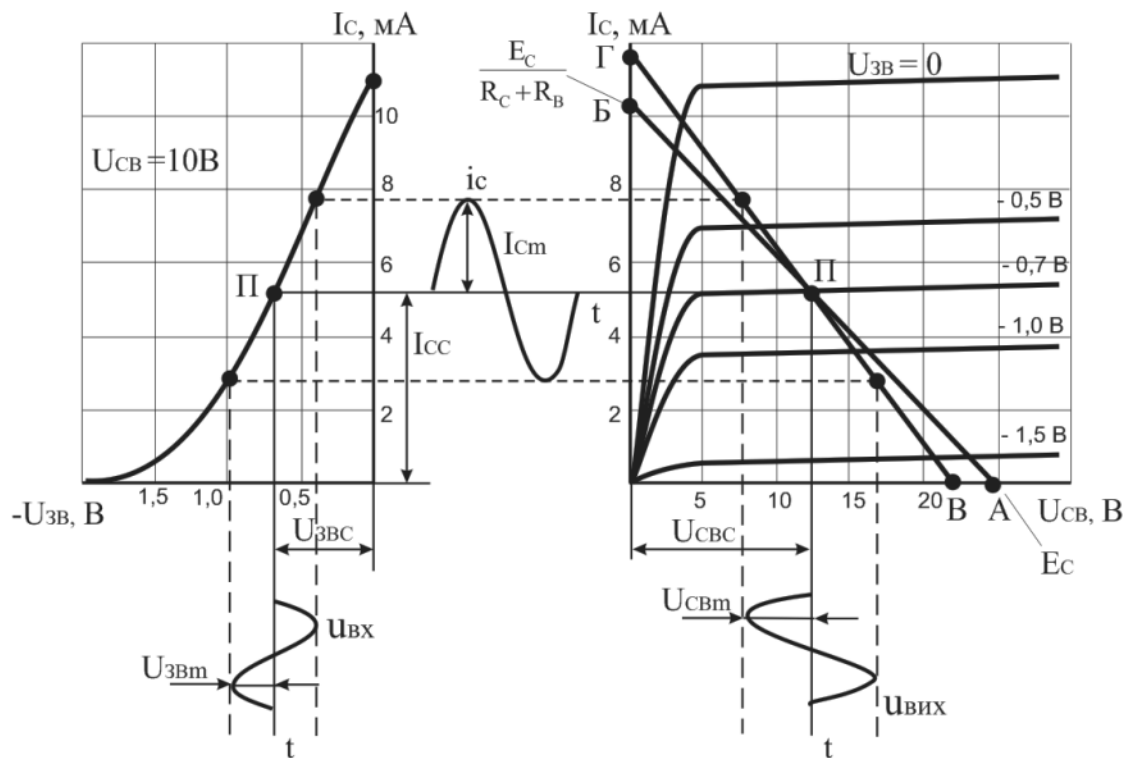


Рисунок 36 – Графоаналітичний розрахунок підсилювального каскаду на польовому транзисторі за допомогою статичних характеристик

2.2.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення, класифікацію та основні параметри підсилювачів на польових транзисторах.

2. Привести схему підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим $p-n$ -переходом, увімкненого за схемою із спільним витоком. Описати призначення елементів схеми.

3. Виконати розрахунок підсилювального каскаду, що працює в режимі підсилення класу А, на польовому транзисторі з керованим $p-n$ -переходом графоаналітичним методом:

- побудувати стік-затворну $I_C = f(U_{ЗВ})$ і стокові $I_C = f(U_{CB})$ вольт-амперні характеристики польового транзистора з керованим

p-n-переходом;

- побудувати лінію навантаження підсилювального каскаду за постійним струмом;

- визначити параметри режиму спокою: $U_{звс}$, I_{cc} , $U_{свс}$;

- визначити величину опору резистора R_B , що забезпечує режим спокою каскаду;

- побудувати лінію навантаження підсилювального каскаду за змінним струмом;

- побудувати графіки зміни струму стоку I_C , напруг затвор-витік $U_{зв}$ і стік-витік $U_{св}$ при синусоїдальній входній напрузі.

Вихідні дані: варіанти завдань наведені в таблиці А.3.

2.2.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для дослідження підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим *p-n*-переходом (рисунок 37).

2. Установити задані параметри елементів схеми і віртуального генератора.

3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

4. Включити схему. Перемикачем S відключити генератор від входу підсилювача. Резистором R_B установити параметри режиму спокою, значення яких визначені в п. 2.2.2. Записати показання приладів.

5. Перемикачем S підключити генератор до входу підсилювача. Записати показання приладів. За допомогою візорних ліній осцилографа визначити амплітуди напруг на вході і виході підсилювального каскаду. Привести осцилограми напруг (див. рисунок 38).

6. За експериментальними даними визначити коефіцієнт підсилення каскаду за напругою K_U .

2.2.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки. Аналіз теоретичних і експериментальних результатів.

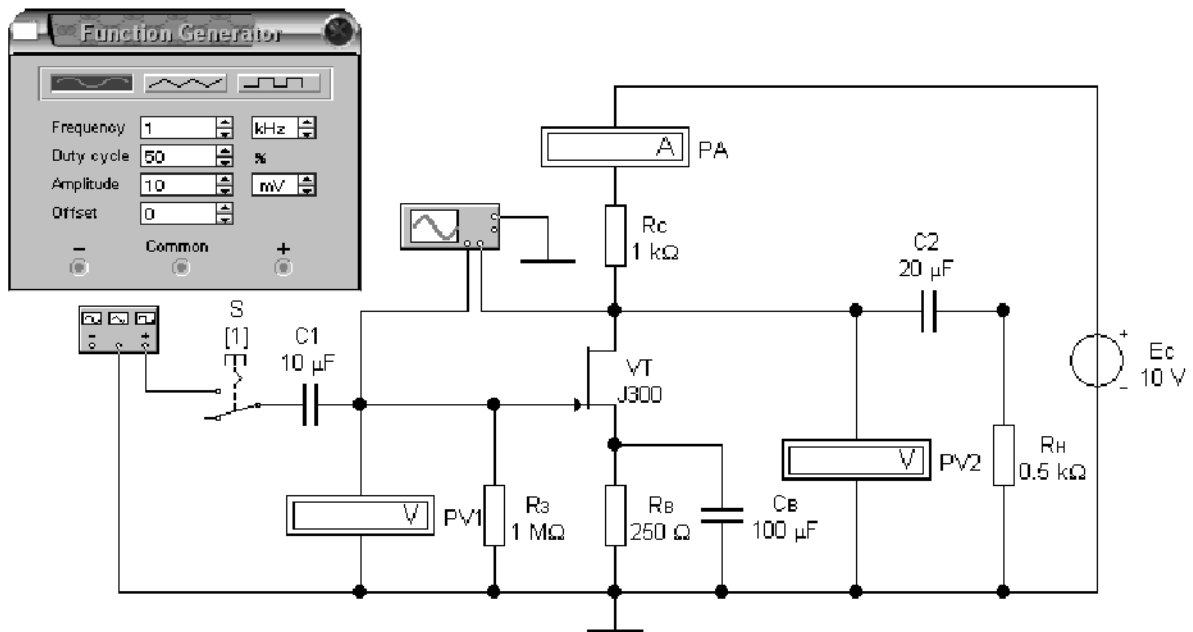


Рисунок 37 – Схема для дослідження підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим $p-n$ -переходом, увімкненого за схемою з спільним витоком

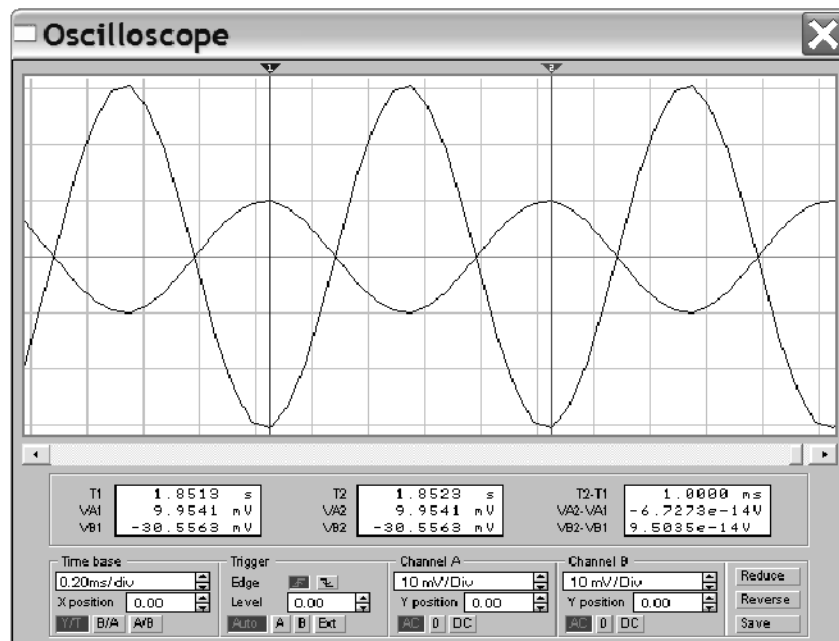


Рисунок 38 – Осцилограми напруг підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим $p-n$ -переходом

Контрольні питання

1. Поясніть призначення підсилювачів.

2. Назвіть основні параметри підсилювачів.
3. Наведіть визначення режиму спокою підсилювального каскаду.
4. Наведіть схеми задання режиму спокою підсилювальних каскадів на польових транзисторах і поясніть принцип їх дії.
5. Наведіть схему підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керованим p - n -переходом, увімкненого за схемою з спільним витоком. Поясніть призначення елементів схеми та принцип роботи підсилювального каскаду.
6. Наведіть схему підсилювального каскаду на польовому МДН-транзисторі з вбудованим каналом, увімкненого за схемою з спільним витоком. Поясніть призначення елементів схеми та принцип роботи підсилювального каскаду.
7. Наведіть схему підсилювального каскаду на польовому МДН-транзисторі з індукованим каналом, увімкненого за схемою з спільним витоком. Поясніть призначення елементів схеми та принцип роботи підсилювального каскаду.
8. Поясніть методику побудови лінії навантаження підсилювального каскаду на польовому транзисторі за постійним струмом та визначення параметрів режиму спокою.
9. Поясніть методику побудови лінії навантаження підсилювального каскаду на польовому транзисторі за змінним струмом та визначення коефіцієнтів підсилення каскаду за напругою K_U і потужністю K_P .
10. Поясніть, як зміниться положення робочої точки і параметри режиму спокою підсилювального каскаду на польовому транзисторі при зміні: величини опору резистора R_C ; напруги живлення E_C ; напруги $U_{ЗВ}$; крутизни вольт-амперної характеристики транзистора S ?

2.3 ПІДСИЛЮВАЧІ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ З ВІД'ЄМНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ЗА СТРУМОМ

Мета роботи: дослідження впливу від'ємного зворотного зв'язку за струмом на параметри підсилювачів на біполярних транзисторах.

2.3.1 Загальні теоретичні відомості

Зворотним зв'язком називають таку дію вихідного кола схеми на її вхідне коло, при якому частина вихідного сигналу подається на вхід.

У підсилювачі із зворотним зв'язком вхідна напруга $U_{вх}$ і напруга зворотного зв'язку $U_{зз}$ можуть співпадати за фазою або знаходитися в протифазі. У першому випадку результуюча напруга: $U_1 = U_{вх} + U_{зз}$, а такий зворотний зв'язок називають додатним (ДЗЗ). У другому випадку: $U_1 = U_{вх} - U_{зз}$, і такий зворотний зв'язок називають від'ємним (ВЗЗ).

Зворотні зв'язки (ЗЗ) підрозділяють на зворотні зв'язки за напругою і за струмом. При ЗЗ за напругою $U_{зз} = \beta U_{вих}$ (де β – коефіцієнт передачі кола ЗЗ), тобто напруга зворотного зв'язку виявляється пропорційною вихідній напрузі. При зворотному зв'язку за струмом $U_{зз} = \beta I_{вих} R_{зз}$, тобто напруга ЗЗ виявляється пропорційною струму в колі навантаження.

Напруга ЗЗ може подаватися на вхід підсилювача або послідовно з напругою вхідного сигналу, або паралельно. У першому випадку зворотний зв'язок називається послідовним, а в другому – паралельним.

Коефіцієнт підсилення підсилювача з ВЗЗ

$$K_{зз} = \frac{K}{1 + \beta K}. \quad (18)$$

З цієї формули виходить, що ВЗЗ знижує коефіцієнт підсилення підсилювача в $(1 + \beta K)$ разів.

Від'ємний зворотний зв'язок широко використовують в підсилювачах. В результаті введення ВЗЗ за напругою:

- підвищується стабільність коефіцієнта підсилення підсилювача;
- знижується рівень нелінійних викривлень;
- збільшується вхідний і зменшується вихідний опір підсилювача.

Вхідний опір підсилювача за рахунок ВЗЗ збільшується в $(1 + \beta K)$ разів

$$R_{вх.зз} = R_{вх}(1 + \beta K). \quad (19)$$

а вихідний опір підсилювача зменшується в $(1 + \beta K)$ разів

$$R_{вих.зз} = \frac{R_{вих}}{1 + \beta K}. \quad (20)$$

2.3.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення і класифікацію видів зворотного зв'язку (ЗЗ) у підсилювачах.

2. Виконати розрахунок підсилювального каскаду на біполярному транзисторі графоаналітичним методом:

- побудувати вихідну вольт-амперну характеристику біполярного транзистора $I_K = f(U_{KE})$, увімкненого за схемою з спільним емітером;

- побудувати лінію навантаження підсилювального каскаду за постійним струмом;

- визначити параметри режиму спокою: U_{KEC} , I_{KC} , U_{BEC} , I_{BC} . Режим підсилення класу А.

3. Визначити величину опору резистора R_B у колі бази біполярного транзистора [$R_B = E_K/I_{BP} - h_{11}$].

4. Визначити коефіцієнт підсилення підсилювача за напругою K_U без зворотного зв'язку [$K_U \approx h_{21}(R_K/h_{11})$].

5. Визначити вхідний опір підсилювача R_{BX} без зворотного зв'язку [$R_{BX} = (R_B h_{11})/(R_B + h_{11}) \approx h_{11}$].

6. Визначити передатний коефіцієнт β ланки зворотного зв'язку [$\beta = R_E/R_K$].

7. Визначити коефіцієнт підсилення підсилювача за напругою $K_{U\text{ зз}}$ з від'ємним зворотним зв'язком за струмом [$K_{U\text{ зз}} \approx K_U/(1 + \beta K_U)$].

8. Визначити вхідний опір підсилювача $R_{BX\text{ зз}}$ з від'ємним зворотним зв'язком за струмом [$R_{BX\text{ зз}} = h_{11} + (1 + h_{21})R_E \approx h_{21}R_E$].

Вихідні дані: значення коефіцієнта передачі струму транзистора h_{21} ; напруги джерела живлення E_K ; опору резистора в колі колектора R_K та у колі емітера R_E наведені в таблиці А.6 (додаток А). Величина вхідного опору транзистора h_{11} наведена в таблиці А.7 (додаток А).

2.3.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для дослідження підсилювального каскаду на біполярному транзисторі з від'ємним зворотним зв'язком за струмом (рисунок 39).

2. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця А.6, додаток А) і віртуального генератора.

3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з

контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

4. Включити схему. Перемикачем S1 відключити генератор від входу підсилювача, перемикачем S2 закоротити резистор R_E . Показання вольтметра PV2 повинні бути в межах $U_{КЕС} \pm 1В$. При більших відхиленнях напруги $U_{КЕ}$ резистором R_B установити її в заданих межах. Записати показання приладів.

5. Перемикачем S1 підключити генератор до входу підсилювача. Режим роботи вольтметрів (PV1, PV2) і амперметрів (PA1, PA2) установити для змінного струму «АС». Записати показання приладів. Величини $U_{ВИХ}$ і $U_{ВХ}$ можна визначити за допомогою вольтметрів PV1 і PV2 або віртуального осцилографа. Визначити параметри підсилювача без від'ємного зворотного зв'язку [$K_U = U_{ВИХ}/U_{ВХ}$; $R_{ВХ} = U_{ВХ}/I_{ВХ}$].

6. Перемикачем S2 підключити резистор R_E , що створює від'ємний зворотний зв'язок за струмом. Записати показання приладів. Визначити параметри підсилювача з від'ємним зворотним зв'язком [$K_{U\text{ зз}} = U_{ВИХ\text{ зз}}/U_{ВХ\text{ зз}}$; $R_{ВХ\text{ зз}} = U_{ВХ\text{ зз}}/I_{ВХ\text{ зз}}$].

7. Порівняти розрахункові та експериментальні результати.

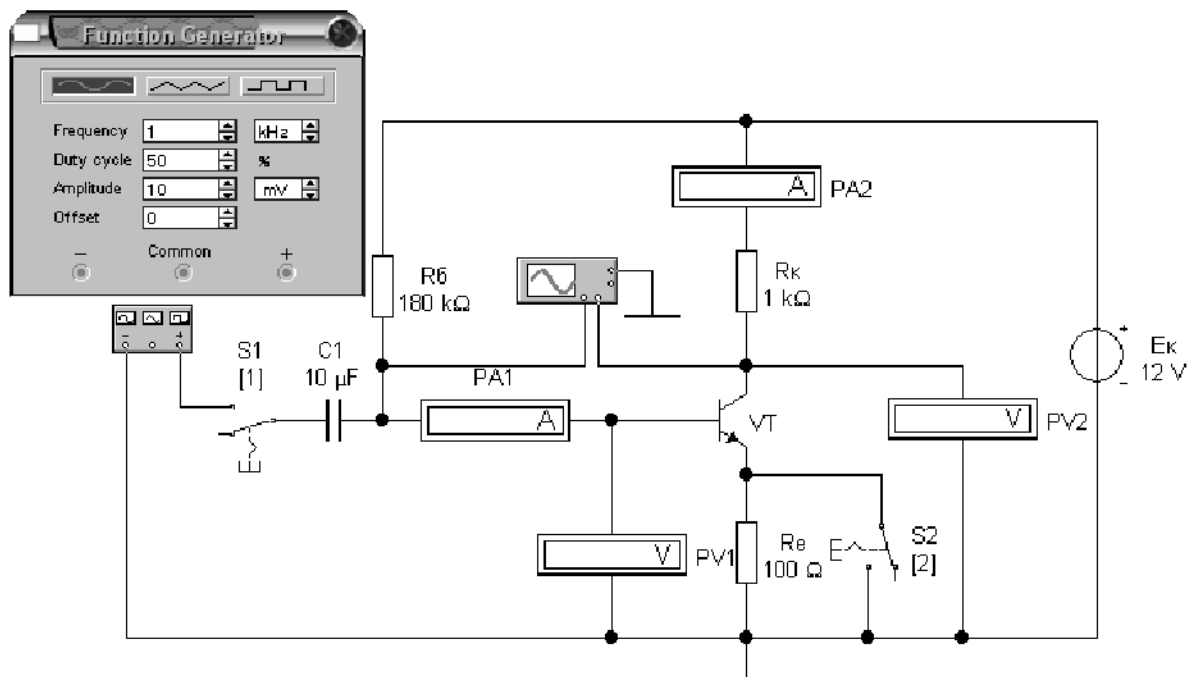


Рисунок 39 – Схема для дослідження підсилювального каскаду на біполярному транзисторі з від'ємним зворотним зв'язком за струмом

2.3.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки. Аналіз теоретичних і експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Поясніть, що таке зворотні зв'язки в підсилювачах і як вони впливають на їх параметри?
2. Назвіть види зворотних зв'язків в підсилювачах і їх особливості.
3. Поясніть, яким чином в підсилювачах реалізується від'ємний зворотний зв'язок за напругою?
4. Поясніть, яким чином в підсилювачах реалізується від'ємний зворотний зв'язок за струмом?
5. Поясніть, як впливає від'ємний зворотний зв'язок на коефіцієнт підсилення, вхідний і вихідний опір підсилювального каскаду?
6. Поясніть, як впливає додатний зворотний зв'язок на коефіцієнт підсилення, вхідний і вихідний опір підсилювального каскаду?

2.4 ОПЕРАЦІЙНІ ПІДСИЛЮВАЧІ

Мета роботи: вивчення принципу дії та дослідження пристроїв на операційних підсилювачах.

2.4.1 Загальні теоретичні відомості

Операційний підсилювач – це підсилювач постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення, який охоплений колом ВЗЗ, що визначає основні якісні показники і характер операцій, які виконує підсилювач.

Один з входів підсилювача називається інвертуючим, а другий – неінвертуючим. При подачі сигналу на неінвертуючий вхід прирощення вихідного сигналу співпадає за знаком (фазою) з прирощенням вхідного сигналу. Якщо ж сигнал поданий на інвертуючий вхід, то прирощення вихідного сигналу має зворотний знак (протилежний за фазою) в

порівнянні з припущенням вхідного сигналу. Інвертуючий вхід часто використовують для введення в ОП зовнішніх ВЗЗ.

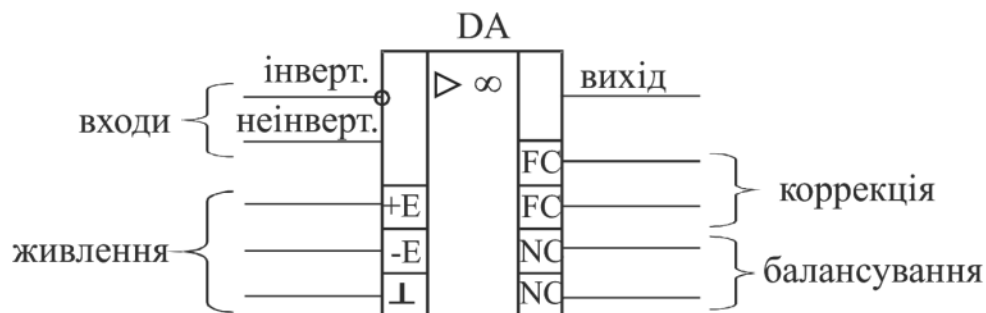


Рисунок 40 – Умовне позначення операційного підсилювача

Сучасний операційний підсилювач виконується на базі інтегральної мікросхеми операційного підсилювача ІМС ОП, до виводів якої, окрім кола ВЗЗ, приєднуються джерела живлення, джерела вхідних сигналів, опір навантаження, кола корекції частотних характеристик ОП і інші кола.

Операційні підсилювачі застосовуються в підсилювальній техніці, пристроях генерації сигналів синусоїдальної і імпульсної форми, в стабілізаторах напруги, активних фільтрах і т. д.

Основні параметри ОП:

- коефіцієнт підсилення напруги $K_{\text{УОП}} = \frac{\Delta U_{\text{ВИХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}$;
- вхідна напруга зміщення нуля – значення напруги на вході ОП, при якому $U_{\text{ВИХ}} = 0$;
- вхідний опір $R_{\text{ВХ}}$;
- вихідний опір $R_{\text{ВИХ}}$;
- максимальна вихідна напруга $U_{\text{ВИХmax}}$;
- максимальний вихідний струм $I_{\text{ВИХmax}}$;
- максимальний споживаний струм $I_{\text{СПОЖmax}}$;
- напруга живлення $U_{\text{ЖИВ}}$ ($U_{\text{ЖИВ}} = \pm 3 \dots \pm 15 \text{В}$);
- споживана потужність $P_{\text{СПОЖ}}$.

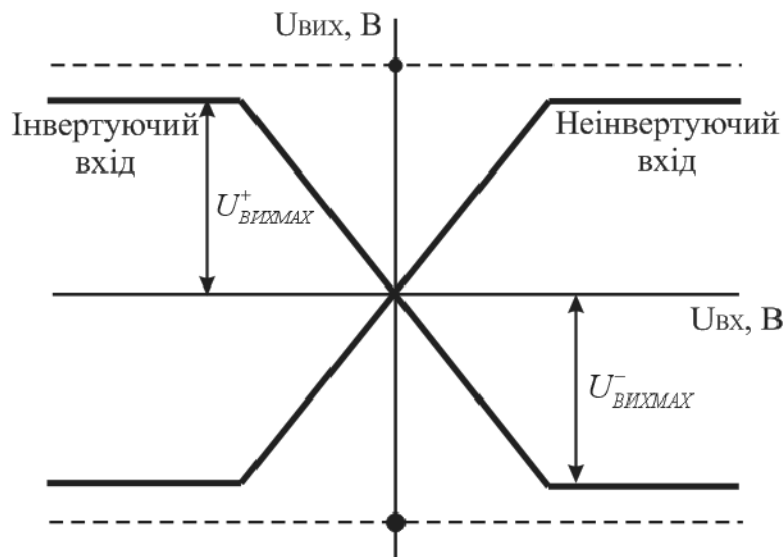


Рисунок 41 – Амплітудна характеристика $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$ операційного підсилювача

Схема інвертуючого підсилювача на основі ОП наведена на рисунку 42.

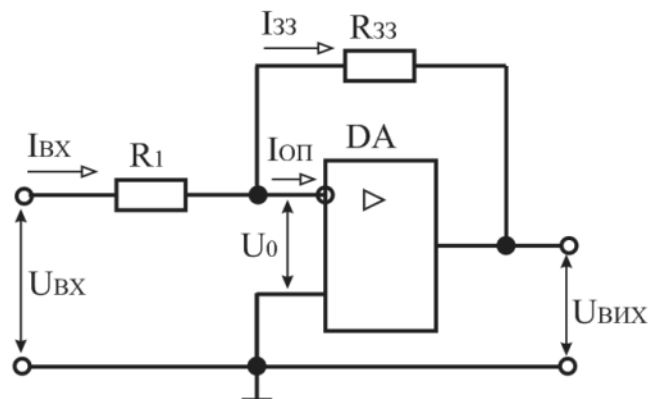


Рисунок 42 – Схема інвертуючого підсилювача на основі ОП

У цій схемі вхідний сигнал подається на інвертуючий вхід ОП, а його неінвертуючий вхід зв'язується із спільною точкою входу і виходу схеми (заземлюється). Підсилювач називається інвертуючим, оскільки вихідна напруга інвертована (знаходиться в протифазі) по відношенню до вхідної напруги $U_{\text{вх}}$. Від'ємний зворотний зв'язок (паралельний за напругою) створюється за допомогою резистора R_{33} .

Коефіцієнт підсилення за напругою інвертуючого підсилювача з паралельним зворотним зв'язком визначається параметрами тільки пасивної частини схеми

$$K_U = \frac{U_{\text{ВИХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_{33}}{R_1} = -\frac{1}{\beta}, \quad (21)$$

де $\beta = \frac{R_1}{R_{33}}$ – коефіцієнт передачі кола ЗЗ.

Неінвертуючий підсилювач (рисунк 43) містить послідовний ВЗЗ за напругою (резистор R_{33}), який поданий за інвертуючим входом; вхідний сигнал подається на неінвертуючий вхід ОП.

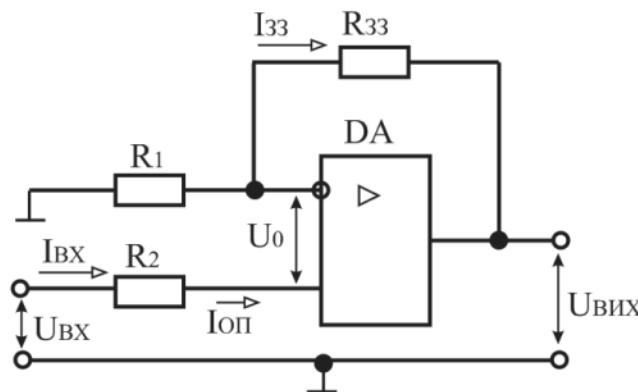


Рисунок 43 – Схема неінвертуючого підсилювача на основі ОП

Коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача

$$K_U = \frac{U_{\text{ВИХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R_1 + R_{33}}{R_1} = 1 + \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (22)$$

2.4.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення та умовне графічне позначення операційного підсилювача (ОП).

2. Привести схему інвертуючого підсилювача на ОП. Визначити величину опору резистора $R_{\text{ВХ}}$ на інвертуючому вході ОП при заданих значеннях коефіцієнта підсилення K_U і опору резистора в колі зворотного зв'язку R_{33} . Побудувати графік залежності $U_{\text{ВИХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$. Варіанти завдань наведені в таблиці А.8 (додаток А). Максимальну вихідну напругу ОП прийняти $U_{\text{ВИХ МАХ}} = \pm 11 \text{ В}$.

3. Привести схему неінвертуючого підсилювача на ОП. Визначити коефіцієнт підсилення підсилювача при величині опорів резисторів $R_{\text{ВХ}}$ і R_{33} з п. 2. Побудувати графік залежності $U_{\text{ВИХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$.

2.4.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для дослідження операційного підсилювача (рисунок 44).
2. Установити наведені на рисунку 44 параметри елементів схеми і віртуального генератора.
3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми, установити кольоровою.
4. Включити схему. Перемикачі S1 і S2 установити в нижнє положення. Якщо напруга на виході ОП відмінна від нульової ($U_{\text{вих}} \neq 0$), то необхідно перемикач S2 установити у верхнє положення та за допомогою резистора R1 добитися $U_{\text{вих}} = 0$.
5. Перемикач S1 установити у верхнє положення і зняти осцилограми вхідної $u_{\text{вх}} = f(t)$ і вихідної $u_{\text{вих}} = f(t)$ напруг ОП. За допомогою візирної лінії віртуального осцилографа виміряти амплітуди напруг і обчислити коефіцієнт підсилення ОП.
6. Набрати схему для дослідження інвертуючого підсилювача (рисунок 45, а).
7. Установити задані в таблиці А.8 (додаток А) і розраховані в п. 2.4.2 параметри елементів схеми.
8. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з виходом ОП, установити кольоровою.
9. Включити схему. За допомогою віртуального осцилографа зняти залежність вихідної напруги операційного підсилювача від вхідної: $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$. Результати вимірів занести в таблицю 7.
10. Привести осцилограми напруг (див. рисунок 46). Визначити коефіцієнт підсилення ОП за напругою K_U .
11. Набрати схему для дослідження неінвертуючого підсилювача (рисунок 45, б).
12. Виконати пп. 7-10.
13. За даними таблиці 7 побудувати графіки залежності $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$ для інвертуючого і неінвертуючого підсилювачів.

Таблиця 7 – Результати експериментальних досліджень операційного підсилювача

$U_{вх}, В$	Інвертуючий підсилювач	Неінвертуючий підсилювач
	$U_{вих}, В$	$U_{вих}, В$
0,1		
0,2		
0,3		
0,4		
0,5		
0,6		
0,7		
0,8		
0,9		
1,0		
1,1		
1,2		

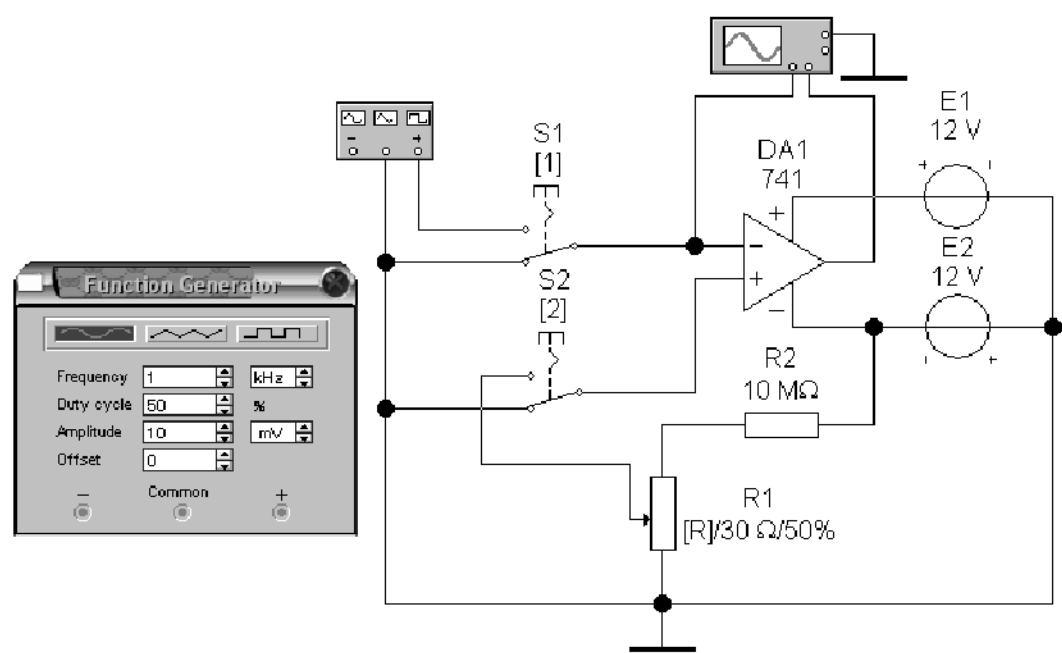
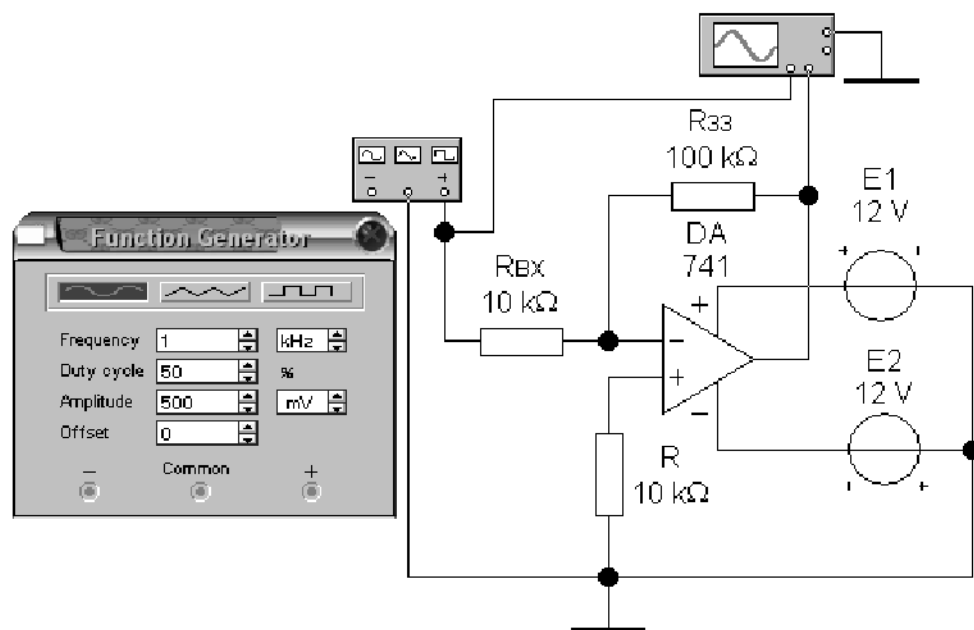
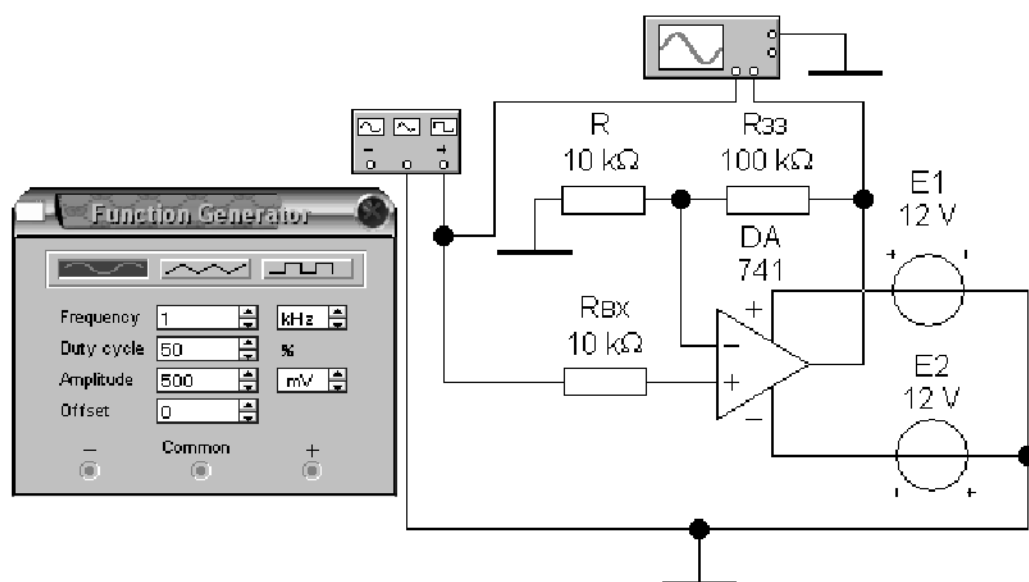


Рисунок 44 – Схема для дослідження операційного підсилювача



a)



б)

Рисунок 45 – Схеми для дослідження операційного підсилювача:
а) інвертуючого; б) неінвертуючого

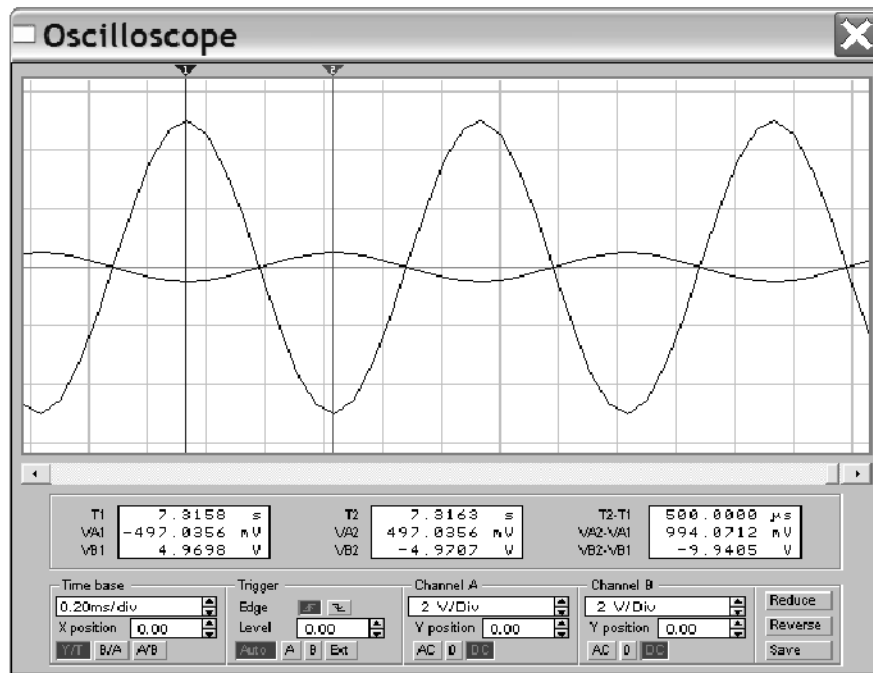


Рисунок 46 – Осцилограми напруг інвертуючого операційного підсилювача

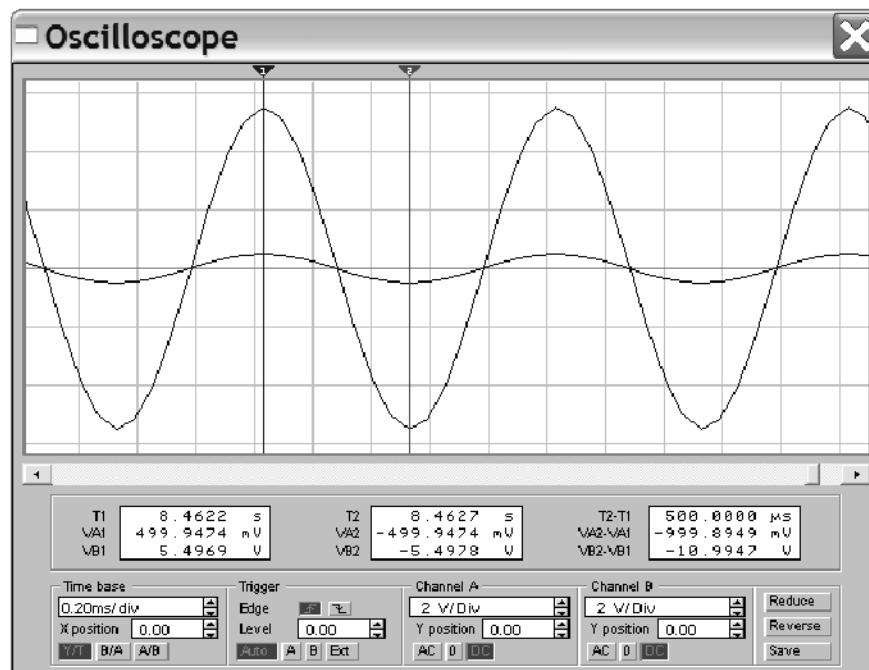


Рисунок 47 – Осцилограми напруг неінвертуючого операційного підсилювача

2.4.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень підсилювачів.
4. Висновки по роботі. Аналіз теоретичних і експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Поясніть призначення підсилювачів постійного струму.
2. Поясніть, що таке операційний підсилювач і як він побудований?
3. Поясніть призначення операційних підсилювачів.
4. Наведіть умовне графічне позначення та поясніть призначення виводів операційного підсилювача.
5. Наведіть основні параметри і характеристики операційного підсилювача.
6. Наведіть схему та поясніть принцип дії інвертуючого підсилювача на ОП.
7. Наведіть схему та поясніть принцип дії неінвертуючого підсилювача на ОП.
8. Наведіть схеми та поясніть принцип дії інвертуючого і неінвертуючого суматорів на ОП.
9. Наведіть схему та поясніть принцип дії інтегруючого підсилювача на ОП.
10. Наведіть схему та поясніть принцип дії диференціюючого підсилювача на ОП.
11. Поясніть, яку роль виконує зворотний зв'язок в операційному підсилювачі?
12. Поясніть, як впливає зворотний зв'язок в операційному підсилювачі на його передатну характеристику?
13. Поясніть, у чому полягає відмінність операційних підсилювачів від звичайних?

