

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ І СПОРТУ УКРАЇНИ**  
**ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ**  
**Кафедра автоматизації виробничих процесів**

С.П. Сус

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**  
з дисципліни  
"Електроніка і мікропроцесорна техніка"  
(для студентів спеціальності 151)

Краматорськ 2018

УДК 621.38 (075.8)

Конспект лекцій з дисципліни «Електроніка та мікропроцесорна техніка» для студентів спеціальності 151 “Автоматизоване управління технологічними процесами” /Уклад. С.П.Сус - Краматорськ: ДДМА, 2018.- 112 с.

Розглянуті елементна база, методика проектування і схемотехніка аналогових, імпульсних і цифрових електронних пристроїв. Весь матеріал розбитий на три модулі відповідно до навчальної робочої програми.

Укладач

С.П. Сус, доц.

Відповідальний за випуск

О.В. Субботін, доц.

## ЗМІСТ

МОДУЛЬ 1. ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ.....	6
1 СУЧАСНІ МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ І ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ.....	6
1.1 Основні етапи проектування електронних пристроїв і параметри електричних сигналів.....	6
1.2 Резистори, варистори і конденсатори. Умовне графічне зображення, види, параметри і маркування.....	10
1.3 Котушки індуктивності, трансформатори і електромеханічні елементи (перемикачі, роз'єми і так далі).....	13
2 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ.....	14
2.1 Принцип дії напівпровідникового діода, його умовне позначення, характеристики і параметри.....	14
2.2 Математичні моделі діодів і їх застосування для аналізу електронних схем.....	15
2.3 Різновиди напівпровідникових діодів, їх класифікація і система позначень.....	18
3 БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ.....	20
3.1 Побудова і принцип дії біполярних транзисторів різного типу провідності. Умовні графічні позначення класифікація і маркування.....	20
3.2 Схеми включення біполярного транзистора.....	22
3.3 Математичні моделі біполярного транзистора для різних схем включення.....	23
3.4 $h$ – параметри біполярного транзистора і його частотні властивості.....	24
4 ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ І ПРИЛАДИ З НЕГАТИВНИМ ОПОРОМ.....	25
4.1 Побудова і принцип дії польових транзисторів з р-n переходом і з ізольованим затвором.....	25
4.2 Схеми включення і математичні моделі польових транзисторів.....	28
4.3 Тиристори. Принцип дії, параметри і маркування.....	28
4.4 Одноперехідні транзистори і тунельні діоди.....	30
5 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДАТЧИКИ І ІНДИКАТОРНІ ПРИЛАДИ.....	31
5.1 Напівпровідникові датчики температури і зусилля.....	31
5.2 Магнітно-напівпровідникові прилади.....	32
5.3 Джерела і приймачі оптичного випромінювання.....	33
5.4 Індикаторні прилади і їх застосування.....	40
МОДУЛЬ 2 СХЕМОТЕХНІКА АНАЛОГОВИХ І ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ.....	40
6 ЕЛЕКТРОННІ ПІДСИЛЮВАЧІ.....	40
6.1 Призначення підсилювачів, їх параметри і характеристики.....	40
6.2 Зворотний зв'язок в підсилювачах і його види.....	43

7 ПІДСИЛЮВАЛЬНИЙ КАСКАД НА БІПОЛЯРНОМУ ТРАНЗИСТОРІ ПО СХЕМІ ІЗ ЗАГАЛЬНИМ ЕМІТЕРОМ.....	46
7.1 Аналіз роботи підсилювального каскаду в режимі спокою.....	46
7.2 Еквівалентна схема заміщення каскаду. Розрахунок параметрів підсилення.....	48
8 СХЕМОТЕХНІКА ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ КАСКАДІВ НА БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРАХ.....	48
8.1 Підсилювальні каскади із загальними колектором і базою.....	48
8.2 Особливості застосування польових транзисторів підсилювальних каскадів.....	50
8.3 Шляхи підвищення коефіцієнта підсилення каскадів.....	51
9 СХЕМОТЕХНІКА ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	52
9.1 Підсилювачі постійного струму на транзисторах з безпосередньою зв'язком і особливості його проектування.....	52
9.2 Диференціальні каскади на польових і біполярних транзисторах.....	53
10 ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ.....	56
10.1 Загальна характеристика і основні параметри.....	56
10.2 Двотактний підсилювач.....	58
11 ОПЕРАЦІЙНІ ПІДСИЛЮВАЧІ (ОП).....	59
11.1 Призначення, структура і основні характеристики операційного підсилювача.....	59
11.2 Схемотехніка підсилювачів на ОП.....	60
12 АКТИВНІ ФІЛЬТРИ.....	63
12.1 Загальні математичні описи і класифікація фільтрів. Пасивні фільтри.....	63
12.2 Схемотехніка активних фільтрів.....	66
13 РОБОТА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ В КЛЮЧОВОМУ РЕЖИМІ.....	66
13.1 Ключовий режим.....	66
14 ПРИСТРОЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ.....	68
14.1 Схеми позитивних і негативних сигналів.....	68
14.2 Схемотехніка нелінійних перетворювачів аналогових сигналів.....	69
15 ДЖЕРЕЛА ВТОРИННОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ.....	70
15.1 Структурні схеми.....	70
15.2 Однофазні випрямлячі.....	70
16 БЕЗПЕРЕРВНІ СТАБІЛІЗАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	73
16.1 Загальні положення.....	73
16.2 Компенсаційні стабілізатори.....	75
17 ІМПУЛЬСНІ І КЛЮЧОВІ РЕГУЛЯТОРИ І СТАБІЛІЗАТОРИ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ.....	76
17.1 Основні вимоги IP. Статичні і динамічні витрати.....	76
17.2 Режими імпульсного регулювання потужності і схеми імпульсних підсилювачів.....	78
17.3 Схемотехніка ключових стабілізаторів та методика їх розрахунку.....	80

18 БАГАТОФАЗОВІ ВИПРЯМЛЯЧІ І ЗГЛАДЖУЮЧІ ФІЛЬТРИ.....	82
18.1 Трифазні випрямлячі і їх схемотехніка.....	82
18.2 Згладжуючі фільтри і особливості роботи випрямляча на ємкісне навантаження.....	84
18.3 Зовнішні характеристики і методика розрахунків випрямляча.....	85
19 ЕЛЕКТРОННІ РЕГУЛЯТОРИ ЗМІННОЇ НАПРУГИ.....	87
19.1 Способи зміни змінної напруги.....	87
19.2 Схемотехніка електронних регуляторів змінної напруги.....	89
19.3 Енергетичні характеристики вентильних перетворювачів і їх вплив на живлячу мережу.....	91
20 ТРАНЗИСТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НАПРУГИ.....	92
20.1 Схеми перетворювачів.....	92
20.2 Розрахунок перетворювачів.....	94
МОДУЛЬ 3. МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА.....	96
21 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ.....	96
21.1 Елементи алгебри логіки.....	96
22 КОМБІНАЦІЙНІ ЛОГІЧНІ ПРИСТРОЇВ.....	99
22.1 Синтез логічних пристроїв.....	99
22.2 Типові комбінаційні пристрої.....	100
23 ПОСЛІДОВНІ ЛОГІЧНІ ПРИСТРОЇ.....	102
23.1 Тригери.....	102
23.2 Регістри.....	104
23.3 Лічильники.....	104
24 АНАЛОГО – ЦИФРОВІ І ЦИФРО – АНАЛОГОВІ СХЕМИ.....	106
24.1 Компаратор.....	106
24.2 Інтегральний таймер.....	106
24.3 Цифро – аналогові перетворювачі (ЦАП).....	109
24.4. Аналого – цифрові перетворювачі (АЦП) .....	111
ЛІТЕРАТУРА.....	112

# МОДУЛЬ 1. ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

## 1 СУЧАСНІ МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ І ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ

### 1.1 Основні етапи проектування електронних пристроїв і параметри електричних сигналів

Будь-який електронний пристрій може бути спроектоване виходячи з технічних вимог (за початковими даними), при цьому, як правило, вирішується зворотне завдання, тобто проектування починається з “кінця”. Спочатку складається структурна схема. На структурній схемі основні вузли пристрою показують у вигляді прямокутників, усередині яких поміщається пояснюючий напис. Зв'язки між вузлами представляються у вигляді стрілок (під кутом 60°). Структурні схеми викреслюються на листах встановлених форматів. Код схеми електричною структурною - E1.

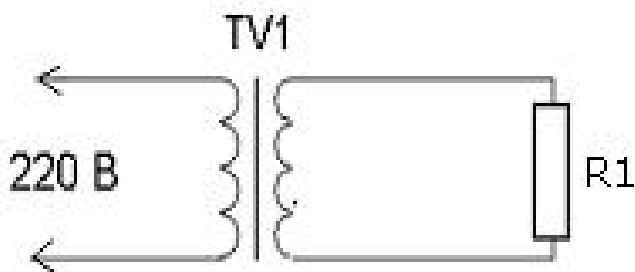
Приклад: Виходячи з технічного завдання необхідно розробити пристрій підключення до мережі напругою 220 В електроплитки, розрахованою на напругу 110 В.

Структурна схема підключення матиме наступний вигляд (рис.1.1):



Малюнок 1.1 – Схема електрична структурна підключення електроплитки.

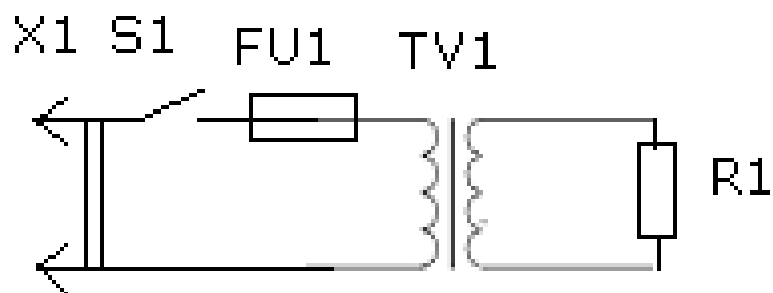
Після структурної схеми зазвичай складається функціональна схема, що має код E2. На функціональній схемі окремі вузли можуть бути представлені у вигляді умовних графічних позначень. З функціональної схема повинна бути зрозуміла робота пристрою. Для нашого прикладу функціональна схема представлена на рис.1.2.



Малюнок 1.2 – Схема електрична функціональна підключення електроплитки

По функціональній схемі розробляється принципова схема, на якій вказуються всі елементи і всі з'єднання. Її код ЕЗ. Принципова схема обов'язково повинна мати перелік елементів, буквено-позиційні позначення яких повинні відповідати позначенням на функціональній схемі. Перелік елементів виконується по відповідній формі і може бути розміщений над основним написом на кресленні принципової схеми. Якщо немає місця на кресленні, то перелік елементів виконується у вигляді окремого документа формату А4.

Для даного прикладу схема електрична принципова може мати наступний вигляд (рис.1.3):



Малюнок 1.3 – Схема електрична принципова підключення електроплитки

Перелік елементів приведений в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

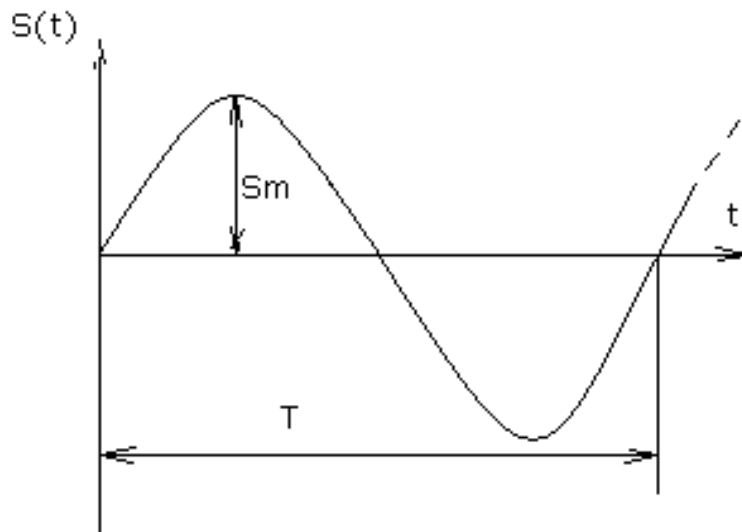
Поз. познач.	Найменування	Кіл-ть.	Примітка
FU1	Запобіжник (тип і ГОСТ)	1	
R1	Нагрівальний елемент (тип і ГОСТ)	1	
S1	Тумблер (тип і ГОСТ)	1	
TV1	Трансформатор (тип і ГОСТ)	1	
X1	Вилка ВД-1 ГОСТ 7.02565-95	1	

Схеми електричні принципові при налазці можуть бути змодельовані за допомогою спеціальних моделюючих програм, наприклад програми Electronics Workbench.

На схемі допускається показувати деякі характеристики напруги або струму. У електронних пристроях напруга або струм замінюється терміном електричний сигнал. Електричні сигнали діляться на безперервних (аналогові) і дискретних (імпульсні).

Безперервні електричні сигнали бувають гармонійними і несинусоїдальними.

Приклад безперервного сигналу показаний на мал. 1.4.



Малюнок 1.4 – Безперервний електричний сигнал

Даний сигнал описується виразом

$$S(t) = S_m \cdot \sin \omega t$$

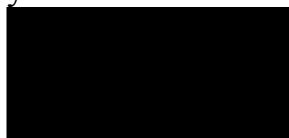
Частота сигналу буде

$$f = \frac{1}{T}$$

Значення сигналу, що діє

$$S_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt}$$

Середнє значення сигналу

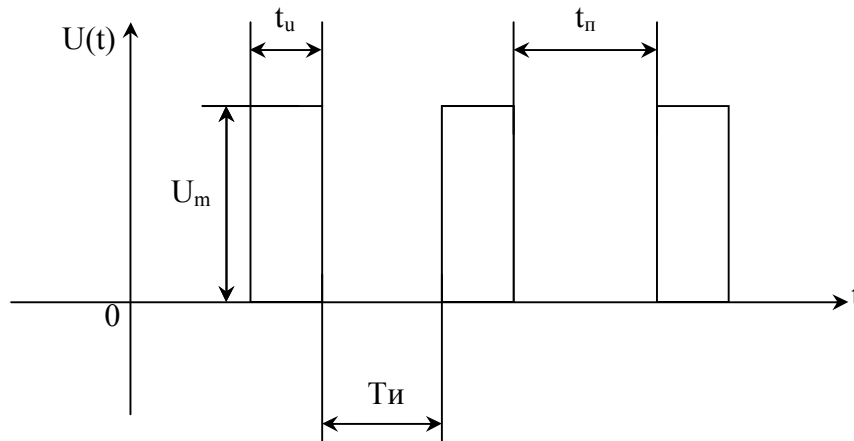




Якщо сигнал несинусоїдальний, то він представляється поряд Фур'є, а його аналіз виконують по окремих гармоніках.

Дискретні сигнали також можуть мати різну форму. Найчастіше в електроніці використовуються імпульсні сигнали прямокутної форми.

На мал. 1.5 показаний приклад дискретного сигналу прямокутної форми (послідовність прямокутних імпульсів).



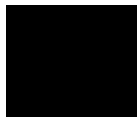
$t_u$  - тривалість імпульсу;  
 $t_n$  - тривалість паузи;  
 $T_{и}$  - період проходження.

Малюнок 1.5 – Послідовність прямокутних імпульсів

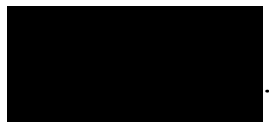
Відношення періоду проходження до тривалості імпульсу називається шпаруватістю.



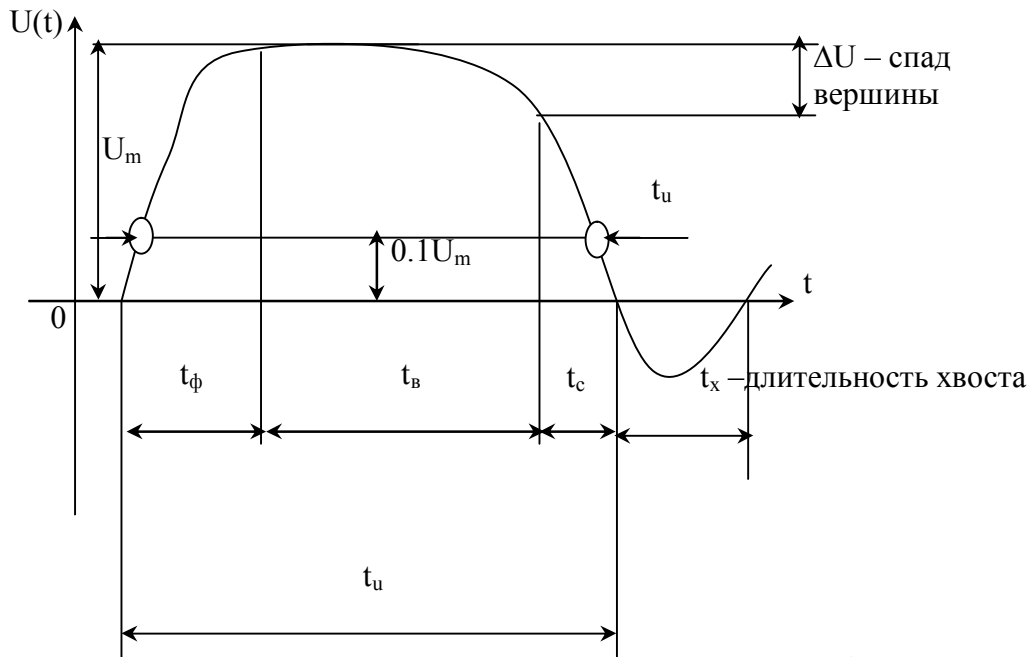
Величина, зворотна шпаруватості, називається коефіцієнтом заповнення



Середнє і діюче значення визначається по формулах:



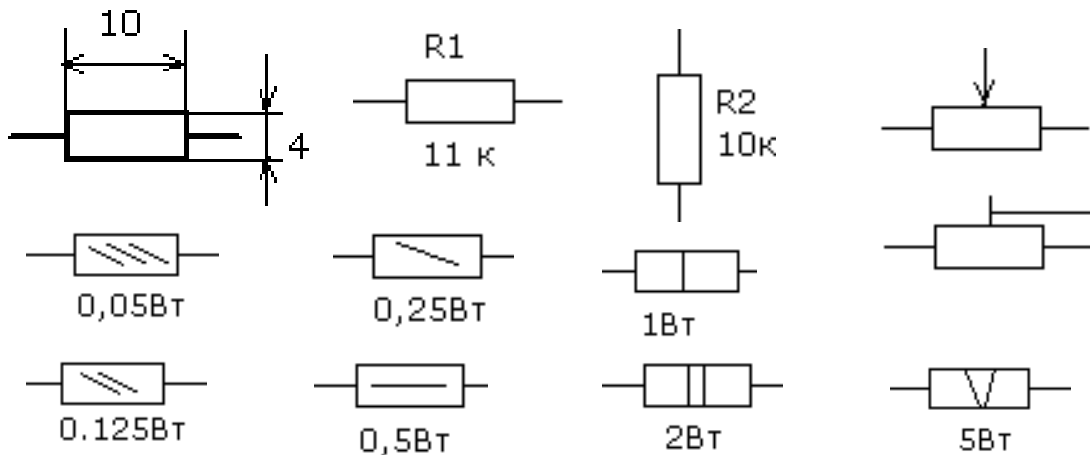
У реальних прямокутних імпульсах зміни фронтів займають певний час. Крім того, виникають спотворення вершини імпульсу і з'являється хвіст імпульсу. Форма реального прямокутного імпульсу представлена на мал. 1.6.



Малюнок 1.6 – Реальний прямокутний імпульс

## 1.2 Резистори, варистори і конденсатори. Умовне графічне позначення, види, параметри і маркування

Резистори є пасивними елементами, які створюють активний опір струму і діляться на резистори постійного і змінного опору. Резистори бувають недротяні і дротяні. На схемі позначаються у вигляді прямокутника. Умовні графічні позначення резисторів приведені на мал. 1.7



Малюнок 1.7 – Умовні графічні позначення резисторів

Основними параметрами резисторів є величина номінального опору і потужність розсіювання.

Потужність розсіювання резистора визначається по формулі

$$P_R = I^2 \cdot R,$$

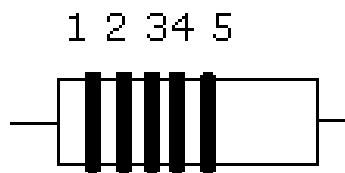
де  $I$  – значення струму, що протікає через резистор, що діє.

Вказана на корпусі резисторів величина номінального опору може кодуватися або представлятися у вигляді кольорових смуг.

При кодовому уявленні замість коми, що відокремлює цілу частину числа, ставляться букви Е, До або М (Е означає Ом, До – Кому, М – Мом).

Приклад. Замість 1,7К ставиться 1К7, замість 110 Ом ставиться К11.

Маркування у вигляді кольорових смуг показана на мал. 1.8.



Малюнок 1.8 – Маркування опору

1-а і 2-а смуги позначають першу і другу цифри числа, 3-а смуга – множник, 4-а – допустиме відхилення опору від номінала, 5-а – надійність (може бути відсутнім).

У таблиці 1.2 приведена розшифровка кольору смуг.

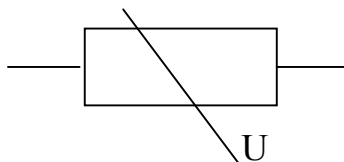
Таблиця 1.2

Цифри числа (1 і 2 смуги)	Колір смуги	Множник (3 смуга)
-	Сріблястий	10 <sup>-2</sup>
-	Золотистий	10 <sup>-1</sup>
0	Чорний	10 <sup>0</sup>
1	Коричневий	10 <sup>1</sup>
2	Червоний	10 <sup>2</sup>
3	Оранжевий	10 <sup>3</sup>
4	Жовтий	10 <sup>4</sup>
5	Зелений	10 <sup>5</sup>
6	Блакитний	10 <sup>6</sup>
7	Фіолетовий	10 <sup>7</sup>
8	Сірий	-
9	Білий	-

Допустиме відхилення опору (колір 4-ої смуги):

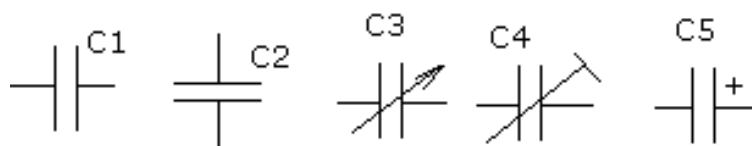
- 2% - червоний;
- 5% - золотистий;
- 10%-серебристий;
- 20%-не маркірується.

Резистори, в яких опір залежить від прикладеної напруги, називаються варисторами. Умовне графічне позначення варисторів показано на мал. 1.9.



Малюнок 1.9 – Умовне графічне позначення варисторів

Конденсатори також є пасивними елементами, створюють реактивний опір змінному струму і бувають постійній і змінній ємності. На мал. 1.10 представлені умовні графічні позначення конденсаторів.



Малюнок 1.10 - Умовні графічні позначення конденсаторів

Основними параметрами конденсаторів є величина номінальної ємності і робоча напруга. При послідовному і паралельному з'єднанні конденсаторів можна набути різних значень результуючої ємності.

Конденсатори і резистори мають стандартний ряд номінальних значень ємностей і опорів. Ряди номінальних значень представлені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Індекс ряду	Позиції ряду	Допустиме відхилення від номінала
E6	1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8	$\pm 20\%$
E12	1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2	$\pm 10\%$
E24	1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1	$\pm 5\%$

Допустиме відхилення від номінала може кодуватися буквами, а саме:  $\pm 0,1\%$  - Же;  $\pm 0,2\%$  - У;  $\pm 0,5\%$  - Д;  $\pm 1\%$  - Р;  $\pm 2\%$  - Л;  $\pm 5\%$  - І;  $\pm 10\%$  - З;  $\pm 20\%$  - В;  $\pm 30\%$  - Ф.

### 1.3 Котушки індуктивності, трансформатори і електромеханічні елементи (перемикачі, роз'єми і так далі)

Котушки індуктивності застосовуються як різний вид фільтрів і створюють реактивний опір змінному струму. Основним параметром котушок є індуктивність, величина якої залежить від конструкції котушки і наявності сердечника. Котушки характеризуються також і добротністю, яка визначається як відношення реактивного опору котушки на певній частоті до її активного опору.

Трансформатор складається як мінімум з двох котушок на загальному сердечнику. Одна котушка первинна, а остальные - вторинні.

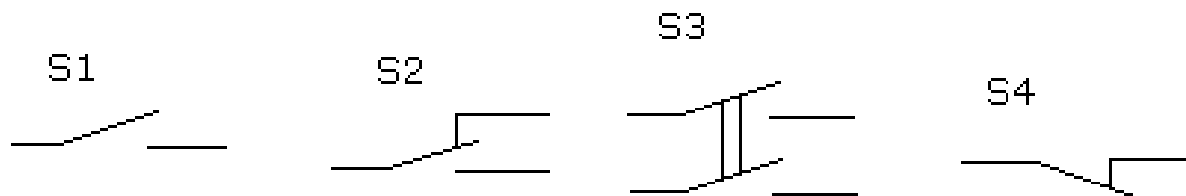
Коефіцієнт трансформації визначається як відношення числа витків первинної обмотки до витків вторинною по формулі:

$$n = \frac{W_1}{W_2}.$$

Для вибору трансформатора потрібно визначити його габаритну потужність  $P_{габ} = 1,25 \sum P_{II}$ .

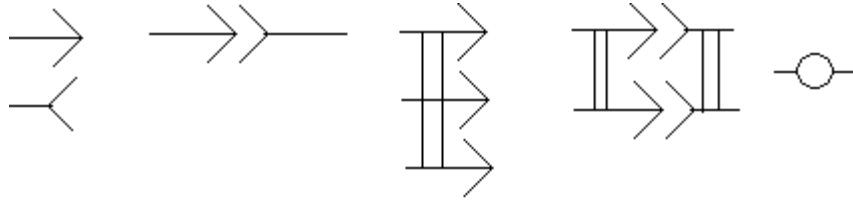
До електромеханічних елементів відносяться перемикачі різного вигляду і пристрою з'єднання (роз'єми).

На мал. 1.11 представлені умовні позначення перемикачів.



Малюнок 1.11 - Умовні позначення перемикачів

Роз'ємні з'єднання можуть бути показані різними способами відповідно до стандарту. При представленні роз'ємного з'єднання у вигляді таблиці необхідно указувати номери контактів і ланцюга, що несуть інформацію. Загальне позиційне позначення всіх роз'ємних з'єднань позначається буквою Х. На мал. 1.12 показані умовні позначення роз'ємних з'єднань.



Малюнок 1.12 – Роз'ємні з'єднання

### Питання для самопідготовки

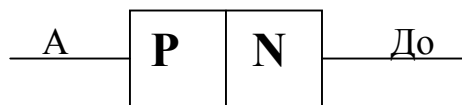
1. Правила розробки схем електричних принципів.
2. Як розрахувати потужність розсіювання послідовно і паралельно сполучених резисторів?
3. Як вибрати стандартне значення опору резистора і ємності конденсатора?
4. Як визначити основні параметри трансформатора?
5. Як розрахувати опір конденсатора і котушки індуктивності струму певної частоти?

Література: [1], з. 3-18. [2], з. 7-14; 22-24. [3], з. 3-8; 290-293. [4], з. 6-26.

## 2 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

### 2.1 Принцип дії напівпровідникового діода, його умовне позначення, характеристики і параметри

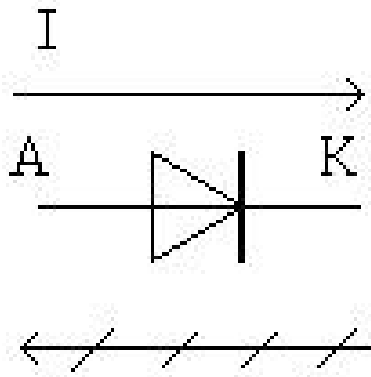
Напівпровідниковий діод – це прилад напівпровідниковий кристал, що містить, з р-n переходом(сплав двох провідників різного типу провідності).



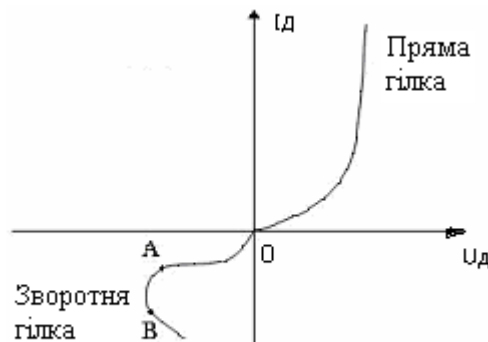
А- анод . N - катод .

Якщо на «P» область подати позитивний потенціал по відношенню до «N» області те р-n перехід зміщується в прямому напрямі, його опір зменшується і з'являється струм, якщо на «P» область подати негативну напругу, то р-n перехід зміщується у зворотному напрямі і його опір різко збільшується.

Напівпровідникові діоди на схемах мають наступне умовне позначення.



Для характеристики діодів застосовують ВАХ .  $I_d = f(U_d)$ ;



Аналітичний вираз для ВАХ р-n переходу.  $I_d = I_s (1 - e^{-U_d / \phi_T})$

$I_s$  – величина струму насичення

$U_d$  – напруга на діоді

$\phi_T$  – потенціал

$\phi_T = 0.025V$  при  $t=20$  з.

В т. А наступає тунельний пробій р-n переходу в точці В наступає тепловий пробій . На ділянці АВ буде лавинний пробій р-n переходу.

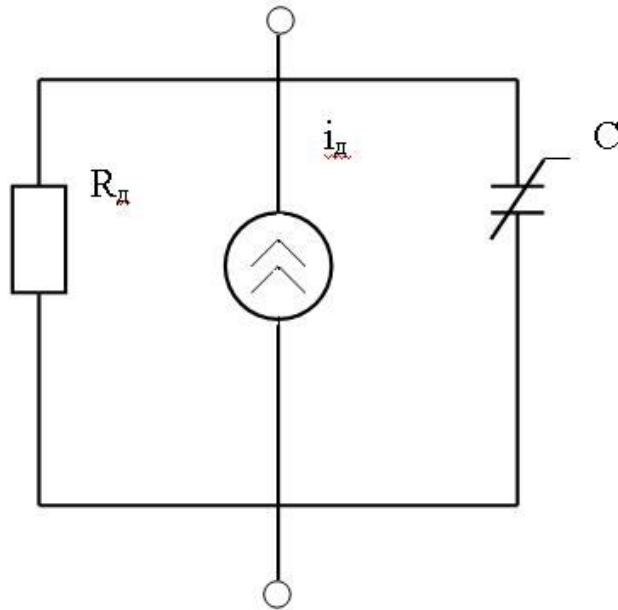
Якщо наступив тепловий пробій, то діод виходить з ладу.

Основні параметри діода:

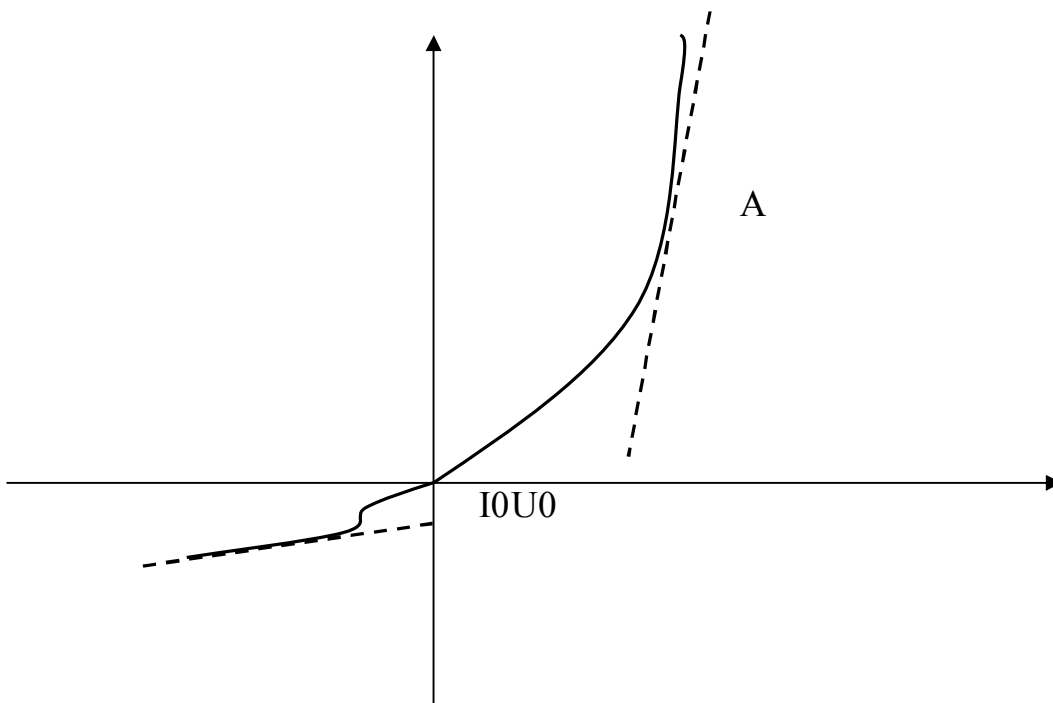
1. Упр р-n переходу при прямому зсуві
2. Максимальне значення випрямленого струму  $I_{пр}$ .
3. Зворотна напруга  $U_{обр}$ .
4. Напруга Зенеровського пробою (тунельний пробій )  $U_{обрА}$ .
5. Величина зворотного струму  $I_{обр}$ .
6. Диференціальний опір  $r_{диф} = \Delta U_d / \Delta I_d = dU_d / dI_d$

## 2.2 Математичні моделі діодів і їх застосування для аналізу електричних схем

Математичною моделлю будь-якого приладу – називають сукупність еквівалентної схеми і аналітичного виразу який зв'язує основні параметри цього приладу. Математичні моделі діодів використовують при моделюванні електричних пристроїв.  
 математична модель реального діода виглядає таким чином



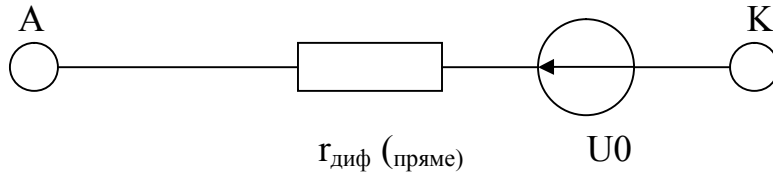
Для спрощення розрахунків нелінійною ВАХ апроксимуються прямими ділянками.