2.5 ГЕНЕРАТОРИ СИНУСОЇДАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ

Мета роботи: Вивчення принципу роботи і дослідження генераторів синусоїдальних (гармонійних) коливань.

2.5.1 Загальні теоретичні відомості

Генератор синусоїдальних (гармонійних) коливань – це електронний пристрій, який перетворює електричну енергію джерела постійного струму в енергію електричних синусоїдальних коливань заданої частоти.

Розрізняють генератори синусоїдальних коливань з незалежним збудженням і з самозбудженням (автогенератори). Залежно від частоти коливань, що генерується, генератори підрозділяються на низькочастотні (від 10 Гц до 100 кГц), високочастотні (від 100 кГц до 100 МГц) та надвисокочастотні (понад 100 МГц).

За типом частотно-вибіркової ланки, які задають частоту коливань, генератори гармонійних коливань поділяються на LC- і RC-генератори.

Будь-яким автогенератором електричних коливань є підсилювач, який охоплений колом додатного зворотного зв'язку. Умовою існування в генераторі незатухаючих електричних коливань є рівняння

$$K_U \cdot \beta = 1. \quad (23)$$

Ця умова підрозділяється на умову балансу амплітуд ($K_U \cdot \beta = 1$) і на умову балансу фаз ($\varphi_U + \varphi_\beta = 2\pi n$, де $n = 0, 1, 2, 3, \dots$).

LC-генератори призначені для генерування сигналів високої частоти (понад декілька десятків кілогерц). LC-генератори містять в ланцюзі ДЗЗ резонансний контур LC, параметри якого визначають частоту коливань вихідної напруги

$$f_o = \frac{\omega_o}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (24)$$

Для отримання гармонійних коливань низької частоти (до одиниць герц) застосовують генератори, у яких в ланці ЗЗ використовуються частотно-вибіркові кола, що складені з резисторів і конденсаторів.

Частотно-вибірковими ланками, які найчастіше використовуються в RC-генераторах, є Г-подібні RC-кола, міст Віна та подвійний Т-подібний міст.

Схема моста Віна і його характеристики наведені на рисунку 48.

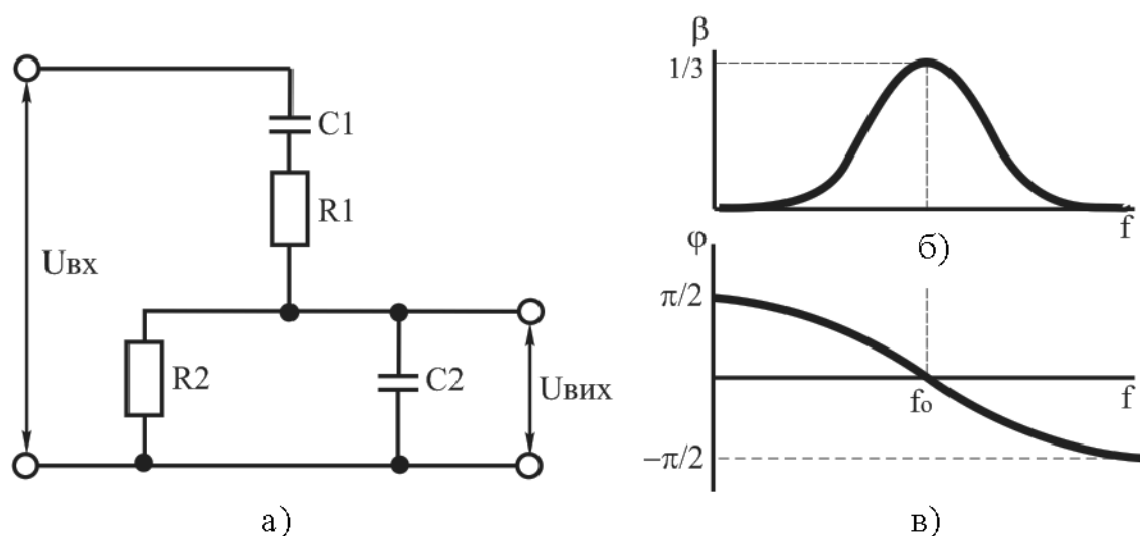


Рисунок 48 – Міст Віна та його характеристики: а – схема;

б – амплітудно-частотна характеристика $\beta = f(f)$;

в – фазо-частотна характеристика $\varphi = f(f)$

На деякій частоті f_0 , частоті квазірезонансу, коефіцієнт передачі β має максимальне значення $\beta_0 = 1/3$, а зсув фаз φ між вхідною і вихідною напругою рівний нулю $\varphi = 0$.

Частота генерації в схемі рівна квазірезонансній частоті частотно-вибіркової ланки, яка визначається із співвідношення

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (25)$$

де $R_1 = R_2 = R$ і $C_1 = C_2 = C$.

Схема RC-генератора на операційному підсилювачі з мостом Віна наведена на рисунку 49. Ланка частотно-вибіркового зворотного зв'язку повинна бути увімкнена між виходом і неінвертуючим входом ОП. Резистори R_3 і R_4 призначені для отримання необхідного коефіцієнта підсилення. За допомогою змінного резистора R_4 можна змінювати коефіцієнт підсилення підсилювача, добиваючись при цьому найменших нелінійних викривлень коливань, що генеруються.

Оскільки на частоті генерації f_0 коефіцієнт передачі моста Віна $\beta = 1/3$, самозбудження генератора можливе при $K_U > 3$.

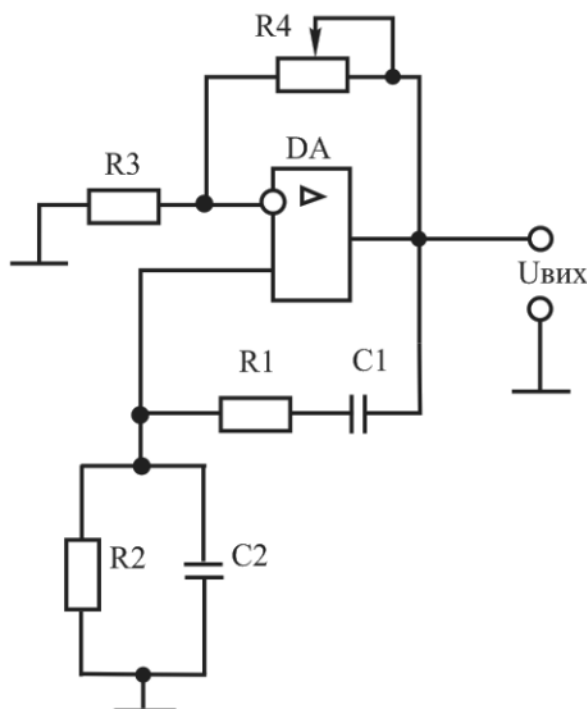


Рисунок 49 – Схема RC-генератора з мостом Віна

2.5.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення, класифікацію та умови самозбудження генераторів синусоїдальних коливань.
2. Привести схему LC-генератора синусоїдальних коливань на біполярному транзисторі, виконаного за схемою “ємнісна триточка”. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи генератора.
3. Визначити частоту коливань генератора $[f = 1/(2\pi\sqrt{L_K C_K})]$. Варіанти завдань (L_K , C_K) наведені в таблиці А.9 (додаток А).
4. Привести схему і характеристики (амплітудно-частотну і фазочастотну) моста Віна.
5. Привести схему RC-генератора синусоїдальних коливань на операційному підсилювачі з мостом Віна. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи генератора.
6. Визначити частоту коливань генератора $[f = 1/(2\pi RC)]$. Варіанти завдань (R , C) наведені в таблиці А.9 (додаток А).

2.5.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для дослідження LC-генератора (рисунок 50).

2. Установити задані (таблиця А.9, додаток А) параметри елементів схеми.

3. Включити схему. Для прискорення виникнення коливань генератора перемикачем S короткочасно замкнути конденсатор С.

4. Привести осцилограму вихідної напруги $u_{\text{вих}} = f(t)$ (див. рисунок 51).

5. За допомогою візирних ліній осцилографа визначити амплітуду і період синусоїдальних коливань. Обчислити частоту коливань $[f = 1/T]$.

6. Набрати схему для зняття амплітудно-частотної (АЧХ) і фазочастотної (ФЧХ) характеристик моста Віна (рисунок 52). Установити задані (таблиця А.9, додаток А) параметри елементів моста Віна.

Примітка: Зняття АЧХ і ФЧХ здійснюється за допомогою вимірювача АЧХ і ФЧХ (Bode Plotter). Вимірювач призначений для аналізу амплітудно-частотних (при натиснутій кнопці «MAGNITUDE») і фазочастотних (при натиснутій кнопці «PHASE») характеристик при логарифмічній (кнопка «LOG») або лінійній (кнопка «LIN») шкалі по осях Y («VERTICAL») і X («HORIZONTAL»). Настроювання вимірювача полягає у виборі меж вимірювання коефіцієнта передачі і варіації частоти за допомогою кнопок у віконцях «F» – максимальне та «I» – мінімальне значення. Значення частоти і відповідне їй значення коефіцієнта передачі або фази показується у віконцях у правому нижньому куті вимірювача. Підключення приладу до досліджуваної схеми здійснюється за допомогою затискачів «IN» (вхід) і «OUT» (вихід). Ліві клеми затискачів підключаються відповідно до входу і виходу досліджуваного пристрою, а праві – до спільної шини.

7. З вимірювача АЧХ і ФЧХ (Bode Plotter) привести амплітудно-частотну і фазо-частотну характеристики моста Віна (див. рисунок 53). Записати значення частоти і відповідне їй значення коефіцієнта передачі і фази.

Примітка: вимірювання коефіцієнта передачі і фази проводиться при резонансній частоті.

8. Набрати схему для дослідження RC-генератора синусоїдальних коливань на операційному підсилювачі з мостом Віна (рисунок 54).

9. Установити задані (таблиця А.9, додаток А) параметри елементів схеми.

10. Лінію, що з'єднує вхід “А” віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

11. Включити схему. Привести осцилограми напруг на виході генератора і моста Віна (див. рисунок 55).

12. За допомогою візирних ліній осцилографа визначити амплітуду і період синусоїдальних коливань на виході генератора і моста Віна. Обчислити частоту коливань і коефіцієнт передачі моста Віна [$\beta = U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}}$, де $U_{\text{вих}}$ і $U_{\text{вх}}$ – вихідна і вхідна напруга моста Віна].

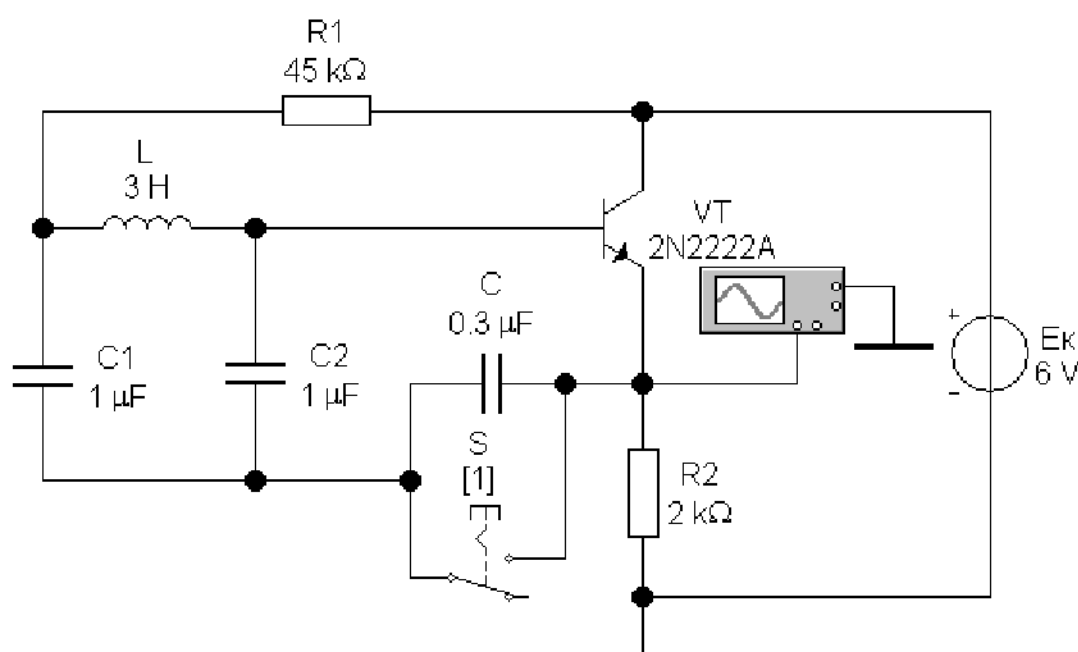


Рисунок 50 – Схема для дослідження LC-генератора, який виконаний за схемою “ємнісна триточка”

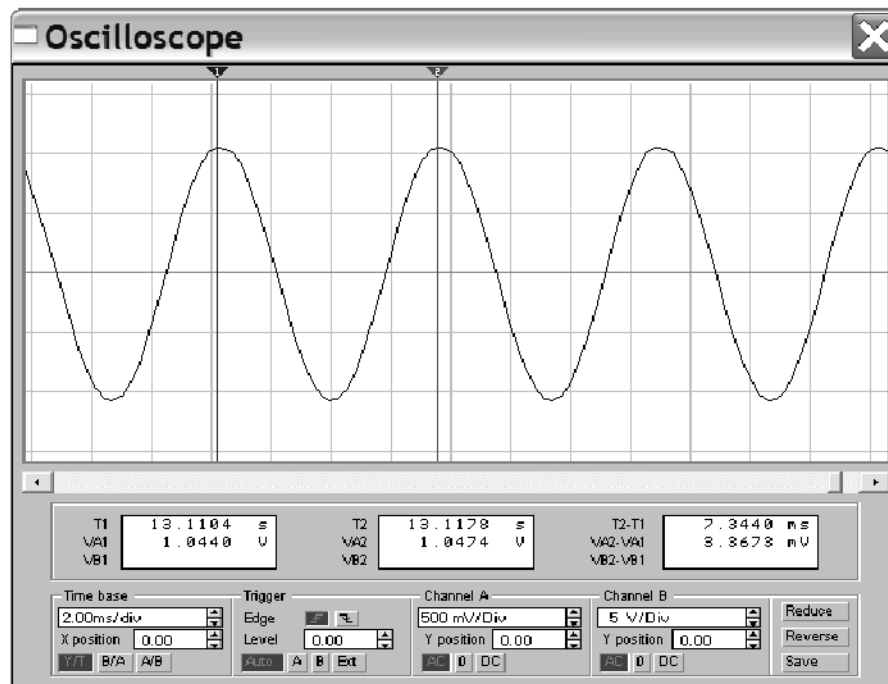


Рисунок 51 – Осцилограма напруги LC-генератора

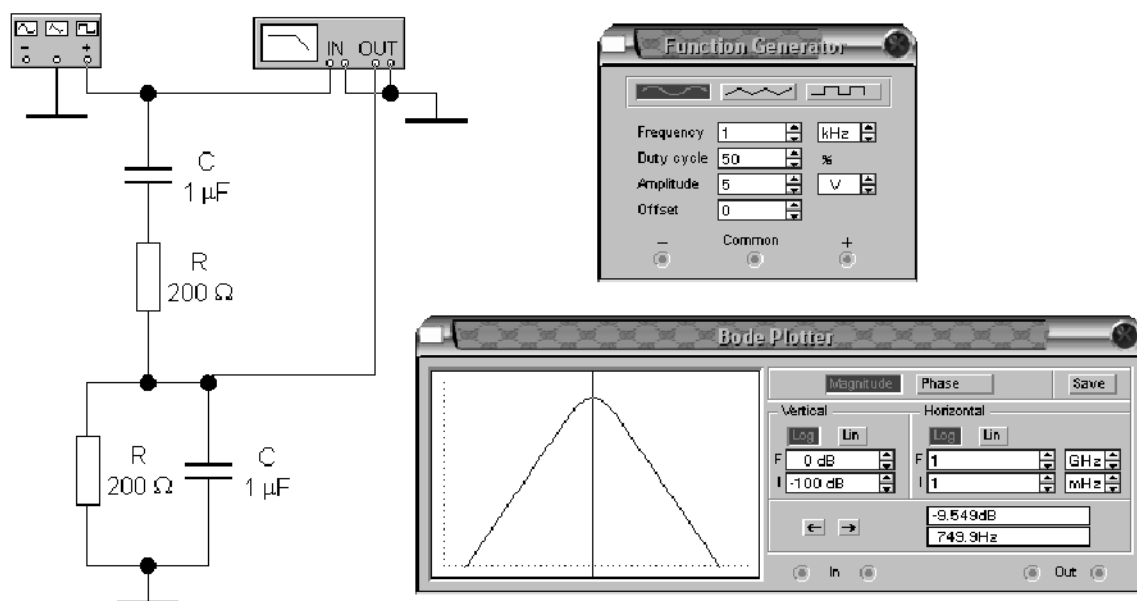


Рисунок 52 – Схема для зняття амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристик моста Віна

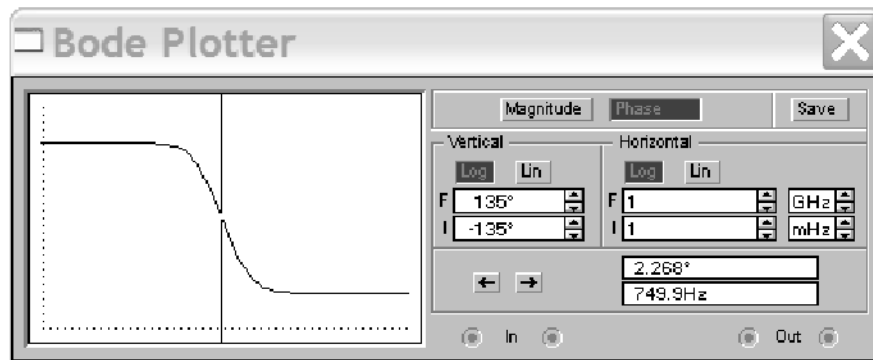


Рисунок 53 – Фазо-частотна характеристик моста Віна

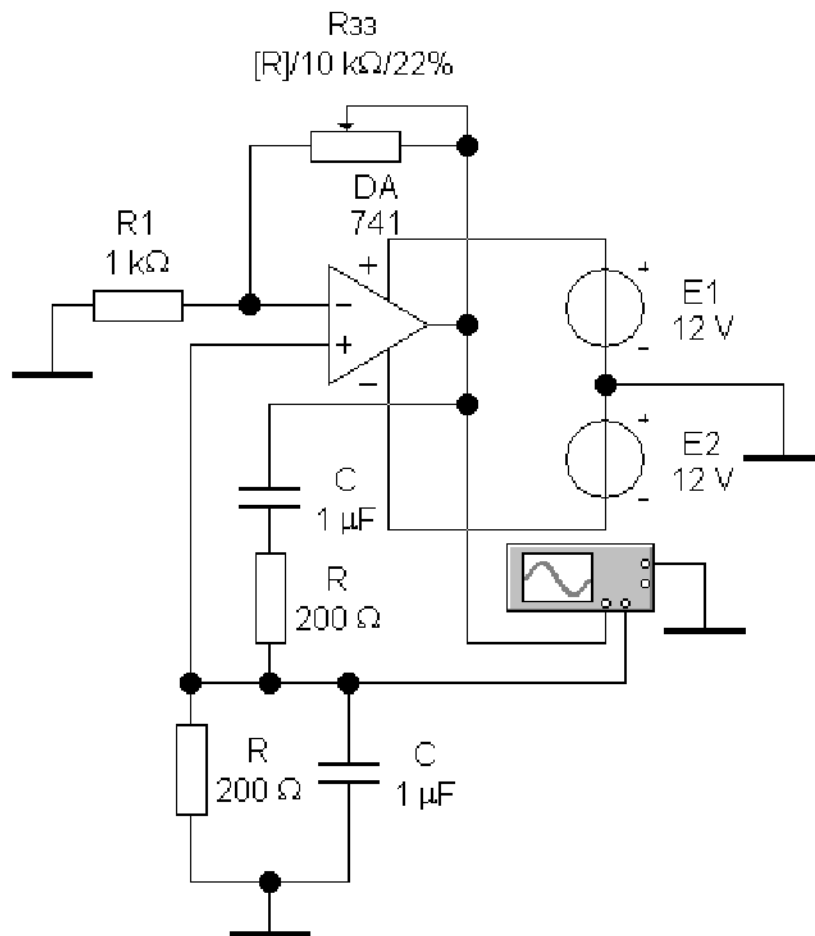


Рисунок 54 – Схема для дослідження RC-генератора на операційному підсилювачі з мостом Віна

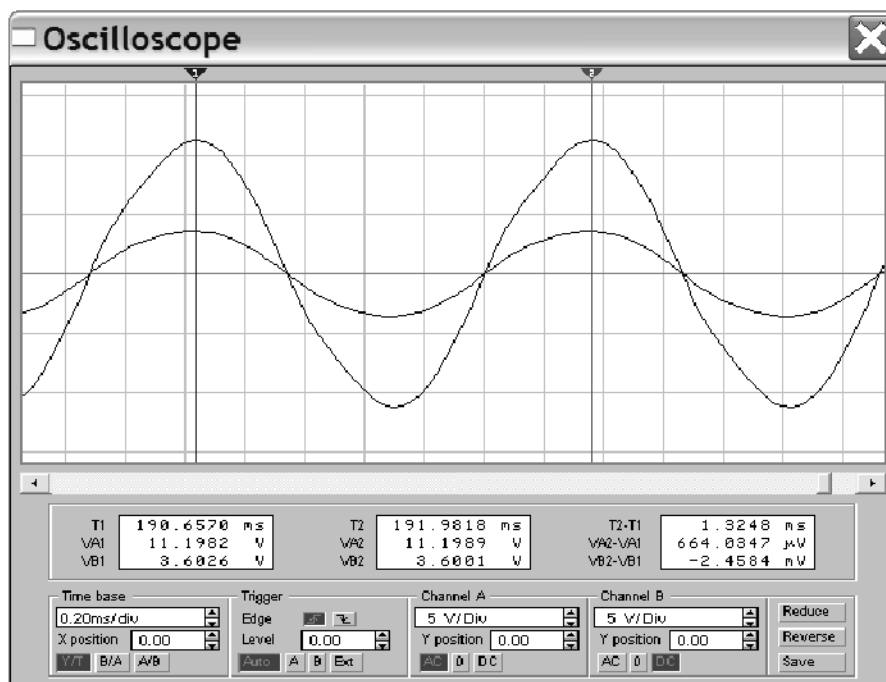


Рисунок 55 – Осцилограми напруг на виході RC-генератора і моста Віна

2.5.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз теоретичних і експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Поясніть призначення генераторів синусоїдальних коливань.
2. Наведіть класифікацію генераторів синусоїдальних коливань.
3. Наведіть структурну схему генератора синусоїдальних коливань.
4. Наведіть умови режиму генерації генераторів синусоїдальних коливань.
5. Наведіть основні параметри і характеристики генераторів синусоїдальних коливань.
6. Поясніть призначення LC- та RC-генераторів.

7. Наведіть схему моста Віна, його амплітудно- і фазо-частотну характеристики.

8. Наведіть схему подвійного Т-подібного моста, його амплітудно-частотну характеристику.

9. Наведіть схему RC-генератора з подвійним Т-подібним мостом на операційному підсилювачі. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.

10. Наведіть схему RC-генератора з мостом Віна на операційному підсилювачі. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.

2.6 ЛОГІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ. ТРИГЕРИ

Мета роботи: вивчення принципу роботи і дослідження логічних елементів і тригерів в інтегральному виконанні.

2.6.1 Загальні теоретичні відомості

Логічні елементи – це електронні схеми, які відтворюють логічні функції і оперують логічними величинами, які приймають тільки два значення: логічну одиницю та логічний нуль.

Логічній одиниці "1" відповідає рівень високої напруги, а логічному "0" – рівень низької напруги.

Умовне позначення логічного елементу НІ, його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 56.

Сигналу $X = 0$ на вході відповідає $Y = 1$ на виході і, навпаки, при $X = 1$, $Y = 0$.

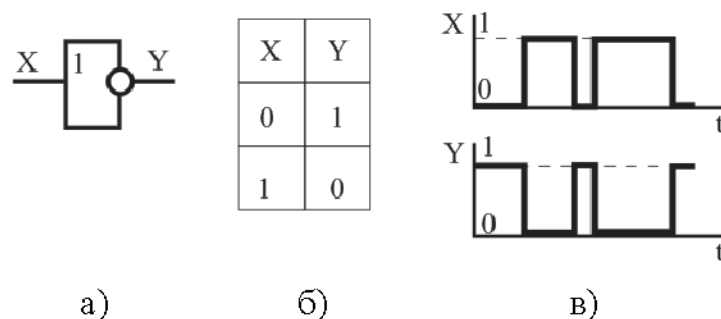


Рисунок 56 – Логічний елемент НІ: а – умовне графічне позначення; б – таблиця істинності; в – часові діаграми роботи

Умовне позначення логічного елементу АБО, його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 57.

Вихідний сигнал Y елементу АБО дорівнює одиниці $Y = 1$, якщо хоч би на один з входів поданий сигнал логічної "1".

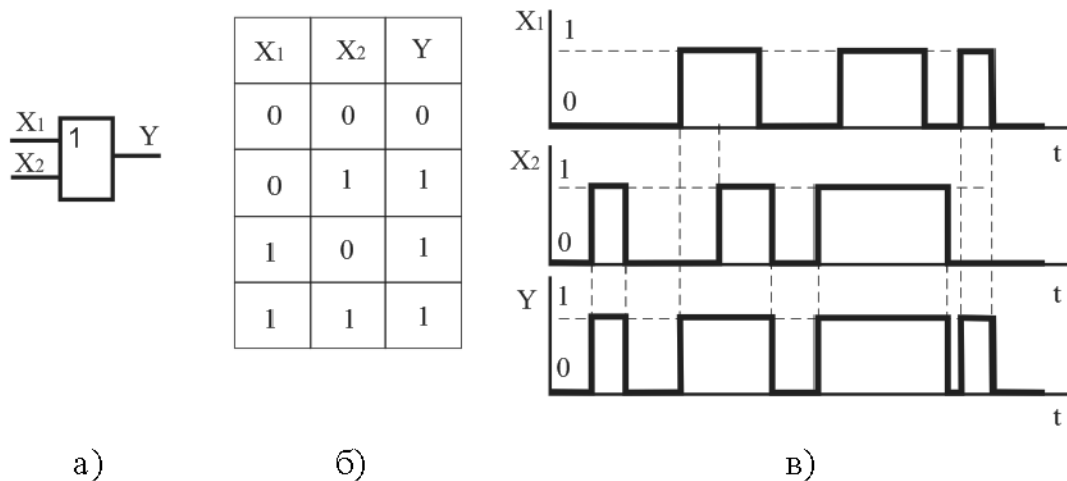


Рисунок 57 – Логічний елемент АБО: а – умовне графічне позначення; б – таблиця істинності; в – часові діаграми роботи

Умовне позначення логічного елементу І, його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 58.

Вихідний сигнал Y елементу І дорівнює одиниці $Y = 1$, якщо одночасно на всі входи поданий сигнал логічної "1".

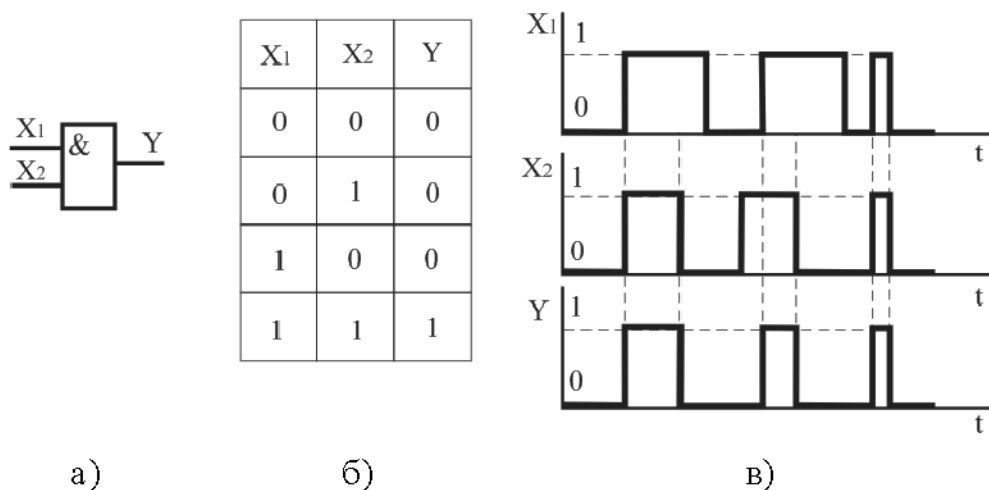


Рисунок 58 – Логічний елемент І: а – умовне графічне позначення; б – таблиця істинності; в – часові діаграми роботи

Умовне позначення логічного елементу АБО-НІ, його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 59.

Логічний елемент АБО-НІ об'єднує елементи АБО і НІ. У зв'язку з цим входнім сигналам, які дорівнюють логічній "1", відповідає логічний "0" на виході, а при сигналах логічного "0" на всіх входах вихідний $Y = 1$.

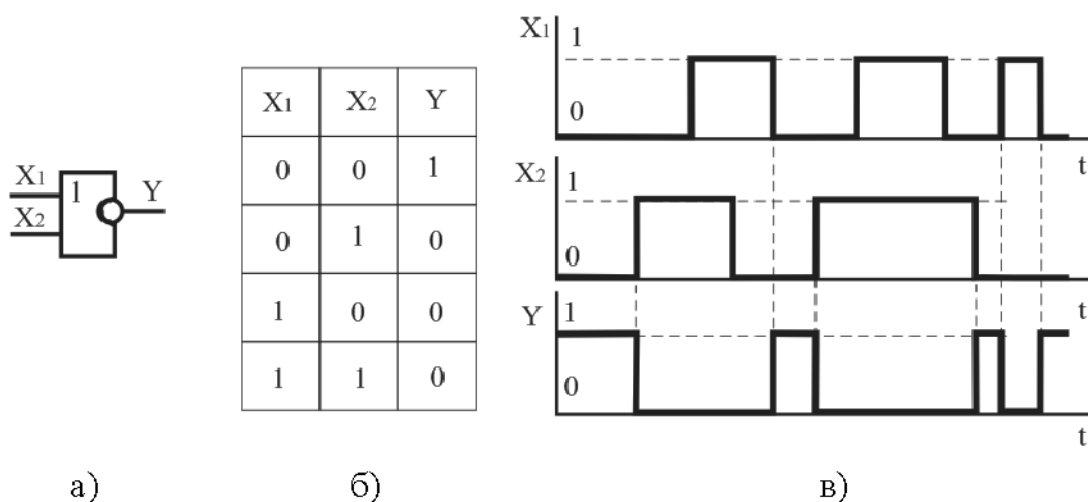


Рисунок 59 – Логічний елемент АБО-НІ: а – умовне графічне позначення; б – таблиця істинності; в – часові діаграми роботи

Умовне позначення логічного елементу "І-НІ", його таблиця істинності та часові діаграми наведені на рисунку 60.

Логічний елемент І-НІ об'єднує елементи І і НІ. Логічний "1" на всіх входах відповідає логічний "0" на виході елементу. При логічному "0" на одному з входів створюється логічна "1" на виході.

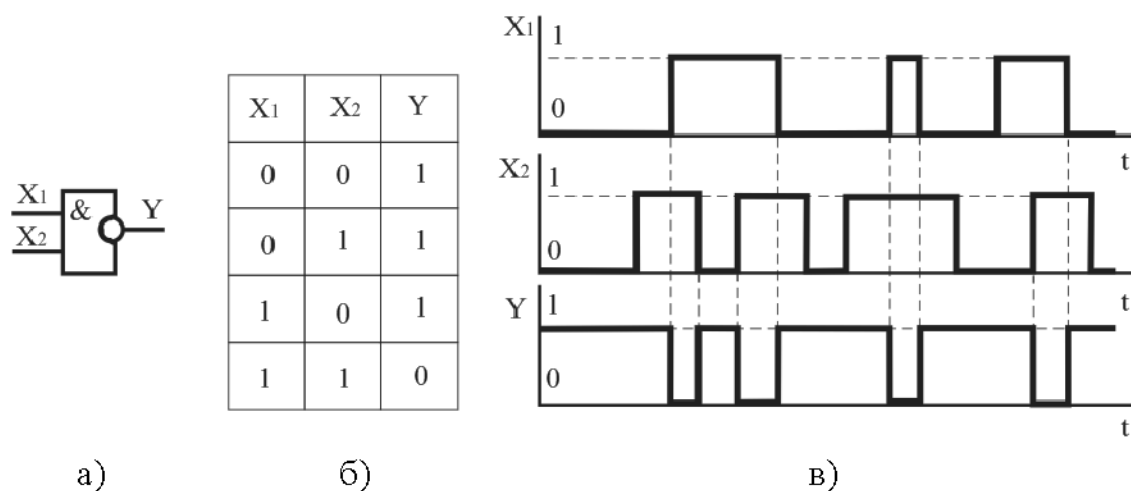


Рисунок 60 – Логічний елемент І-НІ: а – умовне графічне позначення; б – його таблиця істинності; в – часові діаграми роботи

Тригер – це пристрій, що має два стійких вихідних стани і здатний переходити з одного стану в інший під впливом зовнішнього керуючого сигналу.

За функціональною ознакою розрізняють тригери типів R-S, D, T, J-K та інші.

За способом керування тригери підрозділяють на асинхронні та тактовані.

В асинхронних тригерах перемикання з одного стану в інше здійснюється безпосередньо з надходженням сигналу на інформаційний вхід.

В тактованих тригерах крім інформаційних входів є вхід тактових імпульсів. Їх перемикання проводиться тільки за наявності дозволяючого, тактового імпульсу.

Асинхронний **R-S-тригер**, як і тригер будь-якого іншого типу, характеризується двома станами: логічної “1” та логічного “0”.

Стану логічної “1” відповідає $Q = 1$, $\bar{Q} = 0$; стану логічного “0”: $Q = 0$, $\bar{Q} = 1$.

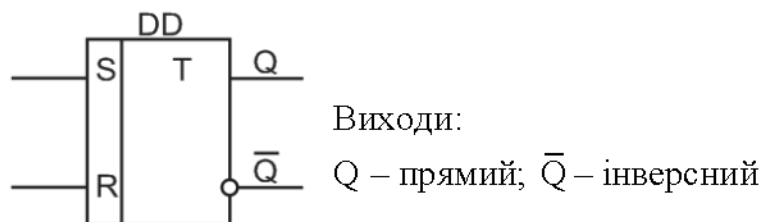


Рисунок 61 – Умовне позначення асинхронного R-S-тригера

По інформаційному входу S проводиться установка тригера в стан логічної “1”, а по інформаційному входу R – установка (перехід тригера в початковий стан) логічного “0”. Цьому відповідають скорочені позначення входів і назва тригера: S (set) – установка, R (reset) – повернення в початковий стан.

Роботу тригера реалізованого на елементах АБО-НІ ілюструє таблиця станів та часові діаграми, які наведені на рисунку 62.

Стан логічної “1” ($Q = 1$) тригер приймає при $S = 1$, $R = 0$. При зворотній комбінації вхідних сигналів ($S = 0$, $R = 1$) тригер встановлюється в стан логічного “0” ($Q = 0$). При комбінації $S = R = 0$ в тригері зберігається попередній стан (“0” або “1”). Комбінація $S = R = 1$ для схеми тригера на елементах АБО-НІ є забороненою зважаючи на невизначеність його стану.

Аналогічно працює R-S-тригер на елементах І-НІ з тією різницею, що він повинен мати інверсні входи.

Для тригера з інверсними входами режим запису логічної “1” реалізується при комбінації $S = 0, R = 1$; режим запису логічного “0” – при $S = 1, R = 0$; при комбінації $S = R = 1$ забезпечується зберігання інформації. Комбінація $S = R = 0$ є забороненою зважаючи на невизначеність його стану.

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

t^n – значення входних сигналів у деякий момент часу;

t^{n+1} – стан тригера в наступний момент часу після приходу чергових імпульсів

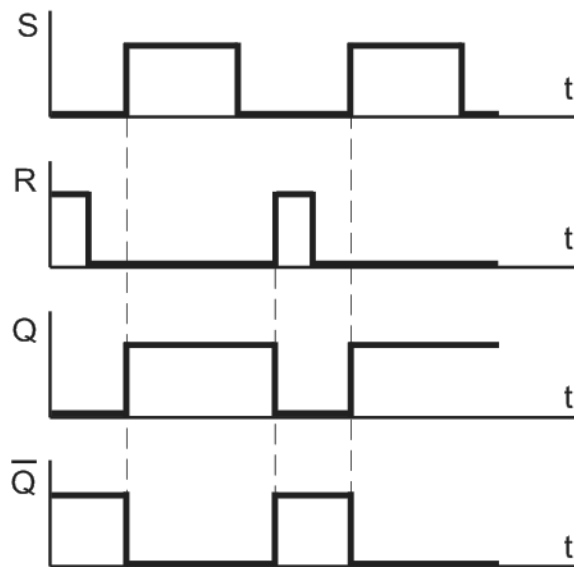


Рисунок 62 – Часові діаграми роботи R-S-тригера

D-тригери мають один інформаційний вхід (D-вхід, на який подається інформація, призначена для занесення в тригер) та вхід синхронізації (C-вхід) або тактовий вхід.

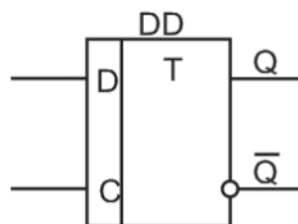


Рисунок 63 – Умовне позначення тактованого D-тригера

Роботу тактованого D-тригера ілюструють таблиця станів та часові діаграми (рисунок 64).

Якщо рівень сигналу на вході $C = 0$, стан тригера стійкий і не залежить від рівня сигналу на інформаційному вході. Під час подачі на вхід синхронізації рівня $C = 1$ інформація на прямому виході

повторюватиме інформацію, що подається на вхід D. Таким чином, перемикання тригера з одного стійкого стану в інше відбувається з появою синхронізуючого (тактового) імпульсу на вході C.

t^n		t^{n+1}	
C	D	Q^{n+1}	$\bar{Q}^{n+1}$
0	0	1	0
1	0	0	1
1	1	1	0
0	1	1	0
0	0	1	0
1	0	0	1

Q^{n+1} – логічний рівень на даному виході після подачі імпульсу синхронізації

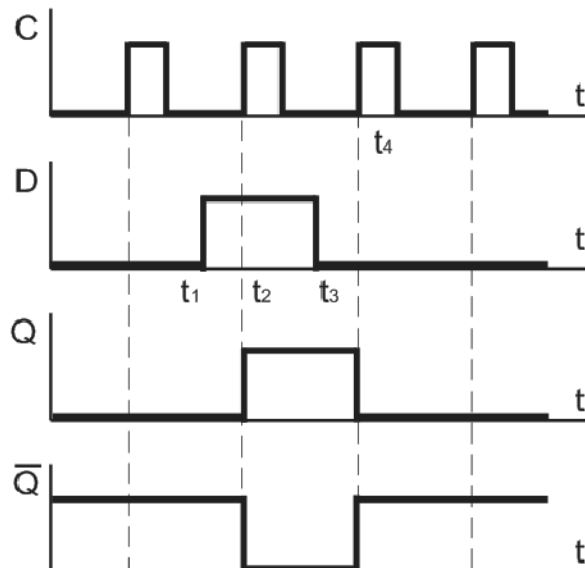


Рисунок 64 – Часові діаграми роботи тактованого D-тригера

T-тригер має один керуючий вхід T і два виходи Q та $\bar{Q}$. Характерною властивістю T-тригера є його перемикання в протилежний стан з приходом кожного чергового входного імпульсу. Його називають також тригером з лічильним запуском.

На рисунку 65 наведено умовне позначення та часові діаграми, що пояснюють принцип дії T-тригера.

З приходом першого імпульсу на вхід T тригер встановлюється в стан логічної “1” ($Q = 1$). Другим імпульсом тригер перемикається в стан логічного “0” і так далі. Як видно з діаграми (рисунок 65, б), частота сигналу на виході T-тригера в два рази нижче за частоту сигналу на вході, тому такий тригер можна використовувати як дільник частоти, а також в лічильниках числа імпульсів.

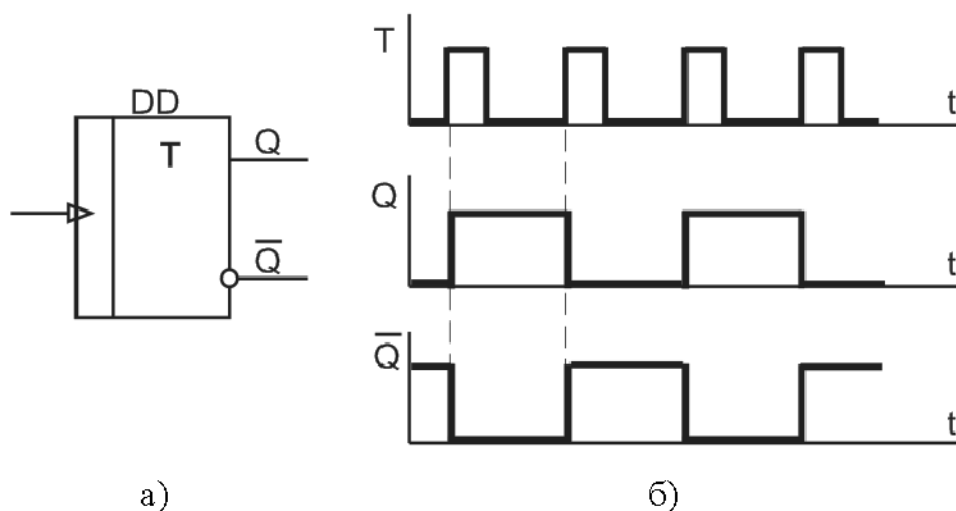


Рисунок 65 – Т-тригер: а – умовне позначення;
б – часові діаграми роботи

Універсальні **Ж-К-тригери** – це пристрої з двома інформаційними входами J і K , які у разі входньої комбінації $J = K = 1$ перемикають тригер в протилежний стан подібно Т-тригеру, а при будь-яких інших комбінаціях вони функціонують як R-S-тригер, у якого роль входів S і R виконують відповідно входи J і K : $J \equiv S$, $K \equiv R$.

При відповідному підключенні входів Ж-К-тригер може виконувати функції R-S, D- і Т-тригерів (рисунок 66).

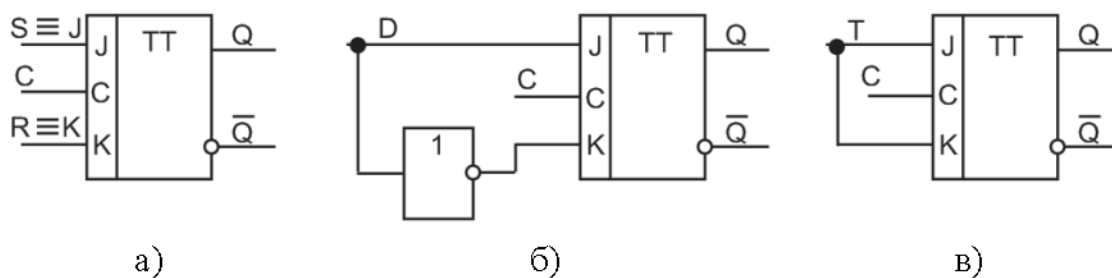


Рисунок 66 – Реалізація тригерів за допомогою універсального Ж-К-тригера: а – R-S-тригера; б – D-тригера; в – Т-тригера

R-S-тригер отримують подачею на вхід J сигналу S ; а на вхід K сигналу R . D-тригер утворюється введенням інвертора в коло входу K . Якщо входи J і K об'єднати і подати на них лічильні імпульси T , отримаємо Т-тригер з лічильним запуском.

У цьому полягає універсальність Ж-К-тригера.

Інтегральні тригери застосовують при побудові складних функціональних пристроїв: лічильників імпульсів, регістрів, пристроїв, що запам'ятовують, дільників частоти і т.д.

2.6.2 Завдання для самостійної роботи

2.6.2.1 Для логічних елементів

1. Описати функціональне призначення логічних елементів: «НІ», «АБО», «АБО-НІ», «І», «І-НІ», «Виключаюче АБО».
2. Привести умовне графічне позначення зазначених логічних елементів.
3. Скласти таблиці істинності логічних елементів.
4. Побудувати часові діаграми роботи логічних елементів.

2.6.2.2 Для тригерів

1. Описати функціональне призначення: RS-, D-, T- і JK-тригерів.
2. Привести умовне графічне позначення зазначених тригерів.
3. Скласти таблиці переходів (стану) тригерів. Таблиця переходів показує стан Q^n тригера в деякий момент часу t^n і стан Q^{n+1} тригера в наступний момент часу t^{n+1} після подачі чергових імпульсів.
4. Побудувати часові діаграми роботи тригерів.
5. Записати в таблицю 8 стан ("0" або "1") логічних елементів і тригерів у схемі, наведеної на рисунку 67. Варіанти завдань наведені в таблиці А.10 (додаток А).

Таблиця 8 – Вихідні сигнали логічних елементів і тригерів

Виходи	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Q1	Q'1	Q2	Q'2
Стан											

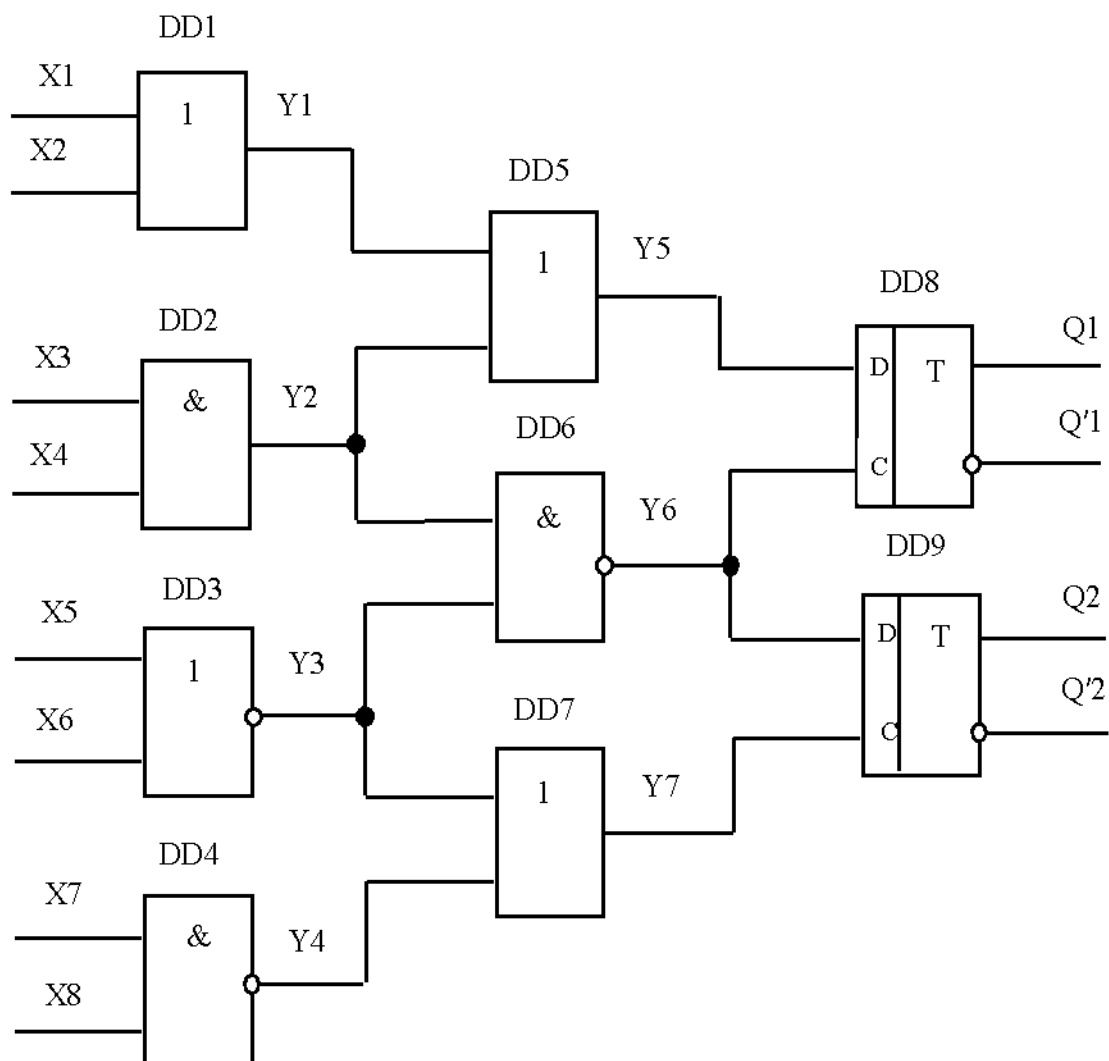


Рисунок 67 – Схема на логічних елементах і тригерах

2.6.3 Порядок виконання роботи

2.6.3.1 Дослідження логічних елементів

1. Запустити програму EWB. Набрати на робочому полі програми схеми для дослідження логічних елементів (рисунок 68). У схемах двохпозиційні перемикачі S1 і S2 подають на входи логічних елементів рівні логічного «0» (контакт перемикача в нижньому положенні) або логічної «1» (контакт перемикача у верхньому положенні).

2. Включити схему. Подаючи перемикачами S1, S2 на входи логічних елементів напруги логічного «0» та «1» і, спостерігаючи рівні сигналів на виході «Y» за допомогою логічних пробників (X1, X2, Y), заповнити таблицю істинності для кожного логічного елемента (таблиця 9).

Таблиця 9 – Результати експериментальних досліджень логічних елементів

«НІ»		«ВИКЛЮЧ. АБО»			«АБО»			«АБО-НІ»			«І»			«І-НІ»		
X	Y	X1	X2	Y	X1	X2	Y	X1	X2	Y	X1	X2	Y	X1	X2	Y
0		0	0		0	0		0	0		0	0		0	0	
1		1	0		1	0		1	0		1	0		1	0	
×	×	0	1		0	1		0	1		0	1		0	1	
×	×	1	1		1	1		1	1		1	1		1	1	

3. Відповідно до таблиць істинності (таблиця 9) побудувати часові діаграми роботи логічних елементів.

2.6.3.2 Дослідження тригерів

1. Набрати на робочому полі програми EWB схеми для дослідження тригерів (рисунок 69).

2. Включити схему. Подаючи перемикачами S1, S2 на входи тригерів сигнали у відповідності з таблицею 10 і, спостерігаючи рівні сигналів на прямому Q та інверсному Q' виходах тригерів, заповнити таблицю станів для кожного тригера (таблиця 10).

Примітка: у схемі (рисунок 69, в) функції Т-тригера виконує D-тригер.

3. Відповідно до таблиць станів (таблиця 10) побудувати часові діаграми роботи тригерів.

Таблиця 10 – Результати експериментальних досліджень тригерів

RS-тригер				D-тригер				T-тригер		
t^{n+1}		Q^n	Q^{n+1}	t^{n+1}		Q^n	Q^{n+1}	t^{n+1}	Q^n	Q^{n+1}
R	S			D	C			T		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1			0	1			1		
0	0			1	0			0		
1	0			1	1			1		
0	0			0	0			0		
0	1			0	1			1		
0	0			0	0			0		

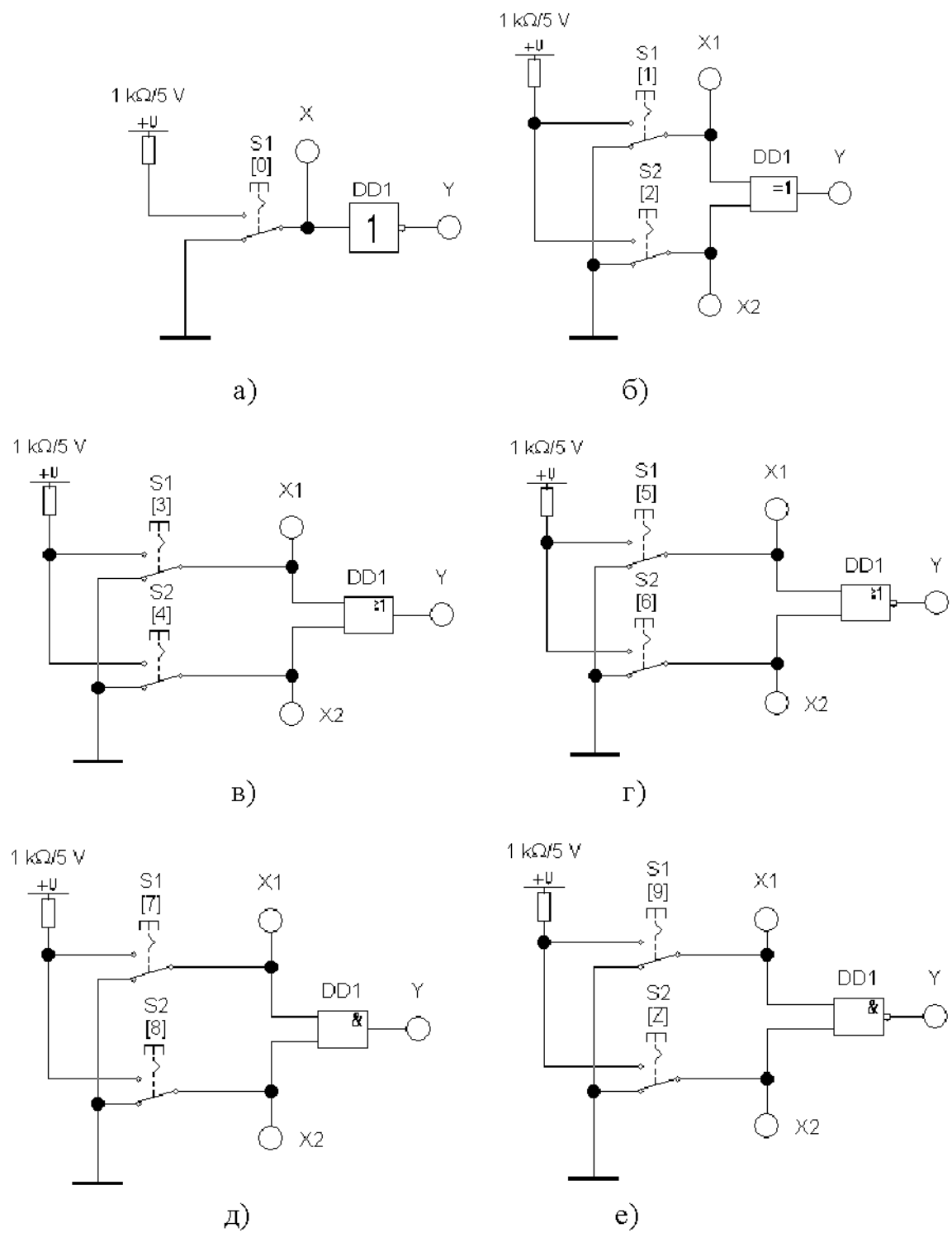


Рисунок 68 – Схеми для дослідження логічних елементів: а) «НІ»; б) «Виключаюче АБО»; в) «АБО»; г) «АБО-НІ»; д) «І»; е) «І-НІ»

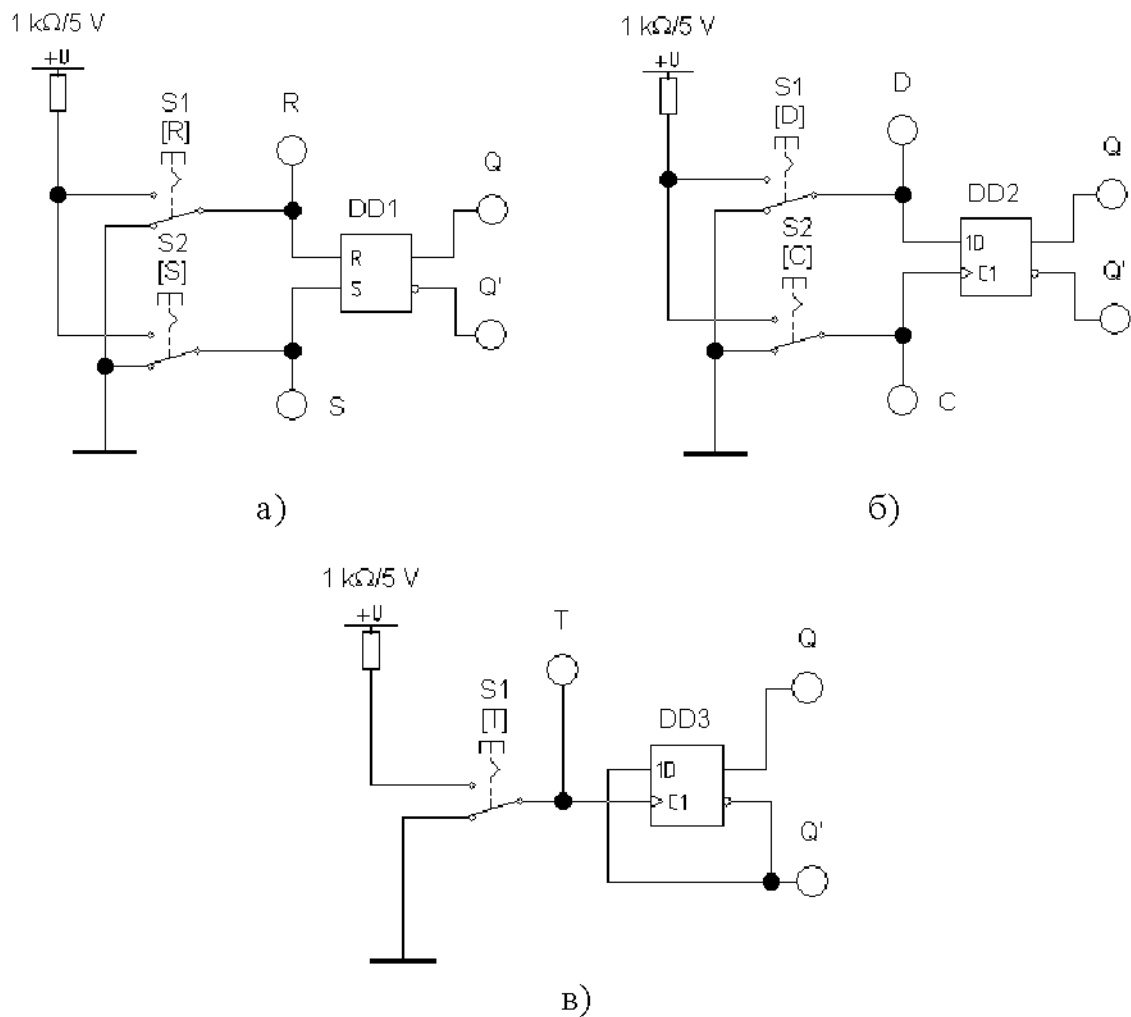


Рисунок 69 – Схеми для дослідження тригерів: а) RS-тригера; б) D-тригера; в) T-тригера

2.6.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз теоретичних і експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Поясніть поняття логічних величин (логічного нуля та логічної одиниці).
2. Назвіть основні логічні функції та елементи, які їх реалізують.

3. Поясніть призначення логічних елементів.
4. Наведіть основні параметри логічних елементів.
5. Наведіть умовне позначення, таблицю істинності та поясніть роботу логічних елементів: «НІ», «АБО», «АБО-НІ», «І», «І-НІ», «Виключаюче АБО».
6. Поясніть призначення тригерів.
7. Назвіть основні типи тригерів.
8. Поясніть функціональне призначення входів тригерів.
9. Поясніть різницю між асинхронним і синхронним тригерами.
10. Наведіть умовне позначення, таблицю переходів та поясніть роботу: RS-тригера, D-тригера, Т-тригера, JK-тригера.

2.7 ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛОВАЧАХ

Мета роботи: вивчення принципу роботи і дослідження імпульсних пристроїв на операційних підсилювачах: а) компаратора; б) тригера Шмітта; в) мультивібратора; г) одновібратора.

2.7.1 Загальні теоретичні відомості

Компаратор – це пристрій, який призначений для порівняння двох напруг, що поступають на його входи. Компаратор здійснює порівняння вимірюваної входної напруги ($U_{ВХ}$) з опорною напругою ($U_{ОП}$).

Опорною напругою є незмінна за величиною напруга позитивної або негативної полярності, а входна напруга змінюється в часі. При досягненні входної напруги рівня опорної напруги відбувається зміна полярності напруги на виході ОП, наприклад з $U_{ВІХ\ MAX}^+$ на $U_{ВІХ\ MIN}^-$.

Різниця напруг $U_{ВХ} - U_{ОП}$ є входною напругою U_0 ОП, що і визначає передатну характеристику компаратора (рисунок 70, б). При $U_{ВХ} < U_{ОП}$ напруга $U_0 < 0$, у зв'язку з чим $U_{ВІХ} = U_{ВІХ\ MAX}^+$. При $U_{ВХ} > U_{ОП}$ напруга $U_0 > 0$ та $U_{ВІХ} = U_{ВІХ\ MIN}^-$.

Зміна полярності вихідної напруги відбувається під час переходу входної вимірюваної напруги через значення $U_{ОП}$.

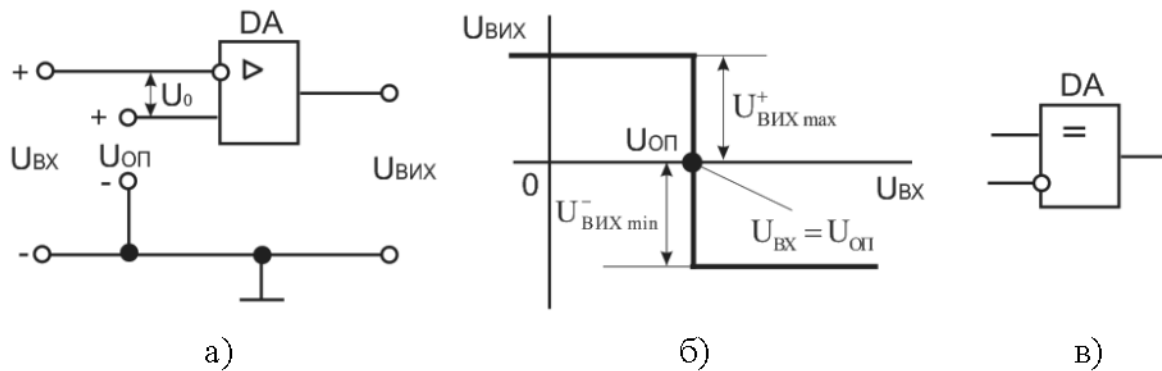


Рисунок 70 – Компаратор: а – схема компаратора на операційному підсилювачі; б – передатна характеристика; в – умовне позначення

Широке застосування отримав також компаратор, в якому ОП охоплений додатним зворотним зв'язком, який здійснюється по неінвертуючому входу за допомогою резисторів R_1 та R_2 (рисунок 71, а). Такий компаратор має передатну характеристику з гістерезисом. Схема відома під назвою тригера Шмітта.

Тригер Шмітта – це пристрій, який призначений для формування напруги прямокутної форми з вхідної напруги довільної форми.

Тригер Шмітта є пороговим елементом, рівні вмикання і вимикання якого не співпадають. Різниця в рівнях називається гістерезисом перемикавання.

Перемикання схеми в стан $U_{\text{вих min}}^-$ відбувається при досягненні вхідною напругою ($U_{\text{вх}}$) напруги (порогу) спрацювання ($U_{\text{спр}}$), а повернення в початковий стан $U_{\text{вих}} = U_{\text{вих max}}^+$ – при зниженні $U_{\text{вх}}$ до напруги порогу відпускання ($U_{\text{відп}}$).

Значення порогової напруги:

$$U_{\text{спр}} = [R_1 / (R_1 + R_2)] \times U_{\text{вих max}}^+; \quad (26)$$

$$U_{\text{відп}} = - [R_1 / (R_1 + R_2)] \times U_{\text{вих min}}^-, \quad (27)$$

звідки ширина зони гістерезису

$$U_{\Gamma} = U_{\text{спр}} - U_{\text{відп}} = [R_1 / (R_1 + R_2)] \times (U_{\text{вих max}}^+ + U_{\text{вих min}}^-). \quad (28)$$

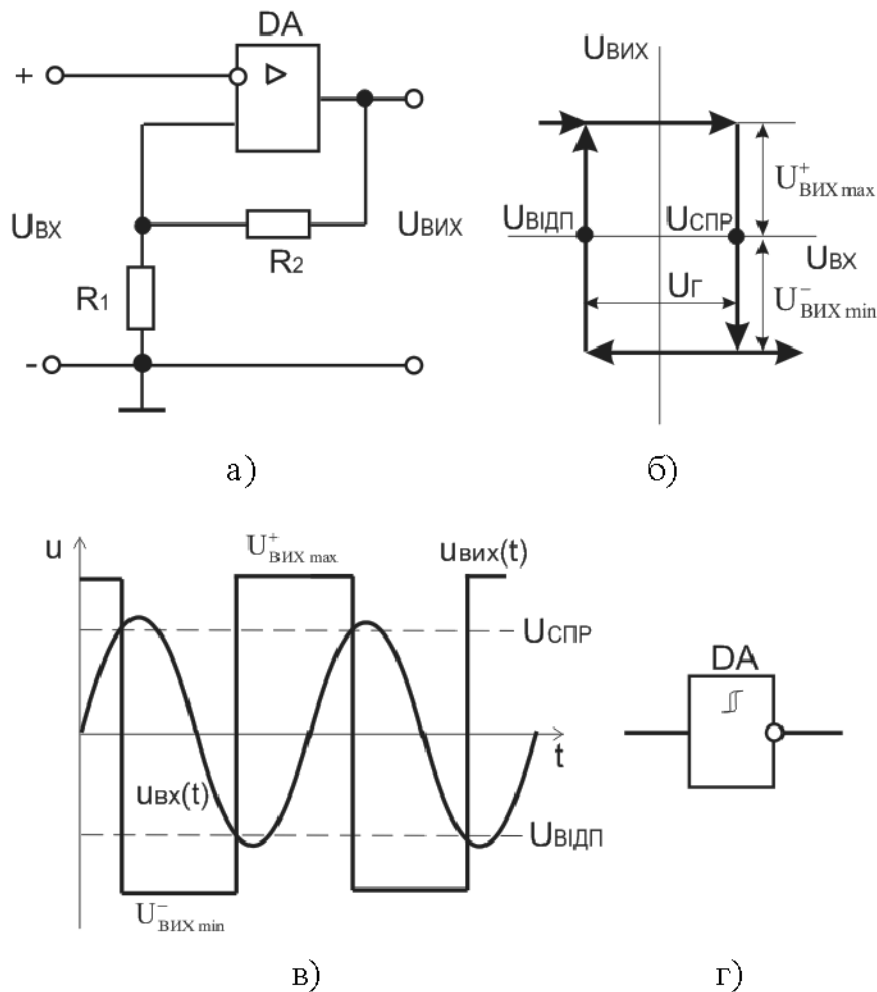


Рисунок 71 – Інвертуючий тригер Шмітта на операційному підсилювачі: а – схема; б – передатна характеристика; в – часові діаграми, що пояснюють принцип формування напруги прямокутної форми з синусоїдальної; г – умовне позначення

Компаратори знайшли застосування в системах автоматичного керування та у вимірювальній техніці, а також для побудови різних вузлів імпульсної та цифрової дії (зокрема, аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів).

Мультивібратор – це пристрій, який призначений для генерування періодичної послідовності імпульсів напруги прямокутної форми з необхідними параметрами (амплітудою, тривалістю, частотою надходження та ін.).

Подібно до генераторів синусоїдальних коливань, мультивібратори працюють в режимі самозбудження: для формування імпульсного сигналу в мультивібраторах не потрібна зовнішня дія, наприклад подача входних сигналів. Процес отримання імпульсної напруги ґрунтується на перетворенні

енергії джерела постійного струму.

Мультивібратори можуть працювати в одному з трьох режимів: 1) очікування; 2) автоколивань; 3) синхронізації.

Мультивібратор, що працює в режимі очікування, називають **одновібратором**.

На рисунку 72 наведена схема і часові діаграми роботи симетричного мультивібратора на ОП. Мультивібратор виконаний на основі інвертуючого тригера Шмітта, в якому від'ємний зворотний зв'язок здійснюється через RC-коло, а додатний через дільник на резисторах R1 і R2. Автоколивальний режим роботи створюється завдяки підключенню до інвертуючого входу ОП часозадавальної ланки з конденсатора C і резистора R.

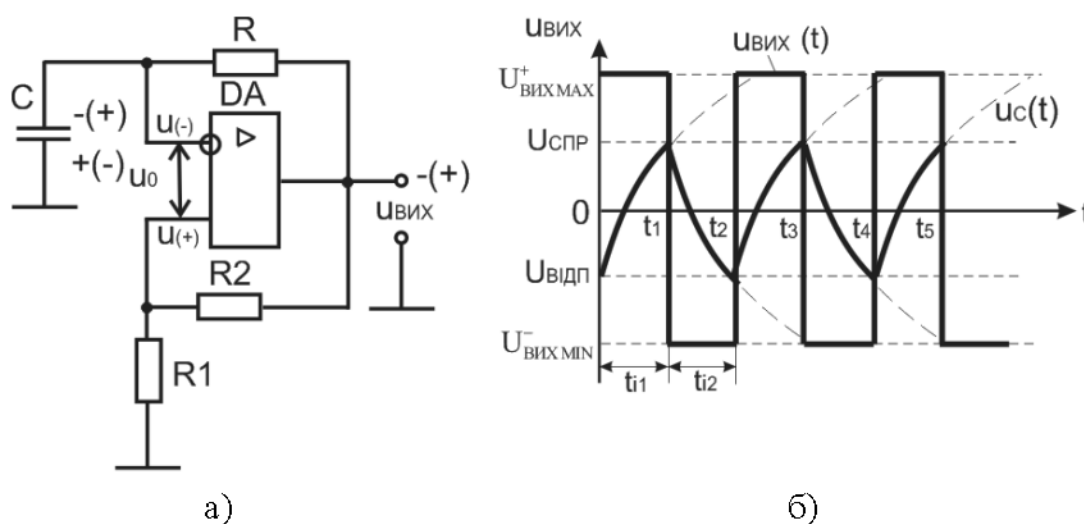


Рисунок 72 – Симетричний мультивібратор на операційному підсилювачі: а – схема; б – часові діаграми роботи

Частота надходження імпульсів симетричного мультивібратора

$$f = 1/T = 1/(t_{i1} + t_{i2}) = 1/2 t_i. \quad (29)$$

Тривалість імпульсу мультивібратора

$$t_i = RC \ln [1+(2R_1/R_2)], \quad (30)$$

а період $T = 2t_i$.

Одновібратор (очікуючий мультивібратор) – це пристрій, який призначений для формування імпульсу напруги прямокутної форми з

необхідною тривалістю і амплітудою при дії на вході короткого запускаючого імпульсу.

На рисунку 73 наведена схема одновібратора на ОП і часові діаграми його роботи. Її основою служить схема мультівібратора рисунок 72, в якій для створення роботи в режимі очікування паралельно конденсатору С увімкнений діод VD1. При показаному на рисунку 73 напрямі увімкнення діода VD1 схема запускається вхідним імпульсом напруги позитивної полярності.

Тривалість імпульсу, що формується одновібратором

$$t_i = RC \ln(1 + R_1/R_2). \quad (31)$$

Час відновлення одновібратора

$$t_B = RC \ln [(2R_1 + R_2)/(R_1 + R_2)]. \quad (32)$$

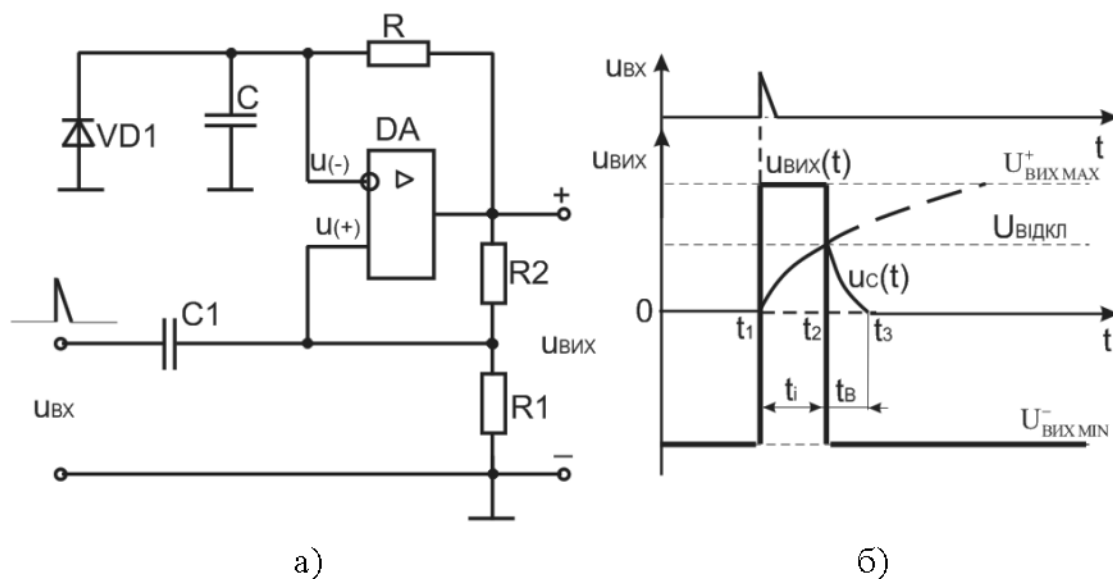


Рисунок 73 – Одновібратор на операційному підсилювачі:

а – схема; б – часові діаграми роботи

2.7.2 Завдання для самостійної роботи

2.7.2.1 Для компаратора

1. Привести визначення компаратора (описати функціональне призначення компаратора).
2. Привести схему компаратора.

3. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи компаратора.

4. Побудувати графік залежності $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$. Опорна напруга $U_{\text{оп}}$ подана на неінвертуючий вхід операційного підсилювача, а вхідна синусоїдальна напруга подана на інвертуючий вхід (див. рисунок 74). Значення напруг наведені в таблиці А.11 (додаток А).

5. Представити графіки зміни в часі вихідної напруги компаратора $u_{\text{вих}} = f(t)$ і вхідної синусоїдальної напруги $u_{\text{вх}} = f(t)$.

2.7.2.2 Для тригера Шмітта

1. Привести визначення тригера Шмітта.

2. Привести схему тригера Шмітта.

3. Описати призначення резисторів R_1 і R_2 дільника напруги і принцип роботи тригера Шмітта.

4. Визначити значення граничних напруг $U_{\text{спр}}$ і $U_{\text{відп}}$ тригера Шмітта при $U_{\text{оп}} = 0$ і $U_{\text{оп}} > 0$. Значення опорної напруги наведені в таблиці А.12 (додаток А).