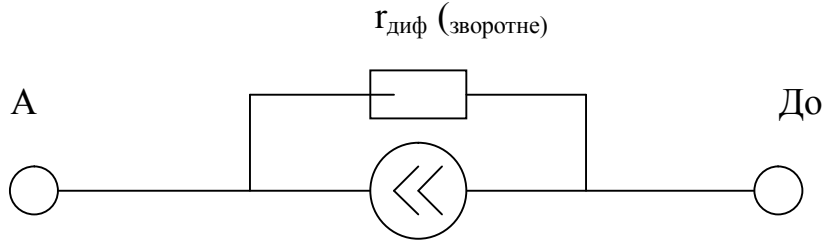
$r_{\text{диф}}$  – прямий опір =  $\Delta U_{\text{д}} / \Delta I_{\text{д}}$  – мале  
 Для апроксимированного характеру



Пряме включення



ЗВОРОТНЕ ВКЛЮЧЕННЯ



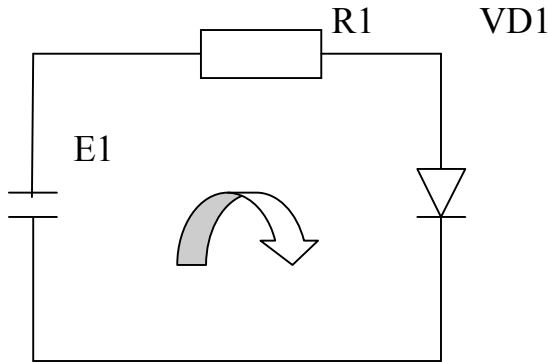
$i_0$

$\Gamma_{\text{диф}} (\text{пряме}) \rightarrow 0$

$\Gamma_{\text{диф}} (\text{зворотне}) \rightarrow \infty$

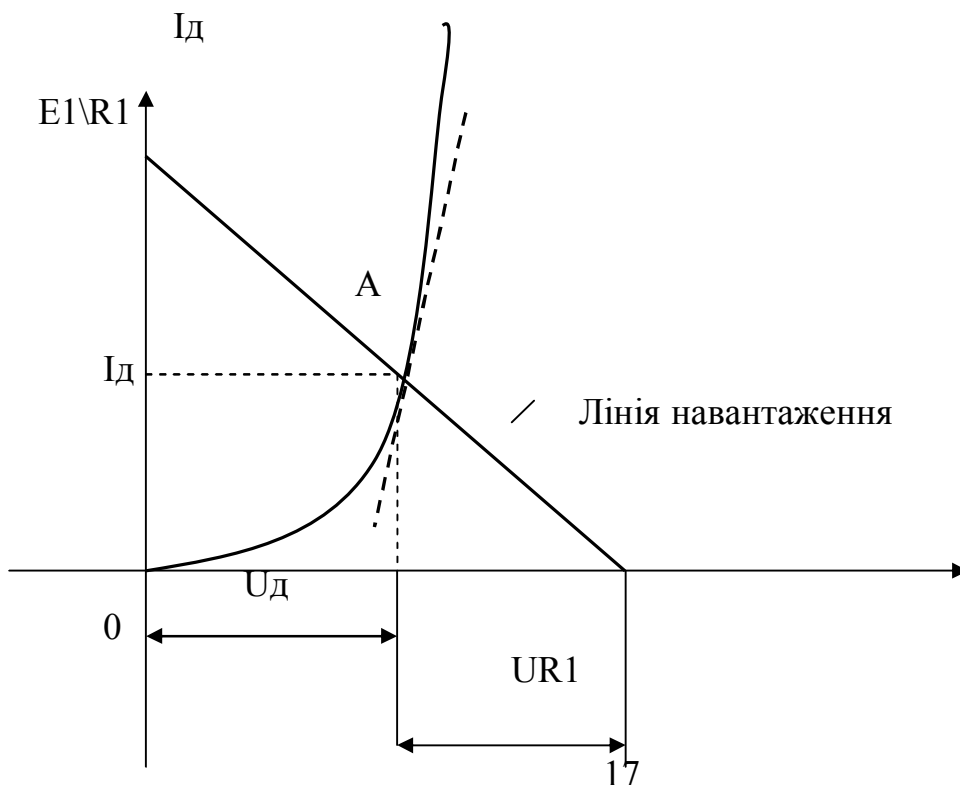
Для розрахунку схеми з діодами застосовують часто графо – аналітичний метод, який представляє графічне вирішення системи рівнянь.

Приклад утворений параметрами схеми графо – аналітичним методом.



Потрібно визначити параметри діода.  
Для визначення параметрів необхідно мати ВАХ діода.

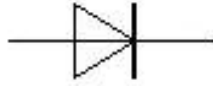
$$I_d = E1 / R1 - U_d / R1 = -1/R1 * U_d + E1 / R1$$



## 2.3 Різновиди напівпровідникових діодів, їх класифікація і система позначень

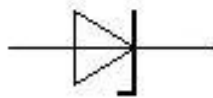
Область застосування напівпровідникового діода визначає його ВАХ. Діоди діляться на декілька груп:

1. Выпрямительные

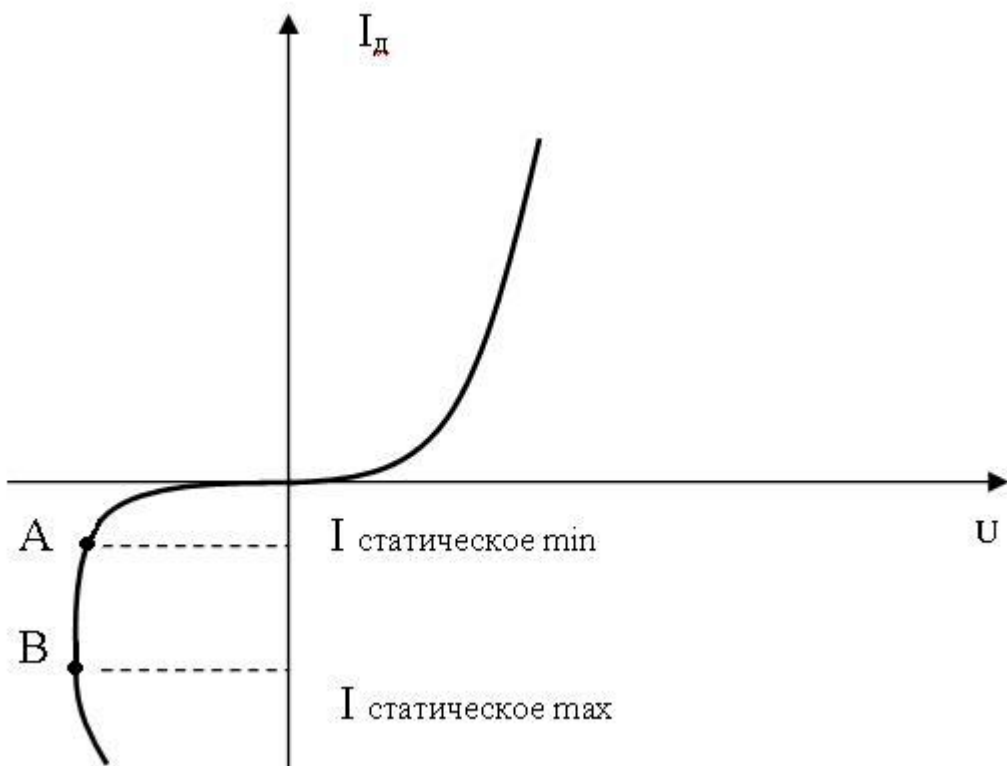


VD1

2. Стабилитроны (призначені для стабілізації напруги)

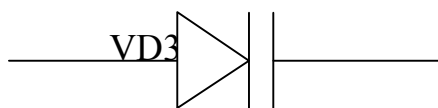


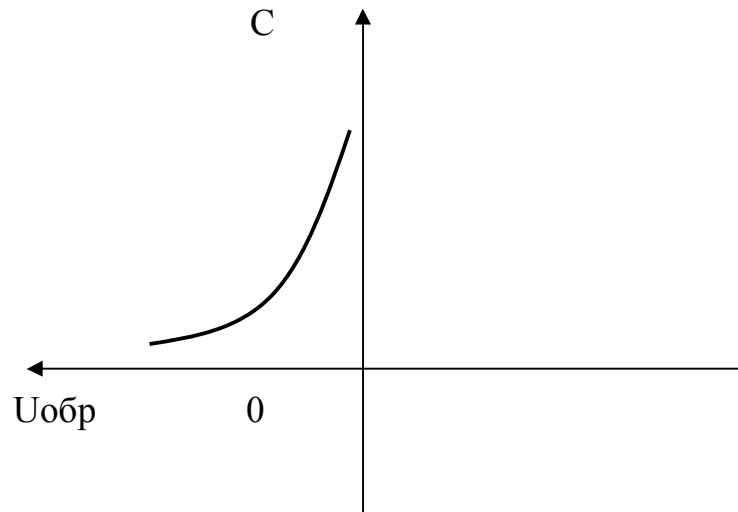
VD2



Ділянка АВ робочий.

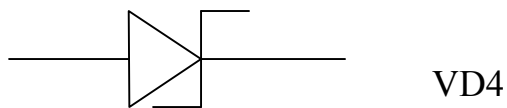
3. Варикап





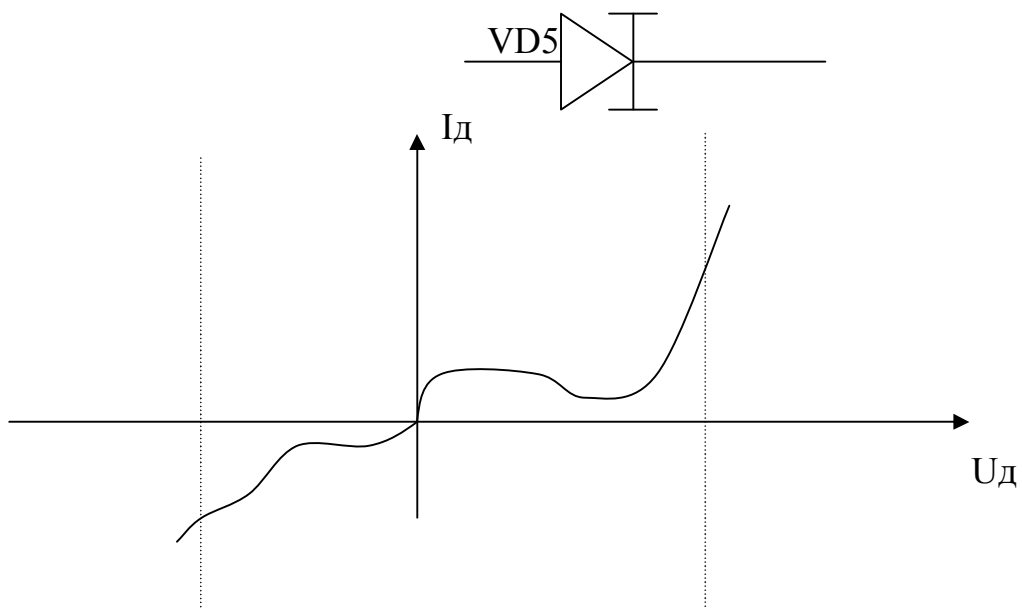
Чим більше зворотна напруга, тем менше ємкість. Варікап використовується як конденсатор змінної ємкості.

#### 4. Діоди Шоттки



У цих діодах використовується перехід - метал напівпровідник. Отже, діоди використовуються на високих частотах.

#### 5. Обернені діоди



Обертаючий діод включається при зворотному зсуві р-п переходу .

Система позначень всіх напівпровідникових приладів у тому числі і діодів що складаються з наступних елементів 1) буква або цифра яка указує на тип напівпровідника 1 или Г – германій, 2 или До – кремній, 3 або А – з'єднання галію, 4 або І – з'єднання индия . 2) Буква указує різновид діода

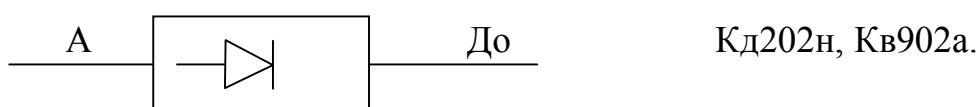
Д – випрямляч  
З - стабілізатор

У - варикапы

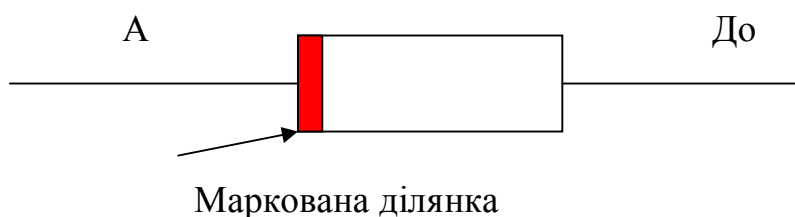
І – тунельні і обернені діоди

Ц - діоди стовпи

3 і 4 елемент указує на електричний параметр діода напругу.



У деяких діодах маркування здійснюється за допомогою фарби



Залежно від площі р-п переходу діоди можуть ділитися на низько частотні і імпульсні, характеристика аналогічна але область застосування різна.

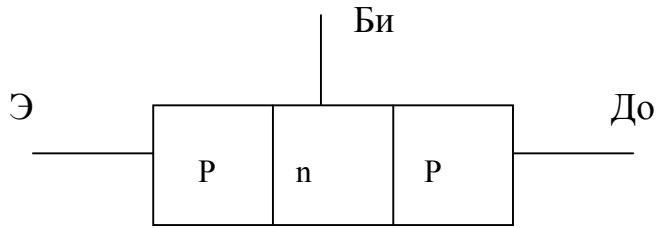
Література: [1] (стр.18-34), (стор. 111-118). [2] (стр.8-52). [3] (стор. 86-111).

### 3 БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ

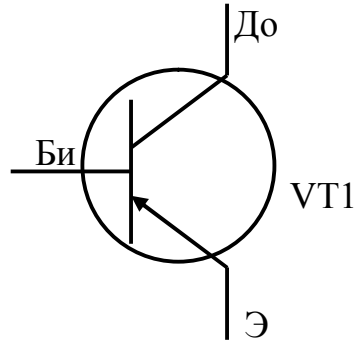
#### 3.1 Пристрій і принцип дії біполярних транзисторів різного типу провідності. Умовні графічні позначення класифікація і маркіровка

Біполярні транзистори призначені для перетворення електричних сигналів.

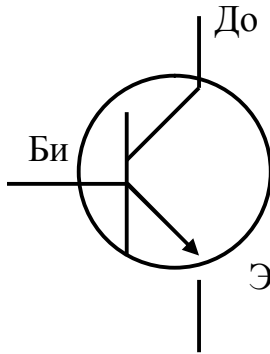
## СТРУКТУРА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ



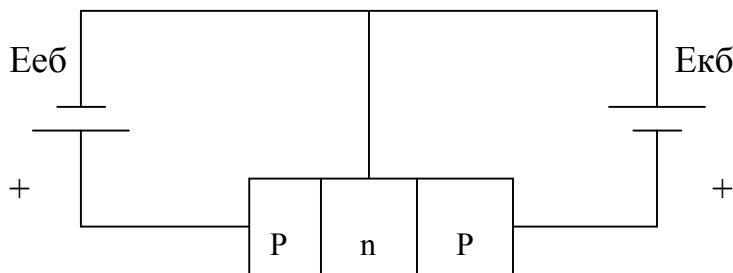
р-п-р - прямий



п-р-п – зворотний



Для того, щоб транзистор працював в схемах необхідний перехід емітер бази змістити в прямому напрямі, а перехід колектора – в зворотному.



$I_{\text{к}} = I_{\text{кр}} + I_{\text{ко}}$ , где  $I_{\text{ко}}$  - зворотний струм колектора

$\frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{э}}} = \alpha$ , где  $\alpha$  - коэффициент передачи тока эмитера

$\alpha < 1$

$I_{\text{Б}} = I_{\text{э}} + I_{\text{к}}$

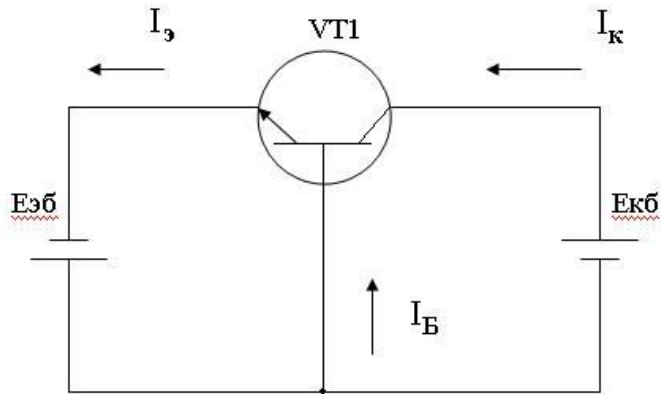
Зміна струму бази приводить до зміни решти струмів. У транзисторах р-п-р всі струми міняють свій напрям і джерела повинні бути із зворотною полярністю.

Наприклад: Кт603а, Гт404б

### 3.2 Схеми включення біполярного транзистора

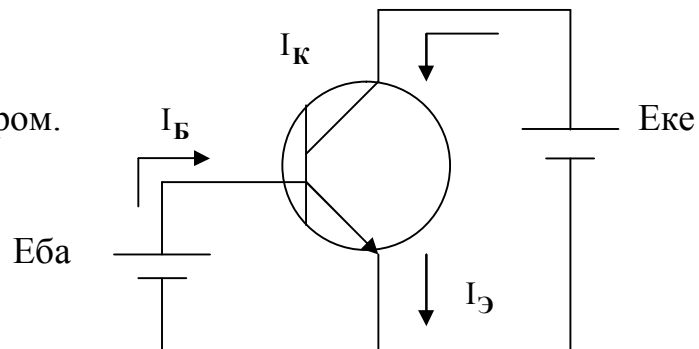
Існує 3 основних схеми включення біполярного транзистора.

1. Схема зі спільною базою (О)



$$r_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{КБ}}}{I_{\text{К}}} \text{ VT1}$$

2. Схема зі спільним емітером.



$$\frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Б}}} = \beta - \text{коефіцієнт передачі струму бази}$$

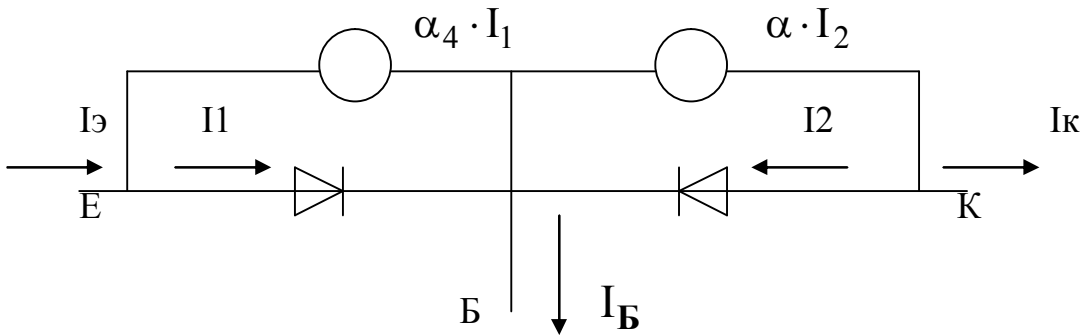
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} - \text{передача струму емітера}$$

$$r_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{ЭБ}}}{I_{\text{Б}}}$$

Характеристики схеми з ОК аналогічні з характеристиками ОЕ.

### 3.3 Математичні моделі біполярного транзистора для різних схем включення

Математична модель – сукупність еквівалентної схеми і аналітичних виразів для струмів і напруги.



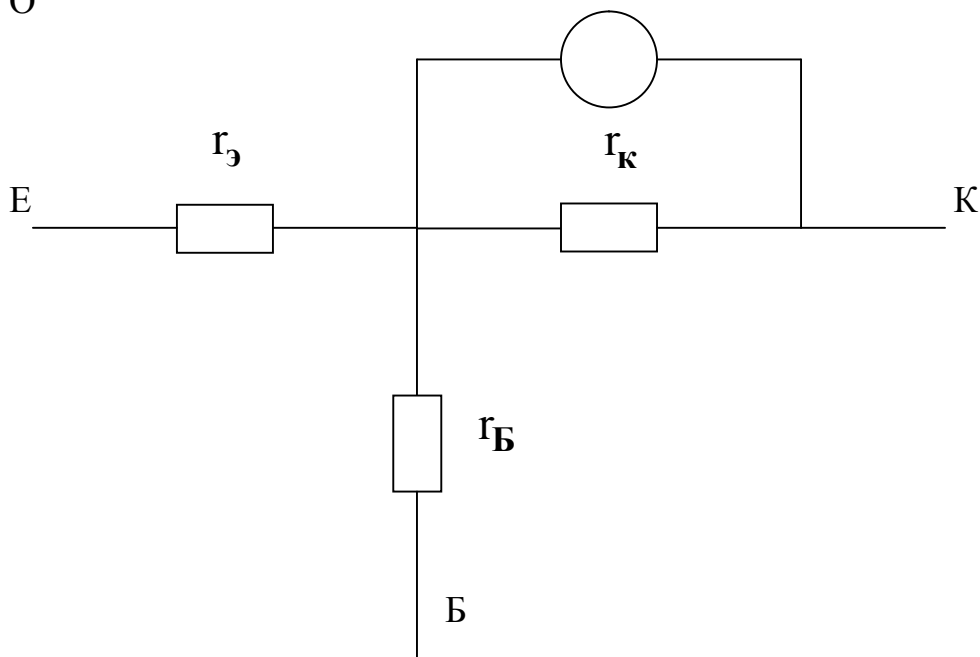
$$\begin{cases} I_{\text{Э}} = I_1 - \alpha_4 \cdot I_2 & (1) \\ I_{\text{К}} = \alpha \cdot I_1 - I_2 & (2) \\ I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}} & (3) \end{cases}$$

$$\Rightarrow 3(1) \quad I_{\text{Э}} = I_{1\text{H}} \left( e^{U_{\text{эб}} / \varphi_{\tau}} - 1 \right) - \alpha_4 I_{2\text{H}} \left( e^{U_{\text{кб}} / \varphi_{\tau}} - 1 \right)$$

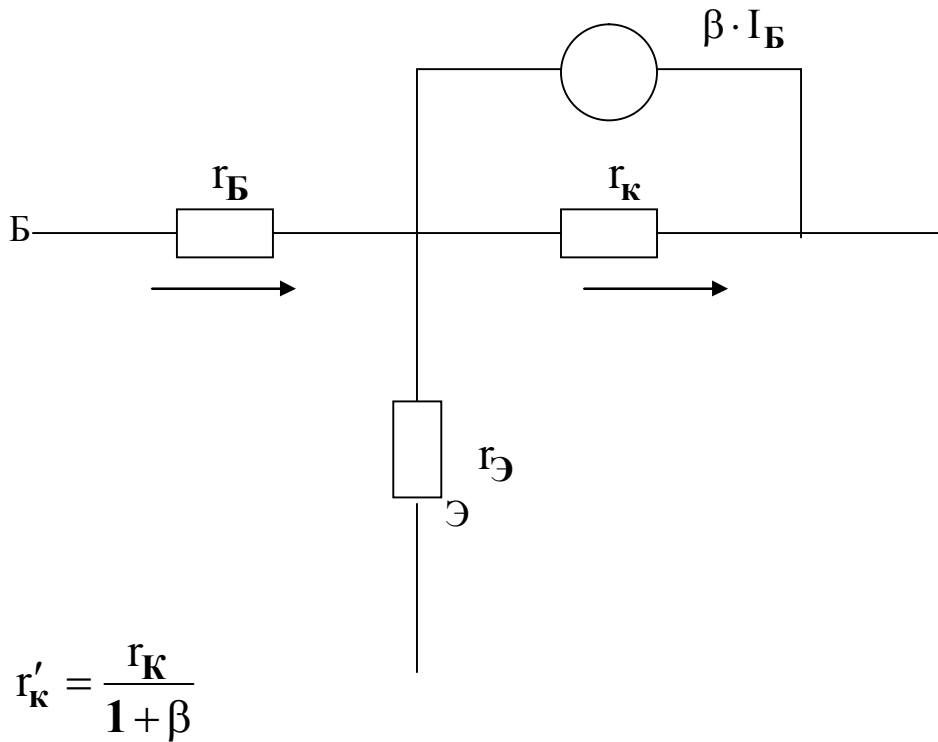
$$3(2) \quad \Rightarrow I_{\text{К}} = \alpha I_{1\text{H}} \left( e^{U_{\text{эб}} / \varphi_{\tau}} - 1 \right) - I_{2\text{H}} \left( e^{U_{\text{кб}} / \varphi_{\tau}} - 1 \right)$$

Для лінійного режиму роботи еквівалентна схема транзистора спрощується.

О

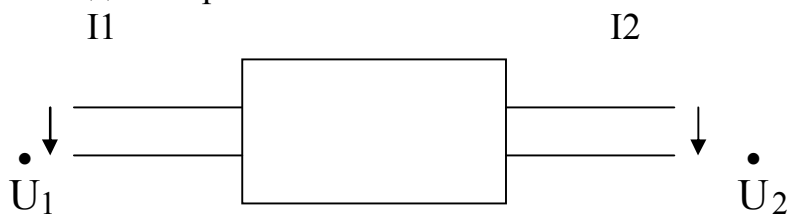


OE



### 3.4 h – параметри біполярного транзистора і його частотні властивості

4) Для розрахунку ланцюгів з транзисторами транзистор представляється у вигляді чотирьох полюсника.



$$\Delta U_1 = h_{11} \cdot \Delta I_1 + h_{12} \cdot \Delta U_2$$

$$\Delta I_2 = h_{22} \cdot \Delta I_1 + h_{21} \cdot \Delta U_2$$

OE  $\Delta U_{КЭ} = \Delta U_2 = 0$

$$h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_Б} = r_{вх}$$



$$\Delta I_1 = \Delta I_B = 0$$

$$h_{22_3} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KЭ}} = Y_{\text{ВЫХ}}$$

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = h_{21_3}$$

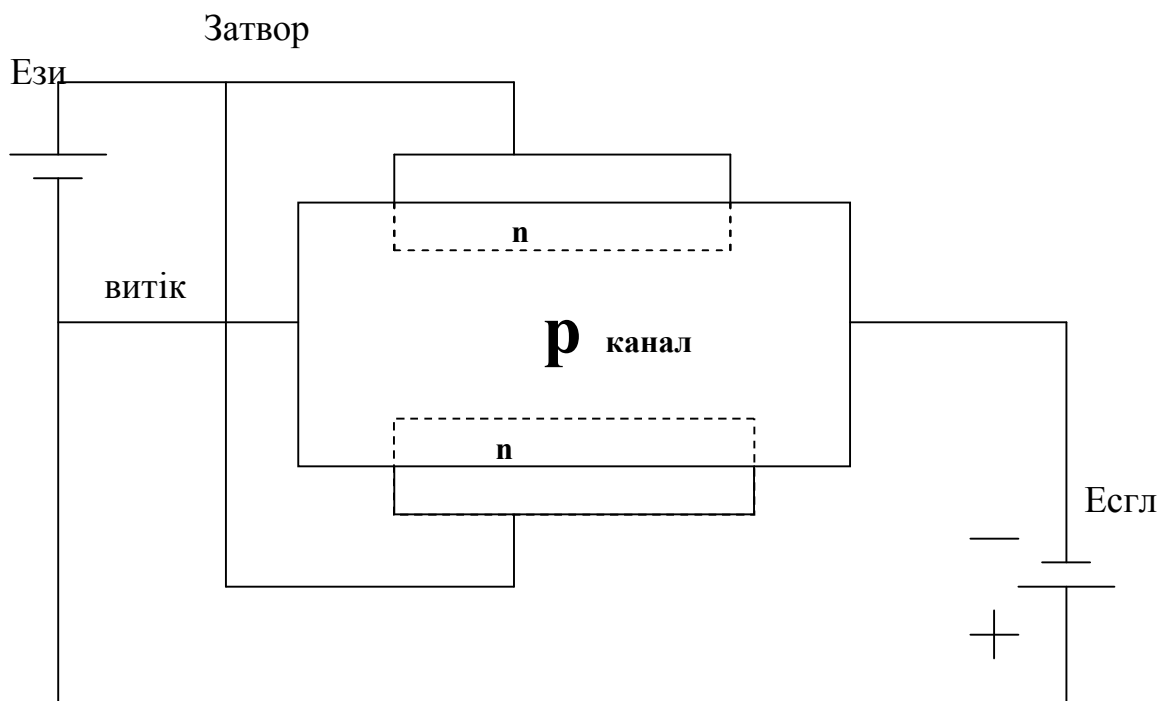
$$I_{21B} \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Э} = \alpha$$

Література: [1]– стор. 34-52. [2] - стор. 53-89. [3] - стор. 11-118

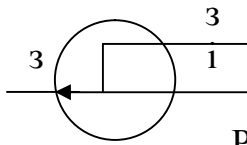
## 4 ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ І ПРИЛАДИ З НЕГАТИВНИМ ОПОРОМ.

### 4.1 Пристрій і принцип дії польових транзисторів з р-п переходом з ізолюваним затвором

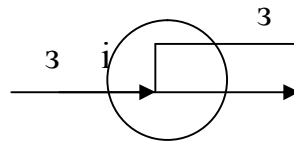
Польовими називаються транзистори, які управляються електричним полем. Принцип дії польових транзисторів:



Польовий транзистор з р-n переходом і каналом р - типу



P - типу



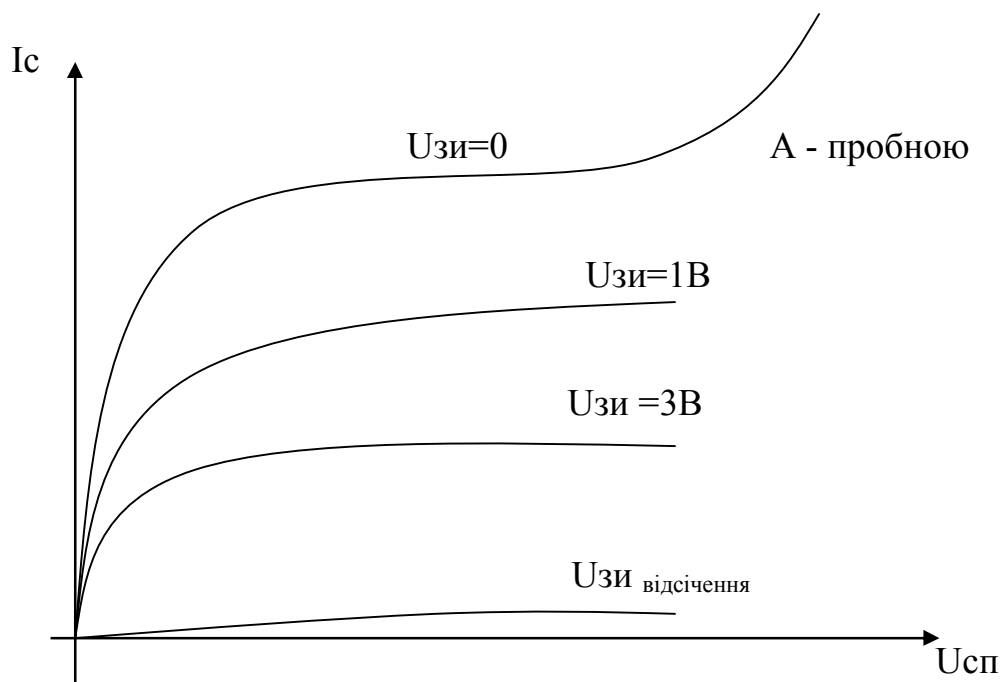
n - типу

У транзисторі з р-n переходом повинен зміщуватися тільки у зворотному напрямі . Т .к . р-n перехід підключений послідовно сполученийджерело Ези і Езгл, то область заряду усередині каналу звужується до стоку.

Зміна величини Есп можна досягти повного перекриття каналу.