5. Побудувати графік залежності $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$. Варіанти завдань наведені в таблиці А.12.

6. Представити графік зміни в часі вихідної напруги тригера $u_{\text{вих}} = f(t)$ і вхідної синусоїдальної напруги $u_{\text{вх}} = f(t)$.

2.7.2.3 Для мультивібратора

1. Привести визначення мультивібратора.

2. Привести схему мультивібратора.

3. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи мультивібратора.

4. Розрахувати тривалість $[t_i = RC \ln(1 + 2R_1/R_2)]$ і частоту проходження імпульсів мультивібратора. Варіанти завдань наведені в таблиці А.13 (додаток А).

5. Представити на одному рисунку графіки зміни напруг у часі на інвертуючому вході $u_c = f(t)$ і виході операційного підсилювача $u_{\text{вих}} = f(t)$.

6. Привести схему несиметричного мультивібратора.

7. Представити (для несиметричного мультивібратора) графіки зміни напруг у часі на інвертуючому вході $u_c = f(t)$ і виході операційного підсилювача $u_{\text{вих}} = f(t)$.

8. Описати можливі способи зміни тривалості імпульсів, що генеруються мультівібратором.

2.7.2.4 Для одновібратора

1. Привести визначення одновібратора.
2. Привести схему одновібратора.
3. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи одновібратора.
4. Розрахувати тривалість імпульсу $[t_i = RC \ln(1 + R_1/R_2)]$ і час відновлення одновібратора $[t_b = RC \ln[(2R_1 + R_2)/(R_1 + R_2)]]$. Варіанти завдань наведені в таблиці А.14 (додаток А).
5. Представити графіки зміни напруг у часі на інвертуючому $u_c = f(t)$ і неінвертуючому $u_{вх} = f(t)$ входах і виході $u_{вих} = f(t)$ операційного підсилювача.
6. Пояснить, які зміни потрібно виконати в схемі, щоб змінити полярність імпульсу, що генерується одновібратором?

2.7.3 Порядок виконання роботи

2.7.3.1 Дослідження компаратора

1. Запустити програму EWB і набрати схему для дослідження компаратора (рисунок 74).
2. Установити величину заданої опорної напруги $U_{оп}$ згідно таблиці А.11 (додаток А).
3. На віртуальному генераторі встановити задані значення напруги $U_{мвх}$ (синусоїдальної форми) і частоти вхідного сигналу.
4. Лінію, що з'єднує вихід операційного підсилювача (компаратора) і вхід "В" віртуального осцилографа встановити кольоровою.
5. Привести осцилограми вхідної $u_{вх} = f(t)$ і вихідної $u_{вих} = f(t)$ напруги компаратора (див. рисунок 75).

2.7.3.2 Дослідження тригера Шмітта

1. На робочому полі програми набрати схему для дослідження тригера Шмітта (рисунок 76).
2. Установити величину вхідної напруги $U_{мвх}$ відповідно до варіанта завдання таблиця А.12 (додаток А) і величину опорної напруги $U_{оп} = 0$.
3. Привести осцилограми вхідної $u_{вх} = f(t)$ і вихідної $u_{вих} = f(t)$ напруги тригера Шмітта (див. рисунок 77).

4. Установити величину вхідної $U_{m\text{ вх}}$ і опорної напруги $U_{оп} > 0$ відповідно до варіанта завдання таблиця А.12 (додаток А).

5. Привести осцилограми вхідної $u_{вх} = f(t)$ і вихідної $u_{вих} = f(t)$ напруги тригера Шмітта (див. рисунок 78).

2.7.3.3 Дослідження мультівібратора

1. Запустити програму EWB і набрати схему для дослідження мультівібратора (рисунок 79).

2. Установити задані значення елементів схеми. Варіанти завдань наведені в таблиці А.13 (додаток А).

3. Лінію, що з'єднує вихід операційного підсилювача (мультівібратора) і вхід "В" віртуального осцилографа встановити кольоровою.

4. Привести осцилограми вхідної $u_{вх} = f(t)$ і вихідної $u_{вих} = f(t)$ напруги мультівібратора (див. рисунок 80).

5. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити тривалість і період імпульсів, що генеруються мультівібратором.

6. Перемикачем S1 підключити додаткове електричне коло, що складається з діода VD і резистора R'. Установити задане значення опору резистора R' згідно таблиці А.13 (додаток А).

7. Виконати пп. 3 - 5.

2.7.3.4 Дослідження одновібратора

1. На робочому полі програми набрати схему для дослідження одновібратора (рисунок 82).

2. Установити задані значення елементів схеми. Варіанти завдань наведені в таблиці А.14 (додаток А).

3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

4. Перемикачем S1 підключити джерело вхідного сигналу до входу операційного підсилювача.

5. Привести осцилограми напруг на входах операційного підсилювача $u_{вх} = f(t)$, $u_c = f(t)$ і вихідної напруги $u_{вих} = f(t)$ одновібратора (див. рисунок 83).

6. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити тривалість імпульсу, що генеруються одновібратором і час відновлення одновібратора.

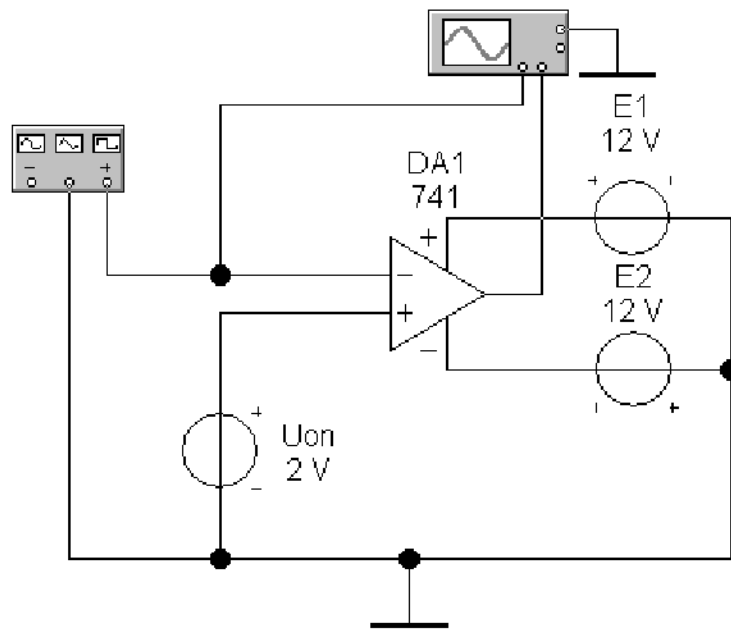


Рисунок 74 – Схема для дослідження компаратора

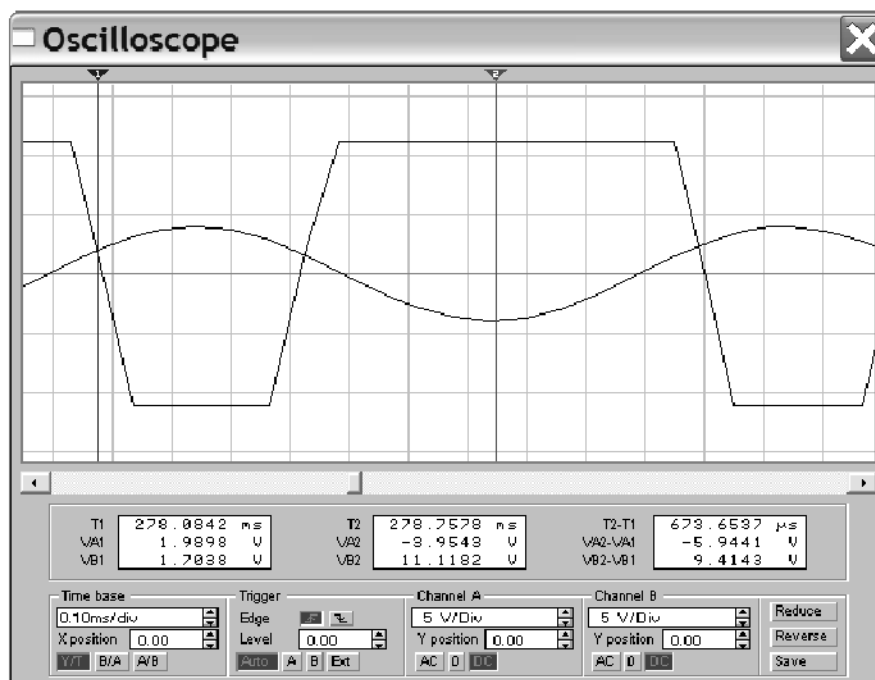


Рисунок 75 – Осцилограми напруг компаратора

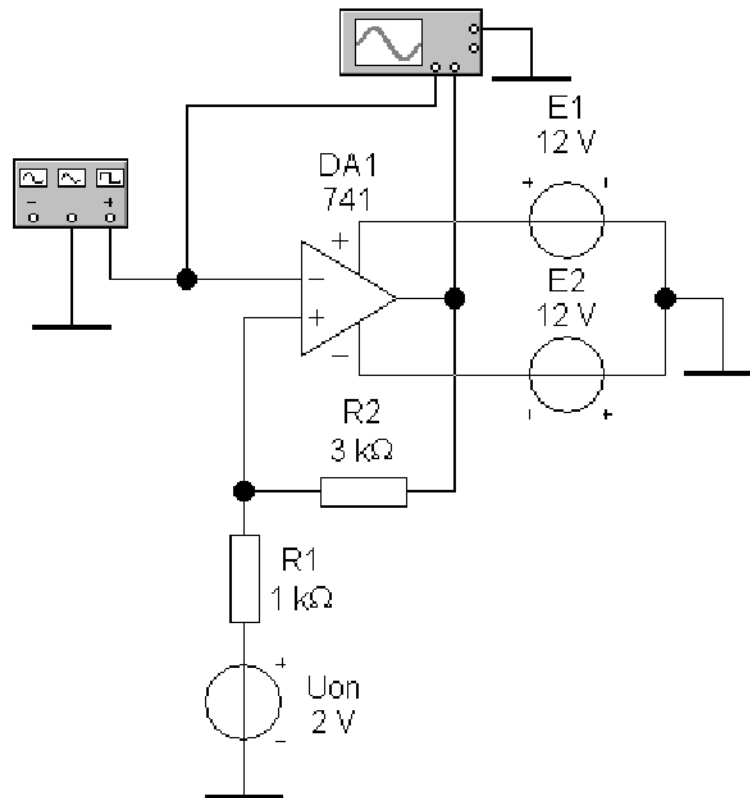


Рисунок 76 – Схема для дослідження тригера Шмітта

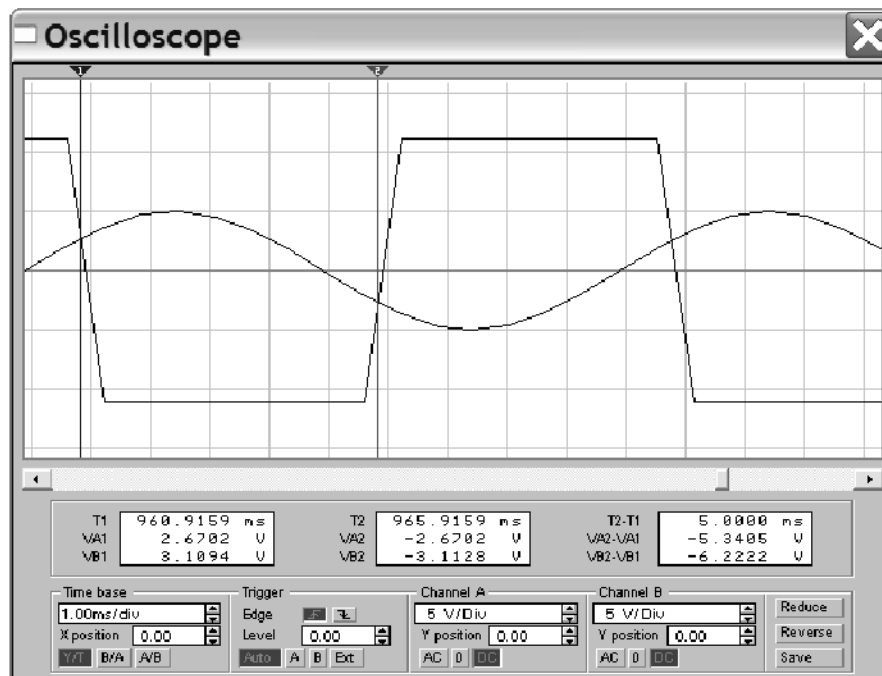


Рисунок 77 – Осцилограми напруг тригера Шмітта при $U_{on}=0$

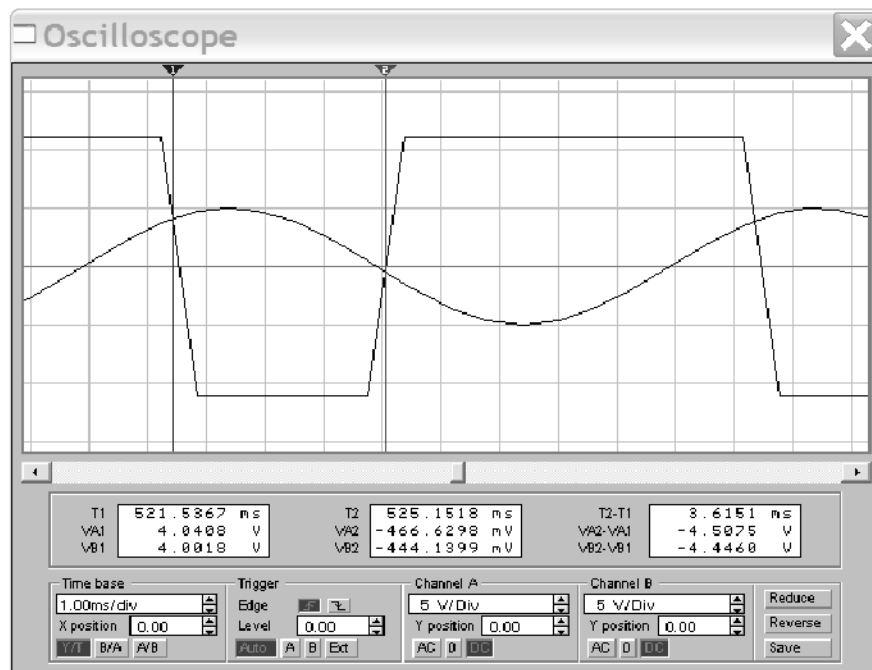


Рисунок 78 – Осцилограми напруг тригера Шмітта при $U_{оп} > 0$

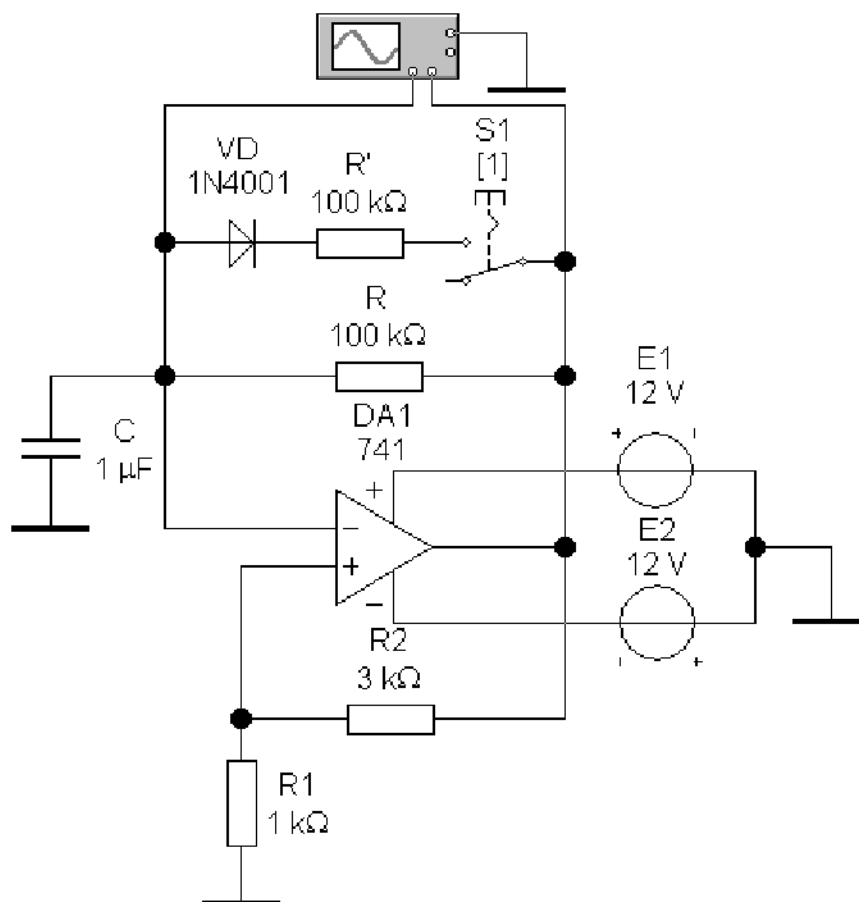


Рисунок 79 – Схема для дослідження мультивібратора

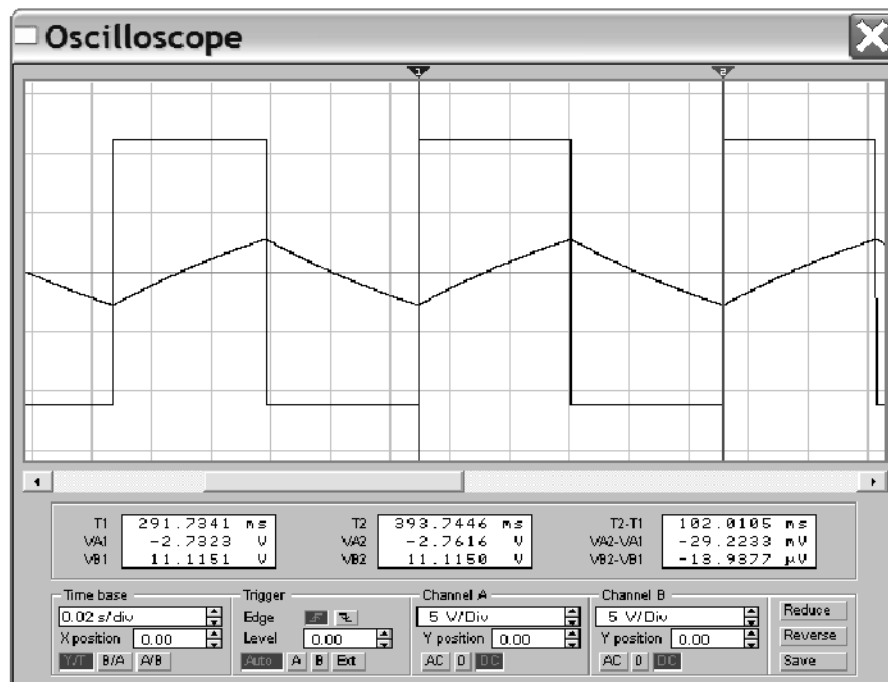


Рисунок 80 – Осцилограми напруг симетричного мултивібратора

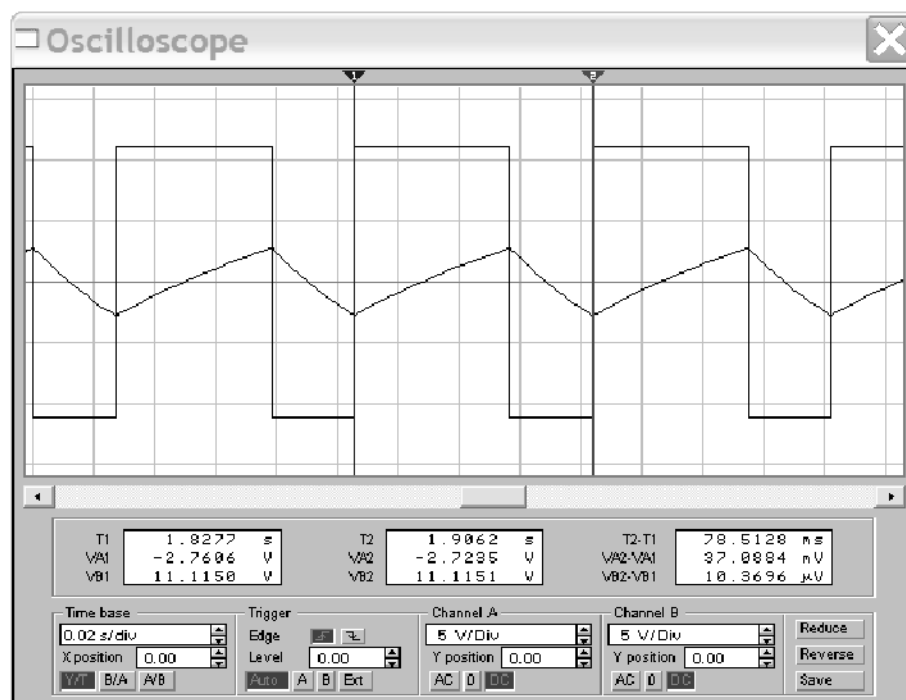


Рисунок 81 – Осцилограми напруг несиметричного мултивібратора

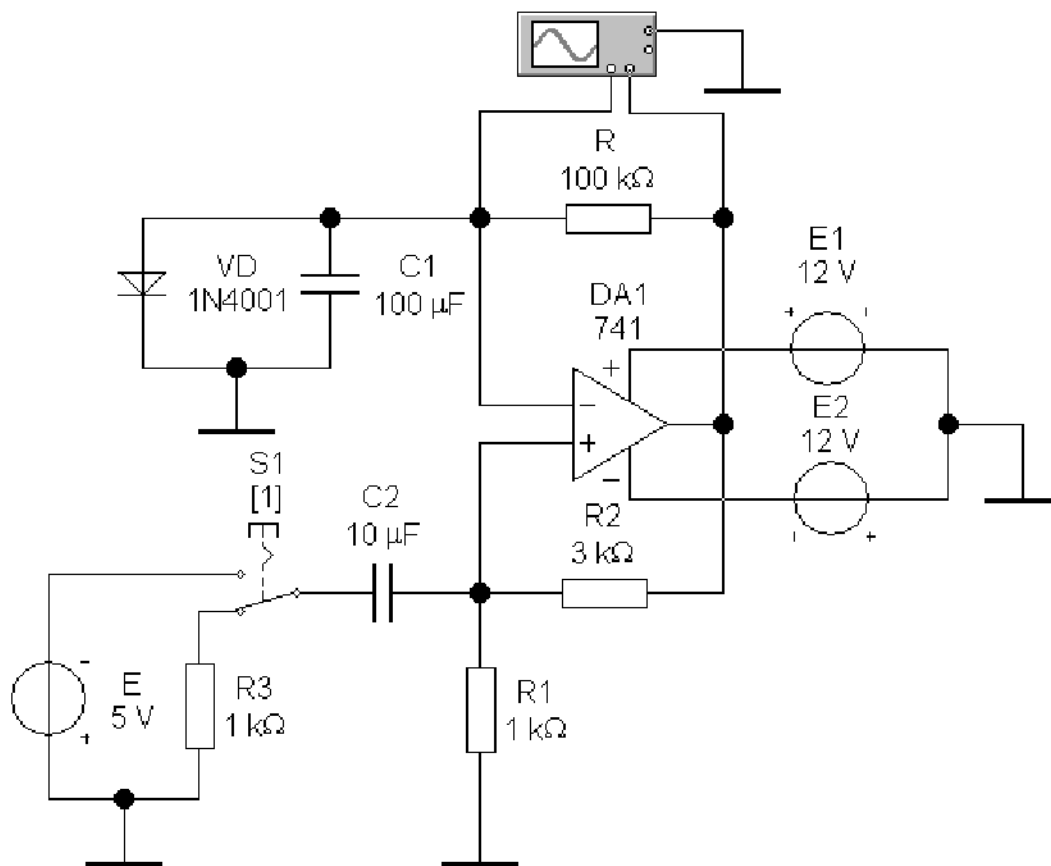


Рисунок 82 – Схема для дослідження одновібратора

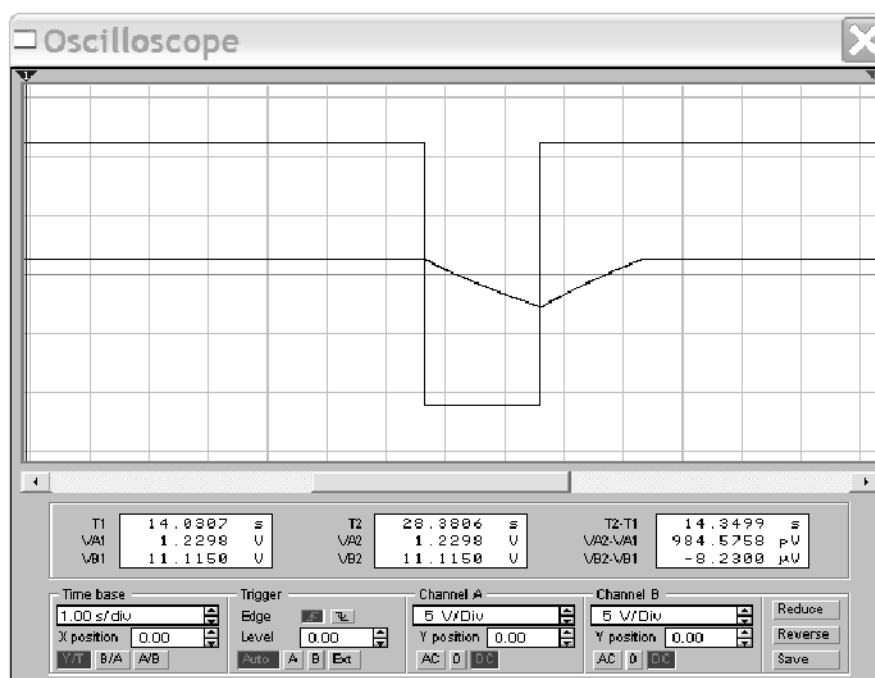


Рисунок 83 – Осцилограми напруг одновібратора

2.7.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз і порівняння теоретичних і експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Наведіть визначення електричного імпульсу. Наведіть форми імпульсних сигналів.
2. Наведіть параметри імпульсів та їх послідовностей.
3. Поясніть призначення компараторів.
4. Наведіть умовне графічне позначення та передатну характеристику компаратора.
5. Наведіть схему компаратора на операційному підсилювачі та поясніть принцип її роботи.
6. Поясніть призначення тригера Шмітта.
7. Наведіть умовне графічне позначення та передатну характеристику тригера Шмітта.
8. Наведіть схему тригера Шмітта на операційному підсилювачі та поясніть принцип її роботи.
9. Поясніть призначення мультивібраторів.
10. Назвіть режими роботи мультивібраторів.
11. Наведіть схему симетричного мультивібратора на операційному підсилювачі. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.
12. Наведіть схему несиметричного мультивібратора на операційному підсилювачі. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.
13. Поясніть, яка відмінність між симетричним і несиметричним мультивібраторами?
14. Поясніть, чим визначається тривалість імпульсів мультивібратора? Як визначити частоту імпульсів мультивібратора?
15. Поясніть призначення одновібраторів.
16. Наведіть схему одновібратора на операційному підсилювачі. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.
17. Назвіть основні параметри мультивібраторів, одновібраторів.

18. Поясніть, як зміняться параметри імпульсної напруги симетричного мультівібратора на базі операційного підсилювача при збільшенні опору резистора в колі від'ємного зворотного зв'язку; зменшенні ємності конденсатора?

19. Поясніть, як зміняться параметри імпульсної напруги одновібратора на базі операційного підсилювача при збільшенні опору резистора в колі від'ємного зворотного зв'язку; збільшенні ємності конденсатора часозадавальної ланки; зміні напрямку включення діода?

2.8 ГЕНЕРАТОРИ ЛІНІЙНО ЗМІНЮВАНОЇ (ПІЛКОПОДІБНОЇ) НАПРУГИ

Мета роботи: вивчення принципу роботи і дослідження генераторів лінійно змінюваної (пилкоподібної) напруги.

2.8.1 Загальні теоретичні відомості

Лінійно змінюваною (пилкоподібною) напругою (ЛЗН) називають імпульсну напругу, яка впродовж деякого часу змінюється практично за лінійним законом, а потім повертається до вихідного рівня.

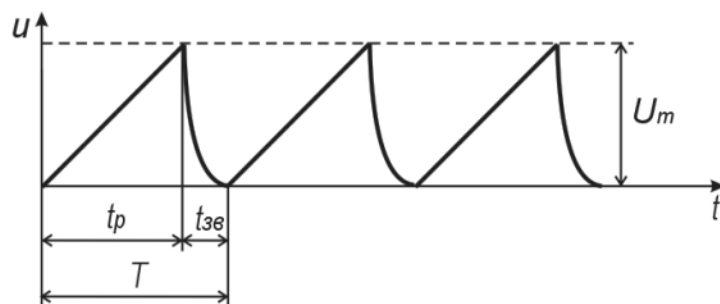


Рисунок 84 – Часові діаграми лінійно змінюваної напруги

Лінійно змінювана напруга характеризується наступними основними параметрами: періодом T , тривалістю робочого ходу t_p , тривалістю зворотного ходу t_{ze} , амплітудою U_m , коефіцієнтом нелінійності ε .

Формування лінійно змінюваної напруги засновано на чергуванні в часі процесів зарядження і розрядження конденсатора.

Схема транзисторного ГЛН (генератора пилкоподібної напруги) зображена на рисунку 85.

Схема працює наступним чином. За позитивної напівхвилі напруги u_2

транзистор VT відкритий, конденсатор C розряджений, вихідна напруга $u_n = 0$.

За негативної напівхвилі напруги u_2 транзистор закривається, а конденсатор заряджається по колу (+E_к, R2, R3, C, -E_к).

За наступної позитивної напівхвилі напруги u_2 , транзистор знову відкривається і конденсатор швидко розряджається до нуля через резистор R3, що обмежує струм через транзистор.

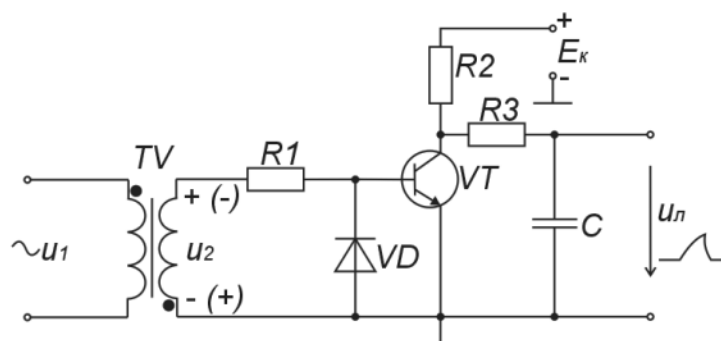


Рисунок 85 – Транзисторний генератор пилкоподібної напруги

У сучасних пристроях частіше застосовують генератори лінійно змінюваної напруги, які побудовані на основі інтегратора, виконаного на операційному підсилювачі і доповненого розрядним транзисторним ключем (рисунок 86). Інтегратор складається з елементів R2, C, DA2. Розрядний транзистор VT емітером підключений до інвертуючого входу операційного підсилювача DA2, що має нульовий потенціал. Синхронізує роботу генератора з напругою мережі нуль-орган на операційному підсилювачі DA1.

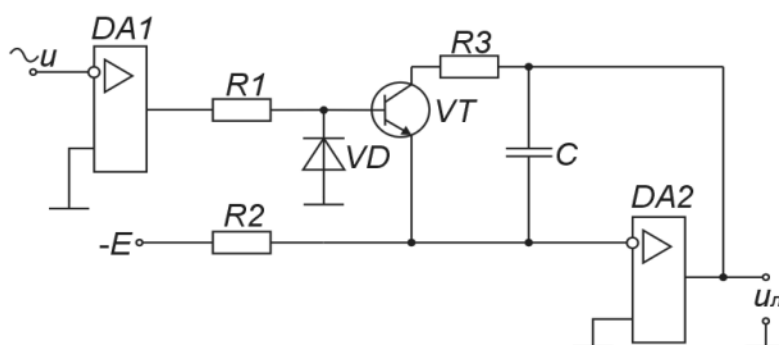


Рисунок 86 – Генератор пилкоподібної напруги на операційному підсилювачі

2.8.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення генератора лінійно змінюваної (пилкоподібної) напруги (ГЛЗН).
2. Привести часову діаграму імпульсного сигналу пилкоподібної форми $u = f(t)$. Вказати на ній основні параметри лінійно змінюваної напруги.
3. Привести схему ГЛЗН на біполярному транзисторі. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи генератора.
4. Привести схему ГЛЗН на операційному підсилювачі. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи генератора.

2.8.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для дослідження ГЛЗН на біполярному транзисторі (рисунок 87).
2. Установити задані параметри елементів схеми.
3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.
4. Включити схему. З віртуального осцилографа привести осцилограми напруг на виході генератора лінійно змінюваної напруги $u_{\text{вих}} = f(t)$ і імпульсів, які формуються генератором G $u_{\text{ск}} = f(t)$ (див. рисунок 88).
5. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити параметри лінійно змінюваної напруги: амплітуду U_m , тривалість робочого (прямого) ходу t_p , тривалість зворотного ходу t_{zv} і період повторення імпульсів T .
6. Провести додаткові дослідження залежності параметрів і форми вихідних імпульсів генератора лінійно змінюваної напруги (рисунок 87) від величини опору резистора R_2 ($R_2 = 2R_2$; $R_2 = R_2/2$) і ємності конденсатора C ($C = 2C$; $C = C/2$). Провести аналіз отриманих результатів.
7. Набрати схему для дослідження ГЛЗН на операційному підсилювачі (рисунок 89).
8. Установити задані параметри елементів схеми.
9. Включити схему. З віртуального осцилографа привести осцилограми напруг на виході генератора $u_{\text{вих}} = f(t)$ (див. рисунок 90).
10. За допомогою віртуального осцилографа визначити параметри

лінійно змінюваної напруги: амплітуду U_m , тривалість робочого (прямого) ходу t_p , тривалість зворотного ходу $t_{зв}$ і період повторення імпульсів T .

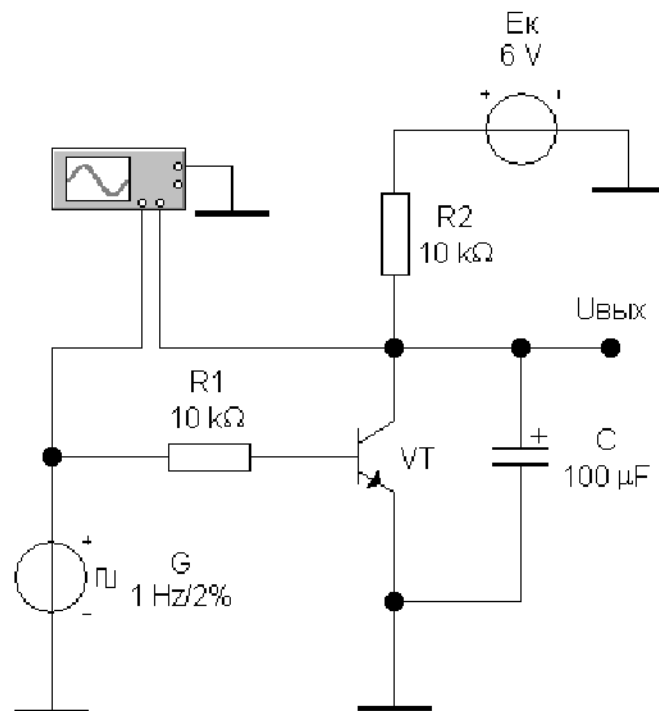


Рисунок 87 – Схема для дослідження генератора лінійно змінюваної напруги на біполярному транзисторі

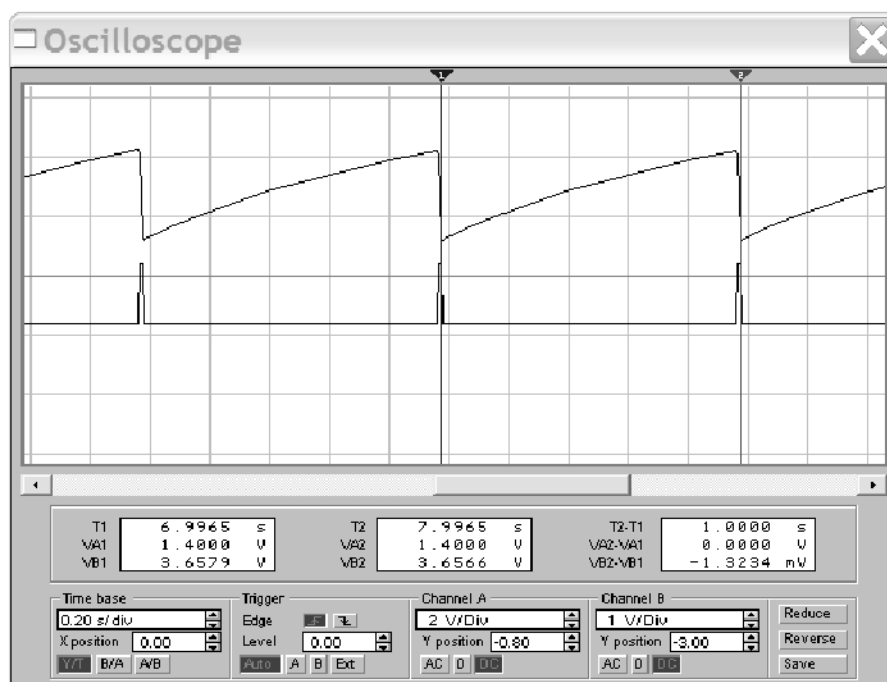


Рисунок 88 – Осцилограми напруг генератора лінійно

змінюваної напруги на біполярному транзисторі

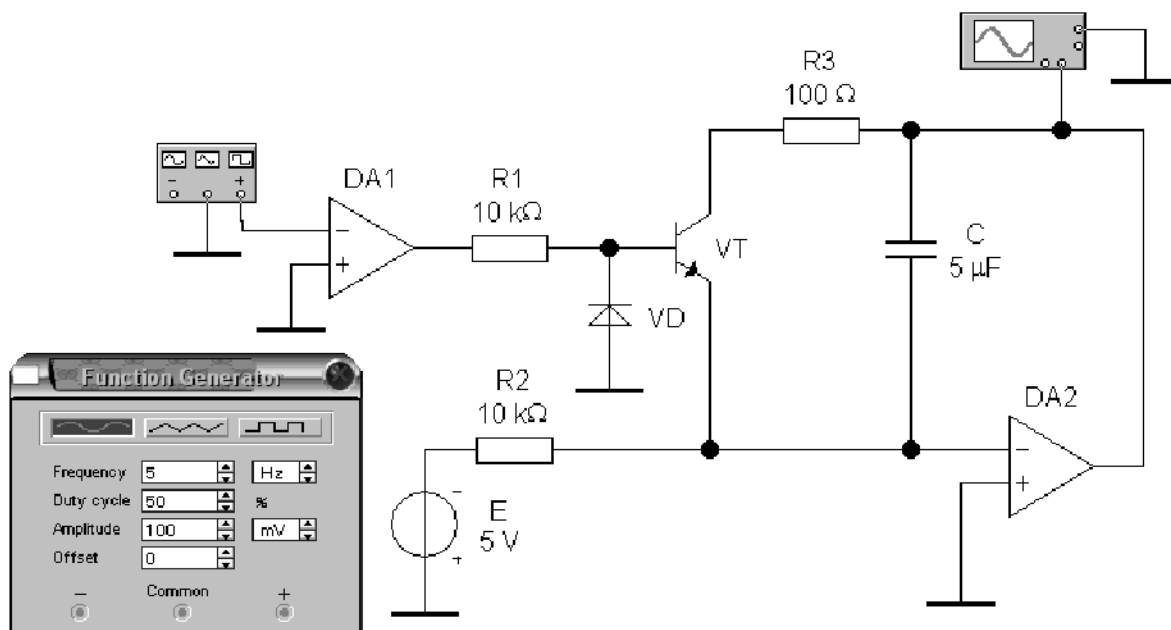


Рисунок 89 – Схема для дослідження генератора лінійно змінюваної напруги на операційному підсилювачі

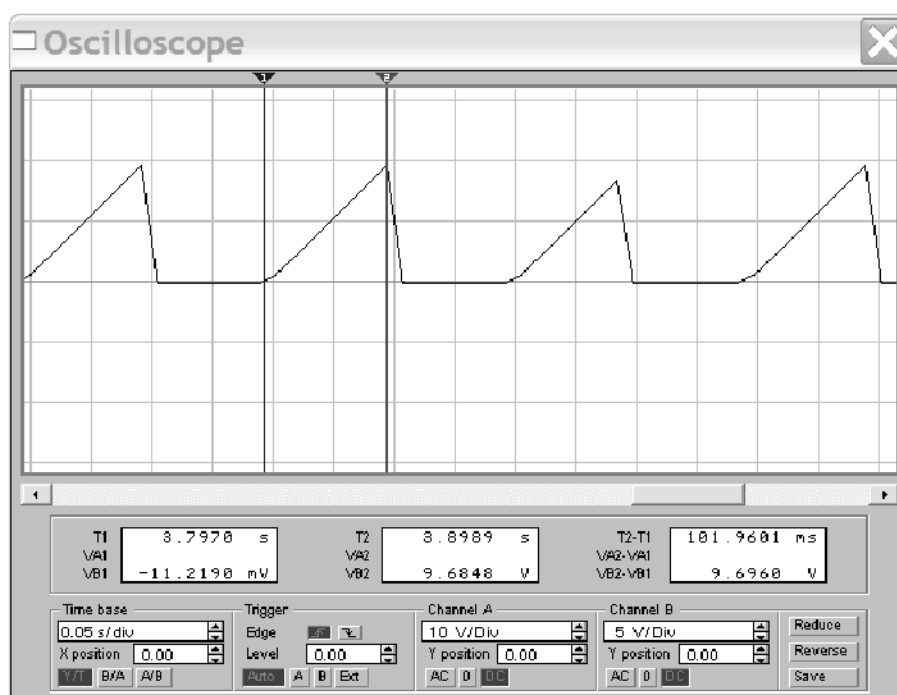


Рисунок 90 – Осцилограми напруг генератора лінійно змінюваної напруги на операційному підсилювачі

2.8.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Поясніть призначення генераторів лінійно змінюваної напруги.
2. Наведіть форму імпульсного сигналу пилкоподібної форми. Назвіть основні параметри лінійно змінюваної напруги
3. Наведіть схему генератора лінійно змінюваної напруги на біполярному транзисторі. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.
4. Наведіть схему генератора лінійно змінюваної напруги на операційному підсилювачі. Поясніть призначення елементів і принцип роботи схеми.
5. Поясніть, якими параметрами генератора лінійно змінюваної напруги визначається частота імпульсного сигналу на виході генератора?
6. Поясніть, за допомогою яких параметрів регулюють нахил імпульсів пилкоподібної форми генераторів лінійно змінюваної напруги.

2.9 ВИПРЯМЛЯЧІ ОДНОФАЗНОГО СТРУМУ

Мета роботи: вивчення принципу роботи і дослідження схем однофазних випрямлячів. Дослідження впливу ємності конденсатора згладжувального фільтра на форму і величину випрямленої напруги.

2.9.1 Загальні теоретичні відомості

Випрямляч – це пристрій, який призначений для перетворення енергії джерела змінного струму в постійний струм.

Випрямлячі підрозділяють на некеровані та керовані. За допомогою некерованих випрямлячів отримують випрямлену напругу незмінної величини. При необхідності змінювати (регулювати) величину випрямленої напруги або струму застосовують керовані випрямлячі.

За числом фаз випрямленої напруги змінного струму випрямлячі

підрозділяють на однофазні, трифазні та багатофазні.

За величиною потужності випрямлячі підрозділяють на випрямлячі малої, середньої та великої потужності.

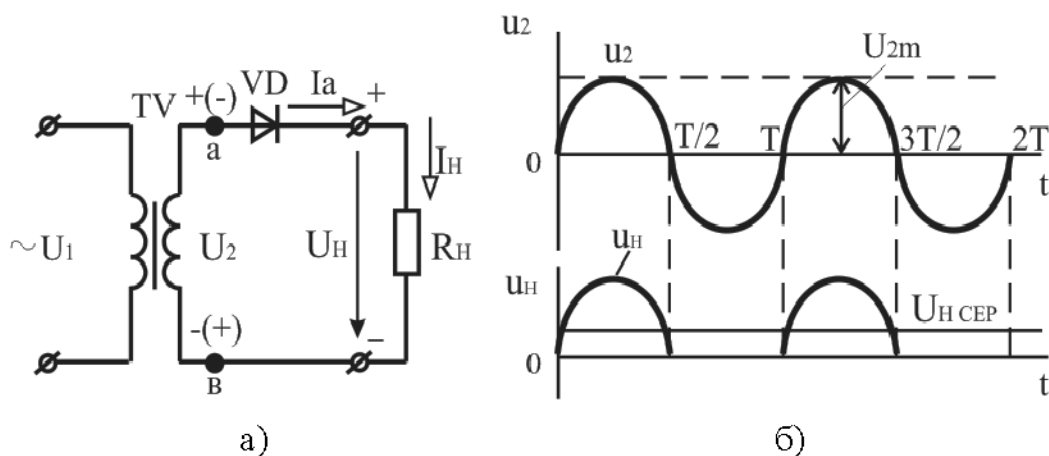


Рисунок 91 – Однофазний однонапівперіодний випрямляч:
а – схема; б – часові діаграми напруги

Випрямляч складається з трансформатора, до вторинної обмотки якого послідовно приєднані діод VD та резистор навантаження R_H .

Основні параметри схеми однонапівперіодного випрямляча:

$$U_{HCEP} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,45 U_2 \quad (33)$$

або

$$U_2 = \frac{\pi U_{HCEP}}{\sqrt{2}} \approx 2,22 U_{HCEP} \quad (34)$$

Струм

$$I_{HCEP} = 0,45 \frac{U_2}{R_H}; \quad (35)$$

$$I_2 \approx 1,57 I_{HCEP} \quad (36)$$

Коефіцієнт пульсації

$$K_{\Pi} \approx 1,57. \quad (37)$$

Зворотна напруга, що прикладається до закритого діода

$$U_{звmax} = \sqrt{2}U_2. \quad (38)$$

Двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом складається з трансформатора TV, діодів VD1, VD2 та резистора навантаження R_H .

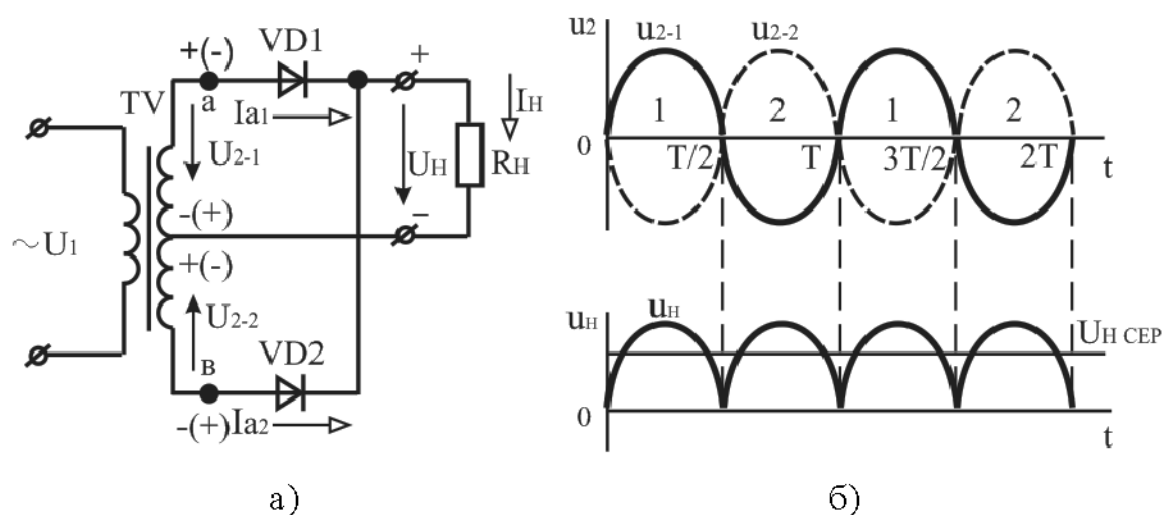


Рисунок 92 – Однофазний двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом: а – схема; б – часові діаграми напруги

Основні співвідношення для однофазного двонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом:

$$U_{HCEP} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_2 \approx 0,9U_2, \quad (39)$$

звідси

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}U_{HCEP} \approx 1,11U_{HCEP}. \quad (40)$$

Коефіцієнт пульсацій

$$K_{\Pi} = 0,67. \quad (41)$$

Середній струм через діод

$$I_a = \frac{I_{HCEP}}{2}. \quad (42)$$

Зворотна напруга, що прикладається до закритого діода

$$U_{зв max} = 2\sqrt{2}U_2, \quad (43)$$

або

$$U_{зв max} = \pi U_{HCEP}. \quad (44)$$

Струм

$$I_2 = \frac{\pi}{4} I_{HCEP}. \quad (45)$$

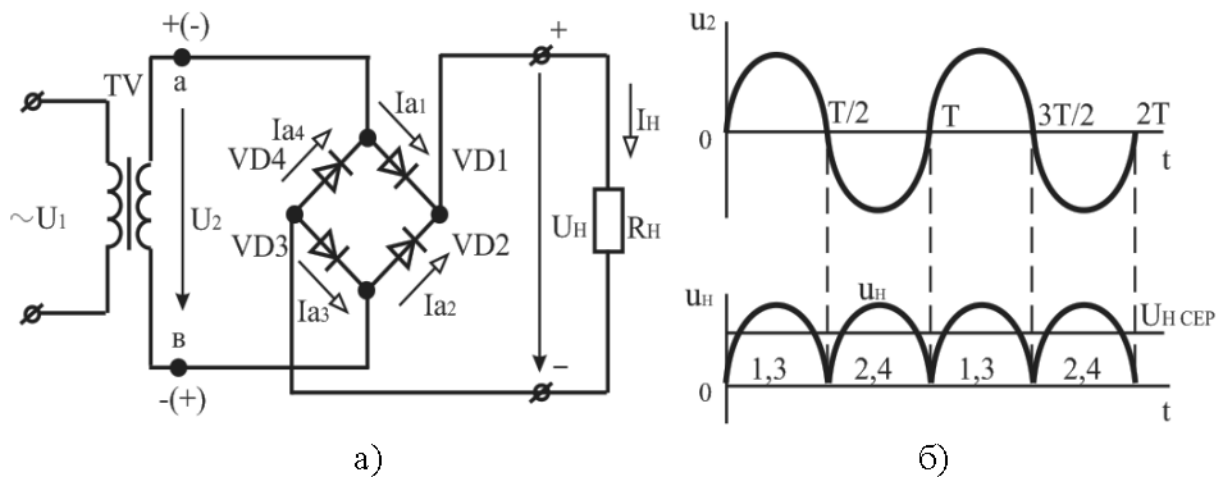


Рисунок 93 – Однофазний мостовий випрямляч:

а – схема; б – часові діаграми напруги

У схему випрямляча входять трансформатор з однією вторинною обмоткою і випрямний міст з чотирьох діодів VD1-VD4.

Основні співвідношення для однофазного мостового випрямляча визначаються співвідношеннями (39-42).

Максимальна зворотна напруга

$$U_{зв max} = \sqrt{2}U_2 = \frac{\pi}{2} U_{HCEP}, \quad (46)$$

тобто вона вдвічі менше, ніж в схемі з виведенням нульової точки.

Струм I_2

$$I_2 = \frac{U_2}{R_H} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_{HCEP}. \quad (47)$$

Випрямлячі призначені для живлення постійним струмом різних систем і пристроїв промислової електроніки, які вирішують завдання управління, регулювання, контролю, відображення інформації і т. д.

Згладжувальні фільтри призначені для зменшення пульсацій випрямленої напруги.

Основним параметром згладжувальних фільтрів є коефіцієнт згладжування, який дорівнює відношенню коефіцієнта пульсацій на вході фільтру до коефіцієнта пульсацій на його виході, тобто

$$q = \frac{K_{ПВХ}}{K_{ПВИХ}}. \quad (48)$$

Ємнісний фільтр C_Φ вмикають паралельно резистору навантаження R_H (рисунок 94, а).

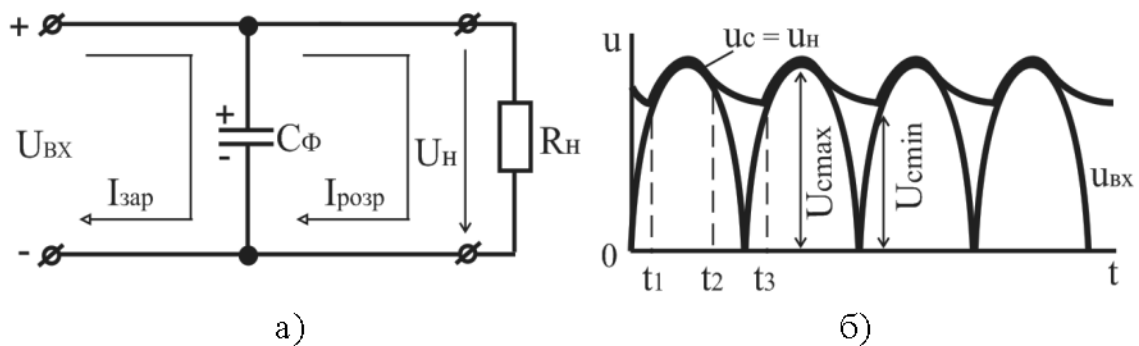


Рисунок 94 – Схема ємнісного фільтру та часові діаграми напруги однофазного двонапівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром:
а – схема; б – часові діаграми напруги

2.9.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення і класифікацію випрямлячів однофазного струму.

2. Привести схеми однофазних випрямлячів: а) однофазної однонапівперіодної; б) однофазної двонапівперіодної з виводом середньої

точки вторинної обмотки трансформатора; в) однофазної двонапівперіодної мостової.

3. Для схем однофазних випрямлячів визначити параметри випрямленої напруги: середнє значення випрямленої напруги $U_{H\text{ СЕР}} (U_d)$, середнє значення випрямленого струму $I_{H\text{ СЕР}} (I_d)$, коефіцієнт пульсацій K_{Π} і зворотну напругу діодів $U_{ЗВ\text{ МАХ}}$ при заданих значеннях напруги на вторинній обмотці трансформатора U_2 і опору резистора навантаження R_H . Варіанти завдань наведені в таблиці А.15 (додаток А).

4. Для схем однофазних випрямлячів побудувати графіки зміни в часі напруг на діодах і резисторі навантаження при синусоїдальній вхідній напрузі.

5. Привести класифікацію згладжувальних фільтрів і описати роботу ємнісного фільтра.

2.9.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для дослідження однофазного двонапівперіодного випрямляча (рисунок 95).

2. Установити задане значення напруги джерела ЕРС (U_2) і опору резистора навантаження R_H (таблиця А.15, додаток А).

3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

4. Включити схему. Записати показання приладів: вольтметра РV (середнє значення випрямленої напруги $U_{H\text{ СЕР}}$) і амперметра РА (середнє значення випрямленого струму $I_{H\text{ СЕР}}$).

5. На віртуальному осцилографі за допомогою візирних ліній визначити амплітудні значення вхідної і вихідної напруги випрямляча. Визначити величину падіння напруги на діоді.

6. Привести осцилограми вхідної і вихідної напруги випрямляча (див. рисунок 96).

7. Набрати схему для дослідження однофазного двонапівперіодного випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора (рисунок 97).

8. Виконати пп. 2-6.

9. Набрати схему для дослідження однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча (рисунок 99).

10. Виконати пп. 2, 3.

11. Включити схему. При відключеному конденсаторі C згладжувального фільтра (перемикач $S1$ розімкнеть) записати показання приладів: вольтметра PV (середнє значення випрямленої напруги $U_{H\text{ СЕР}}$) і амперметра PA (середнє значення випрямленого струму $I_{H\text{ СЕР}}$) і привести осцилограми напруги на виході випрямляча (див. рисунок 100).

12. За допомогою перемикача $S1$ підключити конденсатор C згладжувального фільтра і, змінюючи величину ємності конденсатора згідно таблиці 1, записати показання приладів (вольтметра PV , амперметра PA) і привести осцилограми вихідної напруги випрямляча (див. рисунок 101).

Таблиця 11 – Результати експериментальних досліджень ємнісного згладжувального фільтра

C , мкФ	0	10	50	100	200	500	1000
$U_{H\text{ СЕР}}$, В							
$I_{H\text{ СЕР}}$, А							

13. За даними таблиці 11 побудувати графік залежності вихідної напруги мостового випрямляча від величини ємності конденсатора згладжувального фільтра: $U_{H\text{ СЕР}} = f(C)$.

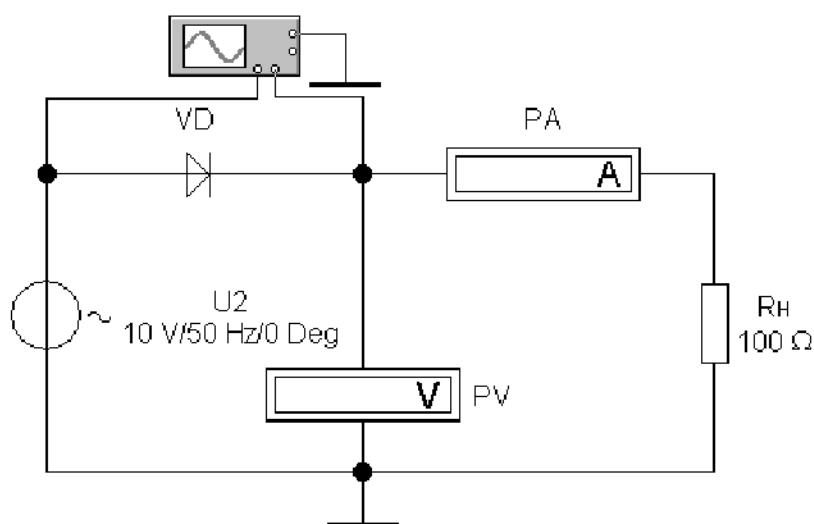


Рисунок 95 – Схема для дослідження однофазного однонапівперіодного випрямляча

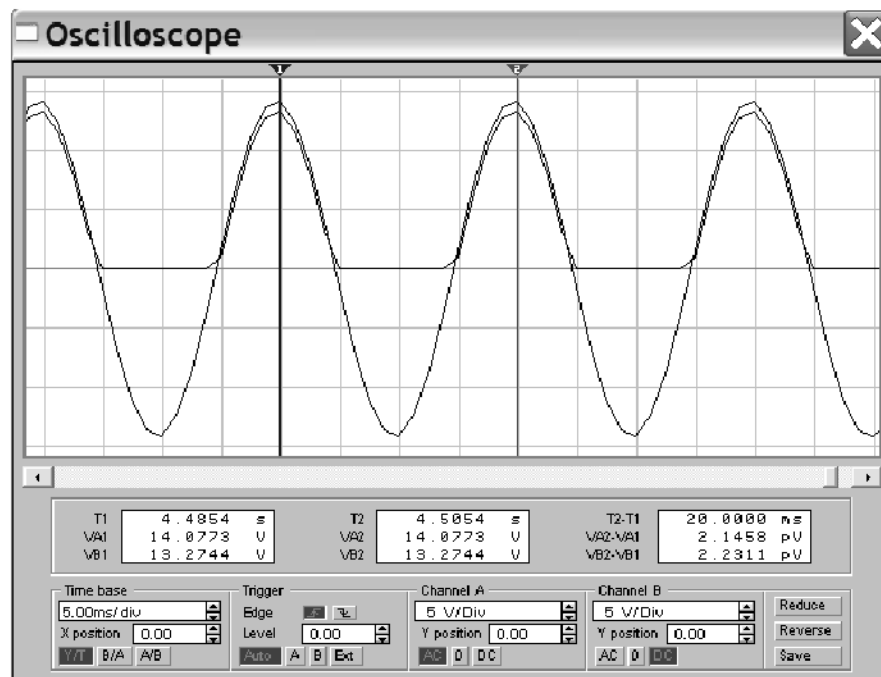


Рисунок 96 – Осцилограми напруг однофазного
однапівперіодного випрямляча

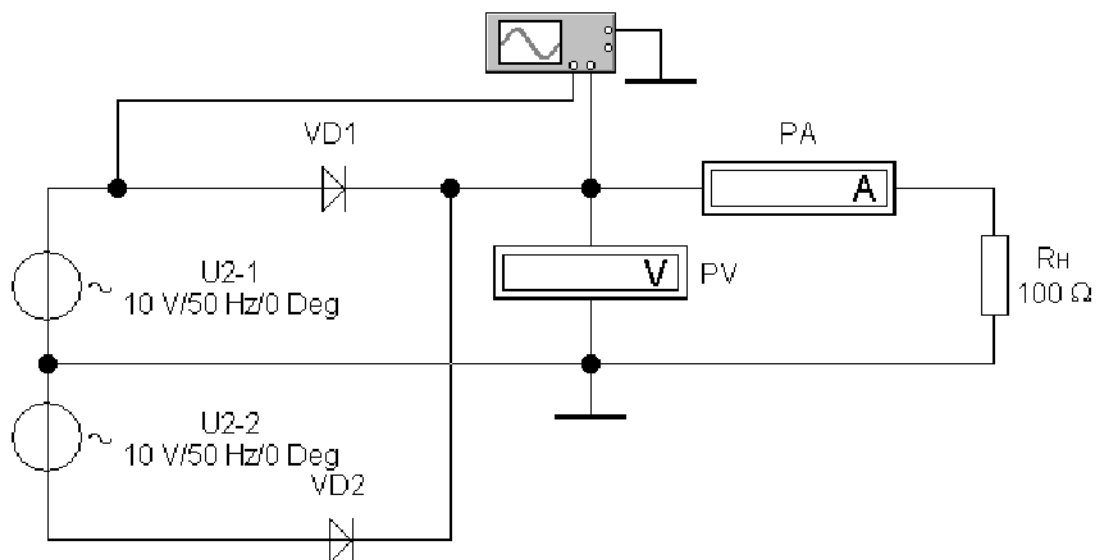


Рисунок 97 – Схема для дослідження однофазного
двонапівперіодного випрямляча з виводом середньої
точки вторинної обмотки трансформатора

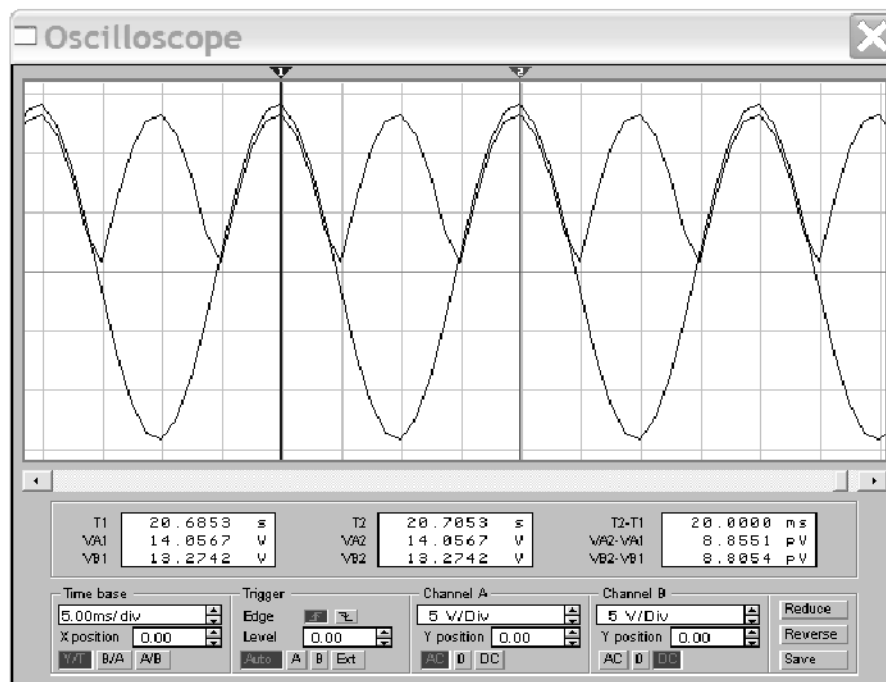


Рисунок 98 – Осцилограми напруг однофазного двонапівперіодного випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора

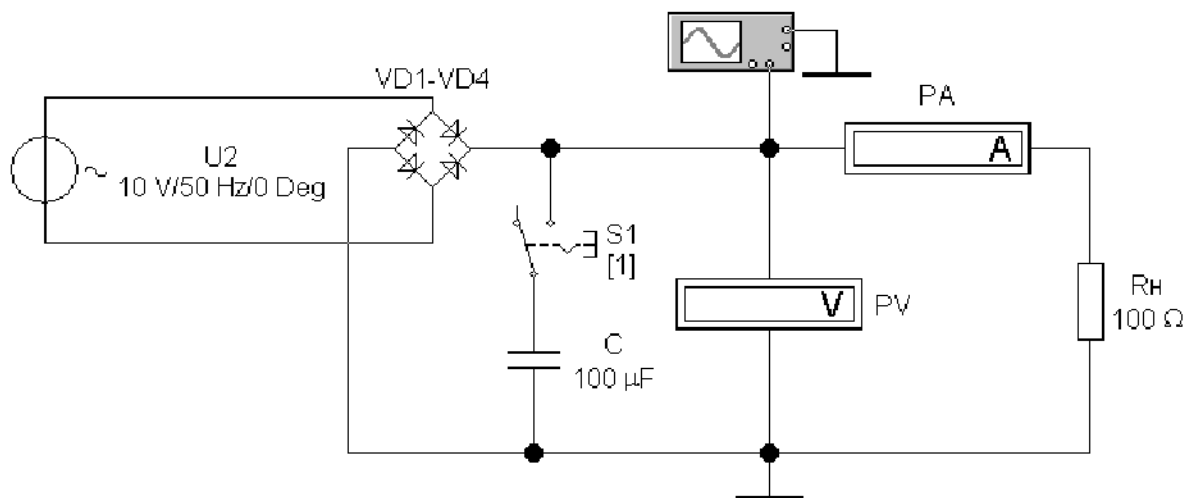


Рисунок 99 – Схема для дослідження однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча

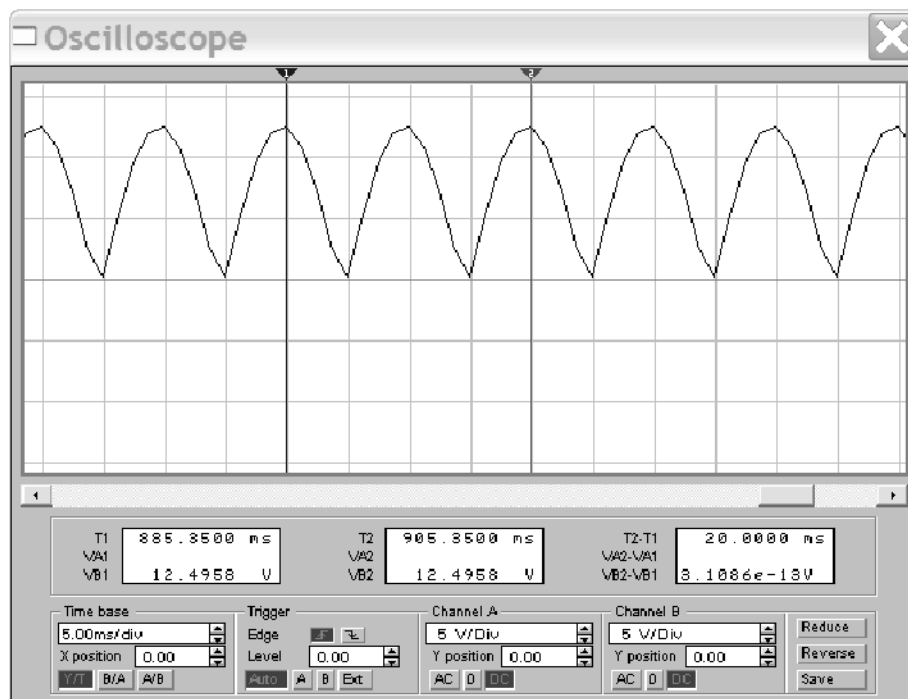


Рисунок 100 – Осцилограма напруги на виході однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча

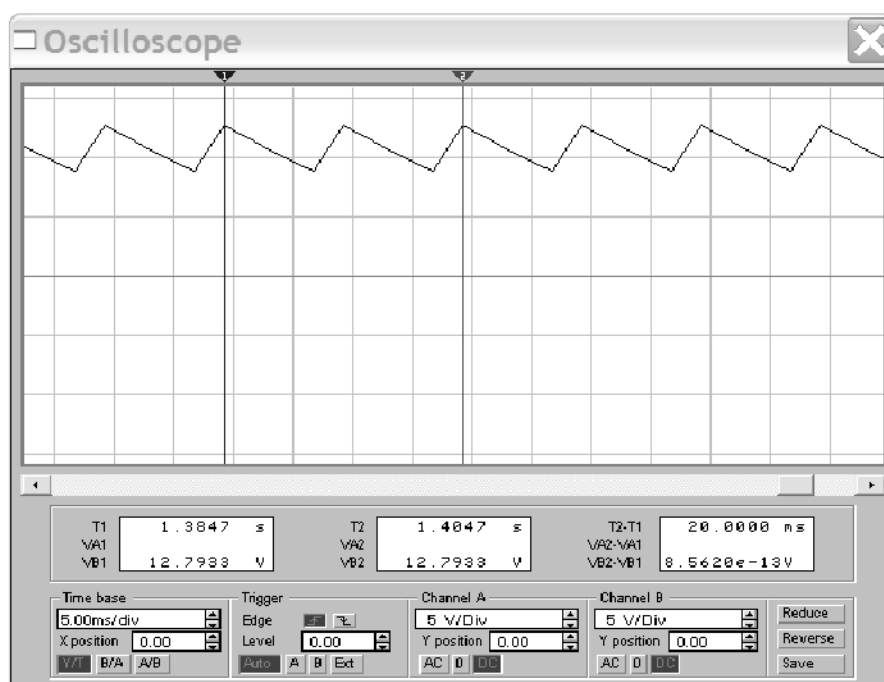


Рисунок 101 – Осцилограма напруги на виході однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча при роботі з ємнісним згладжувальним фільтром

2.9.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз і порівняння для кожної з схем випрямлячів теоретичних і експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Наведіть визначення і класифікацію випрямлячів однофазного струму.
2. Поясніть призначення випрямлячів.
3. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного однонапівперіодного випрямляча.
4. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного двонапівперіодного випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора.
5. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча.
6. Наведіть основні розрахункові співвідношення для однофазних випрямлячів.
7. Наведіть визначення і класифікацію згладжувальних фільтрів.
8. Поясніть призначення згладжувальних фільтрів.
9. Поясніть принцип роботи ємнісного згладжувального фільтра.
10. Назвіть основні параметри згладжувальних фільтрів.
11. Поясніть, в яких випадках застосовують переважно ємнісні або індуктивні згладжувальні фільтри?

2.10 ВИПРЯМЛЯЧІ З МНОЖЕННЯМ НАПРУГИ

Мета роботи: вивчення принципу роботи і дослідження схем однофазних випрямлячів з множенням напруги.

2.10.1 Загальні теоретичні відомості

Випрямлячі з множенням напруги дозволяють отримати на виході пристрою напругу, в будь-яке число разів більше напруги на його вході.

Випрямлячі з ємнісним фільтром дозволяють реалізувати схеми з множенням напруги. Такі випрямлячі використовуються для живлення малопотужних високовольтних пристроїв. Принцип роботи схем множення напруги ґрунтується на використанні кількох конденсаторів, кожен з яких заряджається від однієї і тієї ж обмотки трансформатора, але через різні діоди, для кожного конденсатора свій діод.

Схема послідовного подвоювача напруги наведена на рисунку 102. Стабільність роботи цього подвоювача вище, а пульсації нижчі, ніж в схемі паралельного подвоювача напруги.

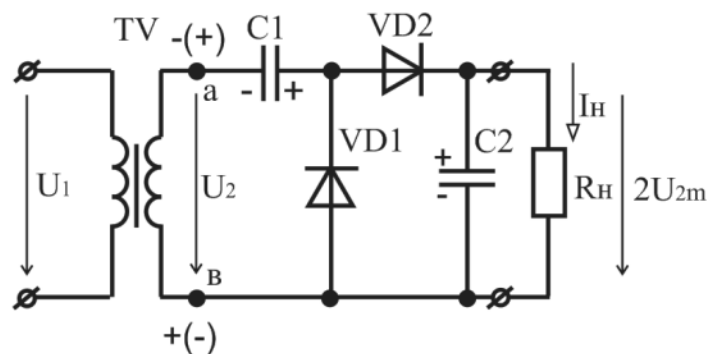


Рисунок 102 – Схема послідовного подвоювача напруги

Послідовний подвоювач працює таким чином. У один з напівперіодів вхідної напруги, коли потенціал точки «в» вище за потенціал точки «а», конденсатор $C1$ заряджається через відкритий діод $VD1$ до амплітудного значення вхідної напруги U_{2m} . В цей час діод $VD2$ закритий. У другий напівперіод потенціал точки в нижче за потенціал точки «а», і напруга на конденсаторі $C1$ підсумовується з вхідною напругою, внаслідок чого конденсатор $C2$ заряджається через відкритий діод $VD2$ до подвоєного амплітудного значення вхідної напруги $2U_{2m}$.

На рисунку 103 наведена схема випрямляча з множенням напруги другого роду, де добавлені ланки з діодів і конденсаторів.

2.10.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення випрямляча з множенням напруги.
2. Привести схеми однофазних випрямлячів з множенням напруги:
 - а) з подвоєнням напруги; б) з множенням напруги на чотири.
3. Описати принцип роботи однофазного випрямляча з подвоєнням напруги.

4. Скласти схему однофазного випрямляча з множенням напруги при заданих значеннях коефіцієнта множення напруги n , напруги джерела живлення U_1 , ємності конденсаторів $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$ і опору навантаження R_H . Варіанти завдань наведені в таблиці А.16 (додаток А).

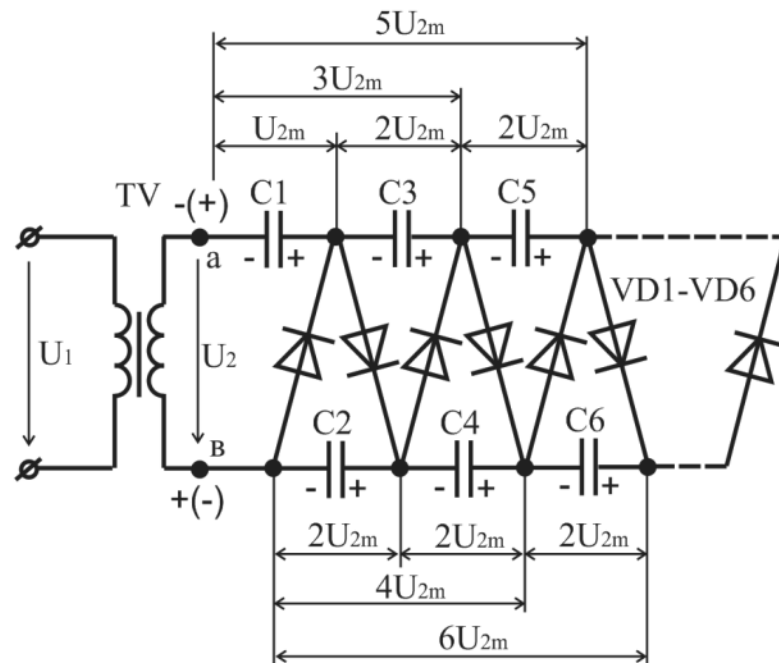


Рисунок 103 – Схема випрямляча з множенням напруги другого роду

2.10.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для дослідження однофазного випрямляча з подвоєнням напруги (рисунок 104).

2. Установити задані значення напруги джерела живлення U_1 , ємності конденсаторів $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$ і опору навантаження R_H (таблиця А. 16, додаток А).

3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

4. Включити схему. Записати показання приладів: вольтметра PV (середнє значення випрямленої напруги U_d) і амперметра PA (середнє значення випрямленого струму I_d).

5. На віртуальному осцилографі за допомогою візирних ліній визначити амплітудні значення вхідної і вихідної напруги випрямляча з множенням напруги.

6. З віртуального осцилографа привести осцилограми вхідної і

вихідної напруги випрямляча з множенням напруги (див. рисунок 105).

7. Набрати схему для дослідження однофазного випрямляча з множенням напруги на чотири (рисунок 106).

8. Виконати пп. 2-6.

9. Набрати схему для дослідження однофазного випрямляча з множенням напруги при заданому значенні коефіцієнта множення напруги n , розроблену в п. 2.10.2.

10. Виконати пп. 2-6.