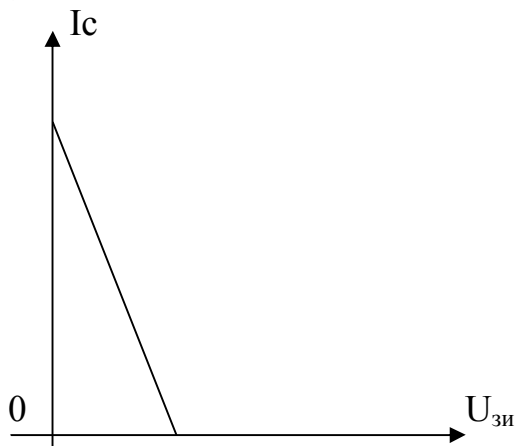
Характеристика польового транзистора

$$I_c = f(U_{сп}) = \text{const}$$



Для характерної роботи транзистора застосовують передавальну характеристику.

$$I_c = f(U_{зи}) |_{U_{си} = \text{const}}$$



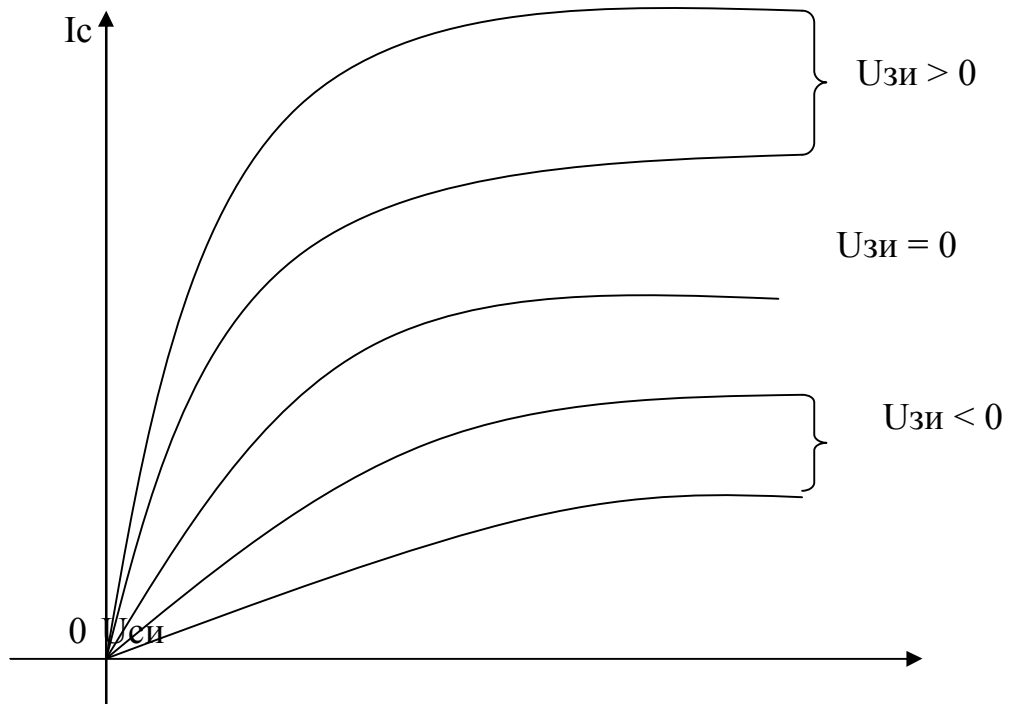
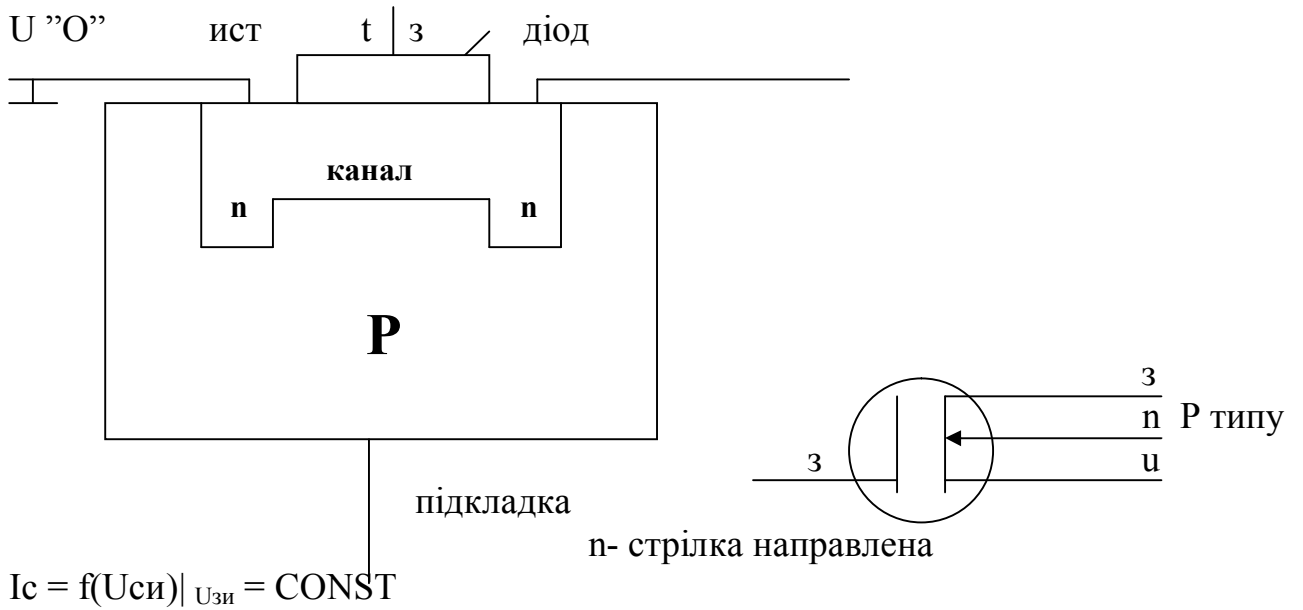
Для транзистора з каналом n типу необхідно змінювати полярність джерела. Основним параметром є крутизна передавального характеру.

$$S = \Delta I_c \setminus \Delta U_{зи} |_{U_{си} = \text{const}}$$

$$R_i = \Delta U_{си} \setminus \Delta I_c$$

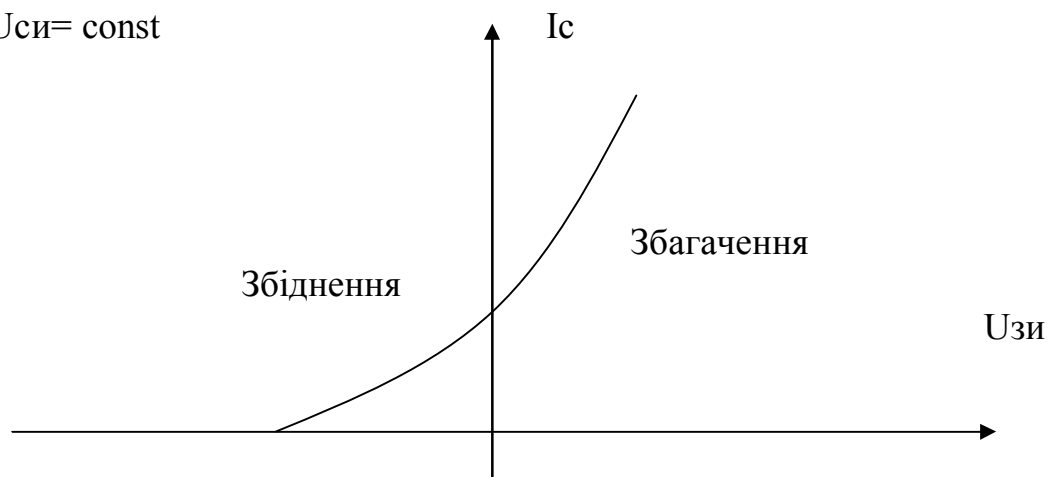
$$\mu = \Delta U_{си} \setminus \Delta U_{зи} = S R_i$$

Польовий транзистор з ізолюваним затвором.



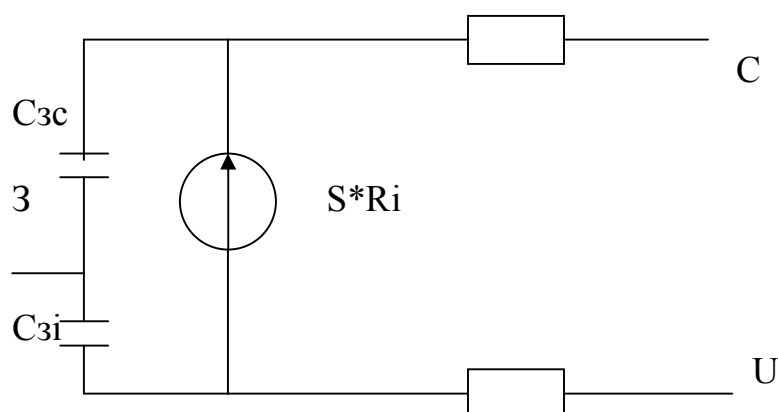
$U_{зи} > 0$  режим називається збагаченням якщо навпаки, то збіднення

$$I = f(U_{зи}) | U_{си} = \text{const}$$



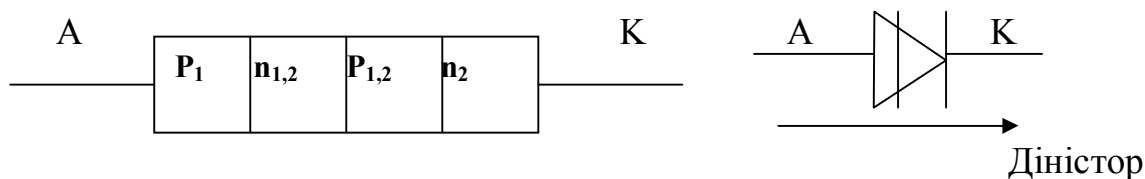
#### 4.2 Схеми включення і математичні моделі польових транзисторів

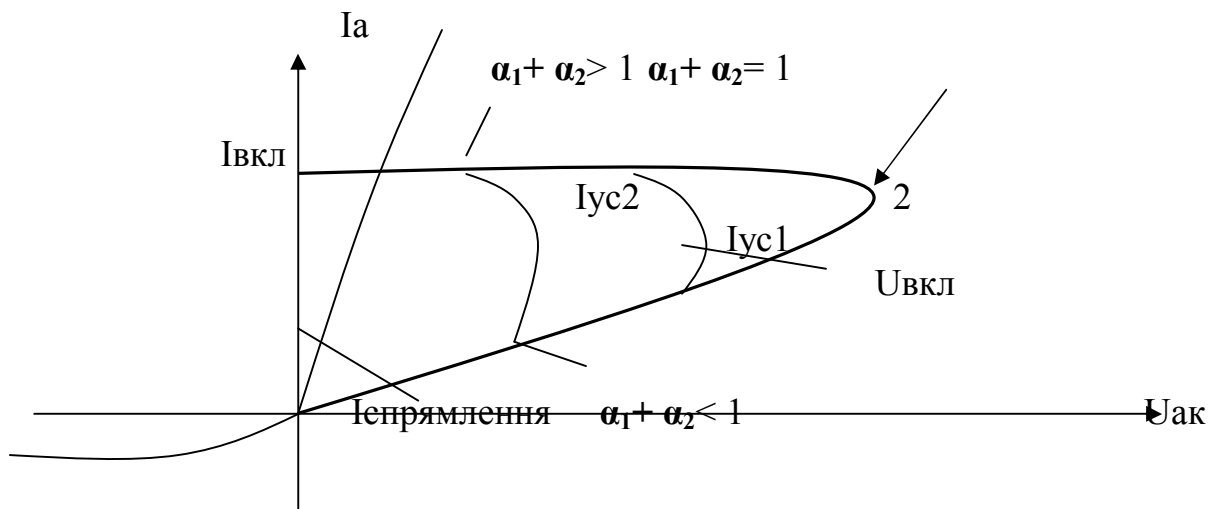
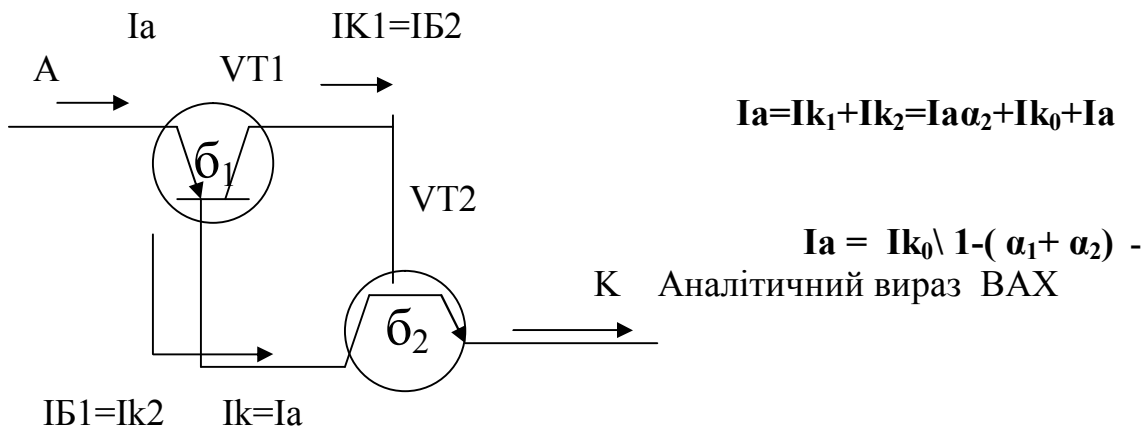
Схеми включення: спільний сток, спільний затвор оскільки вхідний опір транзистора дуже великий (назад зсув р-n перехід) конденсатор, то математична модель для всіх транзисторів представляється у вигляді генератора напруги.



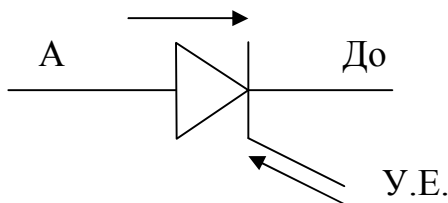
#### 4.3 Тиристри. Принцип дії, параметри і маркування

Тиристор може бути в двох стійких станах і має ділянку негативного опору. Тиристор складається з 3 і більш за р-n переходи.



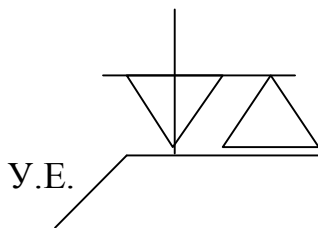


Тиристор який має додаткове управління електрикою – називають тринистором.



$I$  випрямлення – величина струму управління електроду при якому тиристор перетворюється на діод.

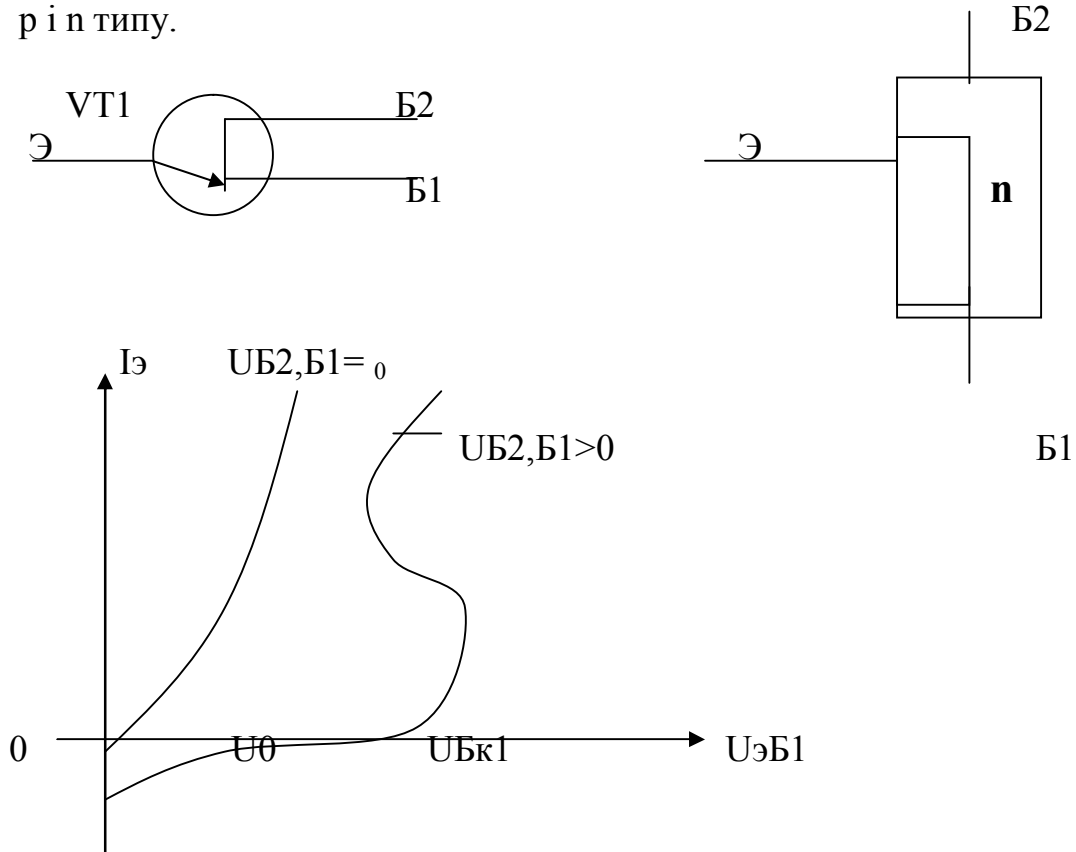
Для комутації змінного струму використовують 2 зустрічних включення тиристора який поміщається в один корпус називаються симистором.



Два операційний тиристор може і включаться і вимкнутися управлінням струму.

#### 4.4 Однопереходні транзистори і тунельні діоди

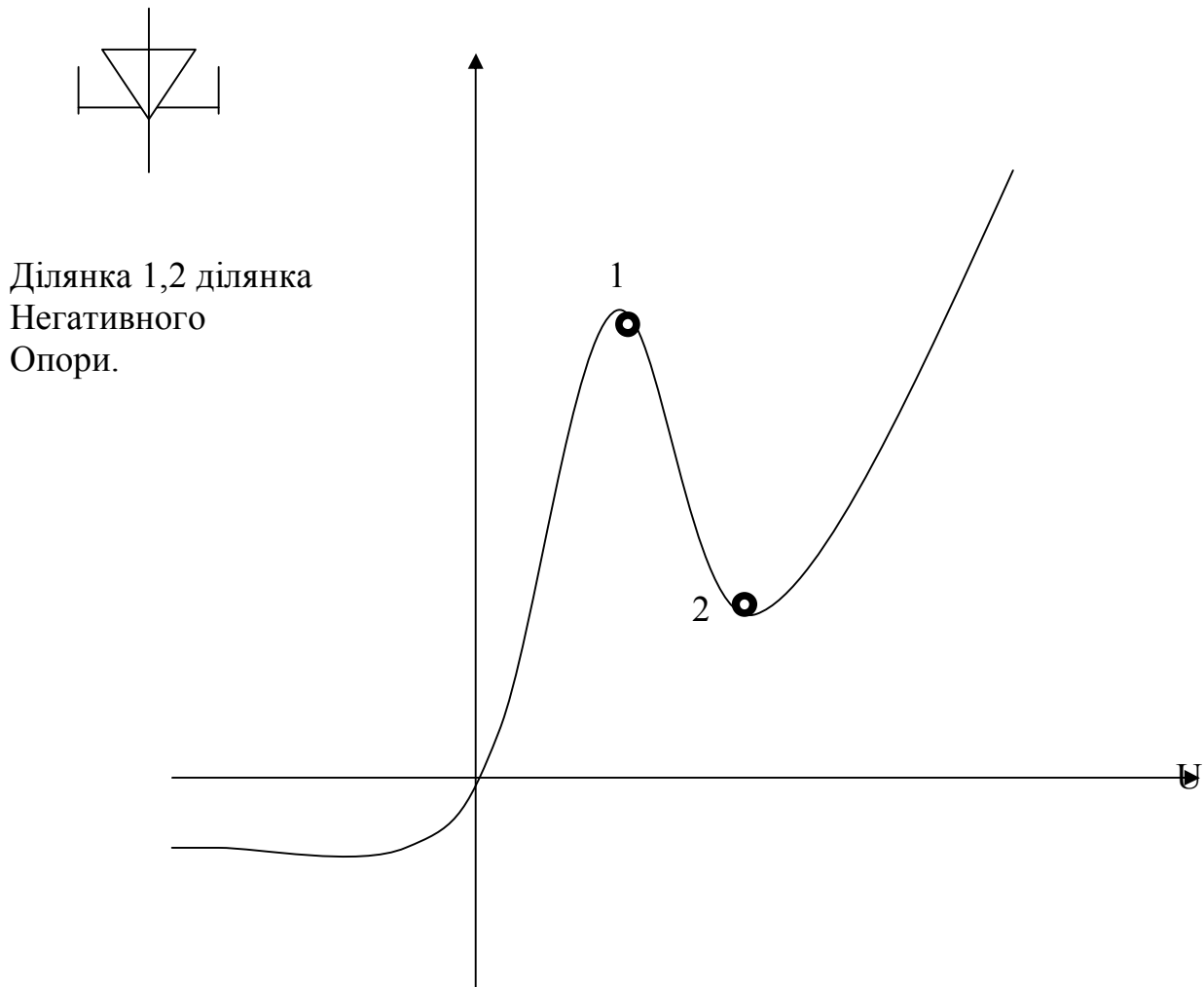
Однопереходний транзистор складається з напівпровідниковий р і n типу.



Однопереходний транзистор має ділянку негативного опору в точці 1,2 його характеристика нагадує характеристику динистора.

## Тунельний діод.

Ділянка 1,2 ділянка негативного опору.



Ділянка 1,2 ділянка  
Негативного  
Опору.

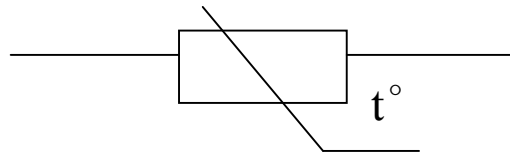
Література : [1].- (стр.52-66). [2].- (стр.89-124) [3].- (стор. 118- 133).

## 5 НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДАТЧИКІВ І ІНДИКАТОРНІ ПРИБАДИ

### 5.1 Напівпровідникові датчики температури і зусилля

Для вимірювання температури можна застосовувати будь-який напівпровідниковий прилад, оскільки їх характеристика залежить від температури. Найчастіше для вимірювання температури застосовуються терморезистори.

Умове позначення терморезисторів:



Основна характеристика терморезисторів – температурний коефіцієнт опору (ТКС). Вказаний коефіцієнт визначає ступінь зміни опору при зміні температури на  $1^\circ$ .

Терморезистори діляться на дві групи:

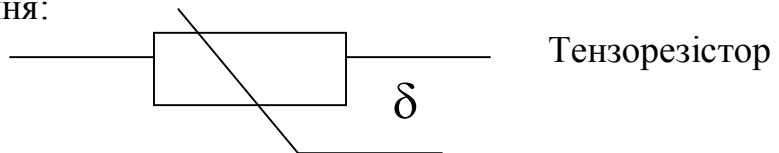
- 1) термістори;
- 2) позистори.

Відрізняються характеристиками:

Термістори застосовуються для вимірювання температури від  $-50^\circ$  до  $+125^\circ$ .

Датчики зусилля застосовуються для вимірювання моментів і зусиль в несучих конструкціях і на валах.

Умовне позначення:



Випускаються у вигляді тонкої плівки, яка наклеюється на місце вимірювання.

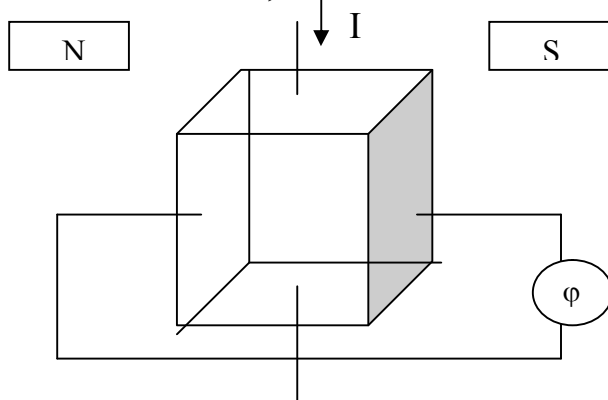
При деформації міняється опір тензорезистора.

## 5.2 Магнітно-напівпровідникові прилади

У цих приладах основний параметр визначається величиною магнітної індукції.

Є безліч магнітополупроводникових приладів, які застосовуються як безконтактні датчики.

Основним магнітоприбором є датчик Холу (призматичний кристал з двома виводами, включений в ланцюг).





Коли з'явиться магнітне поле, то гальванометр покаже різниця потенціалів.

Окрім вказаних датчиків застосовуються магнітодіоди, магнітотранзистори, магнітотерристоры.

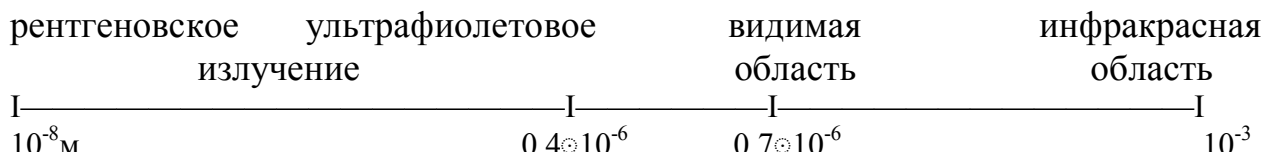
Для магнітотранзисторов струм колектора визначається величиною магнітної індукції. Для магнітотерристоров напруги включення визначаються величиною магнітної індукції (магнітна індукція виконує роль електроду, що управляє).

### 5.3 Джерела і приймачі оптичного випромінювання

Як датчики оптичного випромінювання застосовуються оптико-електронні прилади. Оптичне випромінювання може бути видиме і в інфрачервоному діапазоні.

Оптичне випромінювання – це електромагнітні хвилі, довжина хвилі яких від  $10^{-8}$ м до  $10^{-3}$ м (частоти від  $3 \cdot 10^{16}$  до  $3 \cdot 10^{11}$  Гц).

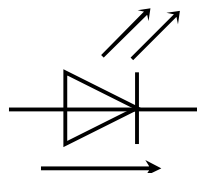
Видима область від  $0.4 \cdot 10^{-6}$  до  $0.7 \cdot 10^{-6}$ м ( $0.4 - 0.7$  мкм).



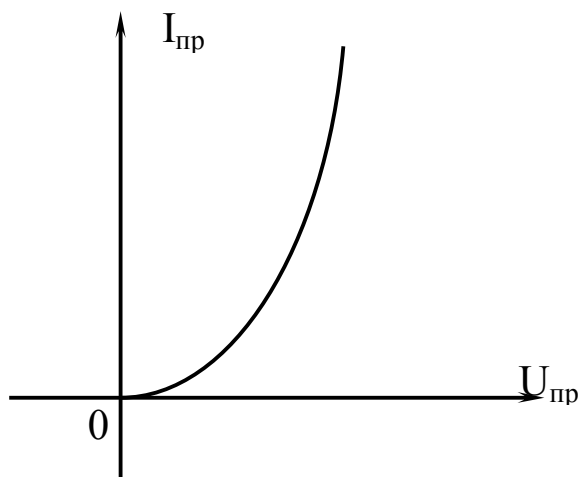
Основний параметр – довжина хвилі  $\lambda$

Перевага оптичного сигналу – висока перешкодостійкість, хороше узгодження ланцюгів з різними  $R_{вх}$  і  $R_{вих}$  ( $Z_{вх}$  і  $Z_{вих}$ ), можливість електричної розв'язки вхідного і вихідного ланцюгів. Окрім  $\lambda$  застосовують наступні параметри: - інтенсивність; - поляризація; - ступінь монохроматичності і когерентності; - спрямованість. Оптичний сигнал може передаватися від джерела до приймача по повітрю (вакууму) або по спеціальних световодах. Як джерела застосовуються теплові (лампи розжарювання, нагріті тіла), електролюминисцентные, напівпровідникові і так далі

В даний час як джерела оптичного випромінювання широко застосовуються светоизлучающие діоди. Діляться на світлодіоди (у видимій області), інфрачервоні діоди.

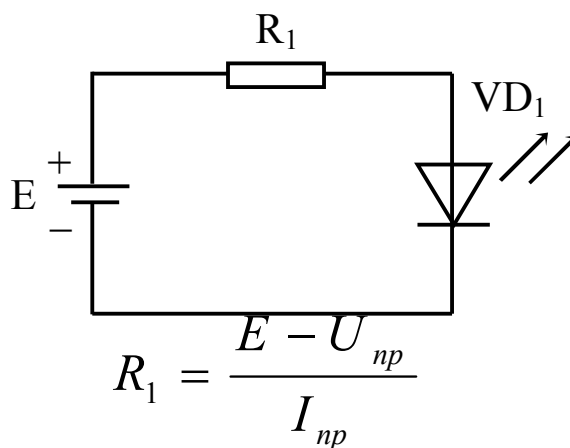


Випромінюючі діоди – джерела некогерентного випромінювання.  
Робочою є пряма гілка ВАХ.



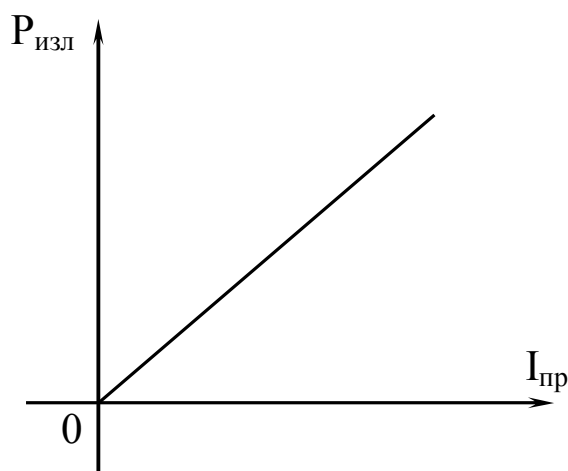
Параметри :  $I_{пр}$ ;  $U_{пр}$ ;  $P_{изл}$ .

Схема включення:



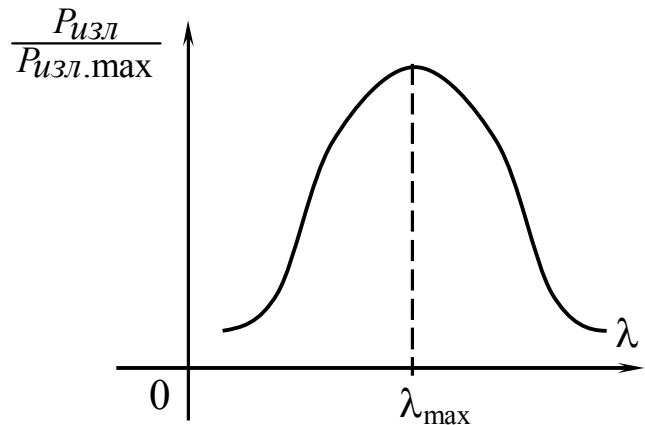
Характеристики світлодіодів

$$P_{изл} = f(I_{пр})$$



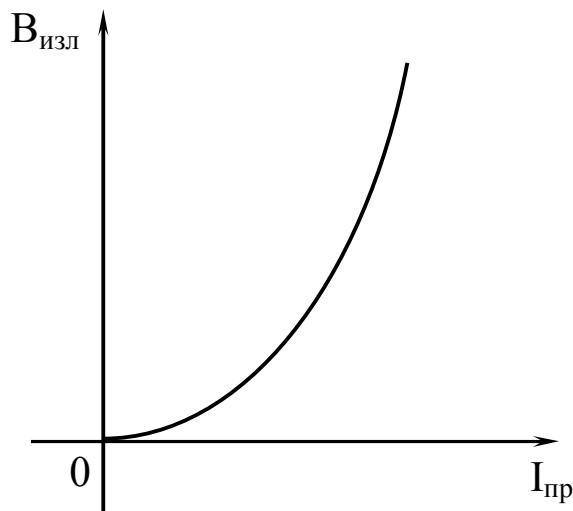
Спектральна характеристика:

$$\frac{P_{\text{изл}}}{P_{\text{изл. max}}} = f(\lambda)$$



Термін служби – до 106 годин.

Для світлодіодів у видимій області застосовується залежність яскравості від  $I_{\text{пр}}$ .



Застосовуються як джерела безперервного і імпульсного випромінювання.

Маркіровка: І П Д 04 А — 1 До

випромінювання | колір

Випромінюючий напівпровідниковий діод (червоний)

Стара маркіровка: Ал107б і так далі

Напівпровідникові лазерні діоди (аналогічні випромінюючим діодам, тільки після  $I_{\text{пр. граничне}}$  відбувається випромінювання когерентним і значно збільшується його потужність).

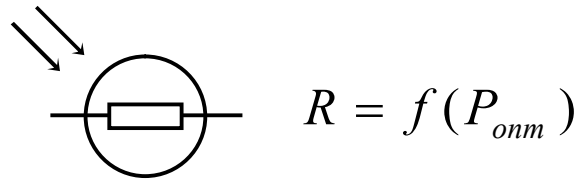
Зворотний зсув р-n переходу світлодіода не допускається.

Основна характеристика випромінювання – залежність потужності випромінювання від прямого струму.

Випромінюючі діоди є монохроматичними випромінювачами.

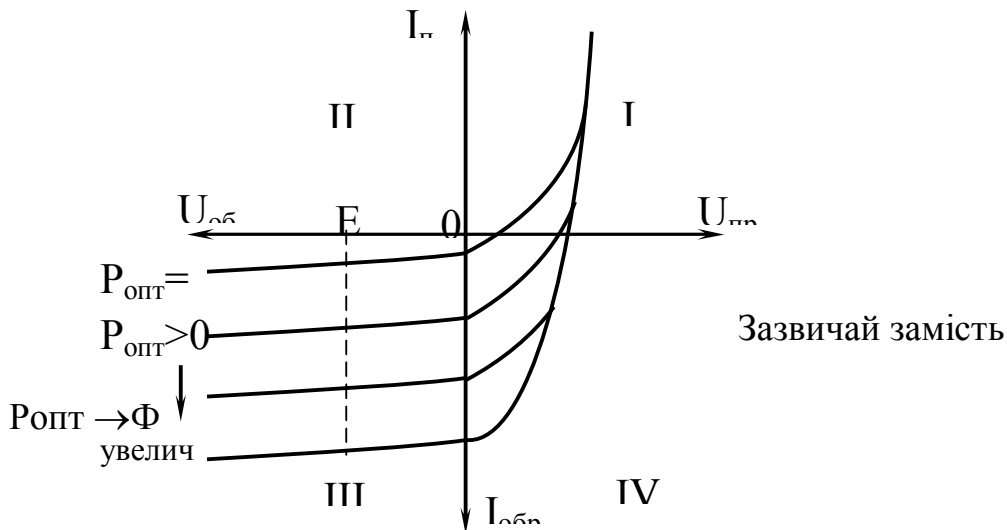
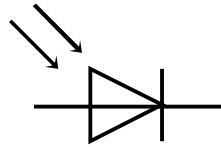
Для прийому оптичного випромінювання застосовуються фото прилади:

1) Фоторезистори



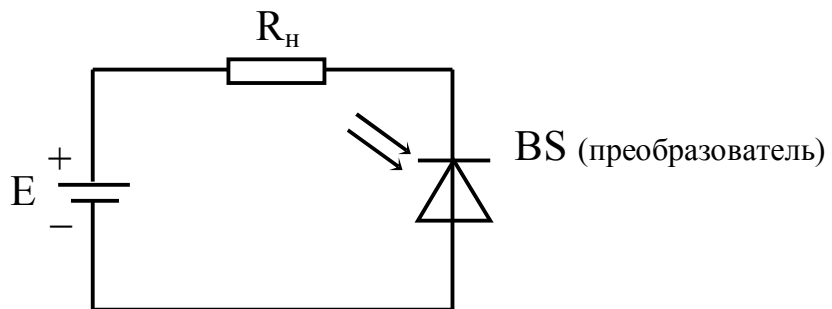
Застосовується рідко

2) Фотодіоди



Працює в 2<sup>x</sup> режимах :

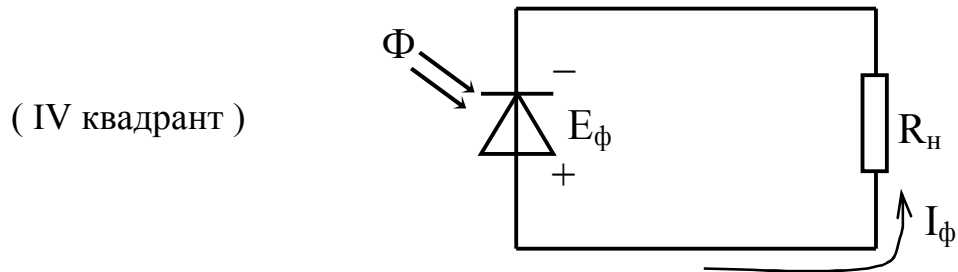
І) Фотодіодний режим – необхідне зовнішнє джерело живлення (ІІІ-квADRANT).



Якщо  $R_n \rightarrow 0$ , то ФД працює як генератор струму.

У фотодіодному режимі – великий динамічний діапазон, велика чутливість.

II) Гальванічний режим – без джерела живлення.



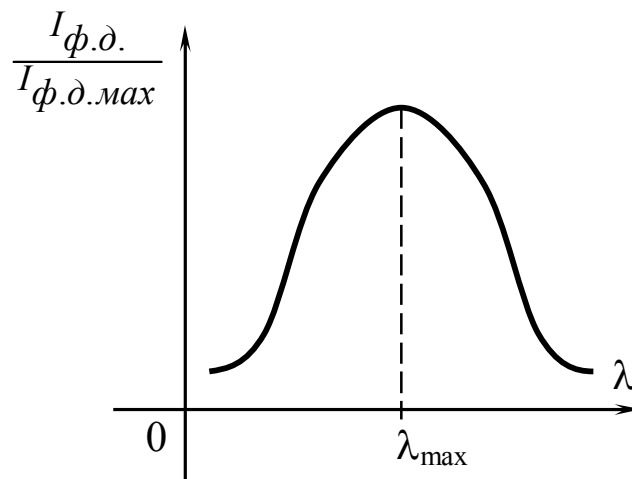
$E_{\phi}$  нелінійно залежить від  $\Phi$ .

Гальванічний режим застосовується при малих  $\Phi$  ( у вимірювальних пристроях).

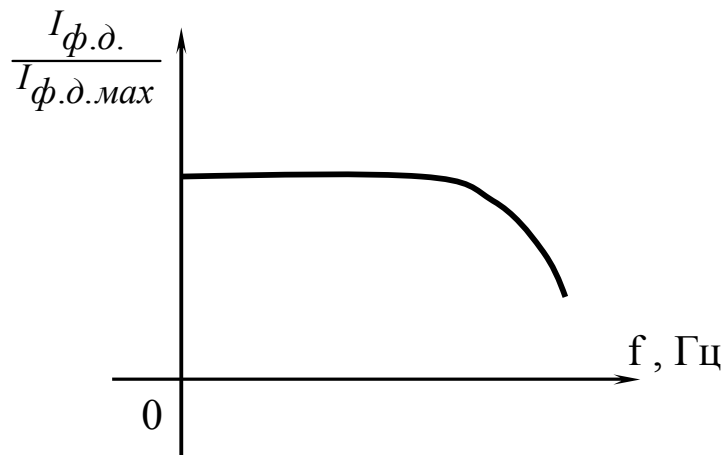
Випускаються спец. лавинні фотодіоди з високою чутливістю.

Характеристики фотодіодів

а) Спектральна характеристика чутливості:

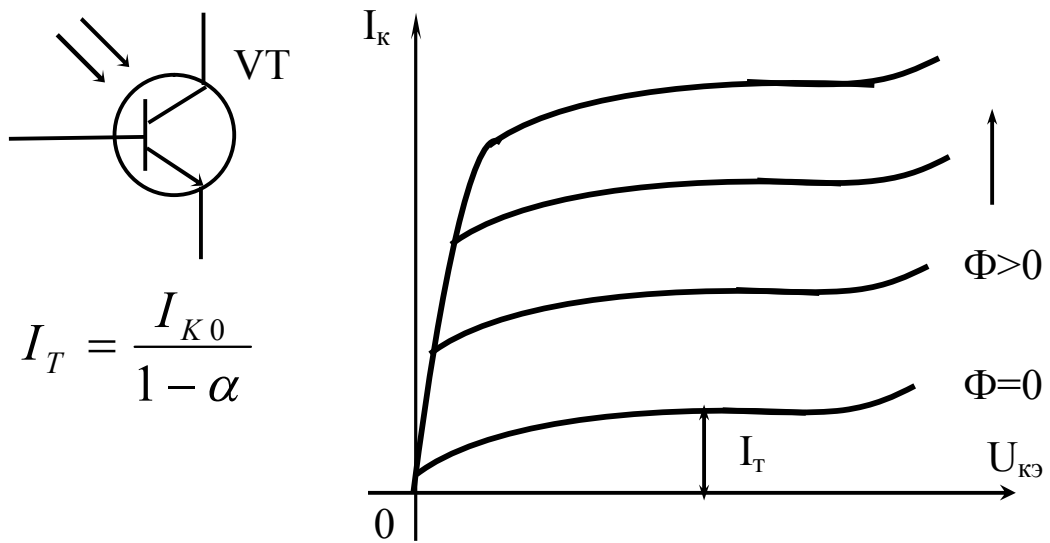


б) Частотна характеристика



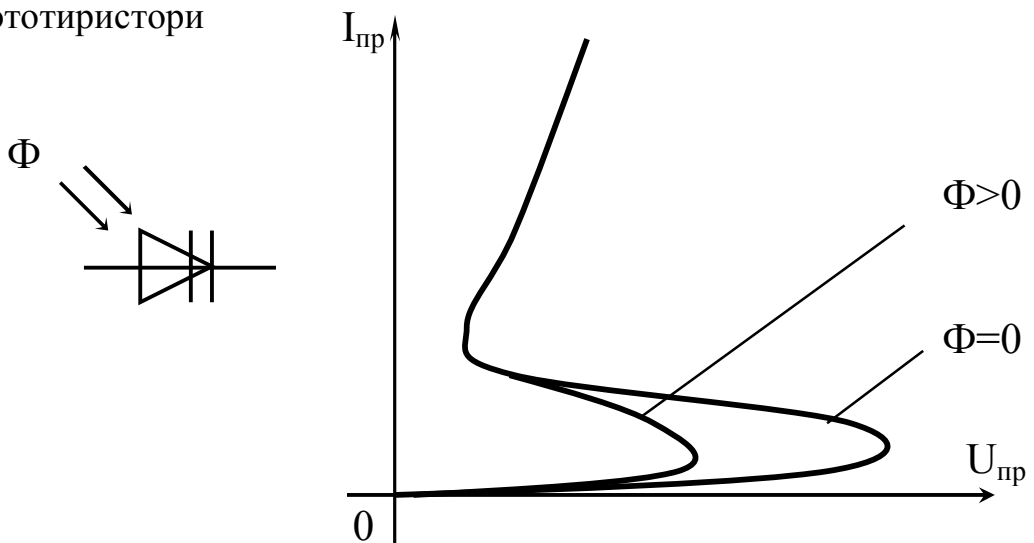
Маркування: **Фд250** – фотодіод

### 3) Фототранзистори



Чутливість транзистора вища, але менше граничної частоти.  
 Маркіровка: ФТ1

### 4) Фототиристри



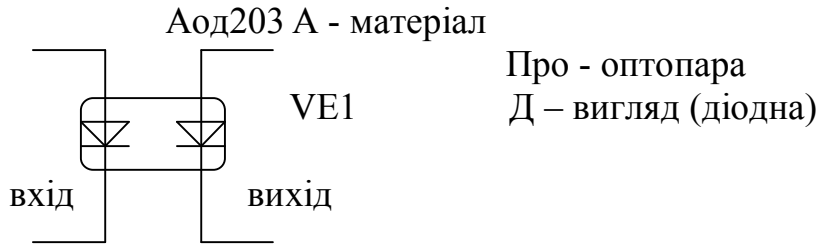
Застосовуються матриці фотоприймачів а також приймальні електронно-променеві трубки.

На базі розглянутих приладів виконуються оптопары (оптрони)

Оптопара містить джерело випромінювання і приймач випромінювання, які знаходяться в одному корпусі. Оптопары (є з відкритим і закритим оптичними каналами).

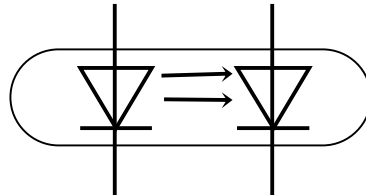
Включає джерело і приймач оптич. випромінювання. Найчастіше як джерело – світлодіод.

Діодна оптопара.

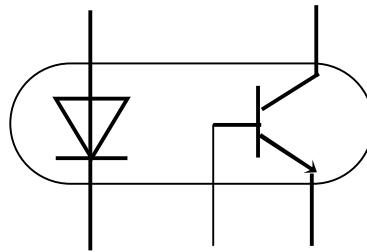


світлодіод - вхід  
приймач – вихід

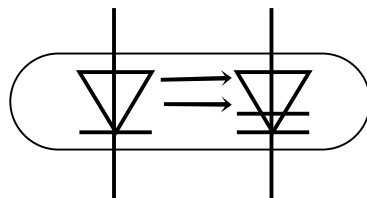
а) Діодні оптопари (Маркування: АОД101)



б) Транзисторні оптопари (Маркування: АОТ110Б)



в) Оптрони тиристорів (Маркіровка: АОУ...)



Застосування – для зв'язку пристроїв при їх гальванічній розв'язці.

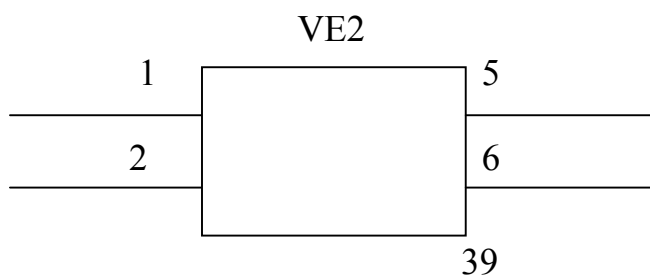
Всі оптопари застосовуються як пристрої розділення сигналів.

У довідниках даються параметри вхідних сигналів (те, що відноситься до світлодіода), вихідних сигналів (те, що відноситься до приймача).

Розглянуті оптопари мають закритий оптичний канал.

Якщо джерело і приймач знаходяться на значній відстані, і є можливість зовнішньої зміни випромінювання, то такі оптопари мають відкритий оптичний канал.

VE1, VE2 – позиційні позначення оптопар.



## 5.4 Індикаторні прилади і їх застосування

Індикаторні прилади застосовуються для відображення інформації. Простим є світлодіод. Може виконуватися матриця світлодіодів, яка відображає або букву, або цифру. Як індикатори застосовуються вакуумні індикатори.

Особливе місце займають рідкокристалічні індикатори. Рідкокристалічні індикатори споживають дуже велику потужність, будучи економічним. Для їх живлення потрібна змінна напруга без постійної складової.

Основний недолік: невисока швидкодія і обмежений діапазон робочих температур.

Широке застосування як індикатори отримали електронно-променеві трубки (телевізори).

Література: [1].– стр.70-108. [2].– стр.124-139. [3].– стр.133-167

## МОДУЛЬ 2. СХЕМОТЕХНІКА АНАЛОГОВИХ І ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

### 6 ЕЛЕКТРОННИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

#### 6.1 Призначення підсилювачів, їх параметри і характеристики

Підсилювач – пристрій, що перетворює енергію джерела сигналу в сигнал, параметри якого визначаються параметрами вхідного сигналу, параметри вихідного сигналу значно більше параметрів вхідного сигналу.

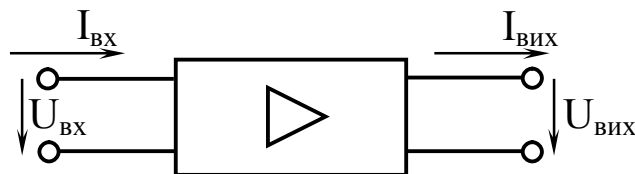
Діляться на:

- підсилювачі напруги ( $Z_{вх.підсил.} \gg Z_{іст.сигн.}; Z_{вих.підсил.} \ll Z_{навантаж.}$ );
- підсилювачі струму ( $Z_{вх.підсил.} \ll Z_{іст.сигн.}; Z_{вих.підсил.} \gg Z_{навантаж.}$ );
- підсилювачі потужності ( $Z_{вх.підсил.} \approx Z_{іст.сигн.}; Z_{вих.підсил.} \approx Z_{навантаж.}$ ).

Як навантаження підсилювача може бути виконавський елемент (приймач енергії) або інший підсилювач.

Окремий ступінь підсилювача називається підсилювальним каскадом.

У загальному випадку підсилювач є 4-м полюсник:



Параметри підсилювачів:

а) Коефіцієнт посилення 
$$K_y = \frac{U_{вих}(j\omega)}{U_{вх}(j\omega)} \quad (\text{у загальному випадку})$$



$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \quad K_i = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} \quad K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}$$

Вказані коефіцієнти можуть виражатися в логарифмічних одиницях(дБ):

$$K_u[\text{дБ}] = 20 \lg K_u; \quad K_i[\text{дБ}] = 20 \lg K_i; \quad K_p[\text{дБ}] = 10 \lg K_p.$$

Для багатокаскадних підсилювачів

$$K_{\Sigma} = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n$$

$$K_{\Sigma}[\text{дБ}] = K_1[\text{дБ}] + K_2[\text{дБ}] + \dots + K_n[\text{дБ}].$$

б) Коефіцієнт нелінійного спотворення (за рахунок нелінійності амплітудної характеристики)

$$K_{\Gamma \text{ или } \nu} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} P_n}{P_1}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}};$$

n – гармоніки.

Для багатокаскадних підсилювачів

$$\nu_{\Sigma} = \nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n.$$

в) Коефіцієнт частотних спотворень (зміна  $K_{\text{усил.}}$  на граничних частотах роботи підсилювача)

$$M_f = \frac{K_o}{K_f};$$

$K_o$  – модуль на середній частоті;

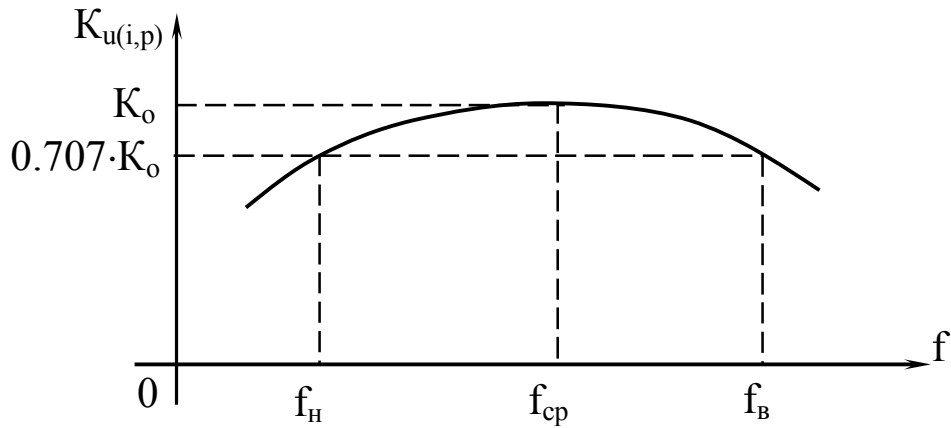
$K_f$  – модуль на заданій частоті.

г) Коефіцієнт корисної дії  $\eta$

д) вхідний і вихідний опори.

Характеристики підсилювачів:

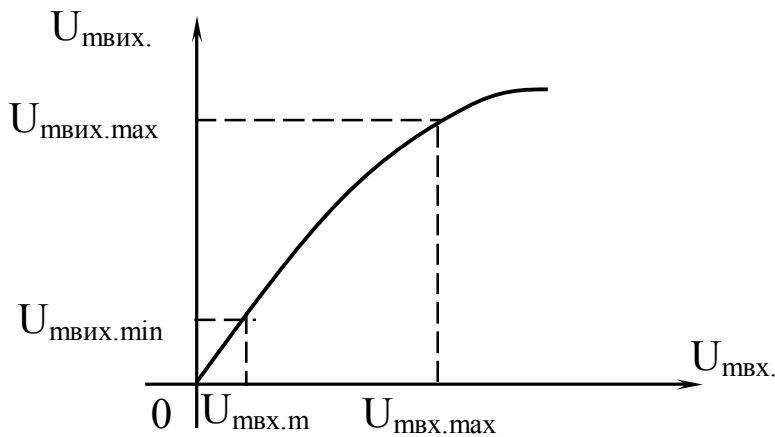
а) АЧХ  $K_{u(i,p)}=F(f)$ , або  $U_{\text{вих}}=F(f)$ , при  $U_{\text{вх}}=\text{const}$ .



$f_v - f_n = \Delta f$  – смуга пропускання (посилення).

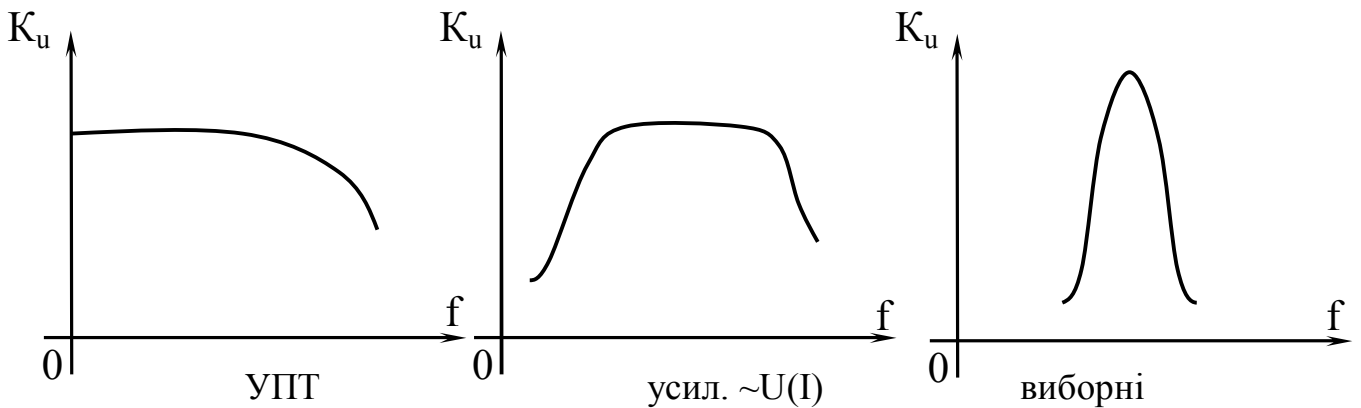
б) Амплітудна характеристика

$\Delta U_{\text{вих}}=F(\Delta U_{\text{вх}})$ , при  $f=\text{const}$ . або  $U_{\text{мвих}}=F(U_{\text{мвх}})$ .



$$\frac{U_{\text{вх.макс}}}{U_{\text{вх.мін}}} = D \text{ – діапазон.}$$

Класифікація підсилювачів (по вигляду АЧХ)



## 6.2 Зворотний зв'язок в підсилювачах і її різновиди

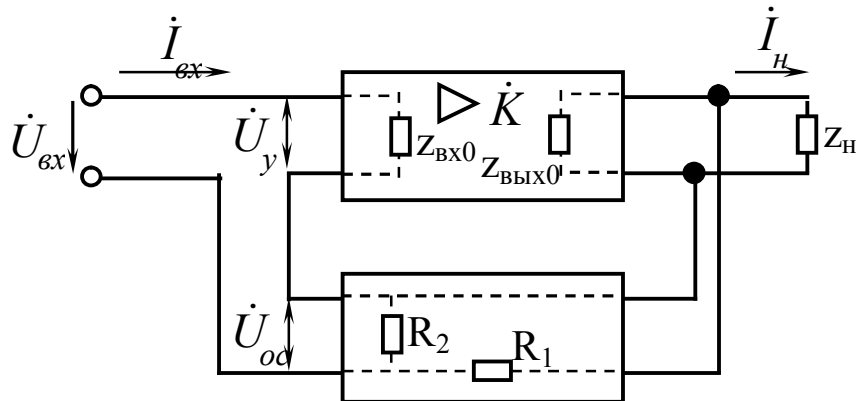
Зворотний зв'язок – подача частини вихідного сигналу на вхід підсилювача. При збігу фаз вказаних сигналів буде позитивний зворотний зв'язок (ПОС), якщо фази відрізняються – буде отриц. обр. зв'язок (ООС).

При ПОС  $U_{\Sigma} = U_{вх} + U_{ос}$  ( $i_{\Sigma} = i_{вх} + i_{ос}$ ).

При ООС  $U_{\Sigma} = U_{вх} - U_{ос}$  ( $i_{\Sigma} = i_{вх} - i_{ос}$ ).

Є 4 види ОС:

1) Послідовна за напругою.



$$\dot{U}_y = \dot{U}_{вх} + \dot{U}_{ос}; \quad \dot{U}_{ос} = \dot{\beta}_{ос} \cdot \dot{U}_{ввых};$$

$$\dot{K}_{ос} = \frac{\dot{U}_{ввых}}{\dot{U}_{вх}} = \frac{\dot{U}_{ввых}}{\dot{U}_y - \dot{U}_{ос}} = \frac{\dot{U}_{ввых}}{\dot{U}_y - \dot{\beta}_{ос} \cdot \dot{U}_{ввых}};$$

$$\dot{K}_{ос} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{\beta}_{ос} \cdot \dot{K}}; \quad \dot{\beta}_{ос} = \frac{\dot{U}_{ос}}{\dot{U}_{ввых}} \text{ - коефіцієнт обр. зв'язки.}$$

$\beta_{ос} K$  - глибина обр. зв'язки.

Якщо  $1 > \beta_{ос} K > 0$  - ПОС;

$\beta_{ос} K \geq 1$  - умова самозбудження;

$\beta_{ос} K < 0$  - ООС;

$\beta_{ос} K = 0$  - ОС немає.

Для підсилювачів повинна бути ООС.

В цьому випадку

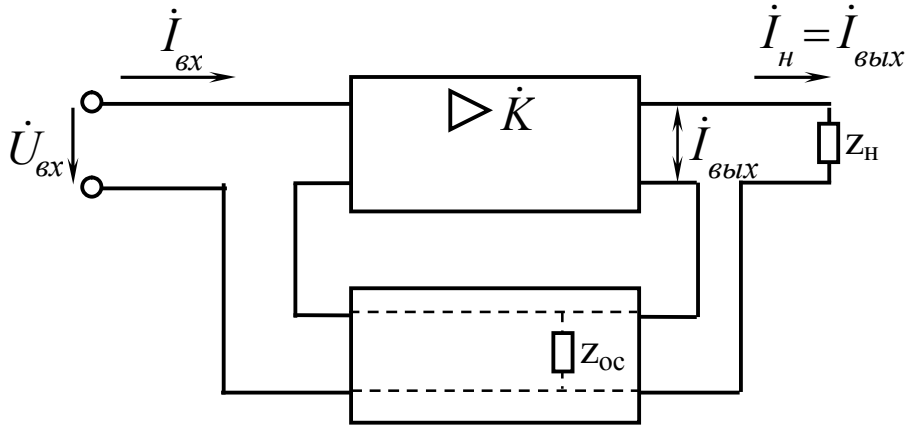
$$\dot{K}_{оос} = \frac{\dot{K}}{1 + \dot{\beta}_{ос} \cdot \dot{K}}; \quad \text{Для даної схеми } \beta_{ос} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Для даного випадку при ООС

$$Z_{вх.оос} = Z_{вх.0} \cdot (1 + \beta_{ос} K)$$

$$Z_{\text{вых.оос}} = \frac{Z_{\text{вых.0}}}{(1 + \beta_{oc} K)}$$

2) Послідовна за струмом.

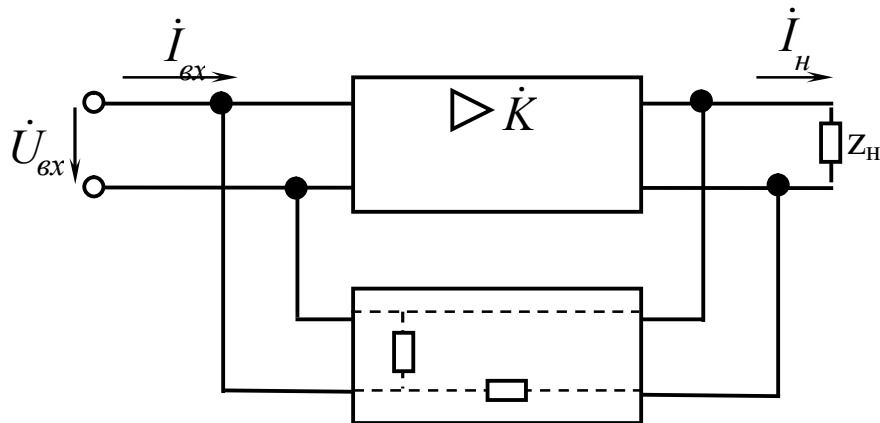


$$\beta_{oc} = \frac{\dot{Z}_{oc}}{\dot{Z}_H + \dot{Z}_{oc}}$$

$$Z_{\text{вх.оос}} = Z_{\text{вх.0}} \cdot (1 + \beta_{oc} K)$$

$$Z_{\text{вых.оос}} = Z_{\text{вых.0}} \cdot (1 + \beta_{oc} K)$$

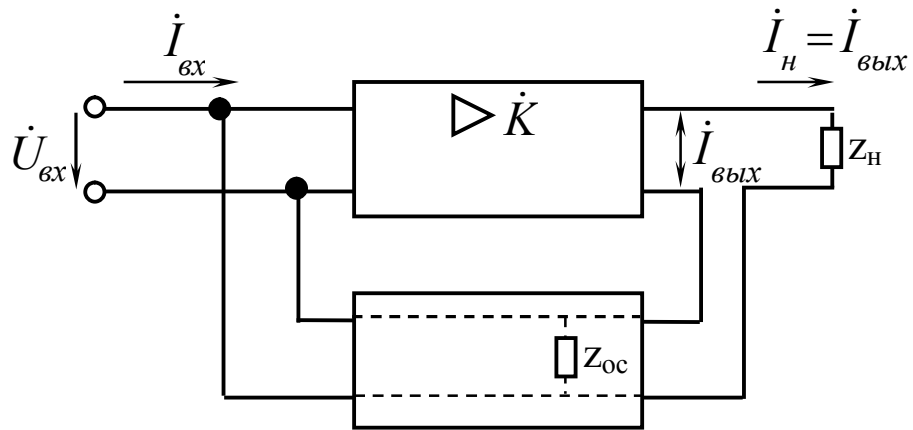
3) Паралельна за напругою.



$$Z_{\text{вх.оос}} = \frac{Z_{\text{вх.0}}}{1 + \beta_{oc} K}$$

$$Z_{\text{вых.оос}} = \frac{Z_{\text{вых.0}}}{1 + \beta_{oc} K}$$

4) Паралельна за струмом.



$$Z_{вх.оос} = \frac{Z_{вх.0}}{1 + \beta_{oc} K}$$

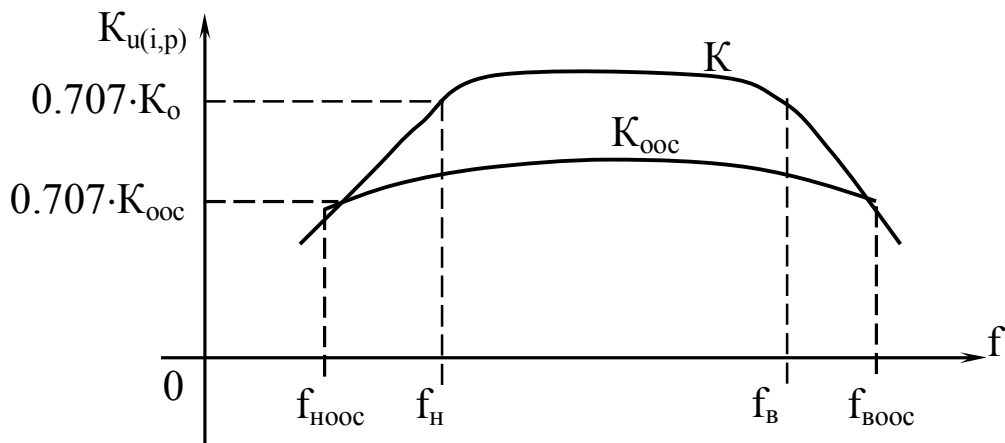
$$Z_{вых.оос} = Z_{вых.0} \cdot (1 + \beta_{oc} K)$$

У разі глибокої ООС і за умови, що  $K$  підсилювача без ООС дуже великий, отримаємо

$$K_{оос} = \frac{K}{1 + \beta_{oc} K} \approx \frac{1}{\beta_{oc}} - \text{визначається тільки } \beta_{oc} \text{ і не залежить від}$$

характеристик власне підсилювача.

ООС істотно покращує лінійність характеристик підсилювача і розширює їх смугу пропускання.



$$f_{в.оос} = f_{в} \cdot (1 + \beta_{oc} K)$$

$$f_{н.оос} = \frac{f_H}{1 + \beta_{oc} K}$$

$$\Delta f_{оос} = f_{воос} - f_{ноос}$$

Коефіцієнт нелінійного спотворення  $V_{оос} = \frac{V}{(1 + \beta_{oc} K)^2}$

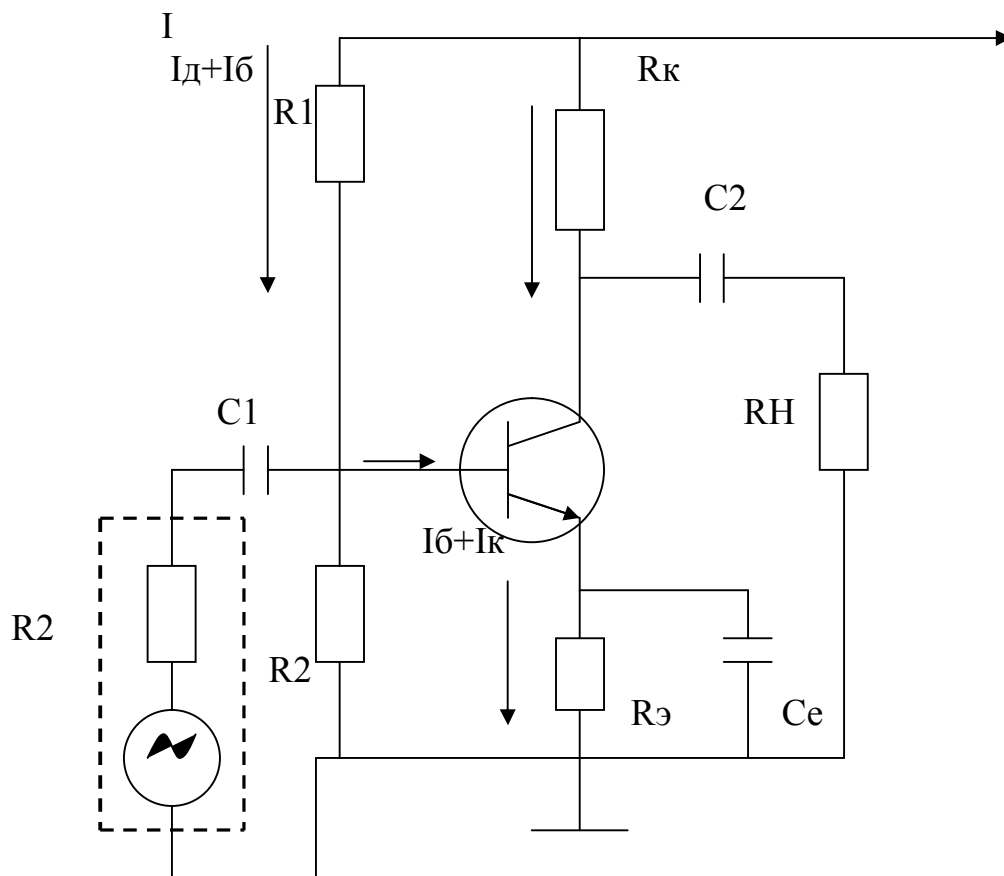
Зменшення коефіцієнта посилення при ООС компенсується введенням додаткових каскадів посилення.