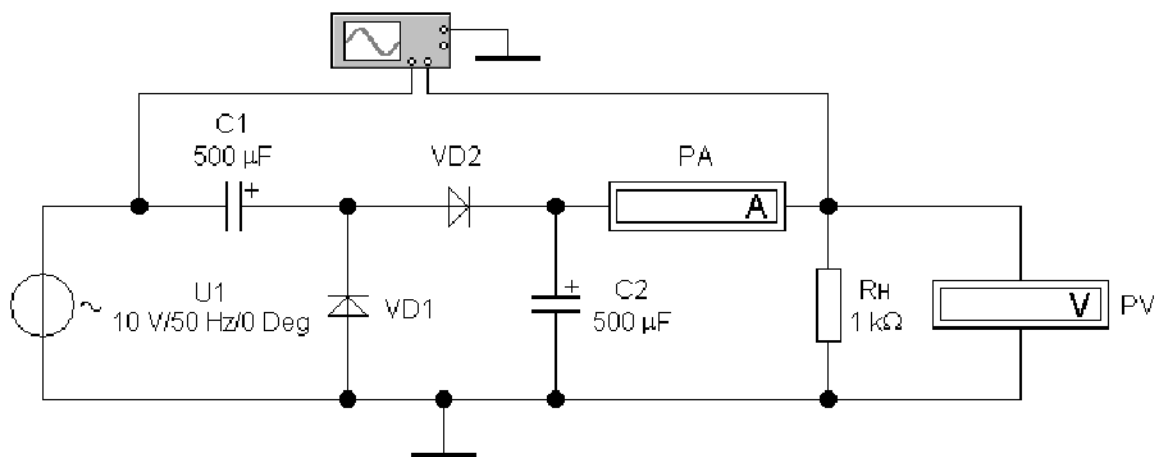


Рисунок 104 – Схема для дослідження однофазного випрямляча з подвоєнням напруги

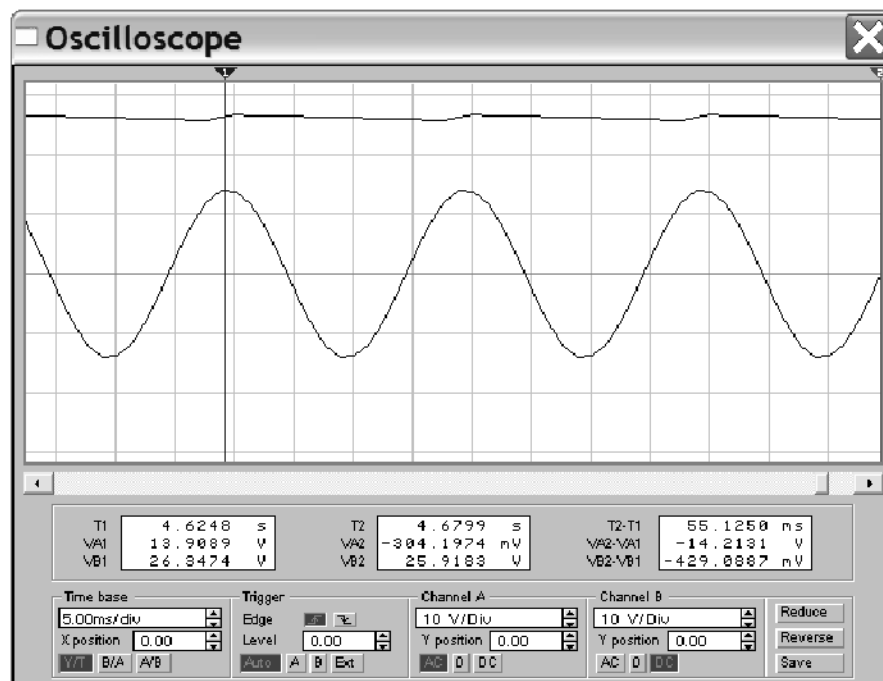


Рисунок 105 – Осцилограми напруг однофазного випрямляча з множенням напруги на два

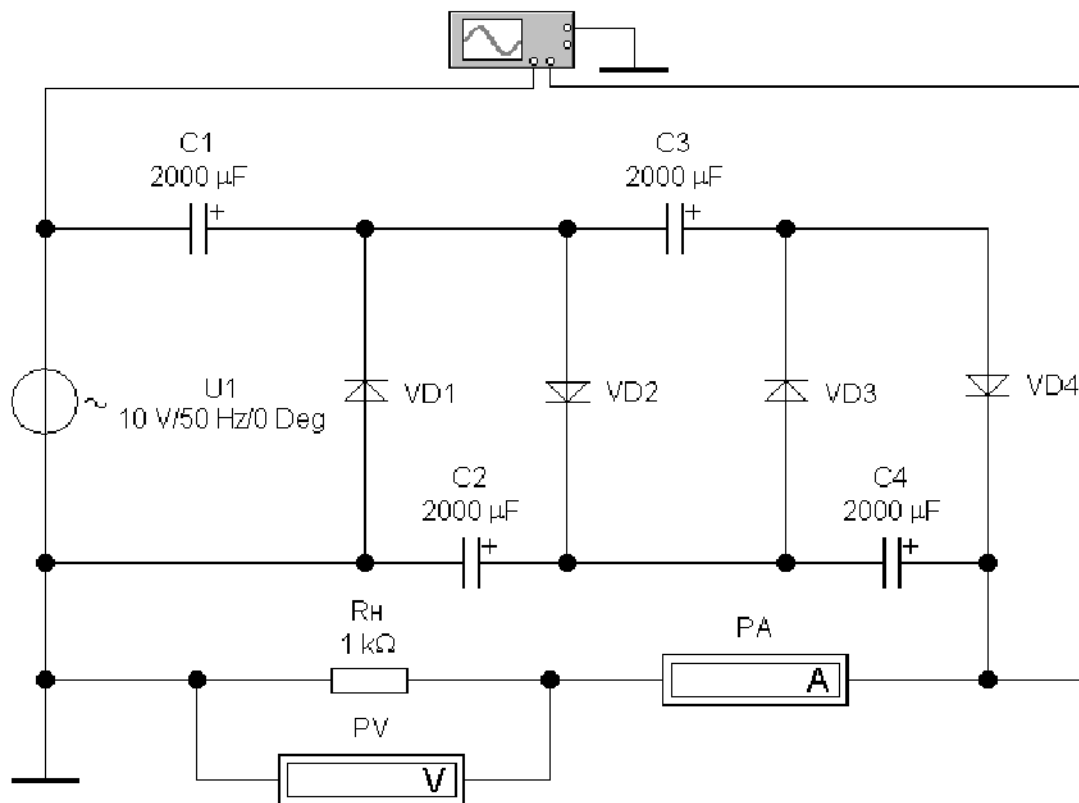


Рисунок 106 – Схема для дослідження однофазного випрямляча з множенням напруги на чотири

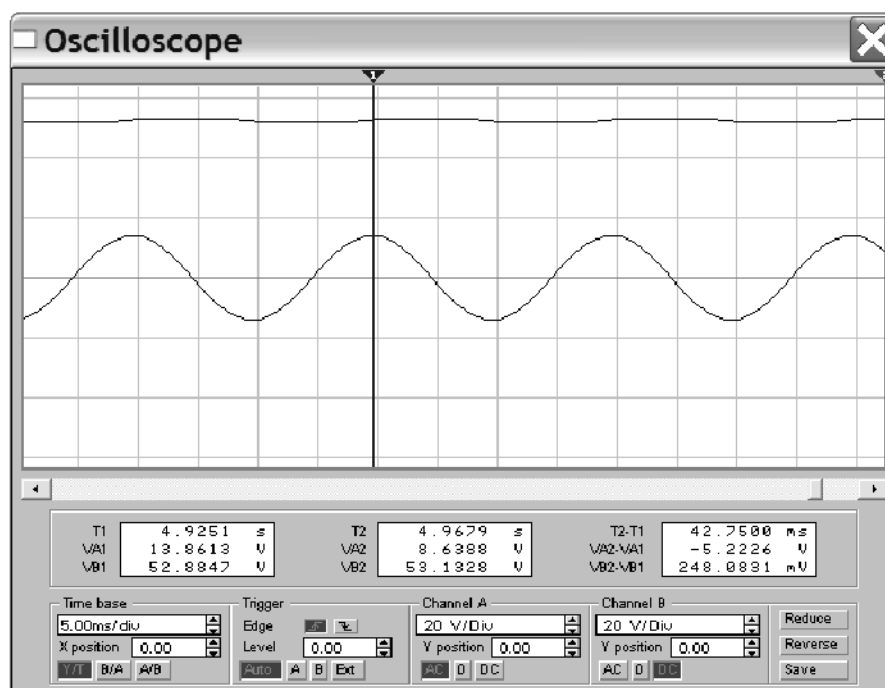


Рисунок 107 – Осцилограми напруг однофазного випрямляча з множенням напруги на чотири

2.10.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз і порівняння для кожної з схем випрямлячів з множенням напруги теоретичних і експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Поясніть призначення випрямлячів з множенням напруги.
2. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного випрямляча з подвоєнням напруги.
3. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного випрямляча з множенням напруги на три.
4. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного випрямляча з множенням напруги на чотири.

2.11 ПАРАМЕТРИЧНІ СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ

Мета роботи: вивчення принципу роботи і дослідження параметричних стабілізаторів напруги.

2.11.1 Загальні теоретичні відомості

Стабілізатори напруги – це електронні пристрої, призначені для автоматичної підтримки незмінного значення напруги з необхідною точністю в заданому діапазоні зміни напруги джерела або опору (струму) навантаження.

За принципом роботи стабілізатори напруги підрозділяються на параметричні та компенсаційні.

Параметричний метод стабілізації базується на зміні параметрів нелінійного елементу стабілізатора в залежності від зміни дестабілізуючого чинника, а стабілізатор називають параметричним.

Схема параметричного стабілізатора напруги наведена на рисунку 108, а. Вона складається з баластного резистора R_B і стабілітрона VD.

Стабілізатор підключається до виходу випрямляча з фільтром. Навантаження увімкнене паралельно стабілітрону.

Особливості роботи такого стабілізатора напруги засновані на тому, що напруга стабілітрона на зворотній гілці його вольт-амперної характеристики змінюється незначно в широкому діапазоні зміни зворотного струму стабілітрона. Зміна напруги на вході стабілізатора зумовлює значну зміну струму стабілітрона при незначній зміні напруги на ньому.

Стабілізатори характеризуються коефіцієнтом стабілізації

$$K_{\text{CT}} = \frac{\Delta U_{\text{BX}} / U_{\text{BX}}}{\Delta U_{\text{ВИХ}} / U_{\text{ВИХ}}}, \quad (49)$$

який для параметричних стабілізаторів складає $K_{\text{CT}} = 20 \div 50$.

Рівняння електричної рівноваги для такого стабілізатора має вигляд

$$U = U_{\text{H}} + IR_{\text{B}}, \quad (50)$$

де R_{B} – баластний резистор, необхідний для зменшення впливу дестабілізуючих чинників на напругу навантаження.

Опір баластного резистора R_{B} вибирають таким, щоб при номінальному значенні напруги джерела U , напруга і струм стабілітрона також відповідали номінальним значенням $I_{\text{CT.H}}$. Величину $I_{\text{CT.H}}$ визначають за паспортними даними стабілітрона за виразом

$$I_{\text{CT.H}} = \frac{I_{\text{CT.min}} + I_{\text{CT.max}}}{2}. \quad (51)$$

Тоді з рівняння (50), визначаємо опір баластного резистора

$$R_{\text{B}} = \frac{U - U_{\text{CT.H}}}{I_{\text{CT.H}} + I_{\text{H}}}, \quad (52)$$

де $I_{\text{H}} = P_{\text{H}} / U_{\text{H}}$; $U \approx U_{\text{d}}$; $I = I_{\text{CT.H}} + I_{\text{H}}$.

Роботу параметричного стабілізатора розглянемо за допомогою

вольт-амперної характеристики стабілітрона і прямої навантаження (рисунок 108, б). Характеристика навантаження будується (при номінальній напрузі джерела) по двох точках, а саме: точка А з координатами $U_{CT.H}$, і точка Б на осі ординат, яка визначається за виразом $I = U/R_B$. Через ці точки будують пряму навантаження. Якщо напруга U , що подається на вхід стабілізатора, збільшиться на ΔU із-за підвищення, наприклад, напруги мережі, тоді характеристика навантаження баластного резистора R_B переміститься паралельно самій собі і займе положення, що відповідає струму $I_{CT.max}$ і напрузі U'_H . Напруга $U_{CT} = U_H$ залишиться практично незмінною. Напруга на стабілітроні залишиться незмінною також при зниженні вхідної напруги стабілізатора та при змінах струму навантаження.

Переваги параметричних стабілізаторів – простота конструкції і надійність роботи, недолік – низькі коефіцієнт стабілізації та к.к.д., а також вузький і нерегульований діапазон напруги, що стабілізується.

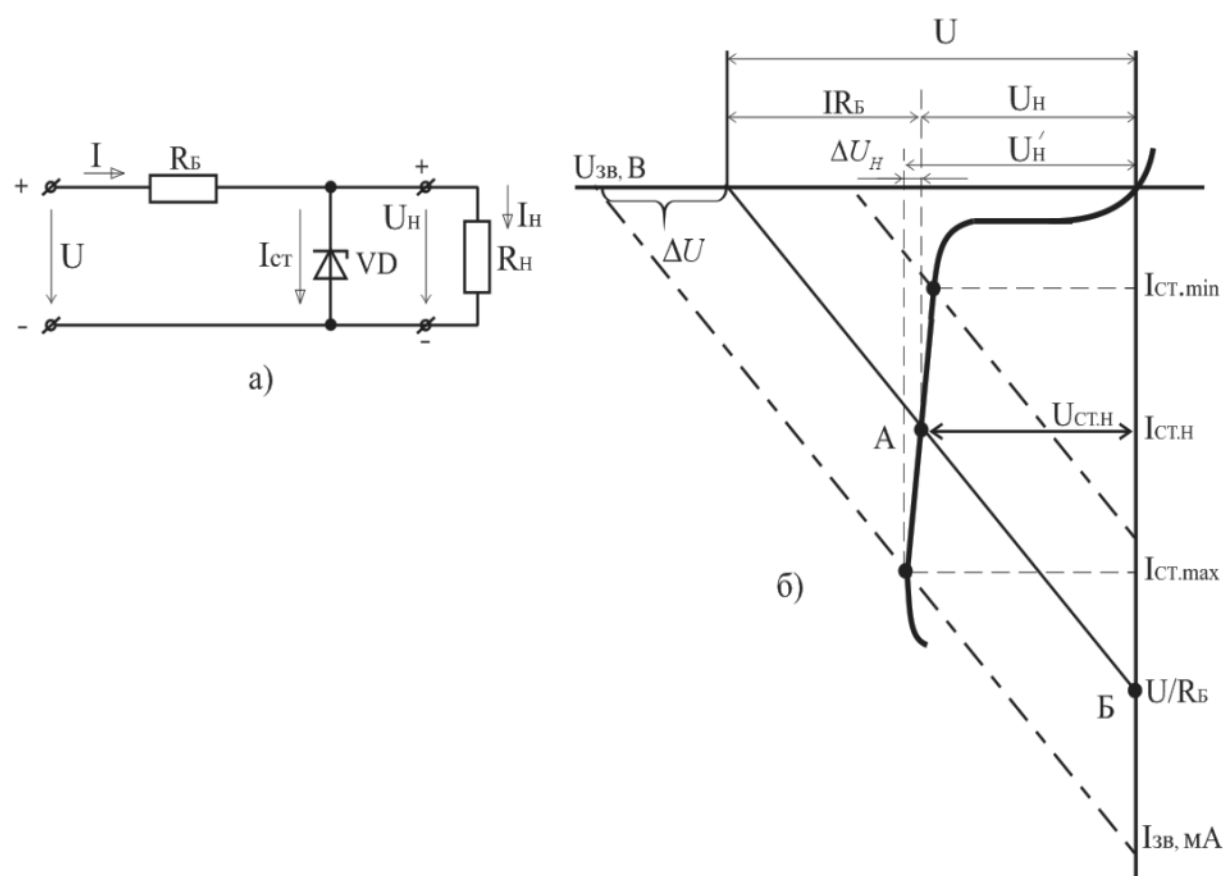


Рисунок 108 – Параметричний стабілізатор напруги:
а – схема; б – графічна інтерпретація принципу роботи

2.11.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення і класифікацію стабілізаторів напруги.
2. Привести схему параметричного стабілізатора напруги.
3. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи параметричного стабілізатора напруги.

4. Виконати розрахунок параметричного стабілізатора напруги (визначити струм I_H і опір R_H навантаження; вибрати тип стабілітрона і його паспортні дані: $U_{ст. н}$, $I_{ст. мін}$, $I_{ст. макс}$, R_d ; визначити номінальний струм стабілізації стабілітрона $I_{ст. н}$ і опір баластного резистора R_B).

Вихідні дані: потужність P_H і напруга U_H навантаження; напруга на вході стабілізатора $U_{вх}$. Варіанти завдань наведені в таблиці А.17 (додаток А).

Порядок розрахунку параметричного стабілізатора напруги.

- 1) Визначають параметри навантаження

$$I_H = P_H / U_H, R_H = U_H / I_H.$$

- 2) Залежно від напруги навантаження U_H вибирають тип стабілітрона і його паспортні дані: $U_{ст. н}$, $I_{ст. мін}$, $I_{ст. макс}$, R_d .

- 3) Визначають номінальний струм стабілізації стабілітрона

$$I_{ст. н} = (I_{ст. мін} + I_{ст. макс}) / 2.$$

- 4) Визначають опір баластного резистора

$$R_B = (U_{вх} - U_{ст. н}) / (I_{ст. н} + I_H).$$

2.11.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB і набрати схему для дослідження параметричного стабілізатора напруги (рисунок 109).

2. Установити задані параметри елементів схеми.

3. Включити схему. Змінюючи величину опору навантаження $R_H = (500 \text{ Ом}; 1 \text{ кОм}; 1,5 \text{ кОм}; 2,0 \text{ кОм}; 2,5 \text{ кОм})$ при вхідній напрузі $U_{вх} = 20 \text{ В}$, зняти показання приладів. Результати вимірів занести в таблицю 12.

4. За даними таблиці 12 побудувати вихідну характеристику стабілізатора $U_{\text{вих}} = f(I_{\text{н}})$.

5. Змінюючи величину вхідної напруги $U_{\text{вх}} = (10 \text{ В}; 15 \text{ В}; 20 \text{ В}; 25 \text{ В}; 30 \text{ В})$ при величині опору навантаження $R_{\text{н}} = 500 \text{ Ом}$ зняти показання приладів. Результати вимірів занести в таблицю 13.

Таблиця 12 – Результати експериментальних досліджень параметричного стабілізатора напруги при $R_{\text{н}} = \text{var}$, $U_{\text{вх}} = \text{const}$

$R_{\text{н}}, \text{Ом}$	$I_1, \text{мА (PA1)}$	$I_{\text{ст}}, \text{мА (PA2)}$	$I_{\text{н}}, \text{мА (PA3)}$	$U_{\text{вих}}, \text{В (PV2)}$

Таблиця 13 – Результати експериментальних досліджень параметричного стабілізатора напруги при $U_{\text{вх}} = \text{var}$, $R_{\text{н}} = \text{const}$

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$I_1, \text{мА (PA1)}$	$I_{\text{ст}}, \text{мА (PA2)}$	$I_{\text{н}}, \text{мА (PA3)}$	$U_{\text{вих}}, \text{В (PV2)}$

6. Визначити коефіцієнт стабілізації стабілізатора напруги $[K_{\text{ст}} = (\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}) / (\Delta U_{\text{вих}} / U_{\text{вих}})]$.

7. Визначити диференціальний опір стабілітрона на ділянці стабілізації $[R_{\text{д}} = \Delta U_{\text{ст}} / \Delta I_{\text{ст}}]$.

2.11.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз експериментальних результатів.

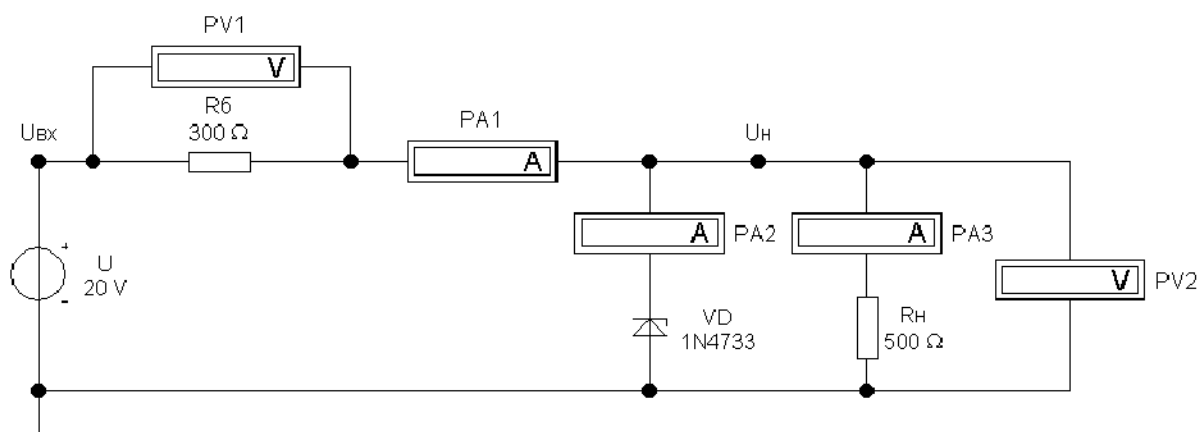


Рисунок 109 – Схема для дослідження параметричного стабілізатора напруги

Контрольні питання

1. Наведіть визначення і класифікацію стабілізаторів напруги.
2. Поясніть призначення стабілізаторів напруги.
3. Поясніть, на чому базується параметричний метод стабілізації?
4. Наведіть схему і поясніть принцип роботи параметричного стабілізатора напруги.
5. Наведіть порядок розрахунку параметричного стабілізатора напруги.
6. Наведіть умови вибору стабілітрона для параметричного стабілізатора напруги.
7. Наведіть графічну інтерпретацію роботи параметричного стабілізатора напруги.
8. Назвіть основні параметри стабілізаторів напруги.

2.12 КОМПЕНСАЦІЙНІ СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ

Мета роботи: вивчення принципу роботи і дослідження компенсаційних стабілізаторів напруги.

2.12.1 Загальні теоретичні відомості

Компенсаційні стабілізатори напруги мають вищий коефіцієнт стабілізації ($K_{\text{СТ}} \geq 50$) і менший вихідний опір в порівнянні з параметричними. Їх принцип роботи заснований на тому, що зміна напруги

на навантаженні (під дією зміни U_{BX} або I_H) передається на регулюючий елемент, що спеціально вводиться в схему і перешкоджає зміні напруги U_H .

Регулюючий елемент (транзистор) може бути увімкнений або паралельно навантаженню, або послідовно з ним. Залежно від цього розрізняють два типи компенсаційних стабілізаторів напруги: паралельні (рисунок 110, а) і послідовні (рисунок 110, б).

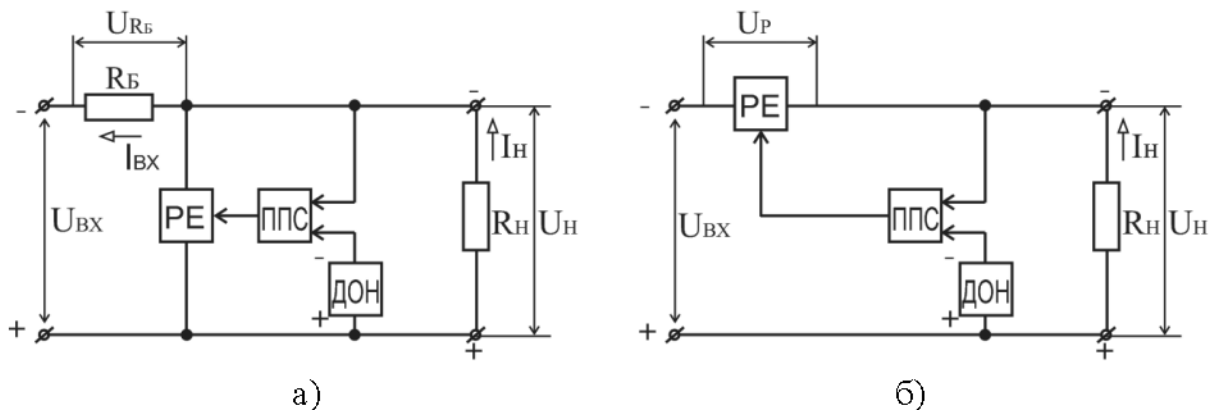


Рисунок 110 – Структурні схеми компенсаційних стабілізаторів напруги: а – паралельного; б – послідовного

Дія на регулюючий елемент (РЕ) в обох типах стабілізаторів здійснюється керуючою схемою в яку входять підсилювач постійного струму (ППС) і джерело опорної напруги (ДОН). За допомогою ДОН проводять порівняння напруги на навантаженні з опорною напругою. Функція ППС зводиться до підсилення різниці порівнюваної напруги і подачі посиленого сигналу безпосередньо на регулюючий елемент.

У схемі (рисунок 110, а) стабілізація напруги на навантаженні досягається, як і в параметричному стабілізаторі, зміною напруги на баластному резисторі R_B шляхом зміни струму регулюючого елементу.

У схемі (рисунок 110, б) регулюючий елемент увімкнений послідовно з навантаженням. Стабілізація напруги навантаження здійснюється шляхом зміни напруги на регулюючому елементі. Струм регулюючого елементу тут дорівнює струму навантаження.

Відповідно до розглянутого, принцип дії компенсаційних стабілізаторів постійної напруги заснований на зміні опору регулюючого елементу.

Енергетичні показники (зокрема к.к.д.) послідовних стабілізаторів напруги вищі, ніж паралельних. Це є головною причиною того, що

послідовні стабілізатори знайшли найбільше застосування на практиці. З переваг паралельних стабілізаторів слід зазначити їх нечутливість до перевантажень за струмом, зокрема коротким замиканням вихідного кола. Послідовні стабілізатори вимагають пристроїв захисту регулюючого елемента при перевантаженнях за струмом.

Принципова схема компенсаційного стабілізатора напруги послідовного типу наведена на рисунку 111.

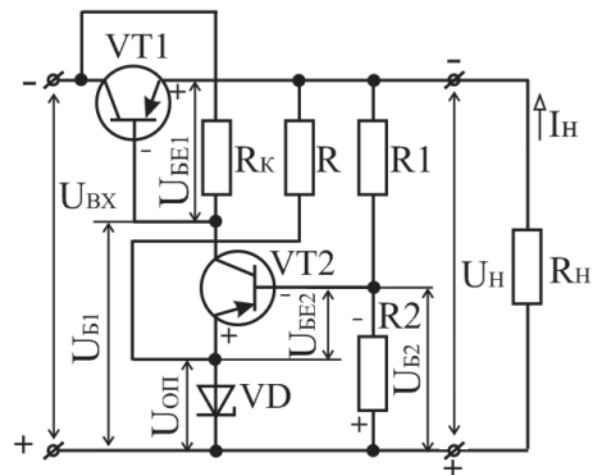


Рисунок 111 – Схема компенсаційного стабілізатора напруги послідовного типу

Транзистор VT1 служить регулюючим елементом, а ППС виконаний на транзисторі VT2. Джерелом опорної напруги є стабілітрон VD, який увімкнений в коло емітера транзистора VT2. Резистори R1, R2 є елементами вхідного дільника напруги. Напруга між базою і емітером транзистора VT2

$$U_{BE2} = \frac{R2}{R1 + R2} U_H - U_{оп}. \quad (53)$$

Резистор R використовують для виведення стабілітрона на робочу ділянку характеристики, якщо струм I_{E2} транзистора VT2 малий.

Опорна напруга (задається за допомогою стабілітрона VD) порівнюється з напругою на резисторі R2, яка пропорційна вихідній напрузі стабілізатора, оскільки цей резистор є плечем дільника напруги R1, R2. Різниця цієї напруги підсилюється транзистором VT2 і виділяється на резисторі R_K. Напруга на цьому резисторі є вхідною напругою регулюючого елемента VT1 і, тому, обумовлює зміну напруги колектор-

емітер транзистора VT1, завдяки чому забезпечується стабілізація вихідної напруги.

2.12.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення і класифікацію стабілізаторів напруги.
2. Привести схему компенсаційного стабілізатора напруги.
3. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи стабілізатора напруги.
4. Виконати розрахунок стабілізатора напруги.

Вихідні дані: номінальна вихідна напруга $U_{н\text{вих}}$; межі регулювання вихідної напруги $\Delta U_{\text{вих}} = U_{\text{вих макс}} - U_{\text{вих мин}}$; номінальний струм навантаження $I_{н\text{ ном}}$; зміна вхідної напруги $\Delta U_{\text{вх}}$. Варіанти завдань наведені в таблиці А.18 (додаток А).

Порядок попереднього розрахунку стабілізатора напруги.

1) Визначають:

- мінімальну вхідну напругу

$$U_{\text{вх мин}} = U_{\text{вих макс}} + (4 \dots 5) B,$$

- номінальну

$$U_{н\text{ вх}} = U_{\text{вх мин}} + \Delta U_{\text{вх}},$$

- максимальну вхідну напругу

$$U_{\text{вх макс}} = U_{\text{вх мин}} + 2\Delta U_{\text{вх}}.$$

2) Залежно від струму навантаження визначають число транзисторів регулюючого елемента. При струмі навантаження $I_{н\text{ ном}} \leq (0,02 \dots 0,03) A$ можна використати тільки один транзистор; при $0,03 A < I_{н\text{ ном}} < 0,6 A$ – два транзистори; при $0,6 A < I_{н\text{ ном}} < 5 A$ – три транзистори.

3) За $U_{\text{вх макс}}$, $U_{\text{вих мин}}$, $I_{н\text{ ном}}$ визначають:

- максимальну напругу колектор – емітер транзистора VT1

$$U_{к\text{е макс}} = U_{\text{вх макс}} - U_{\text{вих мин}};$$

струм колектора $I_{К\text{ макс}} = 1,2 I_{Н\text{ ном}}$; потужність, що виділяється на колекторному переході $P_{К\text{ макс}} = U_{КЕ\text{ макс}} \cdot I_{К\text{ макс}}$ і вибирають тип транзистора.

Для транзистора VT2 визначають

$$U_{КЕ\text{ макс}} = U_{ВІХ\text{ макс}} - U_{СТ},$$

$I_{К\text{ макс}} = (3 \dots 5) \text{ мА}$; $P_{К\text{ макс}} = U_{КЕ\text{ макс}} \cdot I_{К\text{ макс}}$ і вибирають тип транзистора.

4) Вибирають тип стабілітрона VD за напругою стабілізації з умови

$$U_{СТ} = U_{ВІХ\text{ мін}} - (2 \dots 3) \text{ В.}$$

У цьому випадку опір резистора $R2 = (2 \dots 3) / I_{СТ\text{ мін}}$ (де $I_{СТ\text{ мін}}$ – мінімальний струм стабілітрона). При $I_{СТ\text{ мін}} = 5 \text{ мА}$, $R2 = (400 \dots 600) \text{ Ом}$.

5) Опір резистора R1 визначають з умови, що при напрузі $(U_{ВІХ\text{ мін}} - U_{ВІХ\text{ макс}})$ через нього протікає струм $(3 \dots 5) \text{ мА}$.

6) Розраховують сумарний R_d опір резисторів дільника R3-R5 з умови протікання через нього струму $(5 \dots 10) \text{ мА}$ при номінальній напрузі $U_{Н\text{ вих}}$. При цьому опір резисторів дільника визначаються з виразів:

$$R5 = (R_d \cdot U_{СТ}) / U_{ВІХ\text{ макс}};$$

$$R4 = R_d [1 - (U_{СТ} / U_{ВІХ\text{ мін}})];$$

$$R3 = R_d - R4 - R5.$$

2.12.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB і набрати схему для дослідження компенсаційного стабілізатора напруги (рисунок 112).

2. Установити задані та розраховані параметри елементів схеми.

3. Включити схему. Подати на вхід стабілізатора напругу $U_{Н\text{ вх}}$ і резистором R4 установити напругу $U_{Н\text{ вих}}$. Визначити величину напруги $U_{ВІХ}$ при $U_{ВІХ\text{ мін}}$ і $U_{ВІХ\text{ макс}}$. Результати вимірів занести в таблицю 14.

Таблиця 14 – Результати експериментальних досліджень
компенсаційного стабілізатора напруги при $U_{BX} = \text{var}$

Напруга	$U_{Н ВХ}, В$	$U_{ВХ МІН}, В$	$U_{ВХ МАКС}, В$
$U_{ВІХ}, В$			

4. Визначити коефіцієнт стабілізації стабілізатора напруги

$$K_{СТ} = (\Delta U_{ВХ} / U_{Н ВХ}) / (\Delta U_{ВІХ} / U_{Н ВІХ}).$$

5. При номінальній вхідній напрузі $U_{Н ВХ}$, змінюючи опір резистора R_4 у межах (0...100) %, визначити $U_{ВІХ МІН}$ і $U_{ВІХ МАКС}$.

6. Установити на вході стабілізатора напругу $U_{Н ВХ}$ і, змінюючи опір навантаження R_H , зняти вихідну характеристику стабілізатора $U_{ВІХ} = f(I_H)$. Струм навантаження I_H змінюють у межах від 0 до $I_{НМАКС}$ (прийняти $I_{НМАКС} = 3I_{ННОМ}$). Результати вимірів занести в таблицю 15.

Таблиця 15 – Результати експериментальних досліджень
компенсаційного стабілізатора напруги при $R_H = \text{var}$

$I_H, А$	0			$I_{ННОМ}$				$I_{НМАКС}$
$U_{ВІХ}, В$								

7. За даними таблиці 15 побудувати вихідну характеристику стабілізатора $U_{ВІХ} = f(I_H)$.

2.12.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз і порівняння теоретичних і експериментальних результатів.

2) двонапівперіодна мостова (схема Ларіонова).

Однонапівперіодна схема з нульовим виводом (схема Міткевича) зображена на рисунку 113.

Ця схема складається із трифазного трансформатора TV, випрямних діодів VD1–VD3 та резистора навантаження R_H , який вмикається між спільним виводом вторинних обмоток трансформатора (нульовим виводом) та спільною точкою з'єднання випрямних діодів. Випрямні діоди працюють по черзі. За період напруги живлення кожен діод знаходиться у провідному стані третину періоду, причому проводить той діод, до анода якого на даний момент прикладена найбільш додатна фазна напруга.

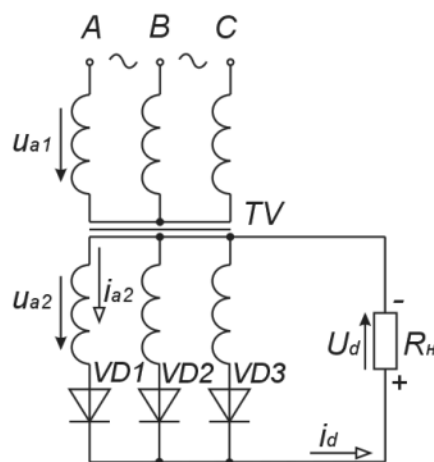


Рисунок 113 – Схема трифазного однонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом трансформатора

Основні розрахункові співвідношення для схеми Міткевича.

Середнє значення напруги на навантаженні

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_2 \sqrt{3} = 1,17 U_{2\Phi}. \quad (54)$$

Тоді

$$U_{2\Phi} = 0,85 U_d. \quad (55)$$

Максимальна напруга на діоді

$$U_{3B \text{ MAX}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} U_{2\Phi} = 2,09 U_d. \quad (56)$$

Середнє значення струму через діод

$$I_a = \frac{I_d}{3}. \quad (57)$$

Коефіцієнт пульсації випрямленої напруги (при $m = 3$)

$$k_{\Pi} = \frac{2}{m^2 - 1} = 0,25. \quad (58)$$

Частота пульсації випрямленої напруги в три рази перевищує частоту мережі.

Недоліком даної схеми є наявність постійного підмагнічування магнітопроводу трансформатора, зумовленого тим, що, як і у будь-якої однократної схеми, вторинною обмоткою трансформатора струм за період проходить лише один раз і в одному напрямку, тобто цей струм має постійну складову. Це вимагає використання трансформатора із підвищеним перерізом магнітопроводу (підвищеної встановленої потужності)

$$S_T = 1,35 P_d. \quad (59)$$

Трифазна мостова (двотактна) схема (схема Ларіонова) зображена на рисунку 114.

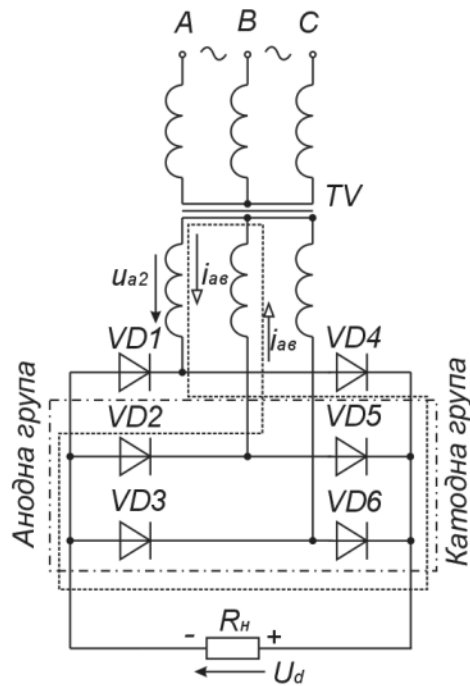


Рисунок 114 – Схема трифазного мостового випрямляча

Шість випрямних діодів увімкнені у трифазну мостову схему і утворюють дві групи: анодну – VD1, VD2, VD3 та катодну – VD4, VD5, VD6. Навантаження вмикається між спільними точками анодної і катодної груп діодів.

У провідному стані завжди знаходяться два діоди: один з анодної групи і один з катодної. Причому струм у схемі протікає від фази з найбільш додатною на даний момент напругою до фази з найбільш від’ємною напругою.

Основні розрахункові співвідношення випрямленої напруги

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_2 \sqrt{3} = 2,34 U_{2\Phi}, \quad (60)$$

$$U_{2\Phi} = 0,425 U_d. \quad (61)$$

Максимальна напруга на діоді

$$U_{3\Phi \text{ MAX}} = \sqrt{2} \sqrt{3} U_{2\Phi} = 1,045 U_d. \quad (62)$$

Середнє значення струму через діод

$$I_a = \frac{I_d}{3}. \quad (63)$$

Коефіцієнт пульсації випрямленої напруги (при $m = 6$)

$$k_{\pi} = \frac{2}{m^2 - 1} = 0,057. \quad (64)$$

Частота пульсації випрямленої напруги перевищує частоту мережі у шість разів.

Встановлена потужність трансформатора

$$S_T = 1,05P_d. \quad (65)$$

У цій схемі відсутнє підмагнічування магнітопроводу, оскільки у вторинному колі кожної обмотки трансформатора за період напруги мережі струм протікає двічі, причому у різних напрямках.

Схема Ларіонова у порівнянні зі схемою Міткевича має такі переваги:

1) за рівних фазних напруг середнє значення випрямленої напруги у два рази вище (потрібно задавати меншу кількість витків вторинних обмоток трансформатора);

2) більш низький коефіцієнт пульсацій (менш ніж шість відсотків), що часто дозволяє використовувати схему Ларіонова без фільтра;

3) краще використання трансформатора за потужністю за рахунок відсутності підмагнічування осердя.

Проте, кількість діодів у схемі Ларіонова в два рази більша, але на даний час це несуттєво (за винятком випрямлення малих за значенням напруг), оскільки вартість діодів невелика порівняно з вартістю трансформатора, який в схемі Міткевича повинен бути приблизно на тридцять відсотків потужнішим.