Література: [1]. – стр.135- 179 [2]. - стр.157-178

## 7 ПІДСИЛЮВАЛЬНИЙ КАСКАД НА БІПОЛЯРНОМУ ТРАНЗИСТОРІ ПО СХЕМІ ІЗ ЗАГАЛЬНИМ ЕМІТЕРОМ

### 7.1 Аналіз роботи підсилювального каскаду в режимі спокою

Для роботи каскаду посилення на біполярному транзисторі потрібний задавати початковий струм бази, цей струм задається за допомогою дільника напруги . Типова схема посилення каскаду із загальним емітером .



Для того, щоб розрахувати всі елементи схеми необхідно виконати її аналіз.

При сучасному способі проектування аналіз необхідний для визначення попередніх параметрів елементів, а після моделюємо ці параметри завжди уточнюємо. Для визначення опору резистора і початкових параметрів роботи транзистора виконуємо аналіз по

постійному струму з подачі вхідного сигналу. При подачі направляємо живлення +  $E_k$  проти слід струми.

Указуючи струми визначаємо величину відповідного опору.

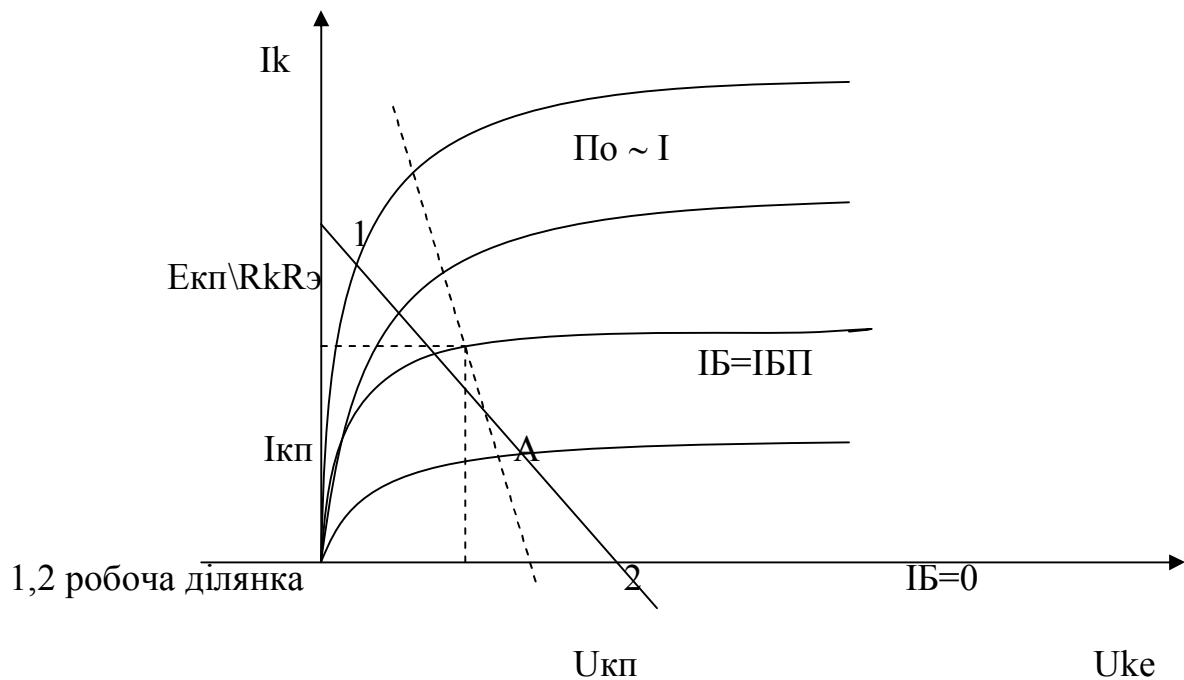
$R_k = R_H \setminus (2-5)$ ;  $R_H$ - опір напрям якого задається при проектуванні

$R_e = (0.1-0.3) R_k$

Негативний зворотний зв'язок послідує по струму.  $R_1$  і  $R_2$  задають початковий струм бази і явл. ділить. напруга для того, щоб умови не впливали на роботу підсилювача величина  $R_1$  і  $R_2$  повинна бути.

Для того, щоб расчитать параметри підсилювача необхідно вибрати тип транзистора.

Вважатимемо, що транзистор сув. і відоме  $E_k$ . Для изв. транзистора будемо навантаження пряму.



Для того, щоб підсилити роботу з мінімальним спотворенням робочого струму транзистора повинна бути посередині ділянки 1,2.

А - робоча крапка, крапці А відповідає  $I_{кп}$  і  $U_{кп}$ . Крапку А вибирають відповідно опору резистора  $R_1$  і  $R_2$ . За вхідними даними визначуваний УБЭ спокою.

$U_{беп} = U_{R2} - U_{ре}$ ;

$R_1 = E_k - U_{R2} \setminus I_{д} + I_{бп}$ ;

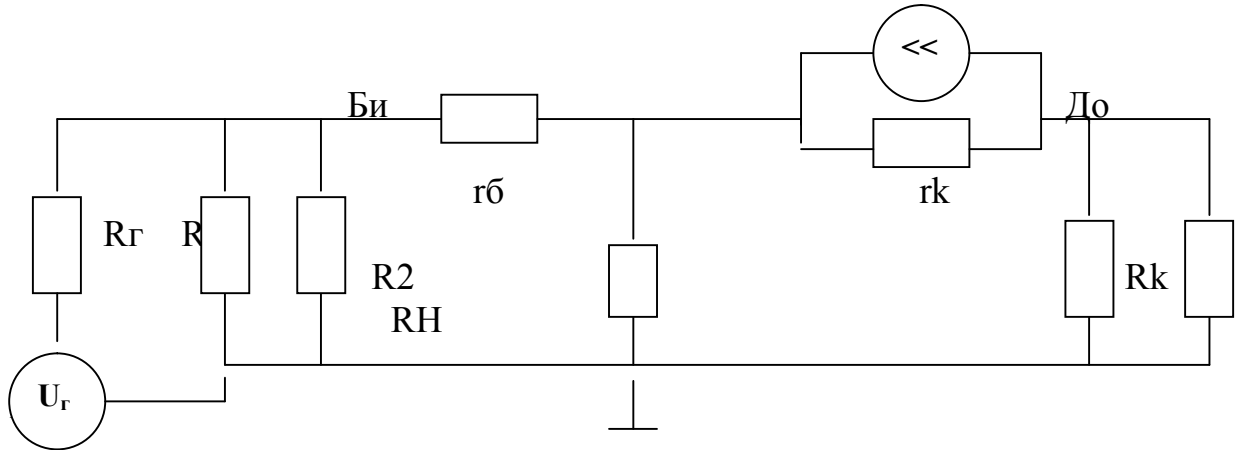
$U_R = (0.1-0.3) E_k$ ;

$R_2 = U_{беп} + U_{ке} \setminus (5-10) I_{бп}$ ;

Для розрахунку параметрів підсилювача необхідно виконати аналіз для змінного струму.

## 7.2 Еквівалентна схема заміщення каскаду. Розрахунок параметрів посилення

Для аналізу по змінному струму вважатимемо, що на середній частоті опір всіх конденсаторів рівна 0, а транзистор працює на мінімальній ділянці характеризує побудовану схему заміщення.



Для змінного струму еквівалентна напруга визначається паралельним включенням  $R_k$  і  $R_h$

$$R_h = R_k \parallel R_h \approx R_k + R_h ; \quad R_h = R_k + R_h ;$$

Знаючи  $R_h \sim$  будемо нагр. прямиї. для змінного струму вона проходить через крапку А.

При подачі на вхід змінної напруги робоча крапка перемелювалася. По лінії для змінного струму.

Визначуваний коефіцієнт посилення по напрузі.

$$I_k = I_{\beta} \cdot \frac{r_k \parallel (r_{\epsilon} + R_h)}{r_k + r_{\epsilon} + R_h} \cdot \frac{1}{r_{\epsilon} + R_h}$$

$$U_{vx} = I_{\beta} \cdot r_{\epsilon} + I_{\epsilon} \cdot r_{\epsilon} = I_{\beta} (r_{\epsilon} + (1 + \beta) r_{\epsilon});$$

$$K_u = \beta \cdot \frac{r_k \parallel R_h}{(r_k + r_{\epsilon} + R_h) \cdot (r_{\epsilon} + (1 + \beta) r_{\epsilon})}$$

$$U_k \gg R_{hi} \quad r_k \gg r_{\epsilon}$$

$$K_u = \beta \cdot \frac{R_h}{r_{\epsilon} + (1 + \beta) r_{\epsilon}} = \frac{R_h}{r_e}$$

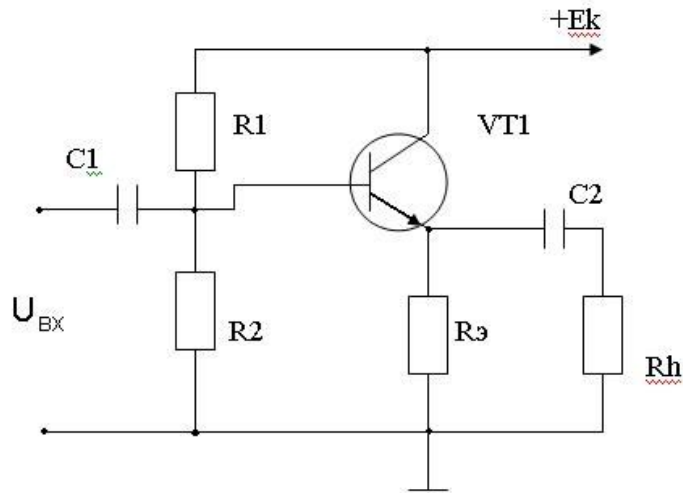
$R_{vx} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{vx}$  аналогічно можна визначити посилення по струму.

## 8 ПІДСИЛЮВАЧІВ СХЕМОТЕХНІК КАСКАДІВ НА БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

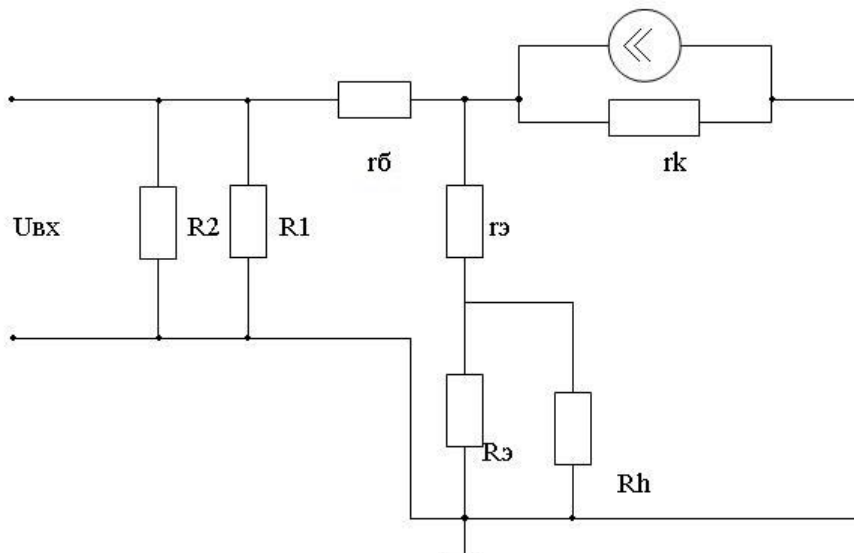
### 8.1 Підсилювальні каскади із загальним колектором і базою

Схема підсилювального каскаду





$R_э$  – створює зворотний зв'язок по змінному і по постійному струму. Аналіз по постійному струму не відрізняється від схеми із загальним емітером. Для визначення параметрів посилення складемо схему заміщення каскаду.



З схеми заміщення визначаємо параметри посилення

$$R_{вх\text{ ок}} = R_2 \parallel R_1 \parallel r_{бх}$$

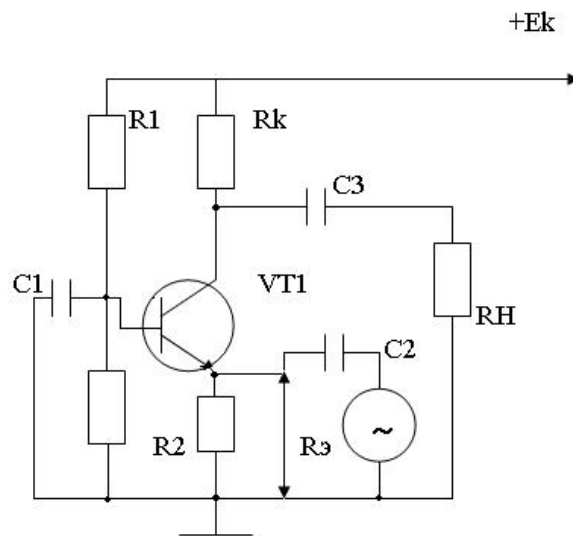
$$R_{вх} + r_{б} + (1 + \beta)(r_{э} + R_{h\sim});$$

$$R_{h\sim} = R_э \parallel R_h \parallel R_{э} + R_h$$

$$R_{вх\text{ ок}} \gg R_{вх\text{ о.э}}$$

$$\boxed{K_u = (1 + \beta) \cdot R_{h\sim} \parallel r_{бх}} \leq 1$$

Схема зі спільним колектором вживаний як повторювач напруги з високим входним опором вживаний для узгодження окремих каскадів



Визначимо параметри посилення

$$R_{вх} = R_2 \parallel g_{вх}$$

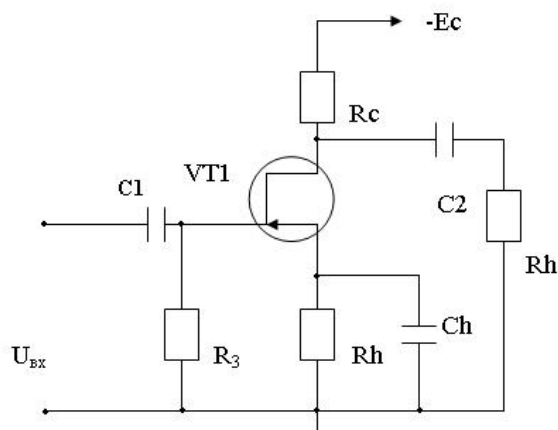
$$g_{вх} = r_e + r_b(1-\alpha)$$

$$K_u = \beta * R_{н\sim} \setminus g_{вх} \gg 1$$

Схема з ОБ є повторювачем струму. Застосовується для узгодження окремих каскадів.

## 8.2 Особливості застосування польових транзисторів підсилювальних каскадів

Оскільки польові транзистори мають дуже великий власний вхідний опір, то вони застосовуються в каскадах, де необхідно забезпечувати великий вхідний опір : застосовуючи схеми із загальним витоком і загальним стоком (по аналогії з біполярним транзистором ). У схемі із загальним затвором в підсилувачах не застосовуються.

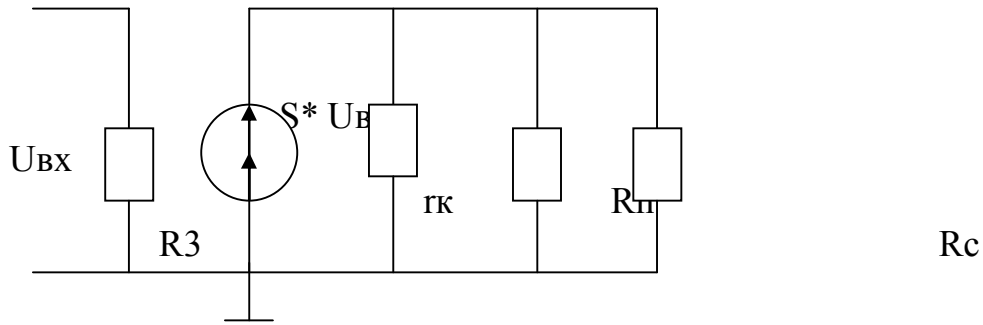


$$U_{зи} = I_h * R_h$$

$R_h$  – визначає положення робочої крапки.

Схема заміщення каскаду

S- крутизна « - » - міняється фаза



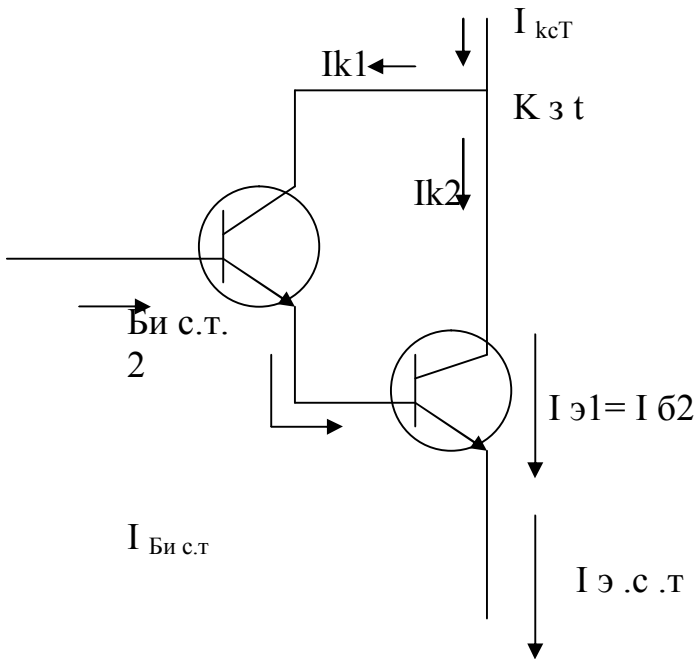
$$K_u = \frac{U_{ВХ}}{U_{ВХ}} = -S * U_{ВХ} * r_k \parallel R_c \parallel R_h \parallel r_k + R_c + R_h \parallel R_{п}$$

### 8.3 Шляхи підвищення коефіцієнта посилення підсилювальних каскадів

Шляхи підвищення коефіцієнта посилення

$$R_u = R_h \parallel r_{к}$$

Для збільшення  $\beta$  застосовують схеми складених транзисторів.



$$= I_{кТ} \beta_{Бис.т}$$

$$I_{кТ} = I_{к1} + I_{к2} = I_{Бис.т} * (1 + \beta_1)$$

$$\beta_1 = I_{к1} + I_{Бис.т}$$

## 9 СХЕМОТЕХНІКА ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### 9.1 Підсилювачі постійного струму на транзисторах з безпосереднім зв'язком і особливості його проектування

Оскільки на виході УПТ є окрім корисного сигналу напруга задаюча режим спокою, то з часом вихідна напруга УПТ змінюється. Цю зміну називають дрейфом.

$$U_{др} = U_{др \max} - U_{др \min}$$

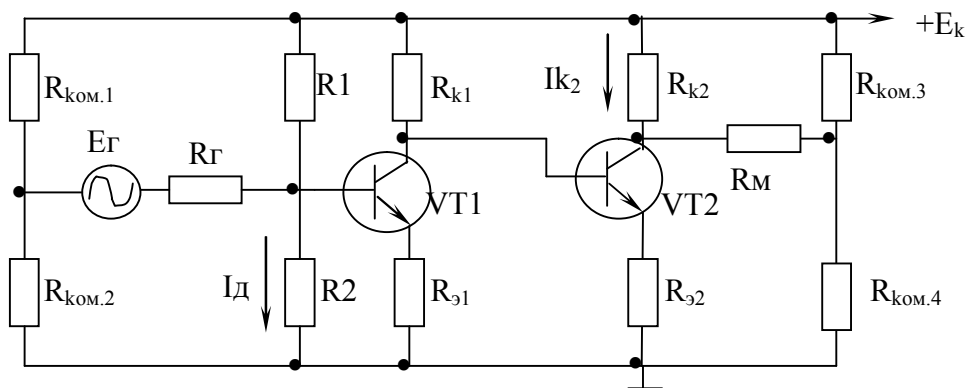
У зв'язку з цим вводиться параметр приведені до входу напруги дрейфу.

$$\ell_{др} = \frac{U_{др}}{kU}$$

Напруга, що визначає min рівень вхідного сигналу

$$U_{вх \min} = 10 \ell_{др}$$

Схема УПТ



Всі елементи схеми визначають режим спокою. Безпосереднє включення джерела сигналу ( $U_{вх}$ ) приведе до порушення режиму спокою транзистора VT1. Зміниться ІБ.

$$U_{R_{g2}} = U_{R_2}$$

$$U_{R_{g4}} = E_k - I_{k2} \cdot R_{k2}$$

При безпосередньому включенні  $R_3$  створюється негативний зворотний зв'язок (ООС) і зад. режим роботи транзистора по постійному струму.

Для нормальної роботи підсилювача  $R_{э2} > R_{э1}$

$$R_{к1} > R_{к2}$$

$$K_{U1} \approx \frac{R_{к1}}{R_{э}}$$

Для третього каскаду коефіцієнт посилення буде  $\approx 1$  (більше трьох каскадів не ставлять).

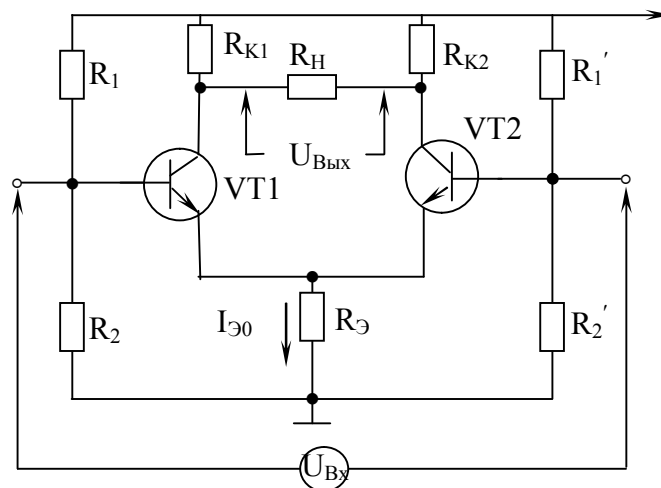
Збільшення  $R_{э}$  вимагає збільшення  $E_{к}$  (для завдання робочої точки). Вказаний підсилювач володіє незначним коефіцієнтом посилення. При зміні температури змінюється напруга дрейфу. Для збільшення загального коефіцієнта посилення можна застосувати складені транзистори.

Для усунення впливу температури замість  $R_{э}$  ставляться стабілітрони. Для того, щоб повністю усунути дрейф повної напруги виконують перетворення постійною в змінну, підсилюють вед. на змінну (струм не має дрейфу).

## 9.2 Диференціальні каскади на польових і біполярних транзисторах

Диференціальні каскади можуть будуватися на біполярному або польовому транзисторі.

Диференціальний каскад складається з двох однакових каскадів, які сполучені безпосередньо.



Для схеми характерне те, що вона повинна бути повністю симетрична:

- схема має 2 входи, може використовувати тільки 1 з входів;

- вихідна напруга знімається з колекторів;
- робоча точка транзисторів задається всіма резисторами, які є в схемі. Якщо змінити температуру, то для симетричної схеми буде однакові зміни струмів колекторів, тобто  $\Delta I_{к1} = \Delta I_{к2}$ , при цьому  $U_{ВЫХ} = \text{const}$

$$U_{ВЫХ} = \Delta U_{к1} - \Delta U_{к2} = \Delta I_{к1} \cdot R_{к1} - \Delta I_{к2} \cdot R_{к2}$$

1)  $K_{U_{с.ф}}$  - синфазный коефіцієнт усил.

$$K_{U_{с.ф}} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{U_{ВХ.с.ф.}} \rightarrow 0$$

2)  $K_{U_{диф}} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{U_{ВХ.диф.}} \rightarrow 0$

На кожному вході різна напруга (диференціальний сигнал)

$$U_{ВХ.диф.} = U_{ВХ.1} + U_{ВХ.2}$$

Для стабілізації режиму спокою необхідно збільшити величину  $R_3$ .

$R_3$  створює стабілізацію режиму спокою.

$$K_{U1} = \frac{\beta_1 \cdot R_{к1}}{r_{вх1}}$$

$$K_{U2} = \frac{\beta_2 \cdot R_{к2}}{r_{вх2}}$$

$$|K_{диф}| = |K_{U1}| + |K_{U2}| = \frac{2\beta \cdot R_{к}}{r_{вх}}$$

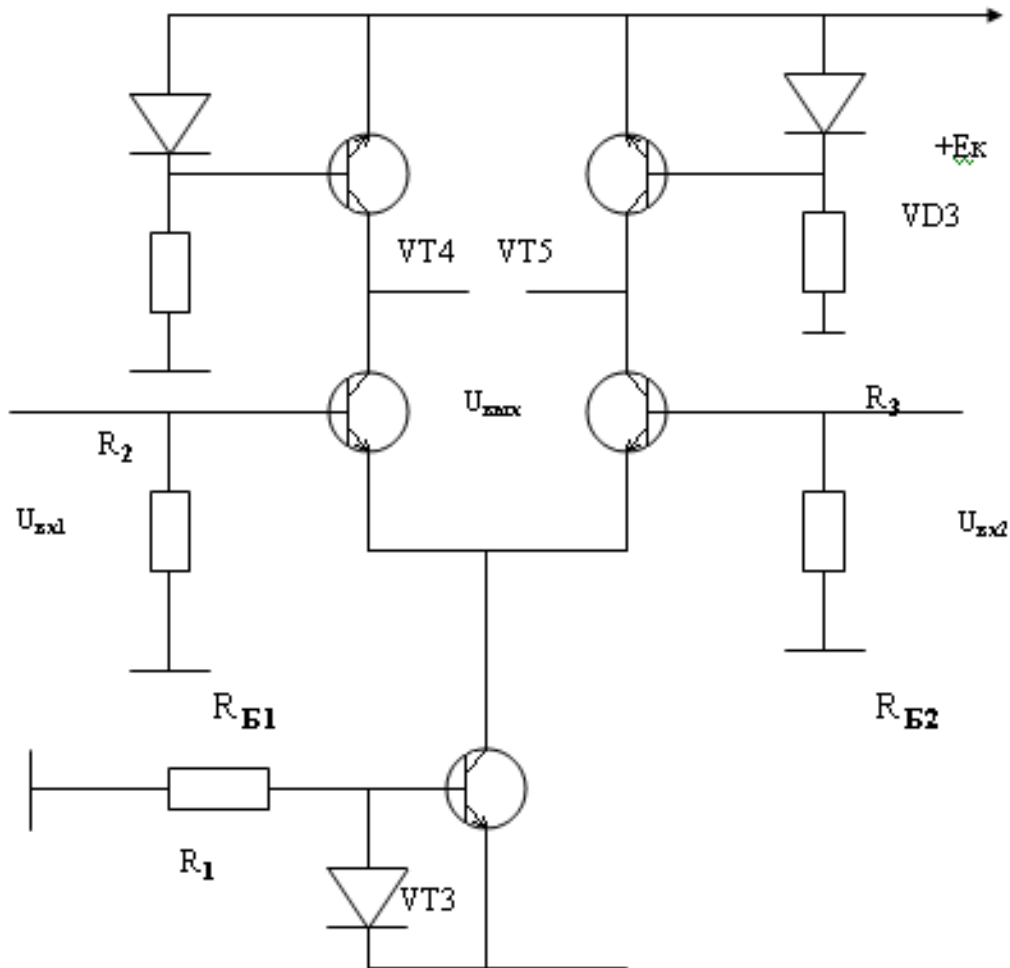
Для збільшення коефіцієнта транзистора можна застосувати складені транзистора:

1)  $\beta = \uparrow$

2)  $R_{к} = \uparrow$

Збільшити  $R_{к}$  можна застосувавши замість них нелінійні елементи (транзистори), стабілізувати режим спокою можна застосувавши замість  $R_3$  генератор стабільного струму. Для спрощення схеми диференціального каскаду живлять від двох джерел.

Схема поліпшення диференціального підсилювача



і  $R_{Б2}$  - виконують роль  $R_1$  і  $R_2$  (для двохполярного джерела).

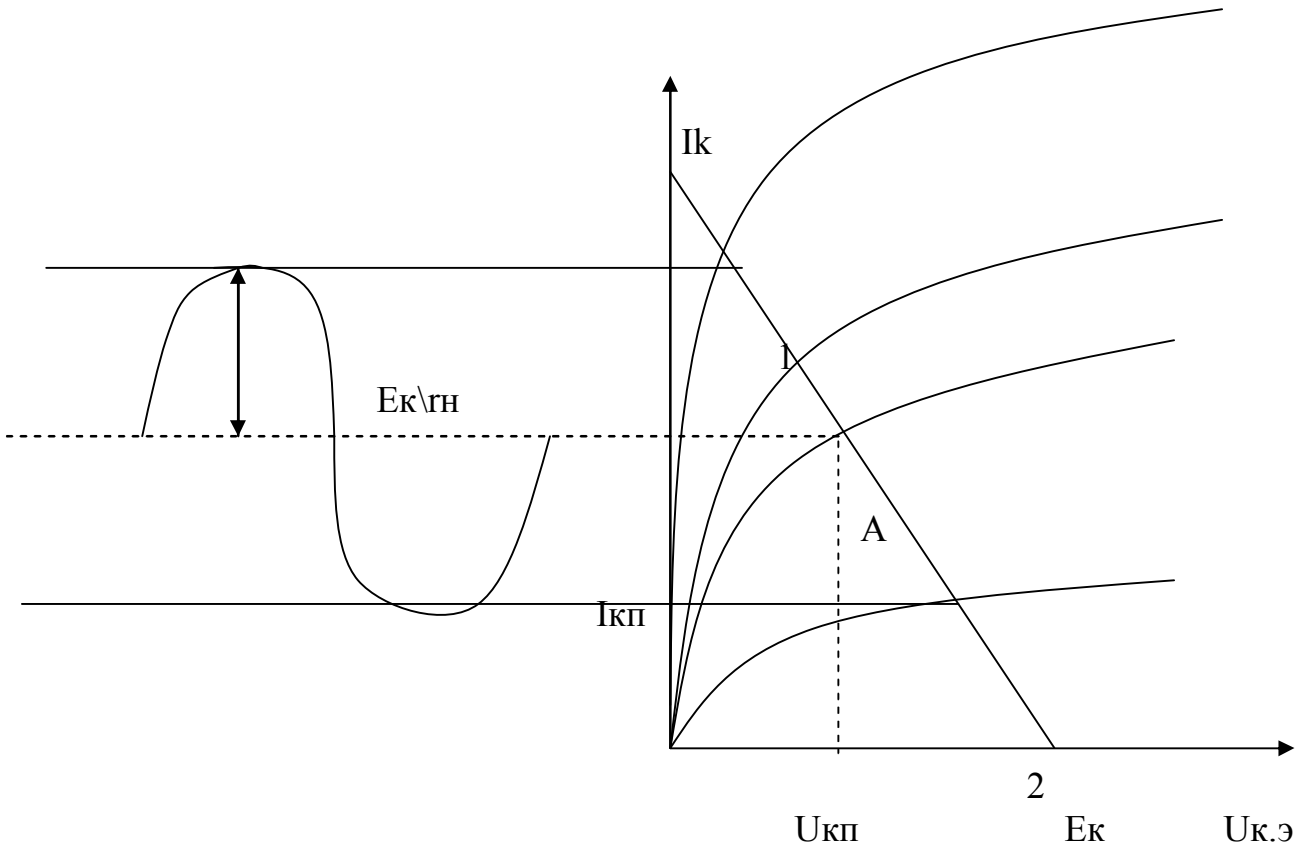
Диференціальний підсилювач використовується для узгодження із звичайним підсилювачем, в цьому випадку вхідний сигнал подається тільки на один вхід.

# 10 ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ

## 10.1 Загальна характеристика і основні параметри

Підсилювачі потужності призначені для посилення потужності вхідних сигналів. Характеризуються наступними параметрами:  $K_u$ ,  $K_p$ ,  $R_{вх}$ ,  $R_{вих}$ ,  $\zeta = P_{вих} / P_0$

При роботі підсилювача виконується вся динамічна характеристика.



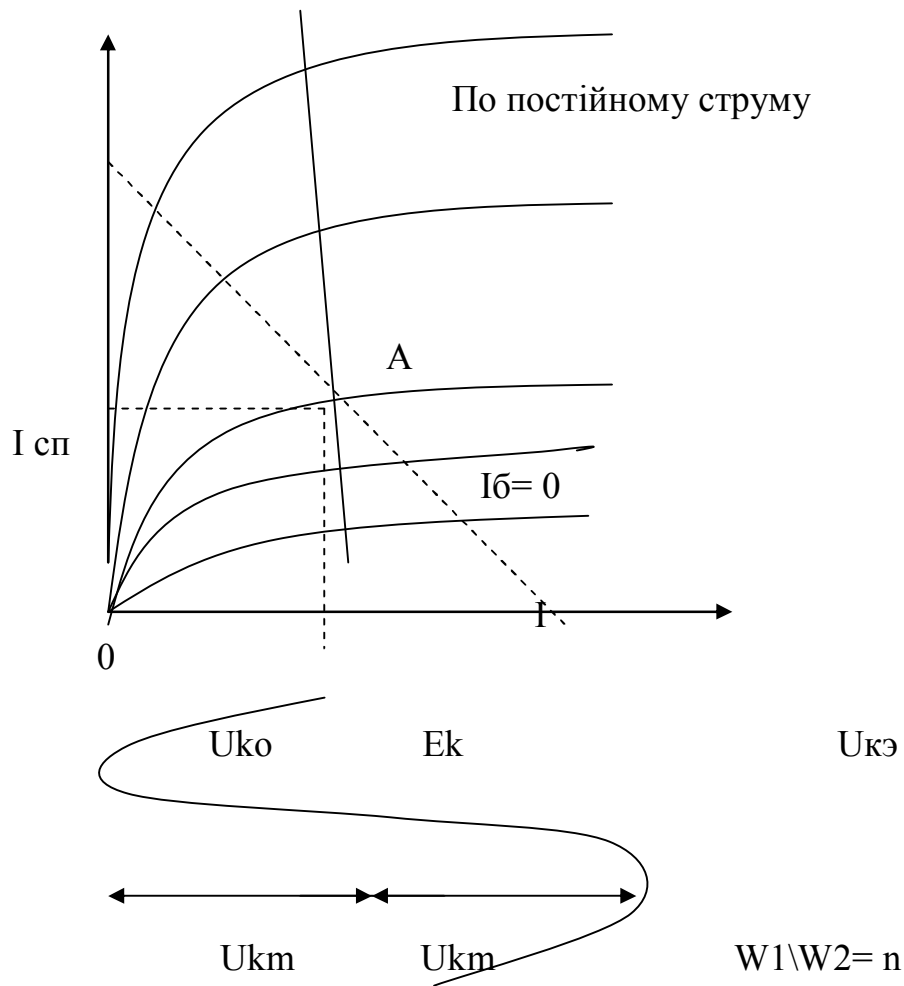
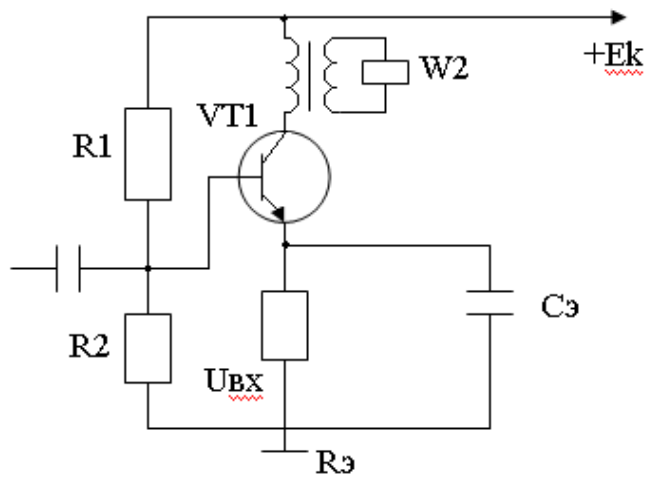
Для роботи каскаду в режимі посилення робоча крапка повинна бути посередині 1-2

$$U_{km} \leq E_k / 2$$

$$I_{km} = I_{kp}$$

$$P_H = U_k * I_{km} / 2.$$

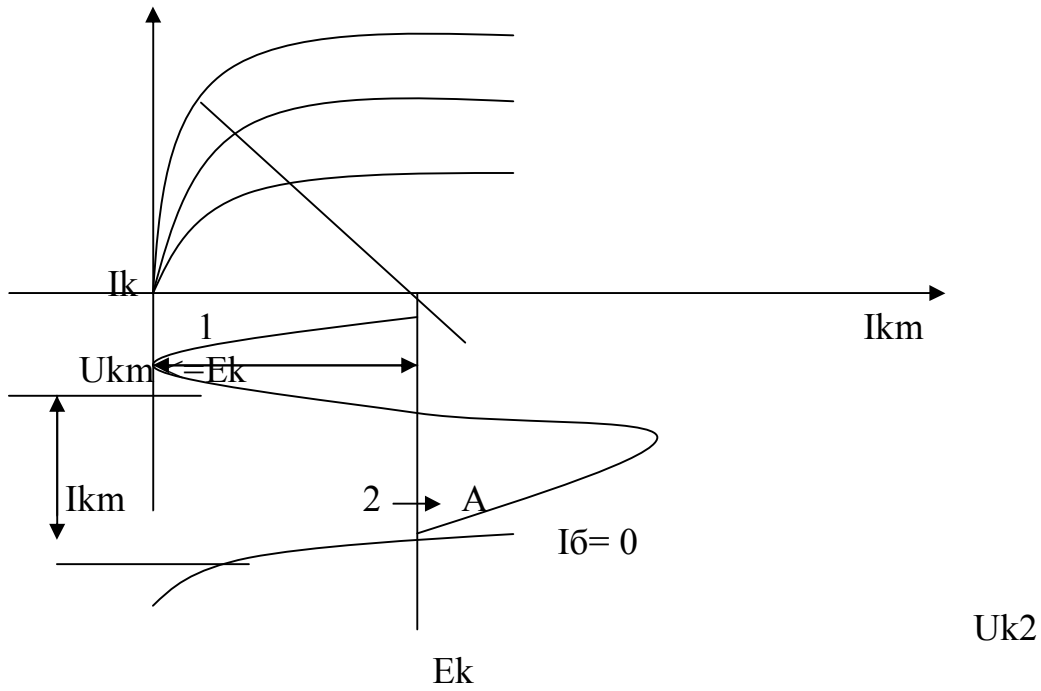




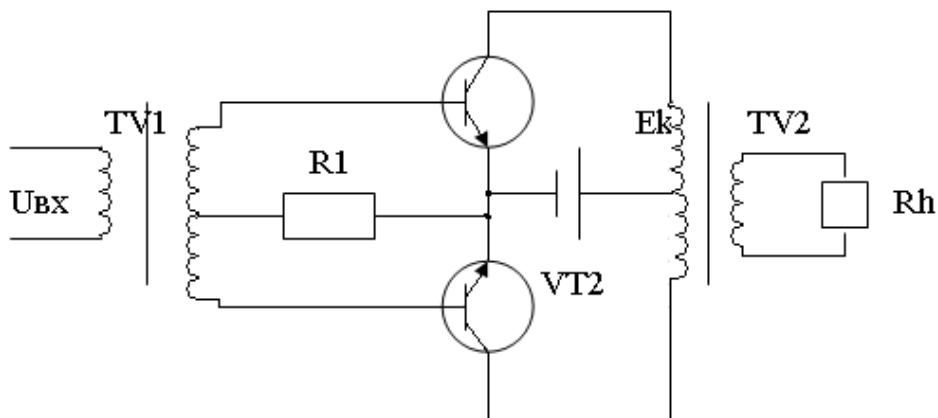
$\beta \leq 0.5$   
Половина втрачається на транзисторі

## 10.2 Двотактовий підсилювач

Робоча точка вибирається при струмі бази = 0. Напруга вибирається у бік зменшення.

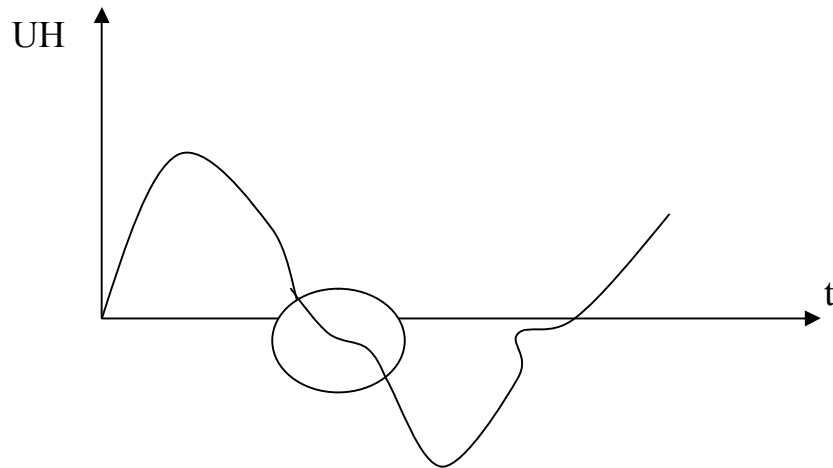


$$\eta = \frac{\pi}{4} \approx 0.785$$



$$P_o = 2 I_{km} \cdot E_k \cdot \frac{\pi}{4}$$

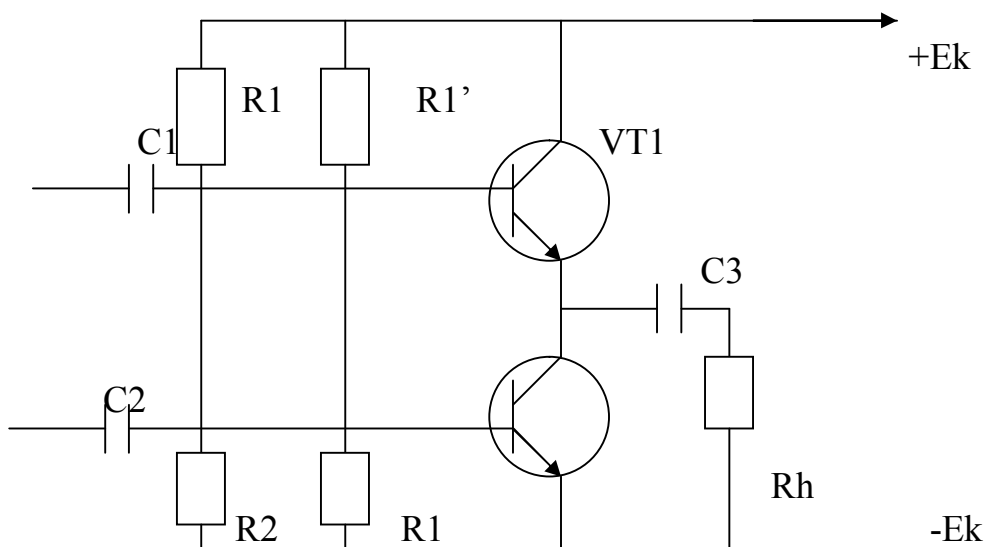
$$P_H = I_{km} \cdot E_k \cdot \frac{\pi}{2}$$



Спотворення типу сходинок. Для усунення необхідно змістити робочу крапку

Не дозволяє зробити прилад маленьким, оскільки трансформатор .

Біс трансформаторні підсилювачі потужності можуть бути зібрані на транзисторах одного типу провідності, так і два.

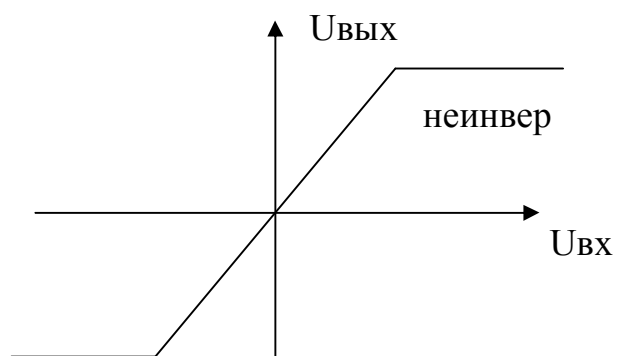
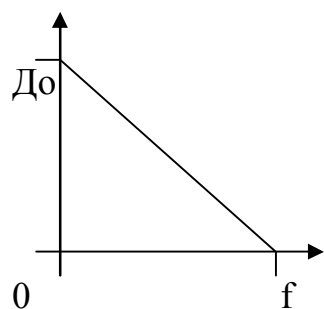


## 11 ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ (ОП)

### 11.1 Призначення, структура і основні характеристики операційного підсилювача

ОП виконується в інтегрального виконання і складається з декількох каскадів посилення.

$$K=f(f)$$



Параметри:

1)  $U = \pm(3...18)\text{В}$

2)  $K_{U_0} = (10^6...10^8) \rightarrow \infty$

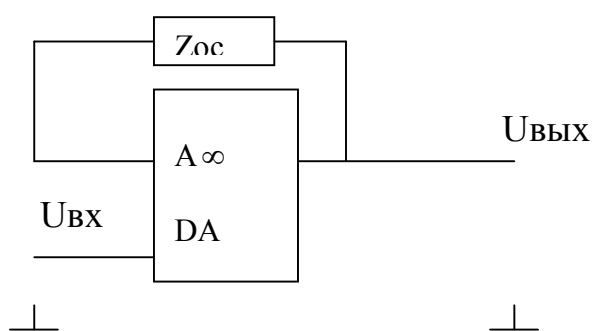
3)  $R_{\text{вх}} - \text{до } 10^9 \text{ Ом} \rightarrow \infty$

4)  $R_{\text{вых}} - \text{десятки Ом}$

$$U_{\text{вхг}} = \frac{18}{10^6} = 18\text{мкВ}$$

## 11.2 СХЕМОТЕХНІКА ПІДСИЛЮВАЧІВ НА ОП

1) Повторювач напруги



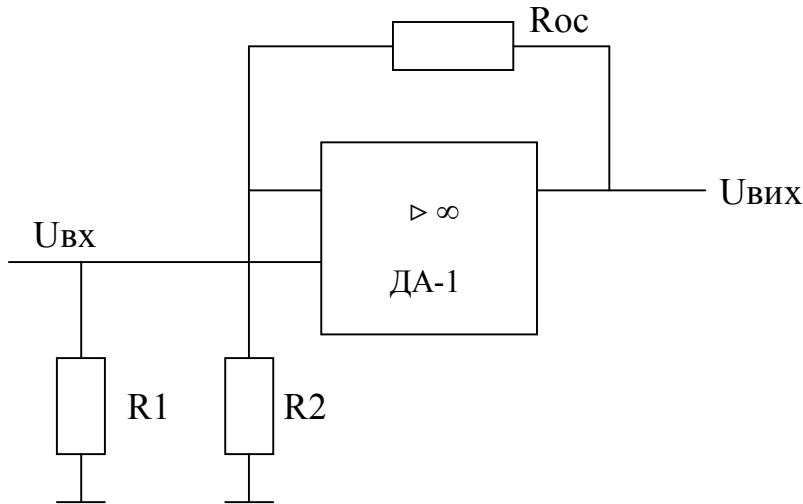
$$R_{\text{вх}} = R_{\text{вх}_0} - (1 + \beta_{\text{oc}} \cdot K_{v_0})$$

$$\beta_{\text{oc}} = 1$$

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{вых}_0}}{1 + \beta_{\text{oc}} K} \approx 0 \quad K_v = \frac{K_{v_0}}{1 + \beta_{\text{oc}} K_{v_0}}$$

Узгодження окремих каскадів по опорі.

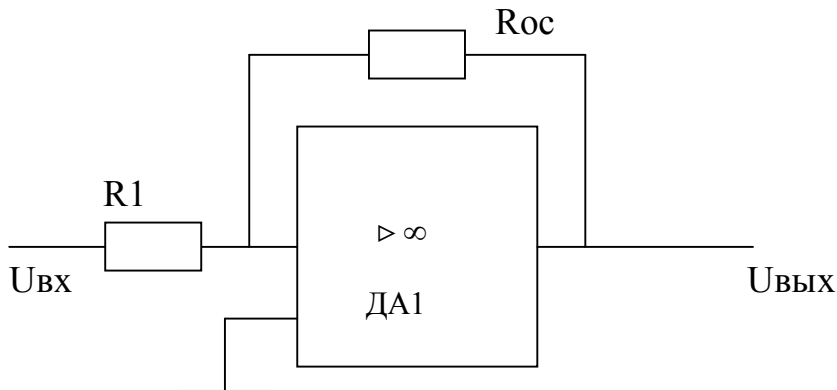
2) Неінвертуючий підсилювач



$$K_{оос} = \frac{K_u}{1 + \beta_{ос} K_u} \quad K_{оос} \approx \frac{1}{1 + \beta_{ос}} \quad \beta_{ос} = \frac{R_2}{R_2 + R_{ос}}$$

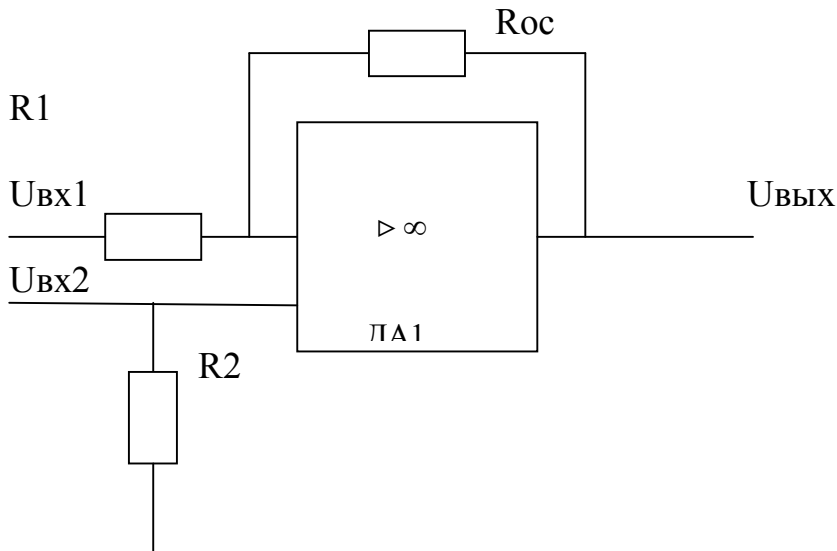
$$K_{оос} = 1 + \frac{R_{ос}}{R_2} \text{ — коэффициент} \quad R_{вх} = R_1$$

3) Інвертуючий підсилювач (зміна фази на протилежний)



$$K_{оос} = K_q \cdot K_{оос} \cdot u_c = K_q \cdot \frac{1}{\beta_{ос}} \quad K_{дел} = \frac{R_{ос}}{R_1 + R_{ос}} \quad \beta_{ос} = \frac{R_1}{R_1 + R_{ос}}$$

4) Підсилювач з диференціальним входом.

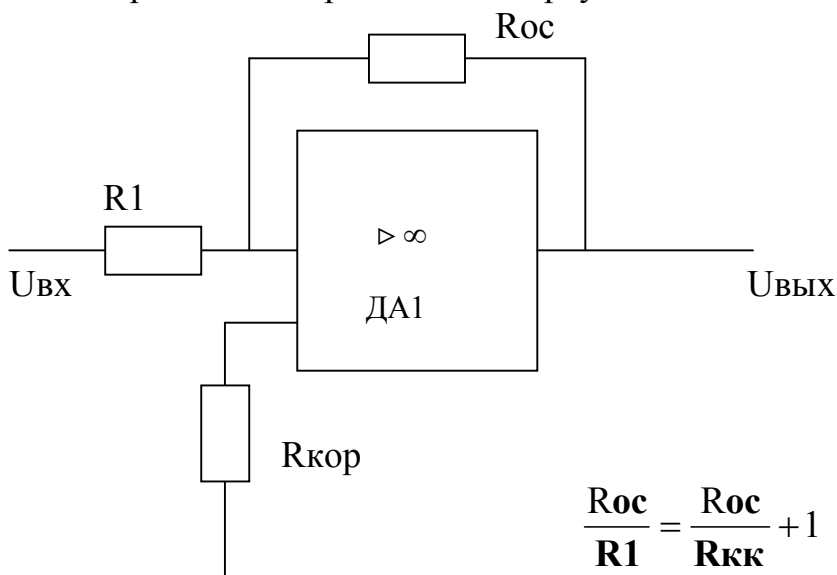


Для цього підсилювача визначається коефіцієнт посилення для того, що інвертує і не інвертує.

Якщо операційні підсилювачі застосовуються у вимірювальній апаратурі, то необхідно враховувати реальні параметри конкретного підсилювача.

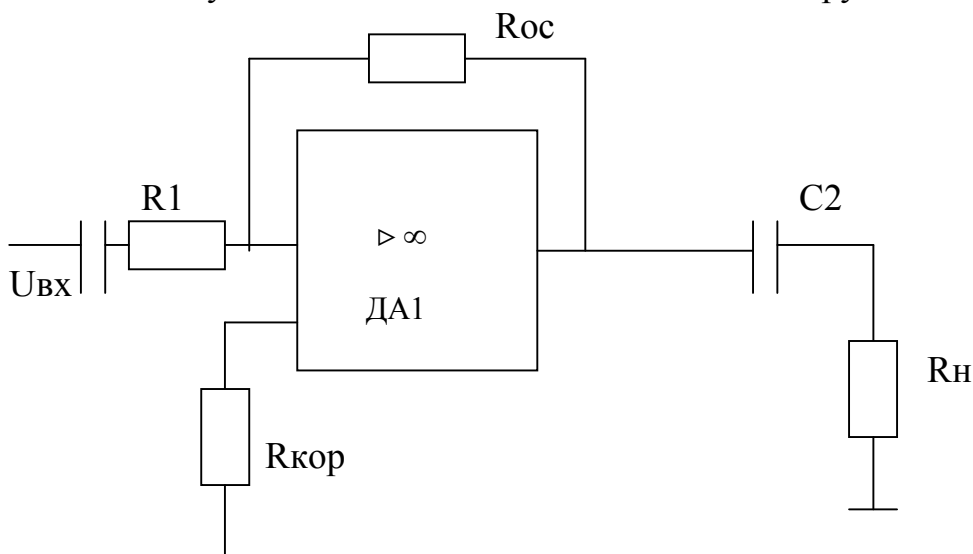
Будь-який операційний підсилювач має кінцевий вхідний опір, а, отже, і кінцеве значення вхідних етапів. Вхідні струми усвідомлюють напр. на опорах схеми, це напр. приводить до дрейфу вихідного напр., тому для вимірювальних схем на обидва входи необхідно скласти активні опори, щоб за відсутності вхідного сигналу напр. на цих входах були однакові.

Приклад використання інвертуючого підсилювача.



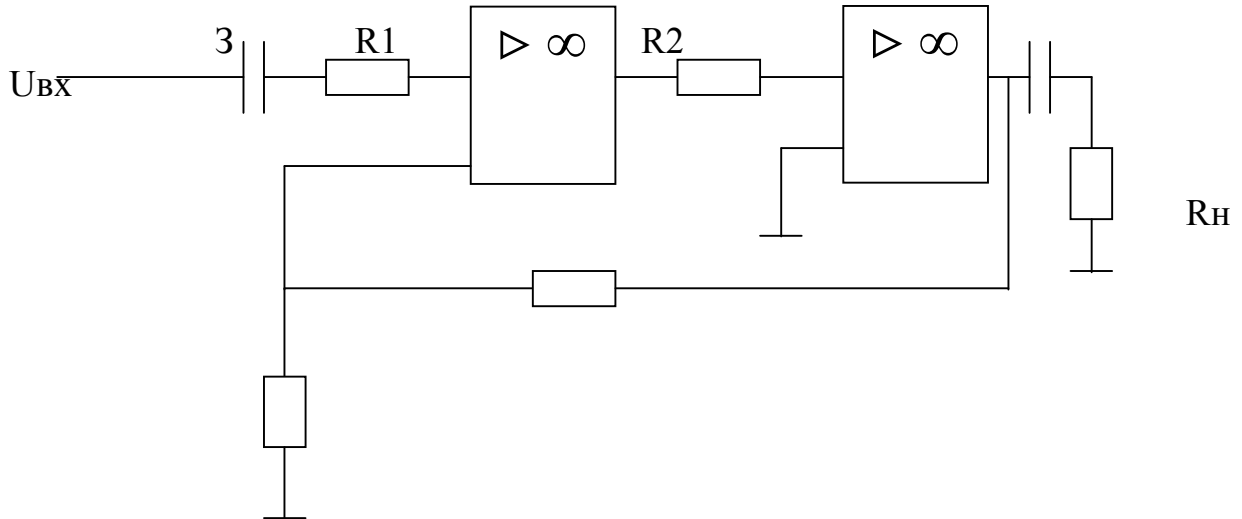
Збалансувати будь-який підсилювач (спер.) можна, подавши на один з входів відп. напр.

Сучасні спер. підсилювачі мають спеціальні виводи для балансування. Застосування ОУ як підсилювачі змінної напруги.



Кількість підсилювальних каскадів определ. типом операторних підсилювачів і смугою пропускання необхідного підсилювача. Для розширення смуги пропускання вводиться негативний зворотний зв'язок.

На змінному струмі негативним зворотним зв'язком відразу можна обхвачувати декілька каскадів.



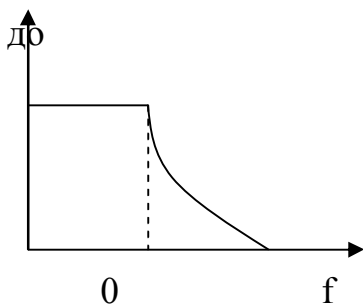
## 12 АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ

### 12.1 Загальні математичні описи і класифікація фільтрів.

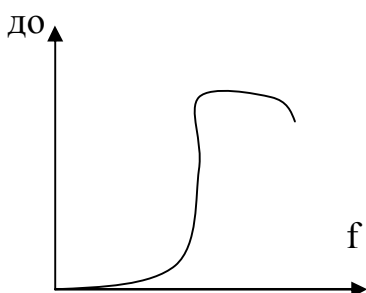
#### Пасивні фільтри

Фільтрами називаються пристрої, які пропускають певну смугу частот. По суті фільтри – реактивні, дільники напруги. По вигляду амплітудо-частотної характеристики фільтри діляться:

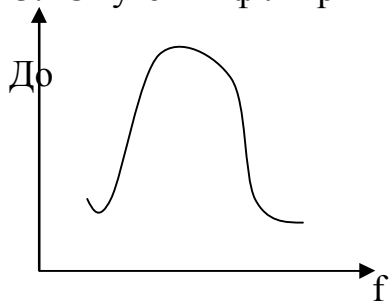
1. фільтри нижніх частот



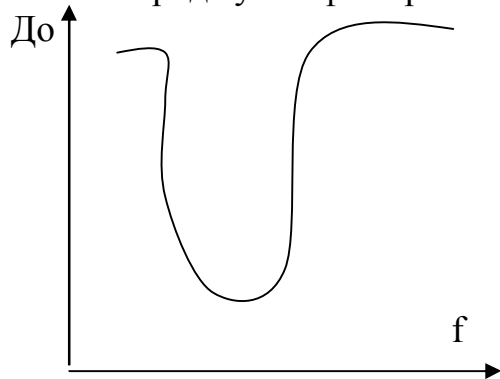
2. Фільтри верхніх частот



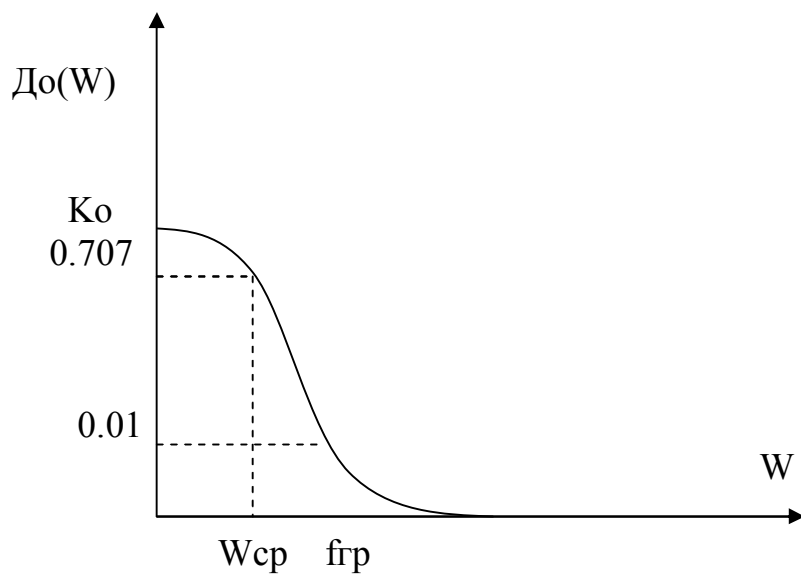
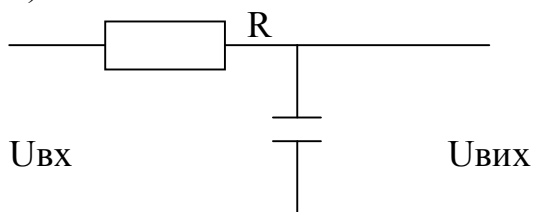
### 3. Смуговий фільтр



### 4. Загороджуючі фільтри

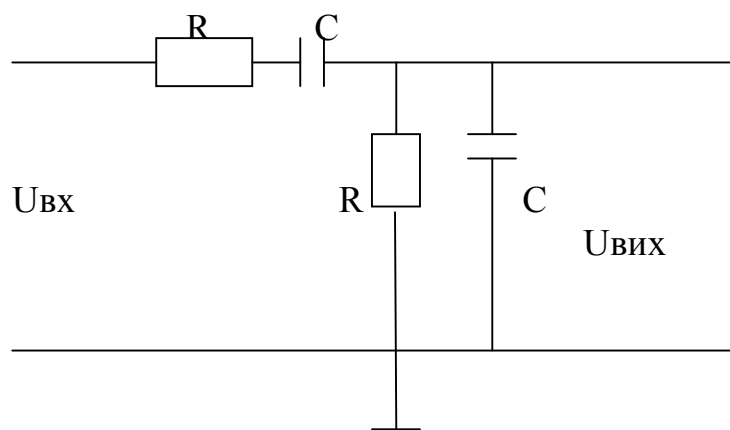
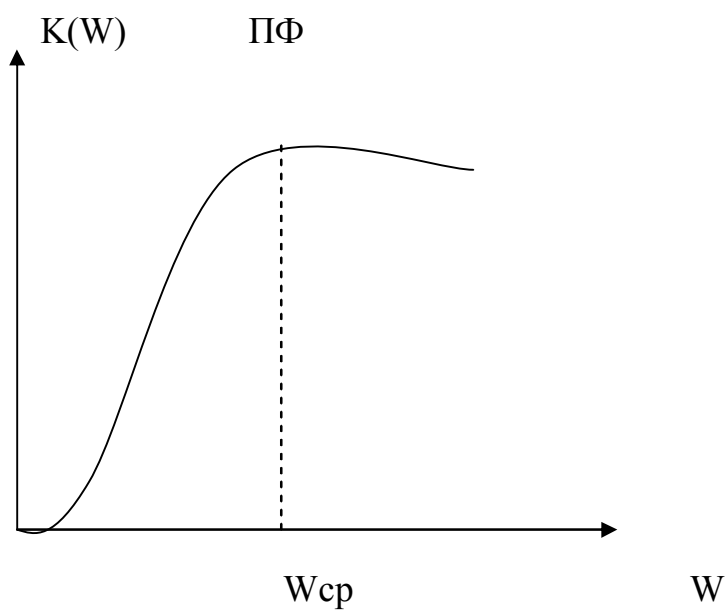
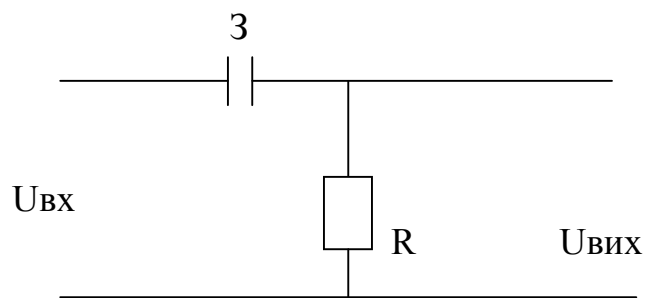


### 1) ФНЧ

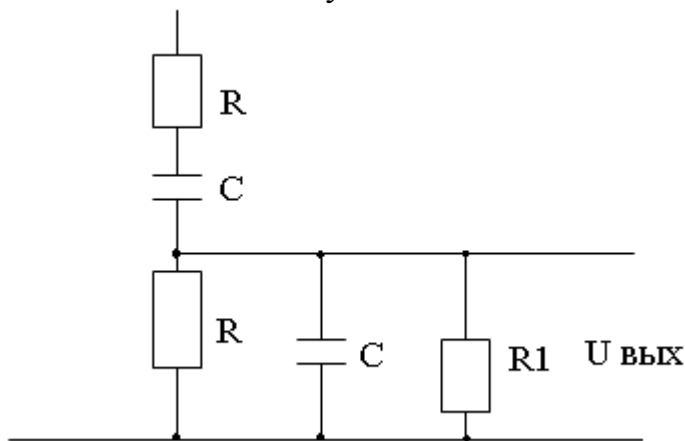




2) ФВЧ



Для поліпшення АЧК застосовуються мостові схеми фільтрів Вина.



## 12.2 Схемотехніка активних фільтрів

Активними називаються фільтри, в яких застосовуються активні елементи.

Смугові фільтри можуть бути побудовані на виборчих підсилювачах. Якщо як навантаження замість  $R_k$  в каскад із загальним емітером підключити паралельний коливальний контур, то коефіцієнт посилення такого каскаду повторюватиме форму резонансної кривої, коливального контура і підсилювач пропускатиме вузьку смугу частот.

## 13 РОБОТА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ В КЛЮЧОВОМУ РЕЖИМІ

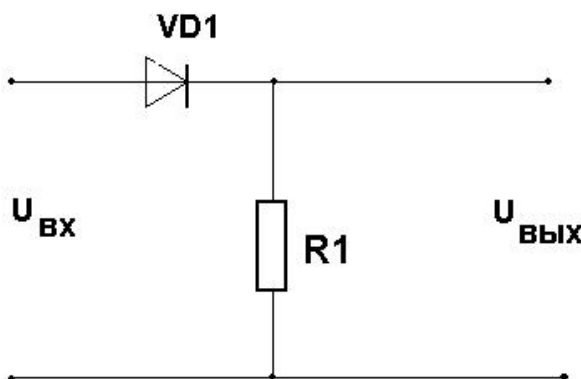
### 13.1 Ключовий режим

При формуванні імпульсної напруги ( у цифровій і імпульсній техніці ) активні елементи повинні працювати в ключовому режимі – тобто мати 2 стани «ВІДКРИТИЙ» - «ЗАКРИТИЙ». Для ідеального ключа опір у відкритому стані рівний 0, а в закритому -  $\infty$ .