2.13.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести схеми трифазних випрямлячів: а) з нульовим виводом (схема Міткевича); б) мостової (схема Ларіонова).

2. Для схем трифазних випрямлячів визначити параметри випрямленої напруги: середнє значення випрямленої напруги U_d , середнє значення випрямленого струму I_d , коефіцієнт пульсацій q і максимальну зворотну напругу на випрямному діоді $U_{зв\ max}$ при заданих значеннях напруги на вторинній обмотці трансформатора $U_{2\phi}$ і опору навантаження R_H . Варіанти завдань наведені в таблиці А.19 (додаток А).

3. Для схем трифазних випрямлячів побудувати графіки зміни в часі (часові діаграми) напруги на опорі навантаження при синусоїдальній вхідній напрузі: $u_2 = f(t)$, $u_d = f(t)$.

2.13.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для дослідження трифазного випрямляча з нульовим виводом (рисунок 115).

2. Установити задані значення напруг U_a , U_b , U_c і опору навантаження R_H (таблиця А. 19, додаток А).

3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

4. Включити схему. Записати показання приладів: вольтметра PV (середнє значення випрямленої напруги U_d) і амперметра PA (середнє значення випрямленого струму I_d).

5. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити амплітудні значення вхідної і вихідної напруги випрямляча.

6. З віртуального осцилографа привести осцилограми вхідної і вихідної напруги випрямляча (див. рисунок 116).

7. Набрати схему для дослідження трифазного мостового випрямляча (рисунок 117).

8. Виконати пп. 2-6.

2.13.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз і порівняння для кожної з схем випрямлячів теоретичних і експериментальних результатів.

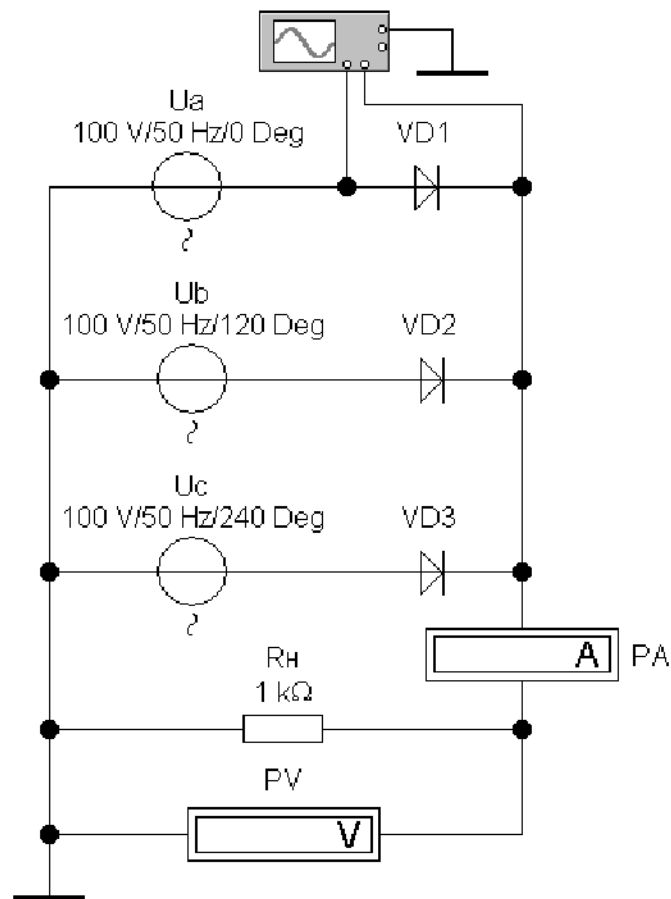


Рисунок 115 – Схема для дослідження трифазного випрямляча з нульовим виводом (схема Міткевича)

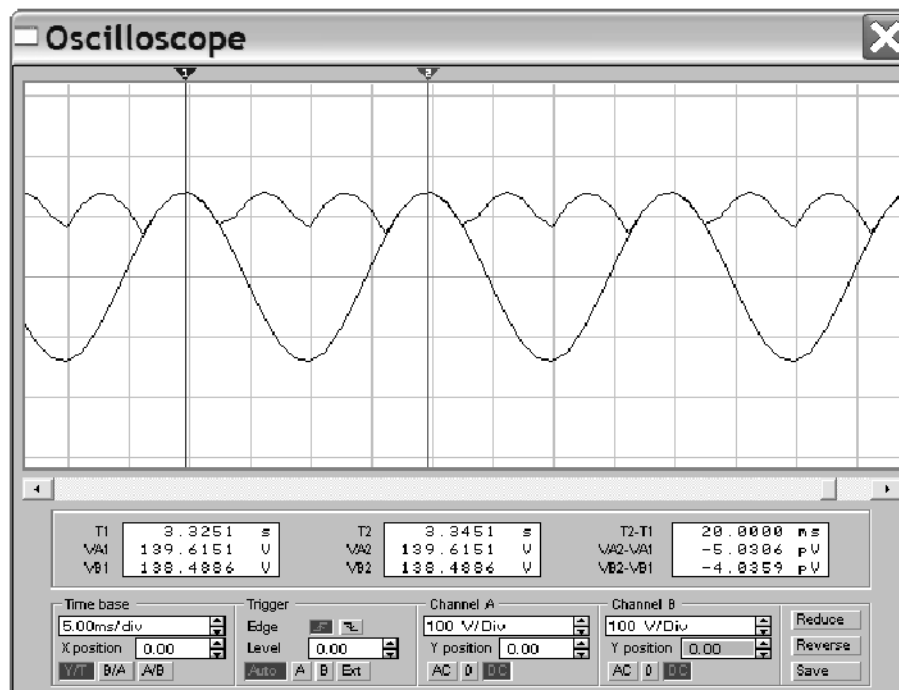


Рисунок 116 – Осцилограми напруг трифазного випрямляча з нульовим виводом (схема Міткевича)

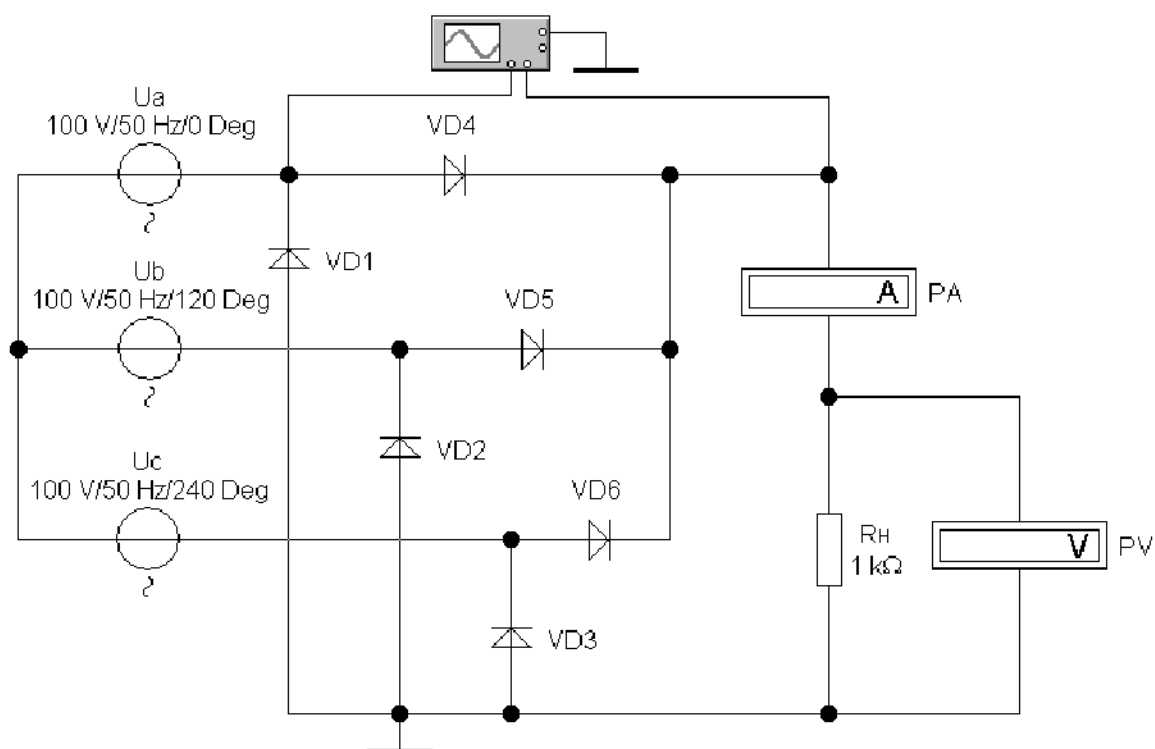


Рисунок 117 – Схема для дослідження трифазного мостового випрямляча (схема Ларіонова)

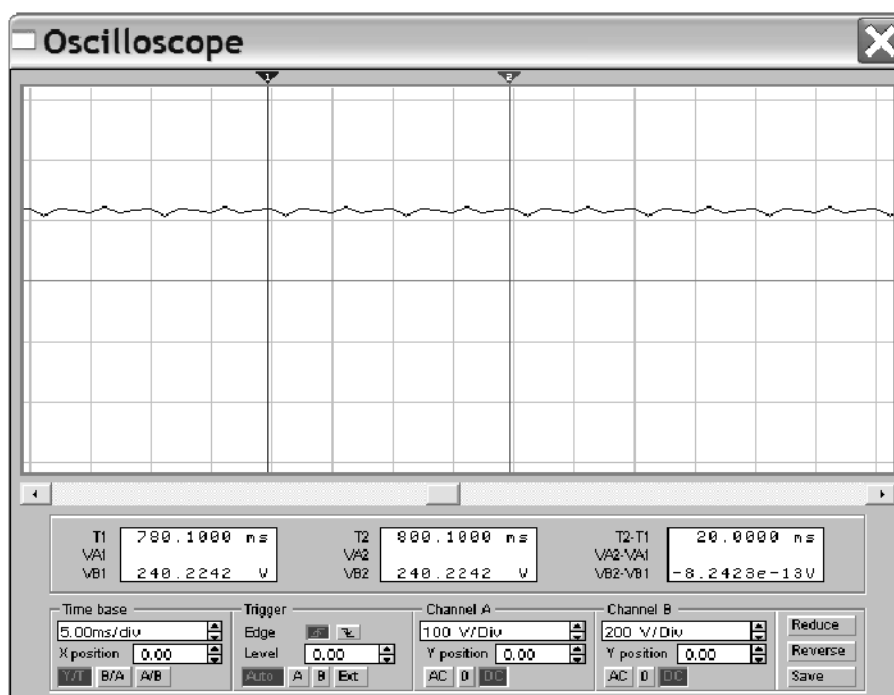


Рисунок 118 – Осцилограми вихідної напруги трифазного мостового випрямляча (схема Ларіонова)

Контрольні питання

1. Поясніть призначення трифазних випрямлячів.
2. Поясніть, у яких випадках застосовують трифазні випрямлячі?
3. Наведіть схему і поясніть принцип роботи трифазного випрямляча з нульовим виводом.
4. Наведіть схему і поясніть принцип роботи трифазного мостового випрямляча.
5. Порівняйте схему Міткевича зі схемою Ларіонова. В яких випадках яка з них більш придатна і чому?
6. Наведіть основні розрахункові співвідношення для трифазних випрямлячів.

2.14 КЕРОВАНІ ВИПРЯМЛЯЧІ

Мета роботи: вивчення принципу роботи і дослідження однофазних керованих випрямлячів.

2.14.1 Загальні теоретичні відомості

Можливість зміни величини постійної напруги на навантаженні за необхідним законом у заданих межах може бути реалізована за допомогою **керованих випрямлячів**, які будуються на керованих вентилях, наприклад, на тиристорах.

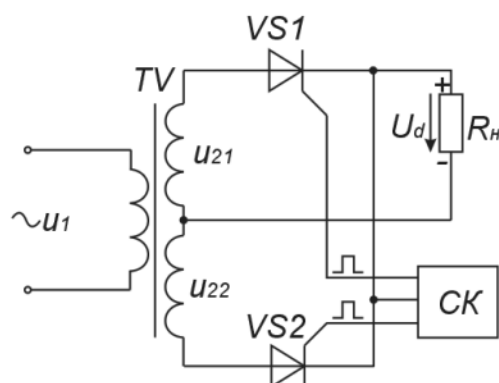


Рисунок 119 – Однофазний двонапівперіодний керований випрямляч з нульовим виводом трансформатора

СК – схема керування (система імпульсно-фазового керування), яка забезпечує подачу на тиристири керуючих імпульсів з регульованою затримкою. Завданням системи імпульсно-фазового керування (СІФК) є генерація імпульсів керування необхідної амплітуди, тривалості і форми, розподіл їх по відповідних вентилях і визначення моменту подачі цих імпульсів відносно переходу змінної напруги через нуль.

Залежність середньої випрямленої напруги на навантаженні U_d від кута керування α називається регульовальною характеристикою, яка наведена на рисунку 120.

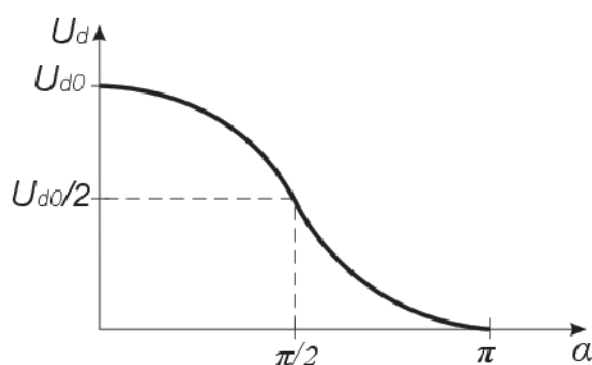


Рисунок 120 – Регульовальна характеристика керованого випрямляча

Керовані випрямлячі широко використовуються для створення регульованих джерел напруги при регулюванні нагрівачів, освітлювальних приладів, швидкості обертання електродвигунів і т.п.

2.14.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення керованого випрямляча.
2. Привести схему мостового фазообертача і його векторну діаграму напруг. Описати принцип роботи мостового фазообертача.
3. Привести схему однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча (рисунок 121). Описати призначення елементів схеми і принцип роботи керованого випрямляча.

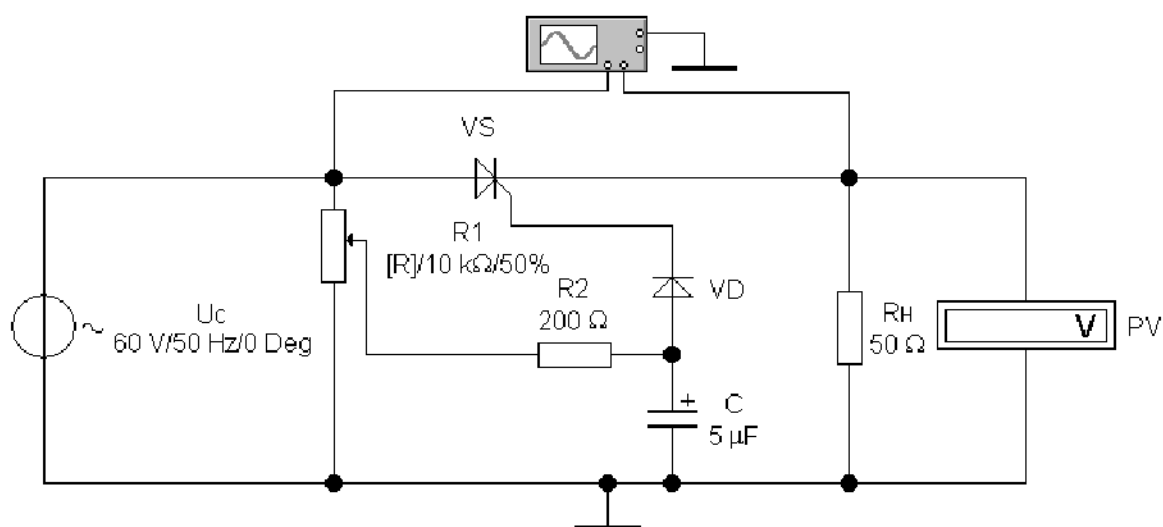


Рисунок 121 – Схема для дослідження однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча

4. Привести схему однофазного двонапівперіодного керованого випрямляча з фазо-імпульсною системою керування (рисунок 123). Описати призначення елементів схеми і принцип роботи керованого випрямляча.
5. Для однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча побудувати графіки зміни в часі (часові діаграми) струму керування $I_{кер}$, напруги на тиристорі U_{VS} і навантаженні U_R при заданих значеннях напруги мережі $U_{мер}$ і кута керування тиристором α . Варіанти завдань наведені в таблиці А.4 (додаток А).
6. Привести регульовальну характеристику керованого випрямляча $U_d = f(\alpha)$.

2.14.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для дослідження однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча (рисунок 121).
2. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця А.4,

додаток А).

3. Лінію, що з'єднує вхід “В” віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

4. Включити схему. Змінюючи опір резистора R1 фазообертача (виконаний на елементах R1, R2, C), простежити за зміною величини випрямленої напруги U_d (вольтметр PV) залежно від величини кута керування тиристором α (визначається за допомогою осцилографа). Результати вимірів занести в таблицю 16.

Таблиця 16 – Результати досліджень однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча

α , ел. град.						
U_d , В						

5. З віртуального осцилографа привести осцилограми напруги на навантаженні при різних значеннях кута керування тиристором α (див. рисунок 122).

6. За даними таблиці 16 побудувати регульовальну характеристику однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча $U_d = f(\alpha)$.

7. Набрати схему для дослідження однофазного двонапівперіодного керованого випрямляча з фазо-імпульсною системою керування (рисунок 123).

8. Установити задані параметри елементів схеми.

9. Лінію, що з'єднує вхід “В” віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми встановити кольоровою.

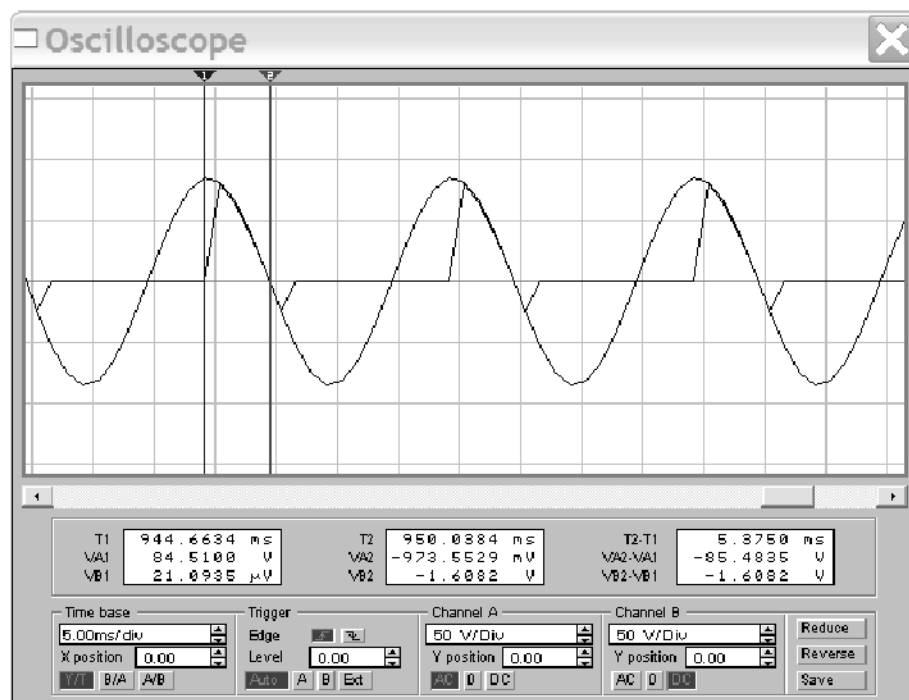


Рисунок 122 – Осцилограми напруг трифазного однофазного
однапівперіодного керованого випрямляча

10. Включити схему. Змінюючи опір резистора R фазообертача простежити за зміною величини випрямленої напруги U_d залежно від величини кута керування тиристором α . Результати вимірів занести в таблицю 17.

Таблиця 17 – Результати досліджень однофазного двонапівперіодного керованого випрямляча

α , ел. град.						
U_d , В						

11. З віртуального осцилографа привести осцилограми напруги на навантаженні при різних значеннях кута керування тиристором α .

12. За даними таблиці 17 побудувати регульовальну характеристику однофазного двонапівперіодного керованого випрямляча $U_d = f(\alpha)$.

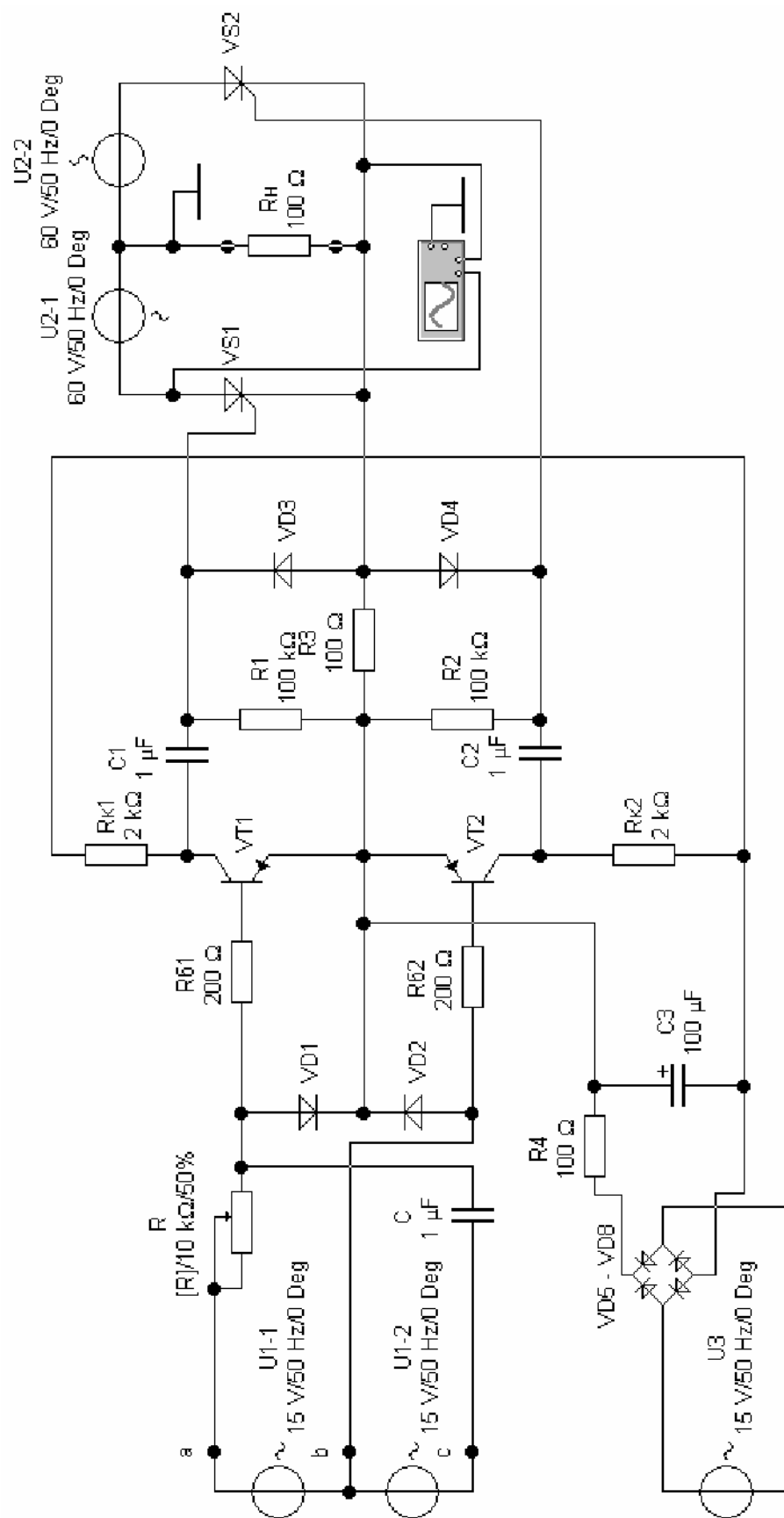


Рисунок 123 – Схема для дослідження однофазного двонапівперіодного керованого випрямляча

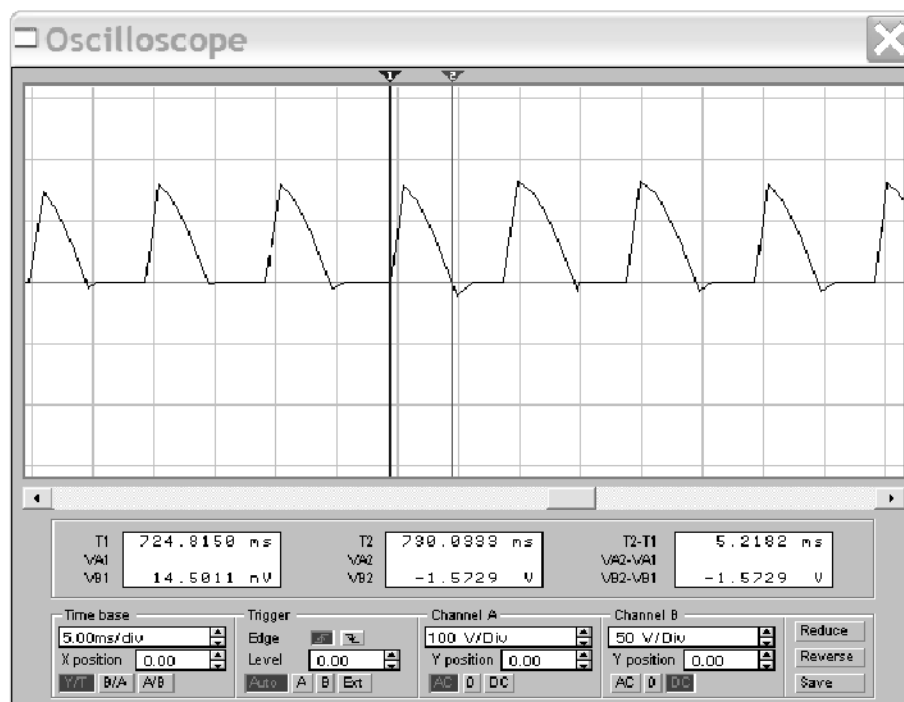


Рисунок 124 – Осцилограма вихідної напруги однофазного двонапівперіодного керованого випрямляча

2.14.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз експериментальних результатів.

Контрольні питання

1. Поясніть призначення керованих випрямлячів.
2. Поясніть, на чому базується принцип роботи тиристорних керованих випрямлячів?
3. Наведіть схему мостового фазообертача і його векторну діаграму напруг. Поясніть принцип роботи мостового фазообертача.
4. Наведіть схему і поясніть принцип роботи однофазного однонапівперіодного керованого випрямляча.
5. Наведіть регулювальну характеристику тиристорного керованого випрямляча і поясніть характер її залежності при лінійних змінах кута керування.

6. Поясніть призначення систем імпульсно-фазового керування (СІФК). Назвіть види СІФК.

7. Наведіть структурну схему і поясніть принцип роботи СІФК з горизонтальним керуванням.

8. Поясніть, у чому полягає принцип дії СІФК з вертикальним керуванням. Наведіть структурну схему такої СІФК і поясніть призначення її вузлів.

2.15 ІМПУЛЬСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ (КОНВЕРТОРИ)

Мета роботи: вивчення принципу роботи і дослідження імпульсних перетворювачів постійної напруги (конверторів).

2.15.1 Загальні теоретичні відомості

Конвертори – це пристрої, які призначені для перетворення постійної напруги однієї величини в постійну напругу іншої величини.

За схемною реалізацією конвертори поділяються на перетворювачі постійної напруги із самозбудженням та імпульсні перетворювачі постійної напруги. Імпульсні перетворювачі постійної напруги (конвертори) використовуються для перетворення постійної напруги в постійну. Зміну величини напруги регулюють за допомогою параметрів імпульсів керування (рисунок 125, а). Для зміни параметрів імпульсів використовують широтно-імпульсний або частотно-імпульсний способи регулювання. При широтно-імпульсному способі вихідну напругу регулюють зміною тривалості вихідних імпульсів $t_{\text{имп}}$ при незмінному періоді їх надходження. При частотно-імпульсному способі вихідну напругу регулюють зміною частоти надходження вихідних імпульсів при незмінній тривалості імпульсу $t_{\text{имп}}$, тобто змінюється період надходження імпульсів T .

Принцип роботи базується на ключовому режимі роботи транзистора або тиристора, внаслідок чого періодично переривається подання напруги на навантаження. Середнє значення напруги навантаження визначається за виразом

$$U_{\text{сеп}} = \delta U, \quad (66)$$

де U – напруга джерела живлення;

$\delta = t_{\text{имп}}/T$ – коефіцієнт заповнення імпульсів.

Таким чином, напругу на навантаженні можна регулювати від 0 до U .

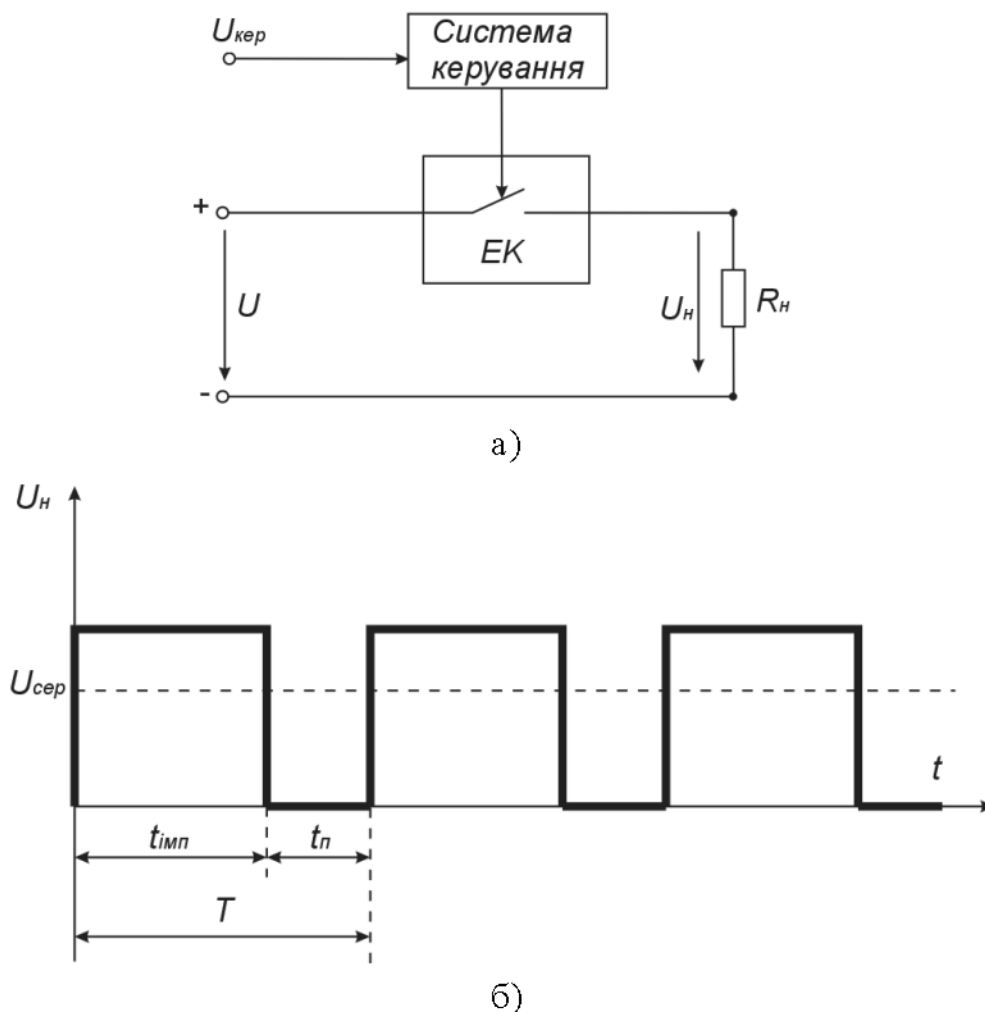


Рисунок 125 – Принцип регулювання напруги навантаження:

$t_{\text{имп}}$ – тривалість імпульсу; $t_{\text{п}}$ – тривалість паузи;

$T = (t_{\text{имп}} + t_{\text{п}})$ – період імпульсів

2.15.2 Завдання для самостійної роботи

1. Привести визначення конвертора.
2. Привести схему конвертора (рисунок 126). Описати призначення елементів схеми і принцип роботи перетворювача.

На операційному підсилювачі DA реалізований мултивібратор, вихідна напруга якого через транзистор VT1 управляє регулюючим елементом, який виконаний на транзисторі VT2. На елементах L і C2 реалізований згладжуючий фільтр. Діод VD2 призначений для створення

контур протікання струму навантаження при закритому регулюючому транзисторі VT2.

3. Розрахувати величину напруги на виході перетворювача $[U_d = (t_i/T)E]$.

Параметри елементів мультивібратора C1, R1 і R2 наведені на схемі перетворювача (рисунок 126), величини резисторів R3 і R4, напруга E, що підлягає перетворенню, наведені в таблиці А.20 (додаток А). Елементи C1, R3 визначають тривалість паузи $[t_{\text{п}} = C1R3 \ln(1+2R1/R2)]$, а C1, R4 – тривалість імпульсу $[t_i = C1R4 \ln(1+2R1/R2)]$.

4. Змінюючи тривалість імпульсу в межах $0,1T < t_i < 0,9T$, побудувати графік залежності $U_d = f(t_i)$. Тривалість періоду T не змінюється ($T = \text{const}$), що досягається тим, що сума опорів резисторів R3 + R4 повинна залишатися постійною.

5. Побудувати графік залежності $U_d = f(T)$ при незмінному значенні тривалості імпульсу ($t_i = \text{const}$). Зміна тривалості періоду в межах $0,1t_i < T < 10t_i$ досягається зміною величини резистора R3.

2.15.3 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB. Набрати схему для дослідження конвертора (рисунок 126).

2. Установити задані параметри елементів схеми (таблиця А.20, додаток А).

3. Лінії, що з'єднують входи “А” і “В” віртуального осцилографа з контрольними точками схеми встановити кольоровими.

4. Включити схему. Зняти показання вольтметра PV. З віртуального осцилографа привести осцилограми напруг на виході мультивібратора і конвертора (див. рисунок 127).

5. За допомогою візирних ліній віртуального осцилографа визначити тривалість імпульсу t_i і періоду T напруги мультивібратора.

6. Змінюючи величину опору резистора R3, зняти залежність величини вихідної напруги конвертора U_d від тривалості періоду $U_d = f(T)$ ($t_i = \text{const}$ – розрахункове значення) при частотно-імпульсному регулюванні. Результати вимірів занести в таблицю 18.

7. Змінюючи величину опорів резисторів R3 і R4 (сума опорів резисторів R3 + R4 при цьому повинна залишатися постійною), зняти

залежність величини вихідної напруги конвертора U_d від тривалості імпульсу $U_d = f(t_i)$ ($T = \text{const}$ – розрахункове значення) при широтно-імпульсному регулюванні. Результати вимірів занести в таблицю 19.

Таблиця 18 – Результати досліджень конвертора при частотно-імпульсному регулюванні

R3, кОм	10	20	30	40	70	100	150	200	250
t_i , мс									
T, мс									
U_H , В									

Таблиця 19 – Результати досліджень конвертора при широтно-імпульсному регулюванні

R3, кОм									
R4, кОм									
t_i , мс									
t_i / T									
U_H , В									

8. За даними пп. 6, 7 побудувати графіки залежностей вихідної напруги конвертора від тривалості періоду $U_d = f(T)$ і тривалості імпульсу $U_d = f(t_i)$.

2.15.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для самостійної роботи.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз і порівняння теоретичних і експериментальних результатів.

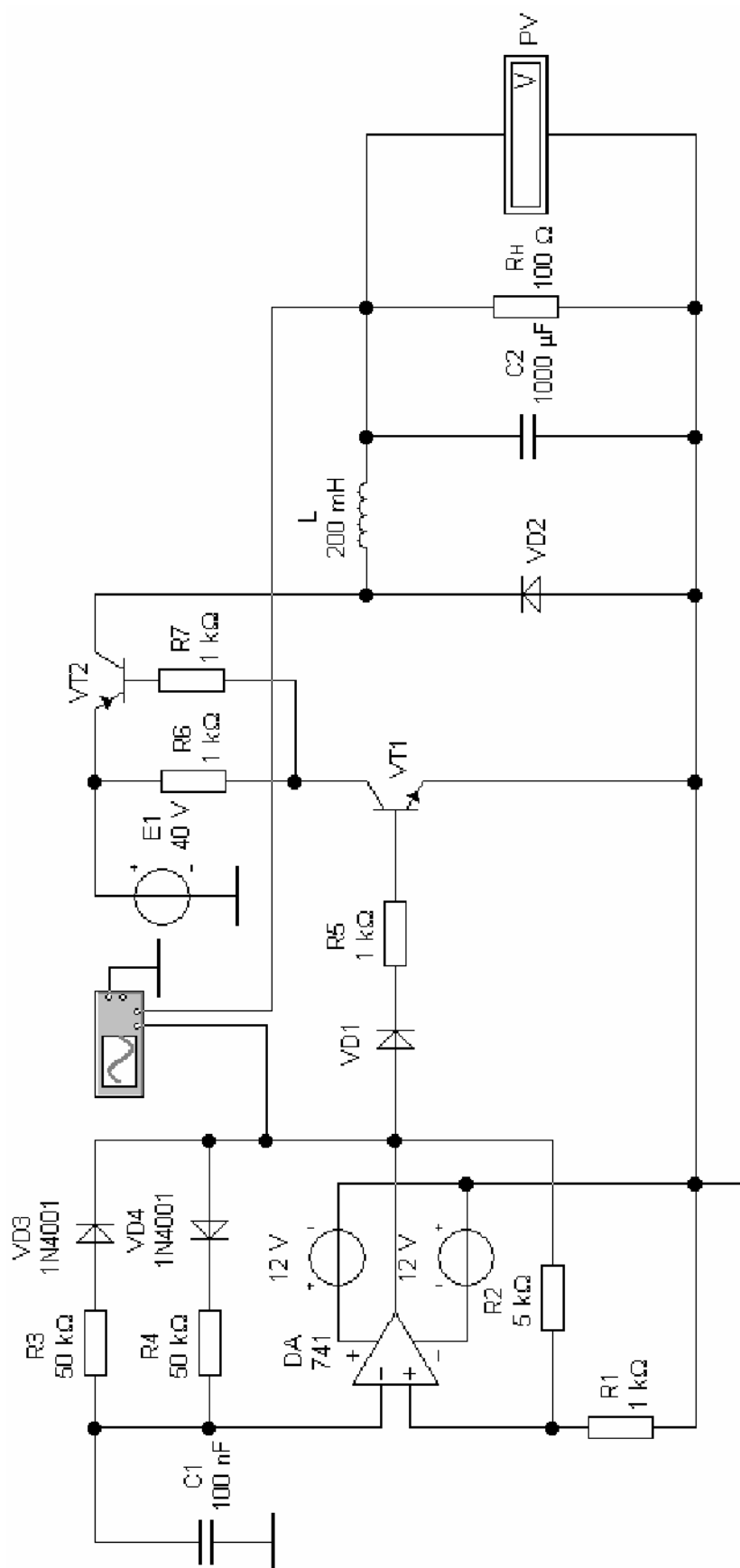


Рисунок 126 – Схема для дослідження імпульсного перетворювача постійної напруги (конвертора)

Контрольні питання

1. Поясніть призначення конверторів.
2. Назвіть методи регулювання напруги постійного струму, поясніть їх особливості.
3. Поясніть за допомогою часових діаграм принцип широтно-імпульсного та частотно-імпульсного способів регулювання вихідної напруги конверторів.
4. Поясніть, на чому базується принцип роботи імпульсного конвертора?
5. Наведіть схему і поясніть принцип роботи імпульсного конвертора.
6. Поясніть, чим визначається робоча частота конвертора?