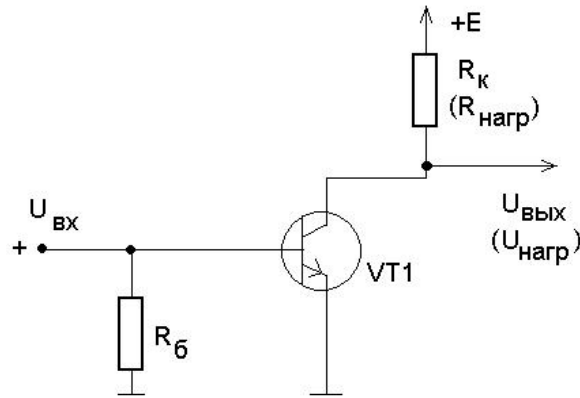
Як електронні ключі використовуються діоди, біполярні транзистори і операційні підсилювачі.

Діодні ключі:

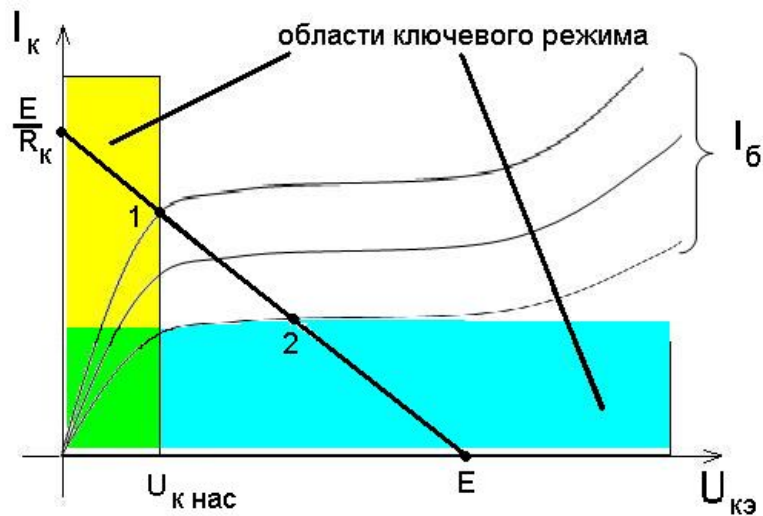
На виході виникає напруга тільки у разі відкриття діода. Резистор  $R_1$  визначає величину струму.



Включений послідовно з навантаженням і що виконує роль вимикача.



Для забезпечення ключового режиму необхідно вибрати величину струму бази



Вище за крапку 1 – транзистор відкритий, і напруга  $U_{кэ} \neq 0$ .  
Нижче за крапку 2 – транзистор закритий, і струм  $I_{кэ} = 0$ .

Для забезпечення відкриття транзистора необхідно подати на вхід  $I_{б}$  від додаткового джерела.

$$I_{бн} = \frac{I_{кн}}{h_{21э \min}} * S \quad S = (1.5.3) - \text{коєфіцієнт насичення для межі}$$

відкриття транзистора.

Замість біполярного транзистора можна застосувати польовою будь-якого вигляду.

У ключовому режимі розсіювана потужність мінімальна, оскільки:

$$P_{кол} = U_{кол} * I_{кол}$$

У разі, коли транзистор відкритий, напруга  $U_{кэ} = 0$ .

У разі, коли транзистор закритий, струм  $I_{кэ} = 0$ .

## 14 ПРИСТРОЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ

### 14.1 Схеми позитивних і негативних сигналів

Для позитивного аналізу сигналів застосовується операційні підсилювачі які включаються як інвертування або як неінвертування

#### Схема підсумовування 2 х сигналів

$$U_{\text{ввн}} = \frac{R_{\text{oc}}}{R_1} * U_{\text{вв1}} \quad \text{якщо } R_{\text{oc}}=R_1=R_2, \text{ тоді } U_{\text{внх}}=U_{\text{вх1}}=U_{\text{вх2}}$$

$R_{\text{кор}}$  – вводиться для компенсації дрейфу операційного підсилювача

$$R_{\text{кор}} = R_1 || R_2 || R_{\text{oc}}$$

Формула вхідних сигналів може бути будь-якій

#### Схема віднімання двох сигналів

$$U_{\text{вх2}}=0 \quad U_{\text{ввн}} = -\frac{R_{\text{oc}}}{R_1} U_{\text{вв1}}$$

$$U_{\text{вх1}}=0$$

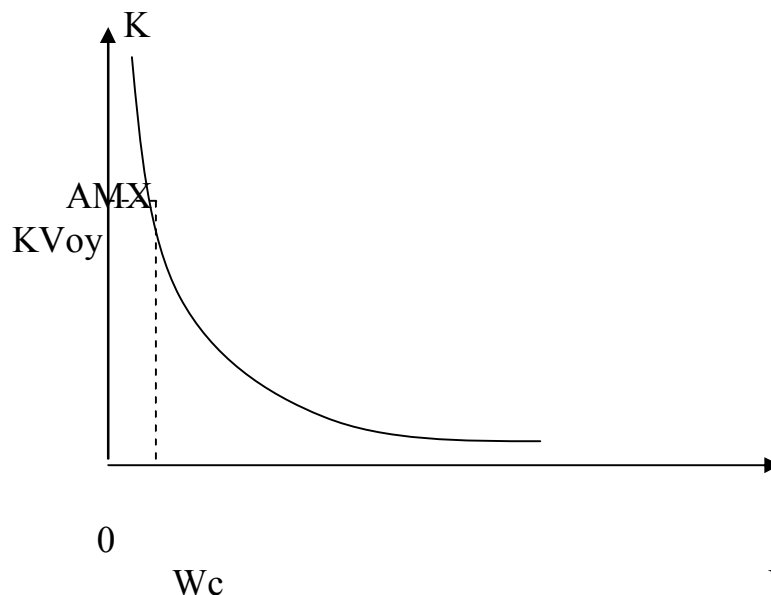
$$U_{\text{ввн}} = U_{\text{вв2}} * \frac{R_3}{R_2 + R_3} \left(1 + \frac{R_{\text{oc}}}{R_1}\right)$$

Якщо всі  $R$  рівні, тоді  $U_{\text{внх}}=U_{\text{вх2}}-U_{\text{вх1}}$

1. Всі схеми будуються на ОУ (операційних підсилювачах)

$$W(p) = \frac{-Z_{\text{oc}}(p)}{Z_{\text{вв}}(p)} = -\frac{1}{RCp} \Rightarrow U_{\text{ввн}} = -\frac{1}{RC} \int U_{\text{вв}}(t) dt$$

для ідеального операційного підсилювача  $W=1 \setminus RC(K_{\text{ov}}+1)$



Для реальних операційних підсилювачів коефіцієнт посилення обмежений  $KV_{oy}$ - в таблицях (паспорті).

Якщо на вхід такої схеми подати постійну напругу, то напруга на виході, буде лінійно змінюватися. Максимальне значення вихідної напруги визначається напругою живлення підсилювача. Швидкість зміни вихідної напруги визначається величиною вхідної напруги і  $R$  і  $C$ .

Для того, щоб встановити початкову умову застосовується електричні ключі, які включаються паралельно конденсатору, як ключі переважно використовувати польові транзистори. При замиканні ключа напруга виходу інтегратора встановлюється рівною 0.

## 14.2 Схемотехніка нелінійних перетворювачів аналогових сигналів

До пристроїв нелінійного перетворення відносяться :

- підсилювачі із змінним коефіцієнтом посилення
- обмежувачі рівня
- пристрої запам'ятовування лінійного значення напруги

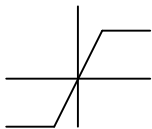
Для отримання зміни коефіцієнта посилення в ланцюзі зворотного зв'язку застосовуються нелінійні елементи.

Логарифмічний підсилювач.

Діод VD1 – забезпечує експонентну залежність коефіцієнта передачі цієї схеми. Для того, щоб отримати підсилювач антилогарифмічний діод і теристор

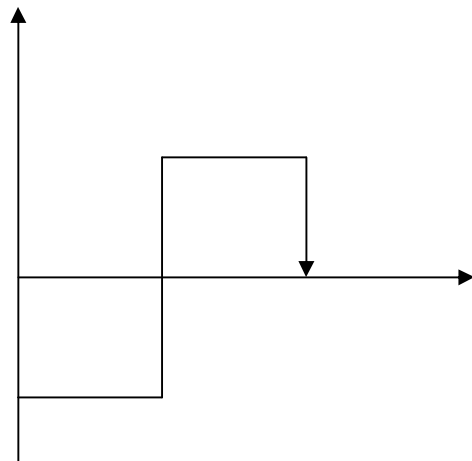
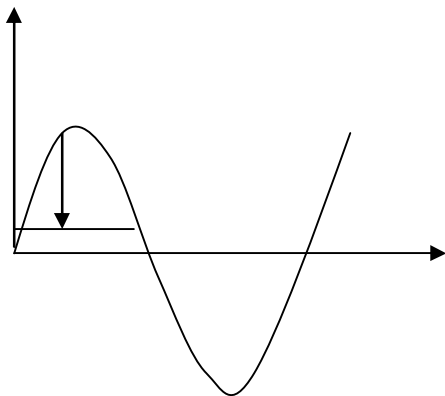
поміняти місцями.

Всі обмежувачі будуються на елементах амплітудна характеристика яких має ділянку насичення. Загальні позначення обмежувача на схемах.



- обмежувач послідовного типу застосовується для формування прямокутної напруги і синусоїдальний, а так само для зміни ділильних фронтів і імпульсів.

Діоди VD1 і VD2 обмежують напруги на виході операційного підсилювача (2 діаграми).



Для того, щоб знизити час перемикання схеми штучно обмежити максимальну напругу на виході. Для пониження напруги застосовується обмежувачі ланцюга зворотного зв'язку.

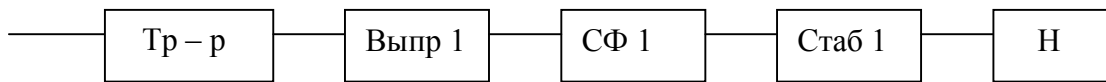
## 15 ДЖЕРЕЛ ВТОРИННОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

### 15.1 Структурні схеми

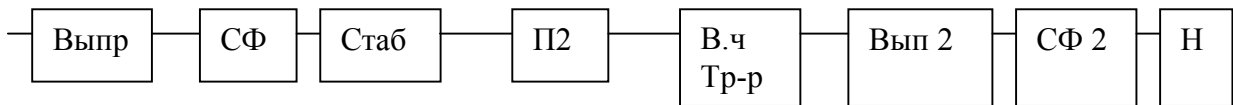
Джерела вторинного живлення призначені для живлення електронних пристроїв від промислової мережі.

Є 2 види:

Без перетворення частоти живлячої мережі (трансформаторні)



З перетворенням частоти живлячої мережі (безтрансформаторные)



Основним є середнє значення напруги на навантаженні  $U_n$   
Напруга пульсації  $U_p$ .

Для проектування джерела повинні бути відомі параметри навантаження.

$$\text{Напруга на навантаженні: } U_n \equiv \frac{1}{2\alpha} \int_0^{2\pi} U_{ex}(\omega t) d(\omega t)$$

Характеристики

Навантаження (зовнішня)  $U_n = f(R_n)$

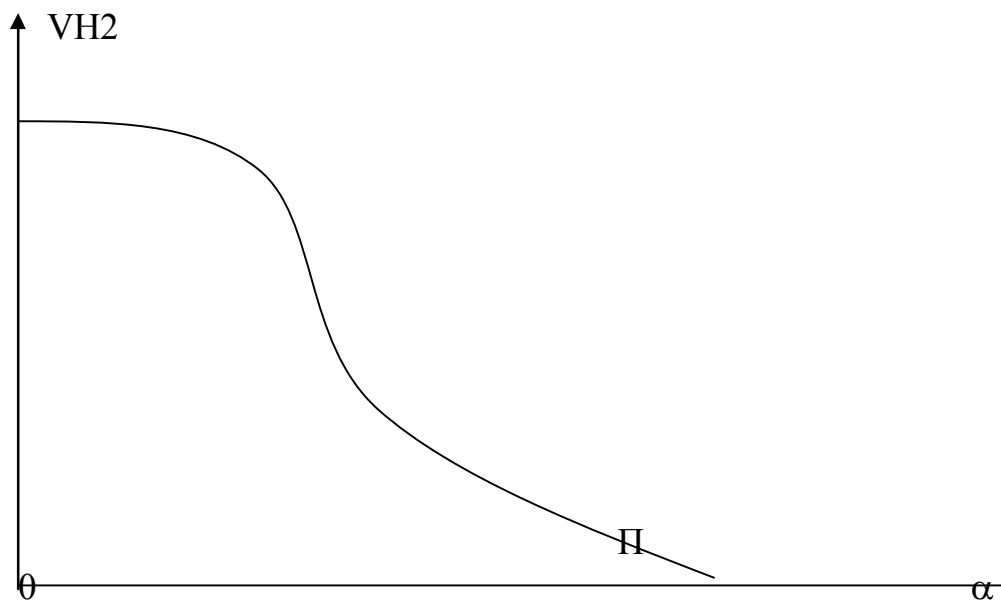
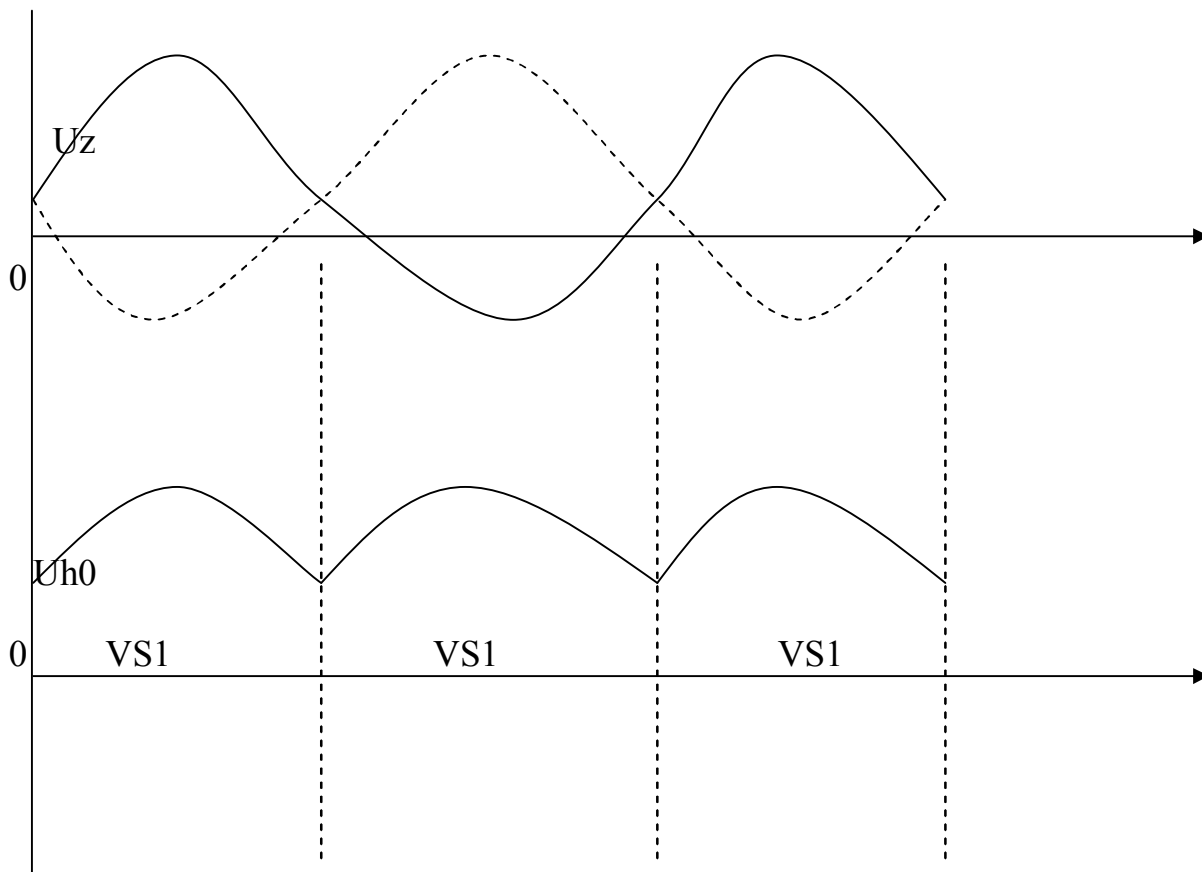
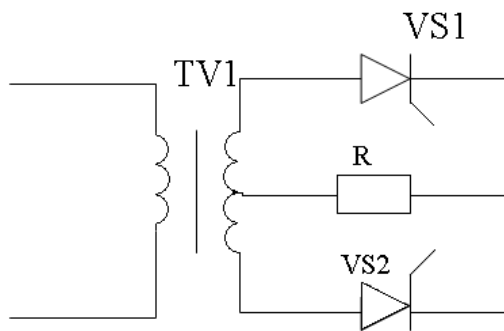
Регульовальна залежить від параметрів регулювання.

Випрямляч призначений для отримання однополярного напруги з різнополярних.

Випрямним елементом може бути будь-який елемент.

### 15.2 Однофазні випрямлячі

Однофазна двухполупериодная з середньою точкою.



$$U_{н2} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{2m} = \frac{U_{2m}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Рівняння 1 – наз. регулювальна характеристика

$$U_2^I = U_2^{II} = U_2$$

$$U_{обр. V.S.m} = 2U_{2m} \alpha$$

$$I_{пр. V.S} = I_{нм} \cdot \frac{1}{2} < I_{пр. сгр.}$$

Потужність вторинної обмотки тр-ра

$$S_2 = 2I_2 U_2$$

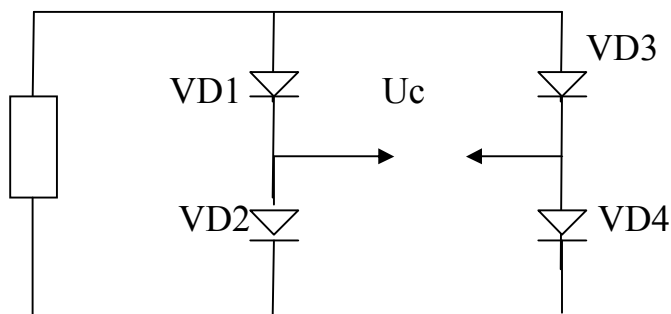
$$Q = 0.67$$

Оскільки через вторинну обмотку тр-ра протікає не струм, то коефіцієнт використання тр-ра не високий.

Вказана схема застосовується зазвичай при низьких випрямлених напругах. Розрахунок параметрів вентилів необхідно виконувати для  $\beta = 0$ .

Однофазна мостова схема

Комбінація 2-х схем з середньою крапкою



У кожен напівперіод послідовно з навантаженням включено 2 вентиля протилежні плечах моста.

$$I_{пр} = \frac{I_n}{2}, \quad U_{обр} = U_{2m} \quad q = 0,67$$

Особливості роботи випрямлячів

$\alpha$  – кут затримки замикання тиристора

якщо  $\alpha = \theta$ , то буде безперервний режим протікання навантаження.

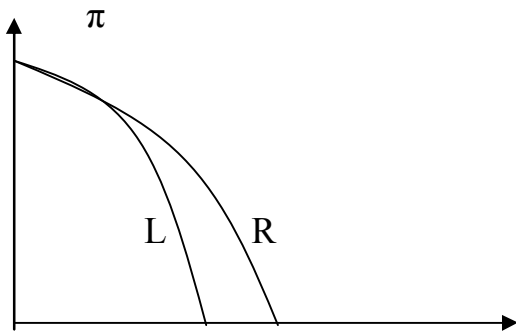
$$U_{на} = \frac{U_{2m}}{\pi} (\cos \alpha + \cos \theta)$$

Рівняння регульоване: характеристики для індуктивного навантаження.

$\theta = \alpha$

$$U_{на} = 2 \frac{U_{2m}}{\pi} \cos \alpha \text{ — непрерывный режим}$$





Параметри тиристора визначають так само, як випрямляча, що працює на активному навантаженні.

У мостовій схемі тах звор.  $U$  на вентилі може досягати  $2U_{2m}$ .

Якщо в мостовій схемі застосовуються 4 тиристори, то схема називається симетричною, якщо 2 тиристори і 2 діоди – несиметричною.

## 16 БЕЗПЕРЕРВНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### 16.1 Загальні положення

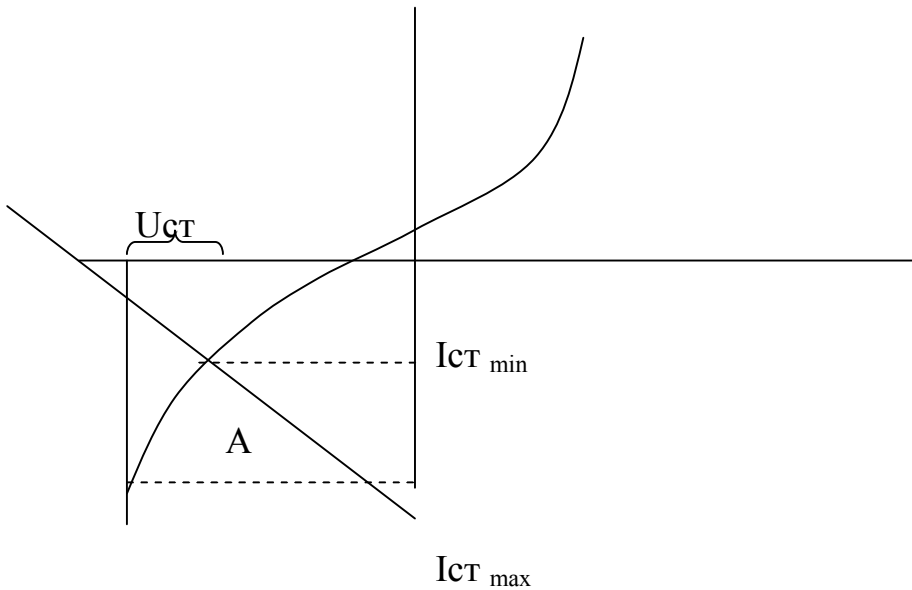
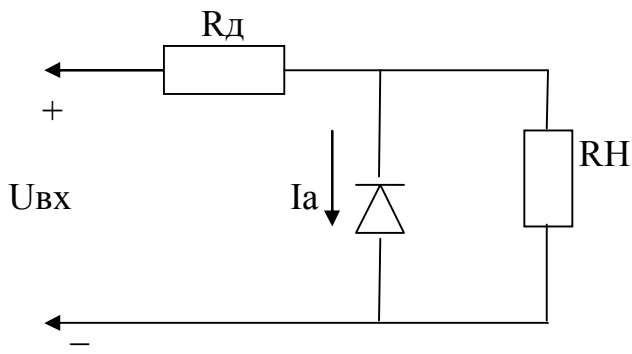
Стабілізатори призначені для підвищення якості випрямленої напруги або струму.

Діляться на стабілізатори напруги і стабілізатори струму.

За способом включення стабілізуючого елемента бувають послідовні, паралельні і змішані.

За способом регулювання діляться на безперервних і ключових.

Параметричними називають стабілізатори, в яких регулювання вихідної напруги здійснюється за рахунок зміни параметрів регулюючого елемента. Як регулюючий елемент може бути використаний будь-який нелінійний елемент.



Дано:  $R_H$ ;  $E_{RH}$ ;  $U_H$

1. З довідника вибираємо тип стабілітрона, для вибраного типу з довідника визначуємо:

$$\delta_{ст} I_{ст} = (\text{Ом A})$$

$$I_{ст. \min} : I_{ст. \max}$$

2. Розраховуємо величину опору  $R_g$

Точка стабілізатора за будь-яких умов повинно знаходитися на ділянці стабілізації. Для цього визначаємо значення елементів для  $\min$  і  $\max$  типів стабілізації. Запишемо рівняння роботи стабілізатора для  $\min$  і  $\max$  режиму:

$$\frac{U_{вх \max} - U_{ст}}{U_{ст}} = R_g$$

$$I_{ст. \max} + \frac{U_{ст}}{R_{H \max}}$$

$$\frac{U_{вх \min} - U_{ст}}{U_{ст}} = R_g$$

$$I_{ст. \min} + \frac{U_{ст}}{R_{н \min}}$$

3. Визначаємо  $\min$  напругу  $U_{вх \min}$

$$U_{вх \min} \geq U_{ст \min}$$

$U_{вх \max}$  не більше  $\approx 2 U_{вх \min}$

4. Розраховуємо величину опору  $R_g$ , а після цього визначаємо із стандартного ряду опір

5. Після вибору  $R_g$  необхідно перевірити  $\min$  і  $\max$  значення струмів в стабілізаторах. Для установки опору необхідно потужність розсіяння.

Коефіцієнт стабілізації

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх}}{\Delta U_{ввых} / U_{ввых}} ; \quad K_{ст} = 10 \dots 50$$

Для підвищення  $K_{ст}$  застосовують складніші схеми стабілізаторів.

Якщо стабілізатор харчується від емкісного фільтру, то на виході такого фільтру при номінальному навантаженні необхідно отримати  $U_{вх \min}$  міняючи ємкість конденсатора.

## 16.2 Компенсаційні стабілізатори

Є пристроєм регулювання напруга, яка охоплена зворотними зв'язками. Всі компенсаційні стабілізатори порівнюють зміни вихідної напруги з опорною напругою і різниця між цією напругою (помилку) подають на регулюючий елемент.

VT1 – регулюючий елемент послідовно з навантаженням.

Навантаженням для VT1 є VD1 є струм транзистора VD1.

Зміну напруги на навантаженні створюють негативну зворотну зв'язь по струму і подаються на вхід тр-ра, компенсується на виході коливання напруги.

Для розрахунку використовується попереднє рівняння для схеми параметр. стабілізатора і вибирається тр-р, виходячи з початкових даних.

Приклад розрахунку на стор. 490.

Для отримання високих коефіцієнтів стабілізації декілька 1000 в ланцюзі зворотного зв'язку кому. Стабілізатора встановлюють підсилювач для посилення  $EU_{ввых}$ .

T1 – регулюючих тр-р (елемент)

T2 – Підсилювач в ланцюзі О. З.

VD1 – параметричний ст-рон потенціал емітера VD2 фіксується тр-роном VD1.

Напруга на базу VD2 подається через R3 R4.

Якщо напруга на виході те VT2 збільшується. Для збільшення коефіцієнта посилення в місце VT2 ставимо ОУ.

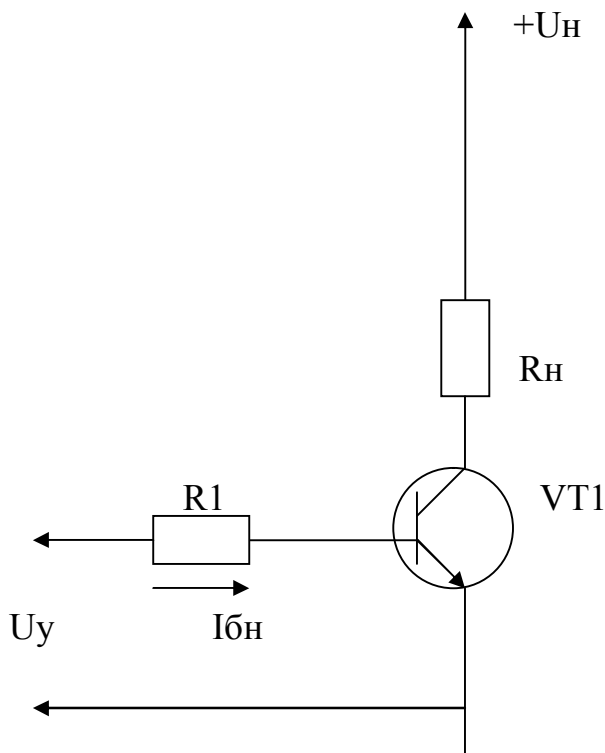
Схема стабілізатора струму повинна мати негативний зворотний зв'язок по струму. Зазвичай регулюючий елемент включається послідовно

## 17 ІМПУЛЬСНИХ І КЛЮЧОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ І СТАБІЛІЗАТОРИ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

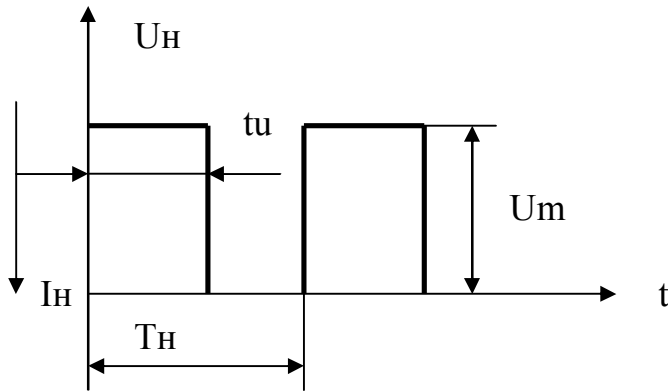
### 17.1 Основні вимоги ІР. Статичні і динамічні втрати

Імпульсний регулятор потужності призначений для зміни середнього або діючого значення  $U$  і що  $I$  протікає через навантаження шляхом періодичного підключення навантаження по певному закону джерела постійної напруги. Регулюючим елементом регулятора є теристори, які працюють в ключовому режимі. Регулюючий елемент може бути підключений послідовно, паралельно або по змішаній схемі до навантаження. Основні вимоги – підвищення ККД. При роботі транзистора в ключовому режимі він знаходиться в двох станах: відкриття і закриття. Для ідеального ключового елемента опір у відкритому стані повинен бути рівне 0, в закритому рівно  $\infty$ .

Основна схема ключа.



У ключовому режимі роботи напруга на вході має імпульсну форму.



$$P_H = \frac{U^2}{R_H} | U_H = U_m \cdot \sqrt{\frac{t_u}{T_H}} = U_m \sqrt{K3}$$

Для підвищення ККД потрібно зменшувати втрати.

Основні втрати виникають на транзисторі. Втрати діляться на статичних і динамічних.

Статичні – втрати на відкритому або закритому ключі, вкл. втрати ланцюга управління.

1. Ключ відкритий

$$P_{II} = U_{KH} \cdot I_H + I_{BH}^2 \cdot R_{BX}$$

Для зменшення  $U_{KH}$  необхідно здійснити глибокий режим насичення транзистора.

$$I_{BH} = \frac{I_H}{h_{21э \min}} \cdot S$$

$$S=1,5.2$$

2. Ключ закритий

$$P_{II}'' = I_{K0}^2 \cdot r_K$$

Динамічні втрати виникають під час переключення транзистора.

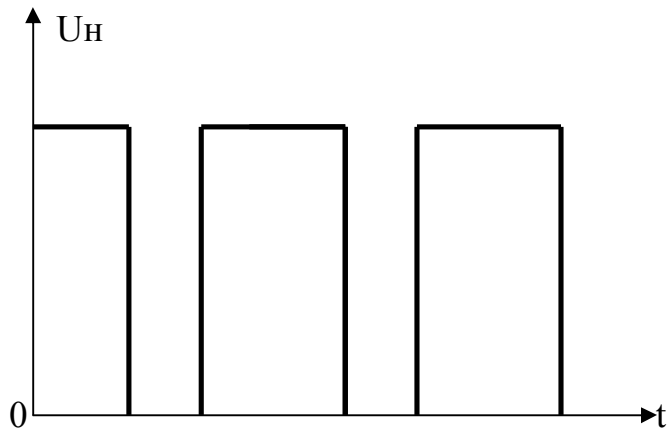
Для активного навантаження час зміни напруги на колекторі і струму співпадають  $\longrightarrow$  для активного навантаження динамічні втрати будуть макс.

Якщо прим. инд-я навантаження происх. зрушення у вр. і струму і напр. на колекторі  $\longrightarrow$  втрати зменшуються.