ДОДАТОК А

Таблиця А.1

№ вар.	Для діода		Для стабілітрона		№ вар.	Для діода		Для стабілітрона	
	$U_{мвх},$ В	R, Ом	$U_{мвх},$ В	R, кОм		$U_{мвх},$ В	R, Ом	$U_{мвх},$ В	R, кОм
1	10	10	6	0,2	31	10	25	10	0,9
2	12	20	7	0,4	32	12	27	11	1,1
3	14	30	8	0,6	33	14	29	12	1,3
4	16	40	9	0,8	34	16	11	13	1,5
5	18	50	10	1,0	35	18	13	14	1,7
6	20	45	11	1,2	36	20	15	15	1,9
7	22	35	12	1,4	37	22	17	16	2,1
8	24	25	13	1,6	38	24	19	17	2,3
9	26	11	14	1,8	39	26	20	18	2,5
10	28	13	15	2,0	40	28	18	19	2,7
11	30	15	16	2,2	41	30	16	20	2,9
12	32	17	17	2,4	42	32	14	21	3,1
13	34	19	18	2,6	43	34	12	22	3,3
14	33	20	19	2,8	44	33	10	23	3,5
15	31	18	20	3,0	45	31	8	24	3,7
16	29	16	21	3,2	46	29	6	25	3,9
17	27	14	22	3,4	47	27	7	6	0,4
18	25	12	23	3,6	48	25	8	7	0,6
19	23	10	24	3,8	49	23	9	8	0,8
20	21	11	25	4,0	50	21	10	9	1,0
21	19	13	6	0,3	51	19	11	10	1,2
22	17	15	7	0,5	52	17	12	11	1,4
23	15	17	8	0,7	53	15	13	12	1,6
24	13	19	9	0,9	54	13	14	13	1,8
25	11	10	10	1,1	55	11	15	14	2,0
26	9	11	11	1,3	56	9	16	15	2,2
27	7	12	12	1,5	57	7	5	16	2,4
28	5	13	13	1,7	58	5	7	17	2,6
29	8	14	14	1,9	59	8	9	18	2,8
30	6	15	15	2,1	60	6	10	19	3,0

Примітка: Діод 1N4001 $U_{пр} = 1,35$ В; стабілітрон 1N4733 $U_{ст} = 5,1$ В

Таблица А.2

№ вар.	β	$E_K, В$	$R_K,$ кОм	№ вар.	β	$E_K, В$	$R_K,$ кОм
1	176	8	0,5	31	175	16	1,0
2	178	9	0,6	32	173	17	0,9
3	180	10	0,7	33	171	18	0,8
4	182	11	0,8	34	174	19	0,7
5	184	12	0,9	35	176	20	0,6
6	186	13	1,0	36	178	10	0,5
7	188	14	0,5	37	180	11	1,0
8	190	15	0,6	38	182	12	0,9
9	188	16	0,7	39	184	13	0,8
10	186	17	0,8	40	186	14	0,7
11	184	18	0,9	41	188	15	0,6
12	182	19	1,0	42	190	16	0,5
13	180	20	1,0	43	187	17	0,5
14	178	10	0,9	44	185	18	0,6
15	176	11	0,8	45	183	19	0,7
16	174	12	0,7	46	181	20	0,8
17	175	13	0,6	47	179	10	0,9
18	177	14	0,5	48	177	11	1,0
19	179	15	0,5	49	175	12	1,0
20	181	16	0,6	50	173	13	0,9
21	183	17	0,7	51	171	14	0,8
22	185	18	0,8	52	175	15	0,7
23	187	19	0,9	53	179	16	0,6
24	189	20	1,0	54	183	17	0,5
25	187	10	0,5	55	187	18	1,0
26	185	11	0,6	56	191	19	0,9
27	183	12	0,7	57	188	20	0,8
28	181	13	0,8	58	184	10	0,7
29	179	14	0,9	59	180	11	0,6
30	177	15	1,0	60	176	12	0,5

Таблиця А.3

№ вар.	S, мА/В	I _{споч.} , мА	U _{зв} вДс, В	E _с , В	R _с , кОм	№ вар.	S, мА/В	I _{споч.} , мА	U _{зв} вДс, В	E _с , В	R _с , кОм
1	0,5	1,0	0,2	8	7	31	0,5	1,8	1,0	20	9
2	0,6	1,4	0,3	9	8	32	0,6	2,0	1,2	21	10
3	0,7	1,6	0,4	10	9	33	0,7	2,4	1,5	22	7
4	0,8	1,8	0,5	11	10	34	0,8	2,8	1,4	23	8
5	0,9	2,0	0,6	12	7	35	0,9	3,0	1,3	24	9
6	1,0	2,2	0,7	13	8	36	1,0	3,1	1,2	25	10
7	1,1	2,4	0,8	14	9	37	1,1	3,2	1,1	8	7
8	1,2	2,6	0,9	15	10	38	1,2	3,3	1,0	9	8
9	1,3	2,8	1,0	16	7	39	1,3	3,4	0,9	10	9
10	1,4	3,0	1,1	17	8	40	1,4	3,5	0,8	11	10
11	1,5	3,2	1,2	18	9	41	1,5	4,0	0,7	12	7
12	1,6	3,4	1,3	19	10	42	1,6	3,6	0,6	13	8
13	1,7	3,6	1,4	20	7	43	1,7	3,7	0,5	14	9
14	1,8	3,8	1,5	21	8	44	1,8	3,8	0,4	15	10
15	1,9	4,0	0,2	22	9	45	1,9	3,9	0,3	16	7
16	2,0	4,2	0,3	23	10	46	2,0	4,0	0,5	17	8
17	2,1	4,4	0,4	24	7	47	2,1	4,1	0,6	18	9
18	2,2	4,6	0,5	25	8	48	2,2	4,2	0,7	19	10
19	2,3	4,8	0,6	8	9	49	2,3	4,3	0,8	20	7
20	2,4	5,0	0,7	9	10	50	2,4	4,4	0,9	21	8
21	2,5	5,4	0,8	10	7	51	2,5	4,5	1,0	22	9
22	2,6	5,6	0,9	11	8	52	2,6	4,6	1,1	23	10
23	2,7	5,8	1,0	12	9	53	2,7	4,8	1,2	8	10
24	2,8	6,0	1,1	13	10	54	2,8	5,0	1,3	9	7
25	2,9	6,4	1,2	14	7	55	2,9	5,2	1,0	10	8
26	3,0	6,8	1,3	15	8	56	3,0	5,4	0,8	11	9
27	3,1	7,0	1,4	16	9	57	3,1	5,6	0,9	12	10
28	3,2	7,2	1,5	17	10	58	3,2	5,8	0,7	13	7
29	3,3	7,4	1,2	18	7	59	3,3	6,0	0,6	14	8
30	3,4	7,6	1,0	19	8	60	3,4	6,2	0,5	15	9

Таблица А.4

№ вар.	U _{МЕР} , В	α , град	R ₂ , кОм	C, мкФ	R _н , Ом	№ вар.	U _{МЕР} , В	α , град	R ₂ , кОм	C, мкФ	R _н , Ом
1	20	10	50	6,0	20	31	185	125	180	4,2	20
2	40	30	70	5,5	30	32	205	145	200	3,8	25
3	60	50	90	5,0	40	33	225	165	220	3,4	30
4	80	70	110	4,5	50	34	35	135	240	3,0	35
5	100	90	130	4,0	60	35	55	105	260	2,6	40
6	120	110	150	3,5	70	36	75	75	280	2,2	45
7	140	130	170	3,0	80	37	95	45	300	1,8	50
8	160	150	190	2,5	90	38	115	15	320	1,4	55
9	180	170	210	2,0	100	39	135	30	340	1,0	60
10	200	20	230	1,5	110	40	155	45	360	2,3	65
11	220	40	250	1,0	120	41	175	60	380	2,6	70
12	30	60	270	0,5	130	42	195	75	400	2,9	75
13	50	80	290	2,0	25	43	215	90	420	3,1	80
14	70	100	310	3,0	35	44	30	105	440	3,4	85
15	90	120	330	4,0	45	45	60	120	460	3,7	90
16	110	140	350	5,0	55	46	90	135	480	4,0	95
17	130	160	370	6,0	65	47	120	150	500	4,3	100
18	150	15	390	4,5	75	48	150	165	470	4,7	105
19	170	35	410	3,0	85	49	180	140	440	5,0	110
20	190	55	430	1,5	95	50	210	125	410	5,3	115
21	210	75	450	1,0	105	51	240	110	380	5,6	120
22	230	95	470	2,2	115	52	20	95	350	5,9	110
23	25	115	490	3,2	125	53	50	80	320	6,2	100
24	45	135	510	4,2	110	54	80	65	290	6,5	90
25	65	155	60	5,2	95	55	110	50	260	1,0	80
26	85	25	80	6,2	80	56	140	35	230	2,0	70
27	105	45	100	5,8	65	57	170	20	200	3,0	60
28	125	65	120	5,4	50	58	200	60	170	4,0	50
29	145	85	140	5,0	35	59	230	100	140	5,0	40
30	165	105	160	4,6	20	60	100	140	110	6,0	30

Таблиця А.5

№ вар.	R _н , кОм	№ вар.	R _н , кОм
1	1,0	31	3,9
2	1,2	32	4,1
3	1,4	33	3,8
4	1,6	34	3,5
5	1,8	35	3,2
6	2,0	36	2,9
7	2,2	37	2,6
8	2,4	38	2,3
9	2,6	39	2,0
10	2,8	40	1,7
11	3,0	41	1,4
12	3,2	42	1,1
13	3,4	43	0,9
14	3,6	44	1,2
15	3,8	45	1,5
16	4,0	46	1,8
17	1,1	47	2,1
18	1,3	48	2,4
19	1,5	49	2,7
20	1,7	50	3,0
21	1,9	51	3,3
22	2,1	52	3,6
23	2,3	53	3,9
24	2,5	54	4,2
25	2,7	55	4,0
26	2,9	56	3,7
27	3,1	57	3,4
28	3,3	58	3,1
29	3,5	59	2,8
30	3,7	60	2,4

Таблиця А.6

№ вар.	R_K , кОм	R_E , Ом	№ вар.	R_K , кОм	R_E , Ом
1	0,5	50	31	0,7	70
2	0,6	50	32	0,8	70
3	0,7	50	33	0,9	70
4	0,8	50	34	1,0	120
5	0,9	50	35	1,1	120
6	1,0	50	36	1,2	120
7	1,1	50	37	1,3	120
8	1,2	50	38	1,4	120
9	1,3	50	39	0,5	120
10	0,5	60	40	0,6	80
11	0,6	60	41	0,7	80
12	0,7	60	42	0,8	80
13	0,8	60	43	0,9	80
14	0,9	60	44	1,0	130
15	1,0	100	45	1,1	130
16	1,1	100	46	1,2	130
17	1,2	100	47	1,3	130
18	1,3	100	48	1,4	130
19	0,5	100	49	1,5	130
20	0,6	100	50	0,5	90
21	0,7	100	51	0,6	90
22	0,8	100	52	0,7	90
23	0,9	100	53	0,8	90
24	1,0	110	54	0,9	90
25	1,1	110	55	1,0	90
26	1,2	110	56	1,1	90
27	1,3	110	57	1,2	90
28	1,4	110	58	1,3	90
29	0,5	70	59	1,4	90
30	0,6	70	60	1,5	90

Примітка: $E_K = 12$ В; $h_{21} = 100$

Таблица А.7

R _Б , кОм	100	120	130	140	160	180	200	220	240	260	280	300
h ₁₁ , Ом	250	270	310	340	380	420	430	530	570	630	680	730

Таблица А.8

№ вар.	K _У	R _{ЗЗ} , кОм	№ вар.	K _У	R _{ЗЗ} , кОм
1	8	50	31	11	200
2	9	55	32	12	205
3	10	60	33	13	210
4	11	65	34	14	215
5	12	70	35	15	220
6	13	75	36	8	225
7	14	80	37	9	230
8	15	85	38	10	235
9	16	90	39	11	240
10	17	95	40	12	245
11	18	100	41	13	250
12	19	105	42	14	255
13	20	110	43	15	260
14	8	115	44	8	265
15	9	120	45	9	270
16	10	125	46	10	275
17	11	130	47	11	280
18	12	135	48	12	285
19	13	140	49	13	290
20	14	145	50	14	295
21	15	150	51	15	300
22	16	155	52	8	305
23	17	160	53	9	310
24	18	165	54	10	315
25	19	170	55	11	320
26	20	175	56	12	325
27	21	180	57	13	330
28	8	185	58	14	335
29	9	190	59	15	340
30	10	195	60	16	345

Таблица А.9

№ вар.	LC – генератор			RC – генератор		№ вар.	LC – генератор			RC – генератор	
	L, Гн	C ₁ =C ₂ мкФ	C, мкФ	C, мкФ	R, Ом		L, Гн	C ₁ =C ₂ мкФ	C, мкФ	C, мкФ	R, Ом
1	2,0	1,0	0,2	0,5	20	31	0,5	3,9	0,35	3,5	6
2	1,9	1,1	0,2	0,6	19	32	0,6	3,8	0,35	3,6	5
3	1,8	1,2	0,2	0,7	18	33	0,7	3,7	0,35	3,7	20
4	1,7	1,3	0,2	0,8	17	34	0,8	3,6	0,35	3,8	19
5	1,6	1,4	0,2	0,9	16	35	0,9	3,5	0,3	3,9	18
6	1,5	1,5	0,2	1,0	15	36	1,0	3,4	0,3	4,0	17
7	1,4	1,6	0,25	1,1	14	37	0,5	3,3	0,3	4,1	16
8	1,3	1,7	0,25	1,2	13	38	0,6	3,2	0,3	4,2	15
9	1,2	1,8	0,25	1,3	12	39	0,7	3,1	0,3	4,3	14
10	1,1	1,9	0,25	1,4	11	40	0,8	3,0	0,3	4,4	13
11	1,0	2,0	0,25	1,5	10	41	0,9	2,9	0,3	4,5	12
12	2,0	2,1	0,3	1,6	9	42	1,0	2,8	0,3	4,6	11
13	1,9	2,2	0,3	1,7	8	43	1,0	2,7	0,3	4,7	10
14	1,8	2,3	0,3	1,8	7	44	1,1	2,6	0,3	4,8	9
15	1,7	2,4	0,3	1,9	6	45	1,2	2,5	0,3	4,9	8
16	1,6	2,5	0,3	2,0	5	46	1,3	2,4	0,3	5,0	7
17	1,5	2,6	0,3	2,1	20	47	1,4	2,3	0,3	5,1	6
18	1,4	2,7	0,3	2,2	19	48	1,5	2,2	0,3	5,2	5
19	1,3	2,8	0,3	2,3	18	49	1,6	2,1	0,3	1,0	20
20	1,2	2,9	0,3	2,4	17	50	1,7	2,0	0,3	1,1	19
21	1,1	3,0	0,3	2,5	16	51	1,8	1,9	0,25	1,2	18
22	1,0	3,1	0,3	2,6	15	52	2,0	1,8	0,25	1,3	17
23	0,9	3,2	0,3	2,7	14	53	1,9	1,7	0,25	1,4	16
24	0,8	3,3	0,3	2,8	13	54	1,8	1,6	0,25	1,5	15
25	0,7	3,4	0,3	2,9	12	55	1,7	1,5	0,25	1,6	14
26	0,6	3,5	0,3	3,0	11	56	1,6	1,4	0,2	1,7	13
27	0,5	3,6	0,35	3,1	10	57	1,5	1,3	0,2	1,8	12
28	0,6	3,7	0,35	3,2	9	58	1,4	1,2	0,2	1,9	11
29	0,7	3,8	0,35	3,3	8	59	1,3	1,1	0,2	2,0	10
30	0,8	3,9	0,35	3,4	7	60	1,2	1,0	0,2	2,1	9

Таблица А.10

№ вар	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	№ вар	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
1	0	1	1	1	0	1	1	0	31	0	0	0	0	1	1	1	1
2	1	1	1	1	0	1	0	1	32	1	0	0	0	1	1	0	1
3	0	0	1	1	0	1	1	1	33	0	1	1	1	0	0	1	0
4	1	0	1	1	0	1	0	1	34	1	1	1	1	0	0	0	0
5	0	1	0	1	0	1	1	0	35	0	0	1	1	0	0	1	1
6	1	1	0	1	0	1	0	0	36	1	0	1	1	0	0	0	1
7	0	0	0	1	0	1	1	1	37	0	1	0	1	0	0	1	0
8	1	0	0	1	0	1	0	1	38	1	1	0	1	0	0	0	0
9	0	1	1	0	0	1	1	0	39	0	0	0	1	0	0	1	1
10	1	1	1	0	0	1	0	0	40	1	0	0	1	0	0	0	1
11	0	0	1	0	0	1	1	1	41	0	1	1	0	0	0	1	0
12	1	0	1	0	0	1	0	1	42	1	1	1	0	0	0	0	0
13	0	1	0	0	0	1	1	0	43	0	0	1	0	0	0	1	1
14	1	1	0	0	0	1	0	0	44	1	0	1	0	0	0	0	1
15	0	0	0	0	0	1	1	1	45	0	1	0	0	0	0	1	0
16	1	0	0	0	0	1	0	1	46	1	1	0	0	0	0	0	0
17	0	1	1	1	1	1	1	0	47	0	0	0	0	0	0	1	1
18	1	1	1	1	1	1	0	0	48	1	0	0	0	0	0	0	1
19	0	0	1	1	1	1	1	1	49	0	1	1	1	1	0	1	0
20	1	0	1	1	1	1	0	1	50	1	1	1	1	1	0	0	0
21	0	1	0	1	1	1	1	0	51	0	0	1	1	1	0	1	1
22	1	1	0	1	1	1	0	0	52	1	0	1	1	1	0	0	1
23	0	0	0	1	1	1	1	1	53	0	1	0	1	1	0	1	0
24	1	0	0	1	1	1	0	1	54	1	1	0	1	1	0	0	0
25	0	1	1	0	1	1	1	0	55	0	0	0	1	1	0	1	1
26	1	1	1	0	1	1	0	0	56	1	0	0	1	1	0	0	1
27	0	0	1	0	1	1	1	1	57	0	1	1	0	1	0	1	0
28	1	0	1	0	1	1	0	1	58	1	1	1	0	1	0	0	0
29	0	1	0	0	1	1	1	0	59	0	0	1	0	1	0	1	1
30	1	1	0	0	1	1	0	0	60	1	0	1	0	1	0	0	1

Таблиця А.11

№ вар.	U _{оп} , В	U _{мвх} , В	№ вар.	U _{оп} , В	U _{мвх} , В
1	2,0	9,0	31	2,1	4,0
2	2,2	8,8	32	2,3	4,2
3	2,4	8,6	33	2,5	4,3
4	2,6	8,4	34	2,7	7,4
5	2,8	8,2	35	2,9	8,1
6	3,0	8,0	36	3,1	8,5
7	3,2	7,8	37	3,3	8,7
8	3,4	7,6	38	3,5	8,9
9	3,6	7,4	39	3,7	9,1
10	3,8	7,2	40	3,9	9,3
11	4,0	7,0	41	4,1	9,5
12	4,1	6,8	42	4,3	9,7
13	4,2	6,6	43	4,5	10
14	2,1	9,0	44	2,1	4,2
15	2,3	8,8	45	2,3	4,3
16	2,5	8,6	46	2,5	7,4
17	2,7	8,4	47	2,7	8,1
18	2,9	8,2	48	2,9	8,5
19	3,1	8,0	49	3,1	8,7
20	3,3	7,8	50	3,3	8,9
21	3,5	7,6	51	3,5	9,1
22	3,7	7,4	52	3,7	9,3
23	3,9	7,2	53	3,9	9,5
24	4,1	7,0	54	4,1	9,7
25	4,3	6,8	55	4,3	10
26	4,5	6,6	56	4,5	8,1
27	2,0	9,0	57	2,7	8,5
28	2,2	8,8	58	2,9	8,7
29	2,4	8,6	59	3,1	8,9
30	2,6	8,4	60	3,3	9,1

Примітка: U_{вихмах} = 11В

Таблиця А.12

№ вар.	U _{оп} , В	U _{мвх} , В	№ вар.	U _{оп} , В	U _{мвх} , В
1	1,8	4,8	13	3,1	6,7
2	2,0	5,0	32	3,3	6,9
3	2,2	5,2	33	3,5	7,1
4	2,4	5,4	34	3,7	7,3
5	2,6	5,6	35	3,9	7,5
6	2,8	5,8	36	4,1	7,7
7	3,0	6,0	37	4,3	7,9
8	3,2	6,2	38	4,5	8,1
9	3,4	6,4	39	4,7	8,3
10	3,6	6,6	40	4,9	8,5
11	3,8	6,8	41	5,1	8,7
12	4,0	7,0	42	5,3	8,9
13	4,2	7,2	43	5,5	9,0
14	2,0	5,2	44	3,1	6,9
15	2,2	5,4	45	3,3	7,1
16	2,4	5,6	46	3,5	7,3
17	2,6	5,8	47	3,7	7,5
18	2,8	6,0	48	3,9	7,7
19	3,0	6,2	49	4,1	7,9
20	3,2	6,4	50	4,3	8,1
21	3,4	6,6	51	4,5	8,3
22	3,6	6,8	52	4,7	8,5
23	3,8	7,0	53	4,9	8,7
24	4,0	7,2	54	5,1	8,9
25	4,2	7,4	55	5,3	8,3
26	3,4	6,8	56	5,5	8,5
27	3,6	7,2	57	4,9	7,9
28	3,8	7,4	58	5,1	8,1
28	4,0	7,6	59	5,3	8,3
30	4,2	7,8	60	5,5	8,5

Примітка: U_{вихмах} = 11В

Таблица А.13

№ вар.	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм	R, кОм	C, мкФ	R', кОм	№ вар.	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм	R, кОм	C, мкФ	R', кОм
1	1	3	10	20	8	31	2,3	5,4	10	21	5
2	1,1	3,2	20	19	18	32	2,4	5,8	20	22	15
3	1,2	3,4	30	18	28	33	2,5	6,0	30	10	25
4	1,3	3,6	40	17	35	34	2,6	6,4	40	11	30
5	1,4	3,8	50	16	45	35	2,7	6,6	50	12	40
6	4,5	4,0	60	15	55	36	2,8	6,8	60	13	50
7	4,6	4,1	70	14	65	37	2,9	7,0	70	14	60
8	1,7	4,2	80	13	75	38	3,0	7,2	80	15	70
9	1,8	4,3	90	12	85	39	3,1	7,4	90	16	80
10	1,9	4,5	100	11	95	40	3,2	7,8	100	17	90
11	2,0	4,8	100	10	90	41	3,3	8,2	100	18	100
12	2,1	5,0	120	21	100	42	3,4	8,5	120	19	100
13	2,2	5,2	130	22	110	43	3,5	9,0	130	20	100
14	1	3	10	20	8	44	2,3	5,4	10	21	5
15	1,1	3,2	20	19	18	45	2,4	5,8	20	22	15
16	1,2	3,4	30	18	28	46	2,5	6,0	30	10	25
17	1,3	3,6	40	17	35	47	2,6	6,4	40	11	30
18	1,4	3,8	50	16	45	48	2,7	6,6	50	12	40
19	4,5	4,0	60	15	55	49	2,8	6,8	60	13	50
20	4,6	4,1	70	14	65	50	2,9	7,0	70	14	60
21	1,7	4,2	80	13	75	51	3,0	7,2	80	15	70
22	1,8	4,3	90	12	85	52	3,1	7,4	90	16	80
23	1,9	4,5	100	11	95	53	3,2	7,8	100	17	90
24	2,0	4,8	100	10	90	54	3,3	8,2	100	18	100
25	2,1	5,0	120	21	100	55	3,4	8,5	120	19	100
26	2,2	5,2	130	22	110	56	3,5	9,0	130	20	50
27	1,4	4,5	50	15	8	57	2,3	5,4	10	21	60
28	4,5	4,8	60	14	18	58	2,4	5,8	20	22	70
29	4,6	5,0	70	13	28	59	2,5	6,0	30	10	80
30	1,7	5,2	80	12	35	60	2,6	6,4	40	11	90

Таблиця А.14

VD 1N4001, $U_{\text{пр}} = 1,35\text{В}$			VD 1N4148, $U_{\text{пр}} = 1,57\text{В}$		
№ вар.	R , кОм	C_1 , мкФ	№ вар.	R , кОм	C_1 , мкФ
1	20	100	31	72	61
2	24	97	32	76	58
3	28	94	33	80	55
4	32	91	34	84	52
5	36	88	35	88	49
6	40	85	36	90	46
7	44	82	37	92	43
8	48	79	38	94	40
9	52	76	39	96	37
10	56	73	40	98	34
11	60	70	41	100	31
12	64	67	42	16	100
13	68	64	43	12	95
14	72	61	44	20	100
15	76	58	45	24	97
16	80	55	46	28	94
17	84	52	47	32	91
18	88	49	48	36	88
19	90	46	49	40	85
20	92	43	50	44	82
21	94	40	51	48	79
22	96	37	52	52	76
23	98	34	53	56	73
24	100	31	54	60	70
25	16	100	55	64	67
26	12	95	56	68	64
27	36	88	57	36	88
28	40	85	58	40	85
29	44	82	59	44	82
30	48	79	60	48	79

Примітка: $U_{\text{вих}} = 11\text{В}$. Величини R_1 и R_2 наведені в таблиці А.13

Таблица А.15

№ вар.	U_2 , В	R_H , Ом	№ вар.	U_2 , В	R_H , Ом
1	10	20	31	48	20
2	15	25	32	52	25
3	20	30	33	56	30
4	25	35	34	60	35
5	30	40	35	58	40
6	35	45	36	54	45
7	40	50	37	50	50
8	45	55	38	46	55
9	50	60	39	42	60
10	55	65	40	38	65
11	60	70	41	34	70
12	55	75	42	30	75
13	50	80	43	26	80
14	45	20	44	22	85
15	40	25	45	18	90
16	35	30	46	14	85
17	30	35	47	10	80
18	25	40	48	15	75
19	20	45	49	20	20
20	15	50	50	25	25
21	10	55	51	30	30
22	14	60	52	35	35
23	18	65	53	40	40
24	22	70	54	45	45
25	26	75	55	50	50
26	30	80	56	55	55
27	34	85	57	60	60
28	38	90	58	65	65
29	42	95	59	45	70
30	44	100	60	25	75

Таблица А.16

№ вар.	U1, В	C, мкФ	Rн, кОм	n	№ вар.	U1, В	C, мкФ	Rн, кОм	n
1	20	500	0,5	3	31	10	800	0,5	8
2	16	600	0,7	5	32	12	900	0,7	7
3	12	700	0,9	6	33	14	1000	0,9	6
4	8	800	1,1	7	34	16	1100	1,1	5
5	4	900	1,3	8	35	18	1200	1,3	3
6	30	1000	1,5	3	36	9	1300	1,5	8
7	25	1100	1,7	5	37	11	1400	1,7	7
8	20	1200	1,9	6	38	13	1500	1,9	6
9	15	1300	2,1	7	39	15	1600	2,1	5
10	10	1400	2,3	8	40	17	1700	2,3	3
11	40	1500	2,5	3	41	6	1800	2,5	8
12	30	1600	2,7	5	42	10	1900	2,7	7
13	20	1700	2,9	6	43	15	2100	2,9	6
14	10	1800	3,0	7	44	20	1400	3,0	5
15	5	1900	2,8	8	45	25	1300	2,8	3
16	25	2000	2,6	3	46	5	1200	2,6	8
17	20	1800	2,4	5	47	10	1100	2,4	7
18	15	1600	2,2	6	48	20	1000	2,2	6
19	10	1400	2,0	7	49	30	900	2,0	5
20	6	1200	1,8	8	50	40	800	1,8	3
21	17	1000	1,6	3	51	10	700	1,6	8
22	15	800	1,4	5	52	15	500	1,4	7
23	13	600	1,2	6	53	20	800	1,2	6
24	11	1900	1,0	7	54	25	1000	1,0	5
25	9	1700	0,8	8	55	30	1200	0,8	3
26	18	1500	0,6	3	56	4	1400	0,6	8
27	16	1300	0,4	5	57	8	1600	0,4	7
28	14	1100	0,7	6	58	12	1800	0,7	6
29	12	900	0,9	7	59	16	2000	0,9	5
30	10	700	1,1	8	60	20	1700	1,1	3

Таблица А.17

№ вар.	P_H , МВт	U_H , В	U_{BX} , В	№ вар.	P_H , МВт	U_H , В	U_{BX} , В
1	100	5	10	31	160	10	25
2	80	6	15	32	180	14	30
3	60	7	20	33	200	18	35
4	200	10	25	34	220	22	40
5	160	12	30	35	240	26	45
6	140	14	35	36	260	30	50
7	120	16	40	37	80	5	10
8	170	18	45	38	100	6	15
9	190	22	50	39	120	7	20
10	50	3	10	40	140	8	25
11	90	4	15	41	160	9	30
12	110	5	20	42	180	10	35
13	130	7	25	43	200	11	40
14	150	10	30	44	220	12	45
15	170	12	35	45	240	13	50
16	190	14	40	46	20	3	10
17	220	16	45	47	50	9	15
18	240	18	50	48	80	13	20
19	70	4	10	49	110	15	25
20	110	7	15	50	140	18	30
21	150	10	20	51	170	22	35
22	190	13	25	52	200	27	40
23	230	16	30	53	230	33	45
24	270	19	35	54	260	40	50
25	310	22	40	55	30	4	10
26	350	25	45	56	50	10	15
27	390	28	50	57	70	14	20
28	90	4	10	58	90	19	25
29	120	6	15	59	110	24	30
30	140	8	20	60	130	26	35

Таблица А.18

№ вар	$\pm\Delta U_{ВХ},$ В	$U_{Н\ Вых},$ В	$\pm\Delta U_{Вых},$ В	$I_{Н\ НОМ},$ мА	№ вар	$\pm\Delta U_{ВХ},$ В	$U_{Н\ Вых},$ В	$\pm\Delta U_{Вых},$ В	$I_{Н\ НОМ},$ А
1	1,0	5	1	10	31	1,5	9	1	20
2	2,0	10	2	15	32	1,0	6	1	15
3	3,0	15	3	20	33	0,5	4	1	10
4	4,0	20	4	25	34	0,2	5	1	5
5	5,0	25	5	30	35	1,5	10	1,5	5
6	6,0	30	1	35	36	2,0	15	1,5	10
7	1,5	5	2	40	37	2,5	20	1,5	15
8	2,5	10	3	45	38	3,0	25	2	20
9	3,5	15	4	50	39	3,5	30	2	25
10	4,5	20	5	55	40	4,0	35	2,5	30
11	5,5	25	1	60	41	4,5	40	2,5	35
12	6,5	30	2	65	42	0,2	4	0,5	40
13	4,5	25	2,5	70	43	0,5	6	0,5	45
14	3,5	20	3	75	44	1,0	9	1	50
15	2,5	15	3,5	80	45	1,2	12	1	55
16	1,5	10	4	85	46	2,2	15	1	60
17	0,5	5	4,5	90	47	3,2	18	1,5	65
18	1,0	9	5	85	48	4,2	22	2	70
19	1,5	12	5,5	80	49	5,2	24	2,5	75
20	2,0	18	6	75	50	6,2	27	3	80
21	2,5	22	1	70	51	7,2	30	3,5	85
22	3,0	24	1,5	65	52	0,4	5	1	90
23	3,5	27	2	60	53	0,8	10	1,5	95
24	4,0	30	2,5	55	54	1,4	15	1,5	90
25	4,5	27	3	50	55	1,8	20	2	80
26	5,0	24	3,5	45	56	2,4	25	2	70
27	4,0	22	4	40	57	2,8	30	2,5	60
28	3,0	18	4,5	35	58	3,2	35	3	50
29	2,0	15	5	30	59	3,8	40	3,5	40
30	1,0	12	5,5	25	60	4,2	30	4	30

Таблица А.19

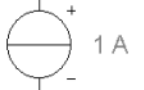
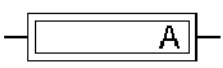
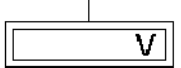
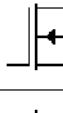
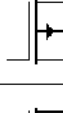
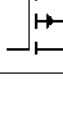
№ вар.	$U_{2\Phi}$, В	R_H , кОм	№ вар.	$U_{2\Phi}$, В	R_H , кОм
1	100	0,5	31	225	1,55
2	120	0,6	32	205	1,65
3	140	0,7	33	185	1,75
4	160	0,8	34	165	1,85
5	180	0,9	35	145	1,95
6	200	1,0	36	125	2,05
7	220	1,1	37	105	2,0
8	240	1,2	38	85	1,7
9	80	1,3	39	65	1,4
10	60	1,4	40	45	1,1
11	50	1,5	41	70	0,8
12	70	1,6	42	90	0,5
13	90	1,7	43	120	0,9
14	110	1,8	44	150	1,3
15	130	1,9	45	180	1,7
16	150	2,0	46	210	2,1
17	170	2,1	47	240	2,5
18	190	2,2	48	220	2,7
19	210	2,3	49	190	2,9
20	230	2,4	50	160	3,0
21	55	0,55	51	130	2,8
22	75	0,65	52	100	2,6
23	95	0,75	53	110	2,4
24	115	0,85	54	140	2,2
25	135	0,95	55	170	1,9
26	155	1,05	56	200	1,6
27	175	1,15	57	230	1,3
28	195	1,25	58	215	1,0
29	215	1,35	59	185	0,7
30	235	1,45	60	155	0,4

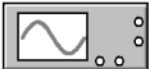
Таблица А.20

№ вар.	Е, В	R3, кОм	R4, кОм	№ вар.	Е, В	R3, кОм	R4, кОм
1	15	10	120	31	65	10	45
2	25	15	115	32	70	15	40
3	30	20	110	33	75	20	35
4	35	25	105	34	80	25	30
5	40	30	100	35	85	30	25
6	45	35	95	36	90	35	20
7	50	40	90	37	95	40	15
8	55	45	85	38	100	45	10
9	60	50	80	39	105	50	120
10	65	55	75	40	110	55	110
11	70	60	70	41	115	60	100
12	75	65	65	42	120	65	90
13	80	70	60	43	17	70	80
14	85	75	55	44	22	75	70
15	90	80	50	45	27	80	60
16	95	85	45	46	32	100	120
17	100	90	40	47	37	105	115
18	105	95	35	48	42	110	110
19	110	100	30	49	47	115	105
20	115	105	25	50	52	120	100
21	120	110	20	51	57	25	95
22	17	115	15	52	65	35	90
23	22	120	10	53	15	45	85
24	27	25	120	54	25	55	80
25	32	35	110	55	30	65	75
26	37	45	100	56	35	75	70
27	42	55	90	57	40	80	65
28	47	65	80	58	45	85	60
29	52	75	70	59	50	90	55
30	57	85	60	60	55	95	50

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Умовні позначення елементів в програмі «Elektronics workbench» (EWB)

Умовні позначення	Назва елементів
	Ідеальне джерело постійної ЕРС
	Ідеальне джерело постійного струму
	Ідеальне джерело змінної ЕРС
	Ідеальне джерело змінного струму
	Амперметр
	Вольтметр
	Біполярний транзистор типу <i>n-p-n</i>
	Біполярний транзистор типу <i>p-n-p</i>
	Польовий транзистор з керованим <i>p-n</i> - переходом каналом <i>n</i> - типу
	Польовий транзистор з керованим <i>p-n</i> - переходом каналом <i>p</i> - типу
	Польовий (МДН) транзистор з ізолюваним затвором вбудованим каналом <i>n</i> - типу
	Польовий (МДН) транзистор з ізолюваним затвором вбудованим каналом <i>p</i> - типу
	Польовий (МДН) транзистор з ізолюваним затвором індукованим каналом <i>n</i> - типу
	Польовий (МДН) транзистор з ізолюваним затвором індукованим каналом <i>p</i> - типу

	Функціональний генератор гармонійних та імпульсних сигналів
	Осцилограф

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка : навчальний посібник / С.О. Квітка, В.Ф. Яковлев, О.В. Нікітіна ; за ред. проф. В.Ф. Яковлева. – К. : Аграрна освіта, 2010. – 329 с.
2. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка : навчальний посібник / С.О. Квітка, В.Ф. Яковлев, О.В. Нікітіна ; за ред. проф. В.Ф. Яковлева. – Суми : «Сумський національний аграрний університет», 2012. – 285 с.
3. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка : підручник / С.О. Квітка. – Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. – 223 с.
4. Квітка С.О. Силові електронні пристрої в системах керування : навчальний посібник для здобувачів вищої освіти / С.О. Квітка. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2021. – 180 с.
5. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка: посібник для виконання лабораторних і практичних занять / С.О. Квітка, Ю.М. Федюшко, Н.Г. Косуліна, С.О. Мороз. – Харків: ФОП Мезіна В.В., 2017. – 244 с.
6. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка: посібник для виконання лабораторних робіт / С.О. Квітка, С.Ф. Курашкін, О.В. Соломаха. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 177 с.
7. Колонтаєвський Ю.П. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков; За ред. А.Г. Соскова. – К.: Каравела, 2003. – 368 с.
8. Колонтаєвський Ю.П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков; За ред. А.Г. Соскова. – К. : Каравела, 2009. – 416 с.
9. Руденко В.С., Ромашко В.Я., Трифонюк В.В. Промислова електроніка. – К.: Либідь, 1993. – 432 с.
10. Гуржій А.М. Імпульсна та цифрова техніка. Підручник / А.М. Гуржій; В.В. Самсонов, Н.І. Поваротнюк. – Х: компанія «Сміт», 2005. – 424 с.
11. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування. Підручник для студентів неелектротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів. – Львів: «Новий Світ – 2000»; «Магнолія плюс», 2003. – 208 с.

12. Дмитрів В.Т., Шиманський В.М. Електроніка і мікросхемотехніка: Навч. посібник. – Львів: Афіша, 2006. – 175 с.