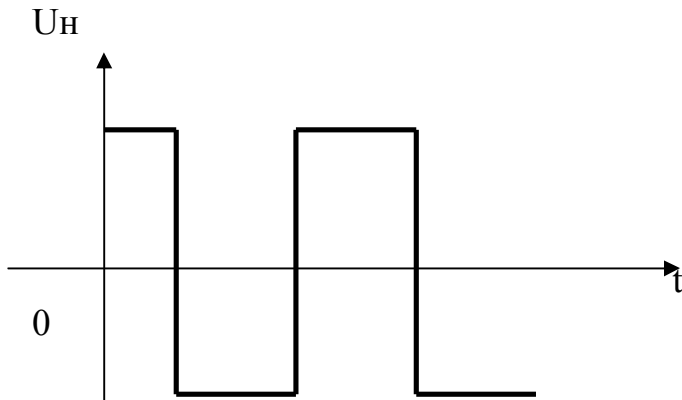
## 17.2 Режими імпульсного регулювання потужності і схеми імпульсних підсилювачів

Є 3 режими: I режим (зміниться тривалість)

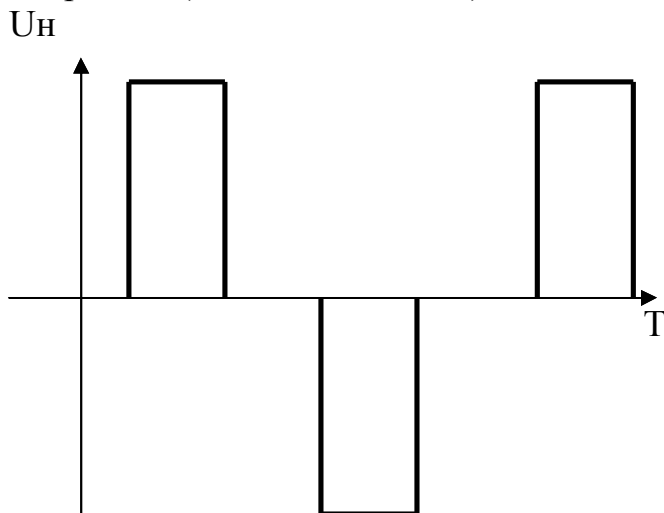
$$t_u = \text{var}$$



II режим (зміняться параметри двох полярних імпульсів)



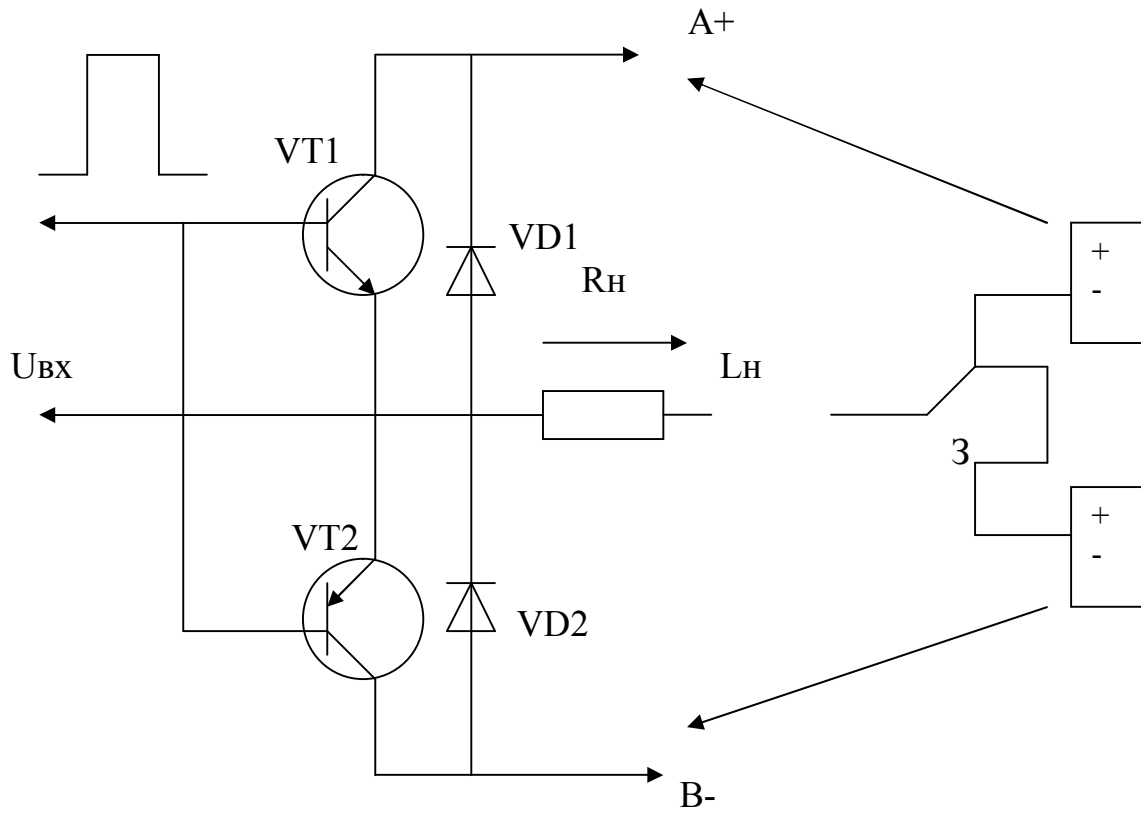
III режим (є ділянки, де  $U=0$ )



Реалізація режимів імпульсного регулювання здійснюється за допомогою імпульсних підсилювачів. Імпульсні підсилювачі нагадують вихідні каскади підсилювачів потужності.

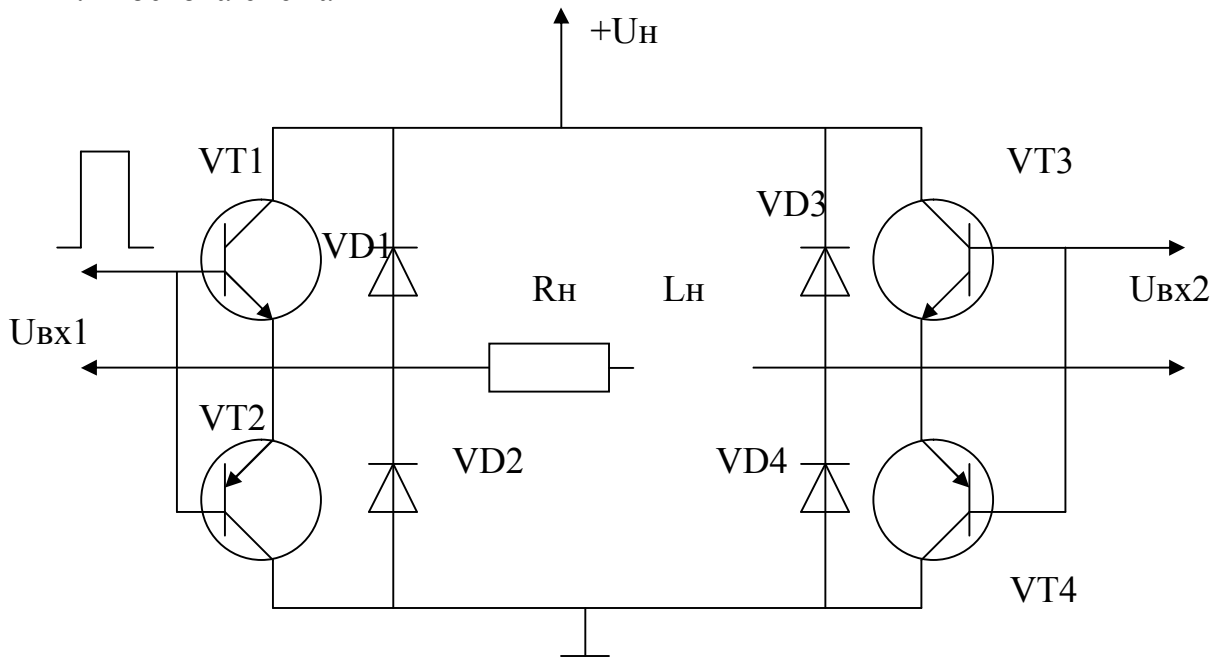
Схеми:

1. послідовні включення двох транзисторів.



VD1 для захисту транзистора від пробую.

## 2. мостова схема



## 17.3 Схемотехніка ключових стабілізаторів ним методика їх розрахунку

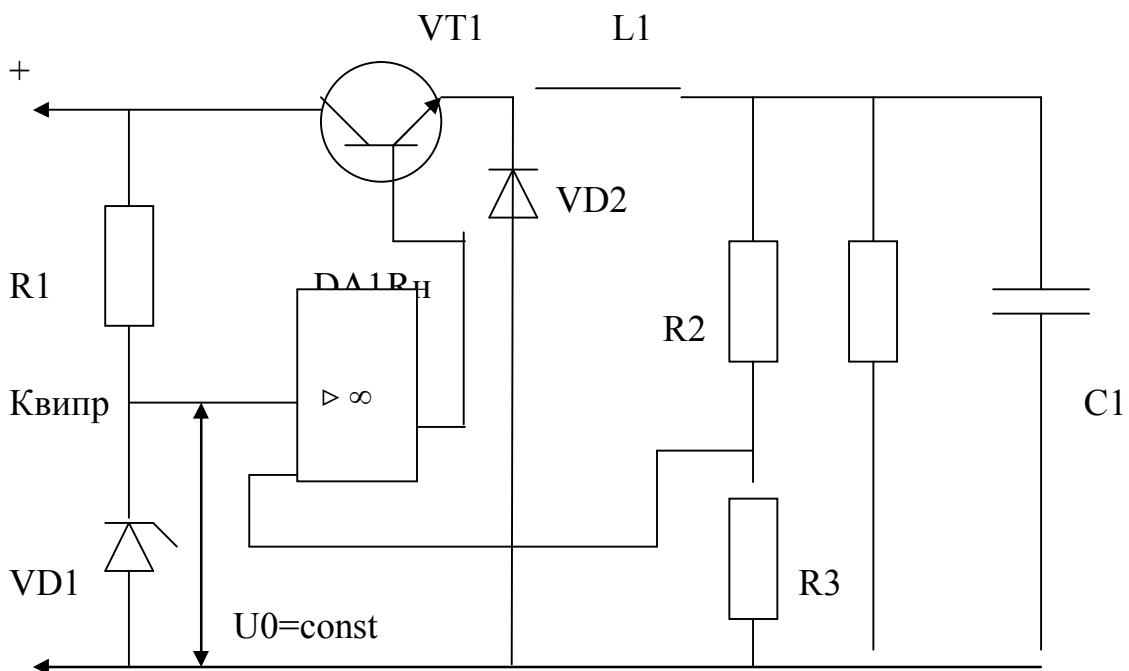
Ключовий стабілізатор – імпульсне регулювання, яке підтримується незмінним середнім значенням напруги на навантаженні.

Є 3 види імпульсних стабілізаторів:

1. Стабілізатор послідовного типу (що знижує)
2. Стабілізатор паралельного типу (підвищення)
3. Стабілізатори інвертують

У всіх вводяться дроселі.

1 тип (релейний стабілізатор)

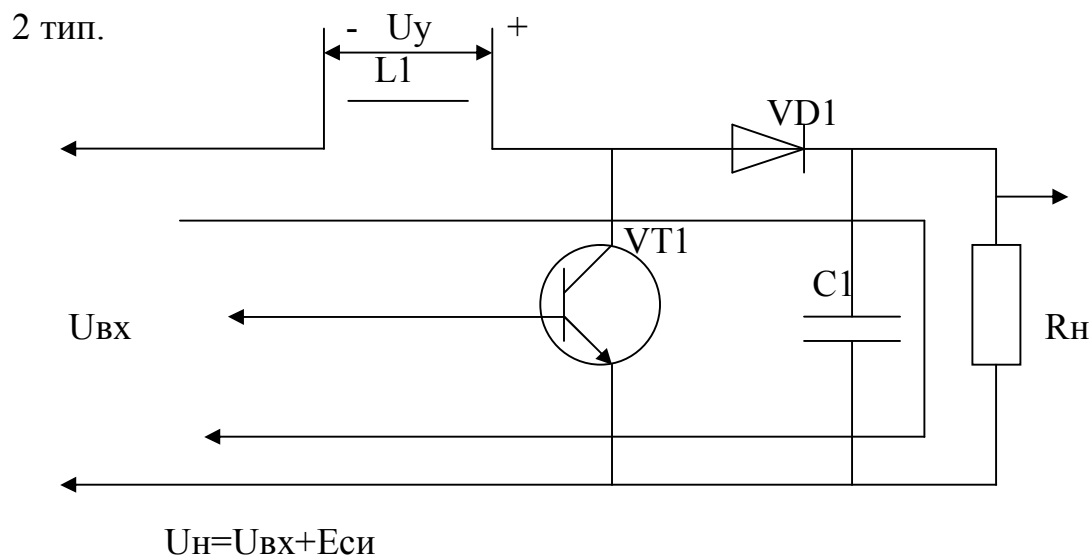




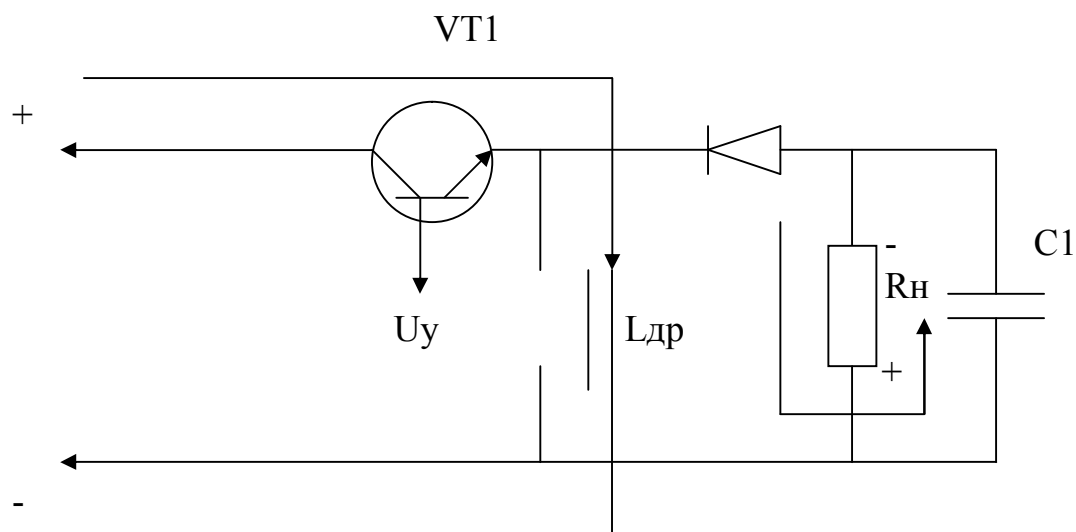
$R1$  і  $VD1$  – параметричний стабілізатор.  
 $DA1$  – підсилювач без зворотного зв'язку.  
 $UR3=U_0 \longrightarrow$  мом.  
 $VD2$  – закарачиваючий діод.  
 $C1$  – ємкісною фільтр.



$$U_n < U_{вх}$$



3 тип.



## 18 БАГАТОФАЗОВИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ І ЗГЛАДЖУЮЧІ ФІЛЬТРИ

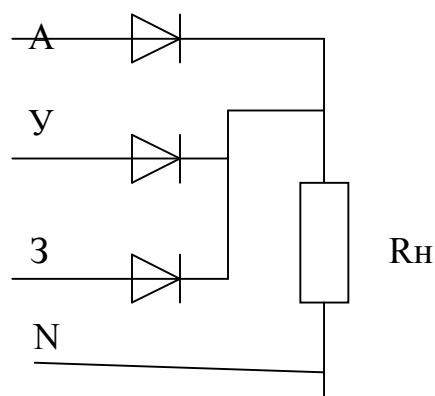
### 18.1 Трифазні випрямлячі і їх схемотехніка

Для підвищення якості випрямлення застосовуються багатофазні випрямлячі, які будуються на основі однофазних. Для багатофазного випрямлення необхідно мати фазові зрушення живлячої напруги.

Трифазні випрямлячі будуються по 2 видам схем:

- трифазний випрямляч з нульовим виводом
- трифазний мостовий випрямляч

Будується на основі трьох однополуперіодних схем, що випрямляються.



Коефіцієнт пульсації.

$$Q=0,25$$

$$q = \frac{2}{m^2 - 1}$$

$m$  – кількість фаз (в даному випадку  $m=3$ )

Для розрахунку такої схеми необхідно вибрати тип вентиля.

$$I_{\text{прVD}} = \frac{I_{\text{н}}}{3} \leq I_{\text{пр.доп}}$$

$$V_{\text{обрVD}} = U_{2\text{млн}}$$

Значення струму, що діє, у вторинній обмотці трансформатора визначається аналогічно, як і для фазного однополуперіодного випрямляча.

$$\alpha_{\text{max}} = 150^\circ$$

Якщо навантаження індуктивне, то можливі переривисті і не переривчастим режими.

Якщо  $\alpha = 30^\circ$ , то це межа між переривистим і не переривчастим режимами.

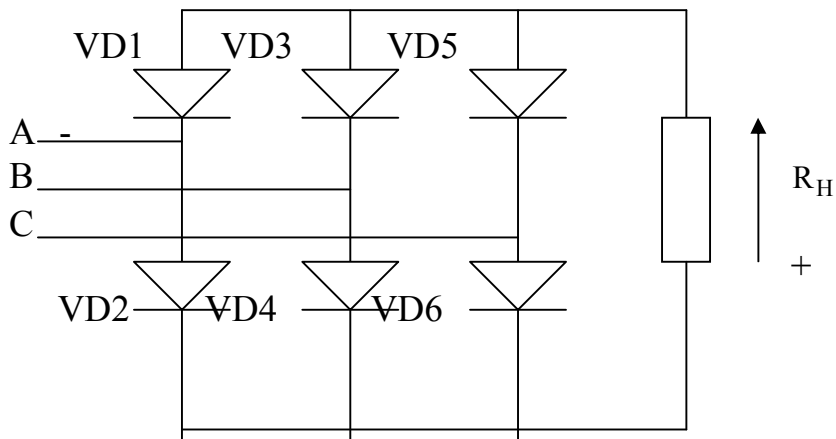
Якщо  $\alpha < 30^\circ$  - безперервний

Якщо  $\alpha > 30^\circ$  - переривистий

Для різних діапазонів  $\alpha$  необхідно користуватися різними формулами для визначення  $U_H$ .

Мостова трифазна схема.

Анодна група



Частота пульсації рівна 6

$Q=0,057$

$$U_{H.O.} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{2т.ф.}$$

$$\alpha_{max} = 120^\circ$$

$$\alpha = 60^\circ \text{ (межа)}$$

Пряме включення струму через вентиль в 3 рази менше  $U_{обр}$ .

$U_d = U_{т.л.}$

Якщо застосовується на вході трансформатор, то форма струмів буде синусоїдальна.

Якщо три діоди і три теристора, то схема – несиметрична.

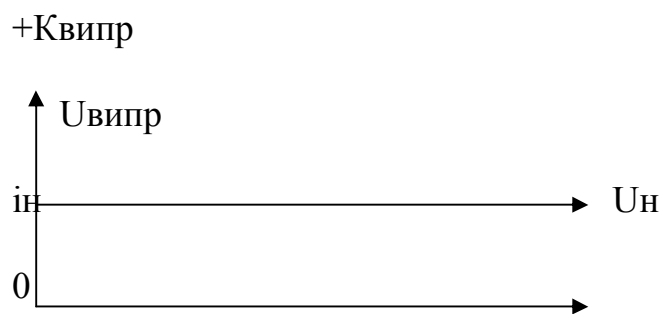
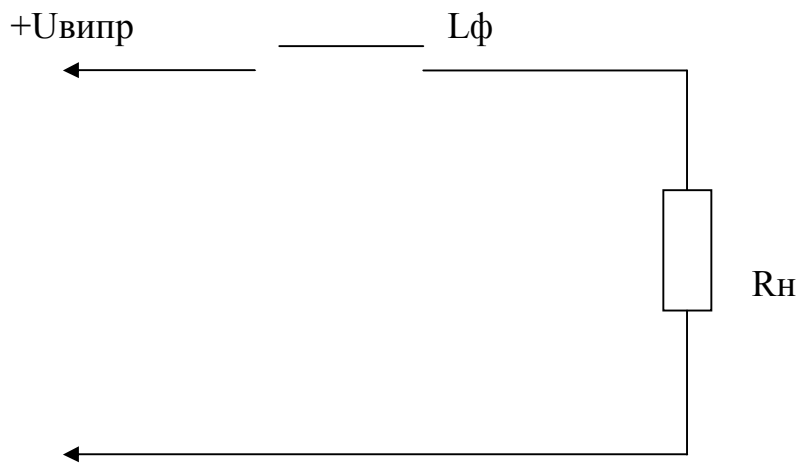
Вгорі – анодна група.

Внизу – катодна група.

Для отримання шестифазних схем можна одну половину вторинної обмотки з'єднати зіркою, а другу – трикутником, використовуючи дві послідовних мостових схеми.

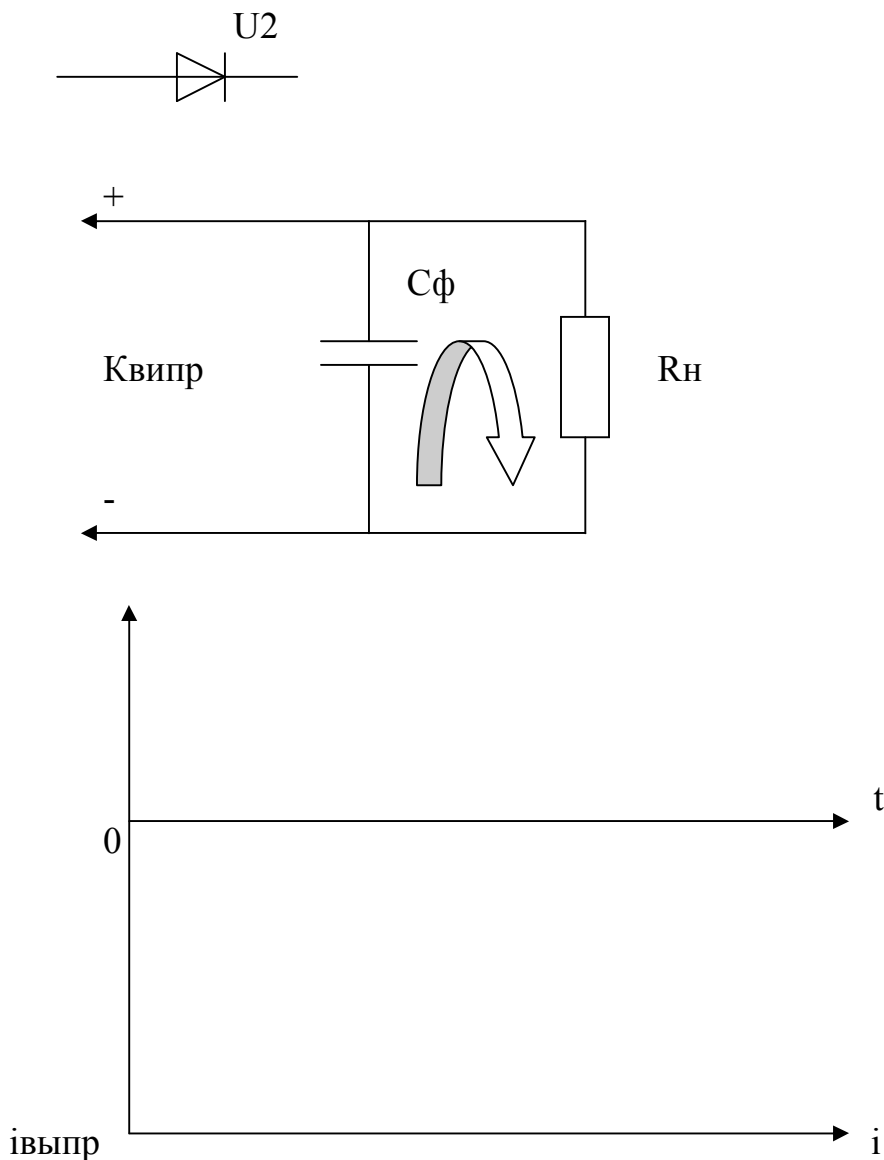
## 18.2 Згладжуючі фільтри і особливості роботи випрямляча на ємкісне навантаження

Згладжуючі фільтри будуються на основі реактивних елементів.



Для підвищення коефіцієнта згладжування застосовуються декілька послідовно включених ланок. Індуктивні фільтри – для великих струмів навантаження. Як індуктивність – дроселі.

Ємнісні фільтри – паралельно включений до навантаження конденсатор.



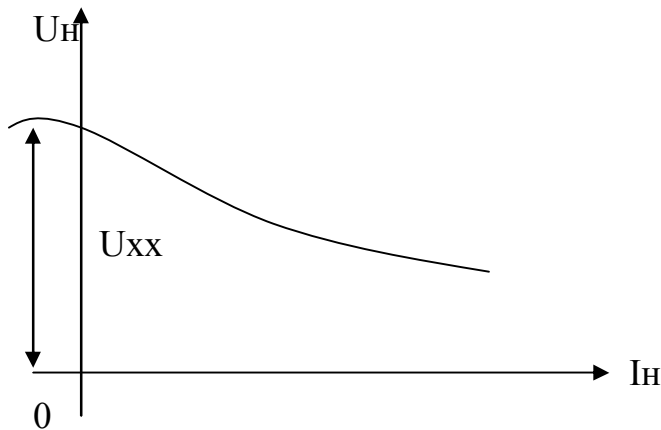
Внаслідок того, що при заряді конденсатора виникають імпульси зарядного струму, існує небезпека виходу з ладу випрямляча, тому при розрахунку параметрів випрямляча, що працює на ємкісному навантаженні, вентилі вибираються із запасом. Приклад розрахунку [1] – 483.

### 18.3 Зовнішні характеристики і методика розрахунків випрямляча

Зовнішньою характеристикою називають залежність  $U$  на навантаженні через струм на навантаженні.

При побудові зовнішньої характеристики випрямляча враховується падіння напруги на вентиліях обмотки трансформатора.

$$U_H = f(I_H)$$

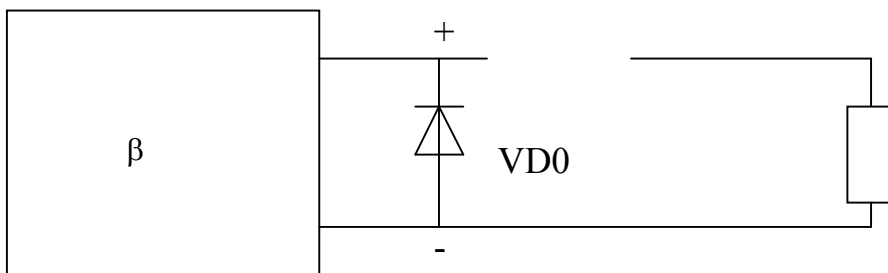


Напруга на вентилі практично не залежить від струму на вентилі.

Враховуючи кількість вентилів, які одночасно пропускають струм.

Унаслідок того, що при індуктивному навантаженні виникає зворотне  $U$  на навантаженні, то відбувається споживання реактивної енергії навіть при чисто активному навантаженні. Для зменшення вказаних втрат на виході випрямлячів встановлюється струм наз. нульові діоди.

Методика розрахунку випрямляча.



1. За початковими даними розроблена схема випрямляча.
2. Розраховуємо гранично допустимі параметри вентиля, при цьому враховуємо, що  $\alpha = 0$ .
3. Вибираються вентиля з довідника.
4. Розраховуємо значення струму вторинної обмотки трансформатора, що діє, визначаємо потужність трансформатора і проводиться його вибір з довідника.
5. Розраховуються і будуються регульовальні і навантаження характеристики випрямляча.

## 19 ЕЛЕКТРОННИХ РЕГУЛЯТОРІВ ЗМІННОГО НАПРУГА

### 19.1 Способи зміни змінної напруги

Основним параметром для змінного струму є дійсне значення напруги

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

$$U_g = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 \sin^2(\omega t) d\omega t} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

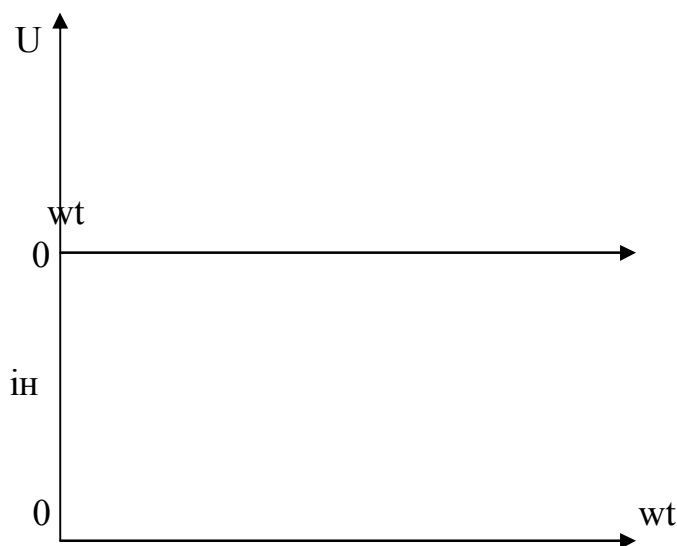
Для зміни величини  $U_g$  можна змінювати:  $U_m$ ,  $\sin$ ,  $\omega t$ .

Виходячи з цього є наступні способи регулювання:

- зміна  $U_m$  (застосування трансформатора), цей спосіб не міняє форму напруги і вносить міні спотворення;
- зміна форми напруги на  $R$ ;
- зміна числа напівперіодів  $U$  на навантаженні;
- зміна виділених параметрів (комбінований);

Зміна форми напруги може здійснюватися різними методами.

1) Регулювання напруги за допомогою введення кута відставання



Для активного навантаження  $\alpha_{\max} \longrightarrow \pi$

$$U_g = \frac{1}{\pi} \sqrt{\int_{\alpha}^{\pi} U_m^2 \sin^2(\omega t) d\omega t} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

$U_g = f(\alpha)$  - рівняння регулювальної характеристики

При роботі на активне навантаження, штучно вводиться індуктивна складова струму, загальне навантаження перетворюється на активно – індуктивну.

2) Введення кута випередження

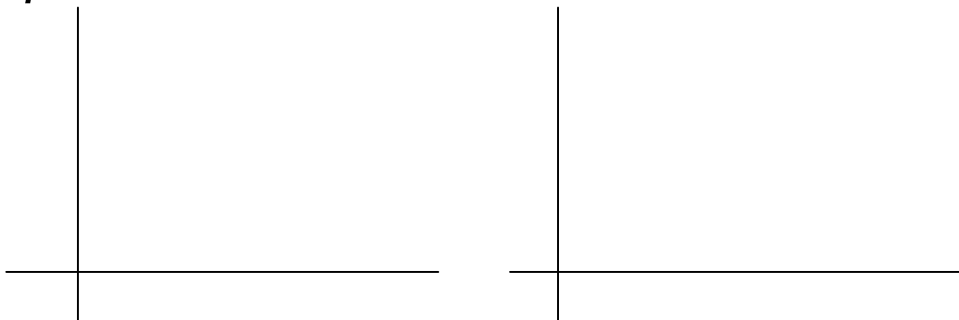


Навантаження носить ємкісним характер,  $I$  випереджає.

Що ці розглядаються 2 випадки вносять реактивність до навантаження.

Для зменшення зрушення фаз між  $I$  і  $U$  застосовуються симетричні способи регулювання.

$$\alpha = \beta$$



Зрушення в першій гармоніці не буде.  
(симетричне регулювання)

Дозволяють міняти  $U_g$ .

3) Зміна форми напруги – застосування амплітудної модуляції.

Для регулювання  $U_g$  необхідно міняти параметри модулюючих імпульсів.

4) Зміна числа напівперіодів – періодичне підключення навантаження до джерела.

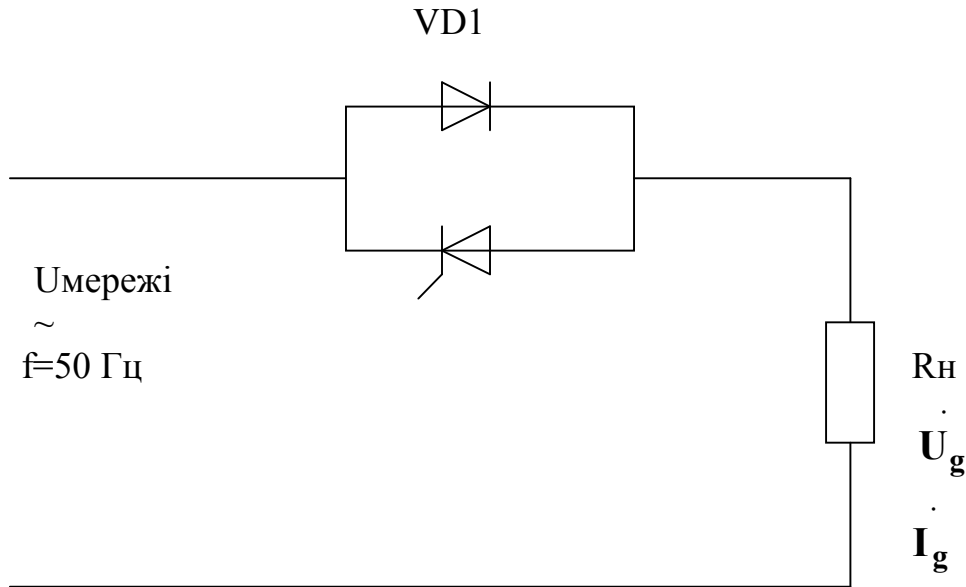


## 19.2 Схемотехніка електронних регуляторів змінного напруга

Як регулюючий елемент застосовуються силові одноопераційні тиристори.

В більшості випадків використовується випадок кут приведення -  $\alpha$

Схема несиметрична



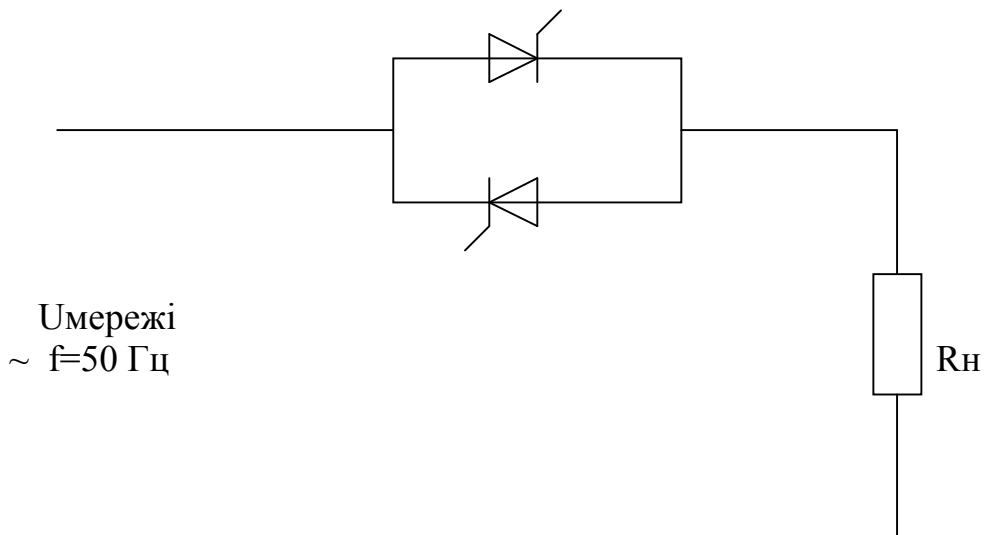
Визначаємо параметри діода VD:

$$I_{\text{пр.VD}} = \frac{I_m}{\pi}$$

$$U_{\text{обр.VD}} = U_{\text{с.мах}} \quad \text{- вибір тиристора}$$

$$I_{\text{пр.VS}} = \frac{I_m}{\pi} \quad U_{\text{обр.VS}} = U_{\text{пр.VD}}$$

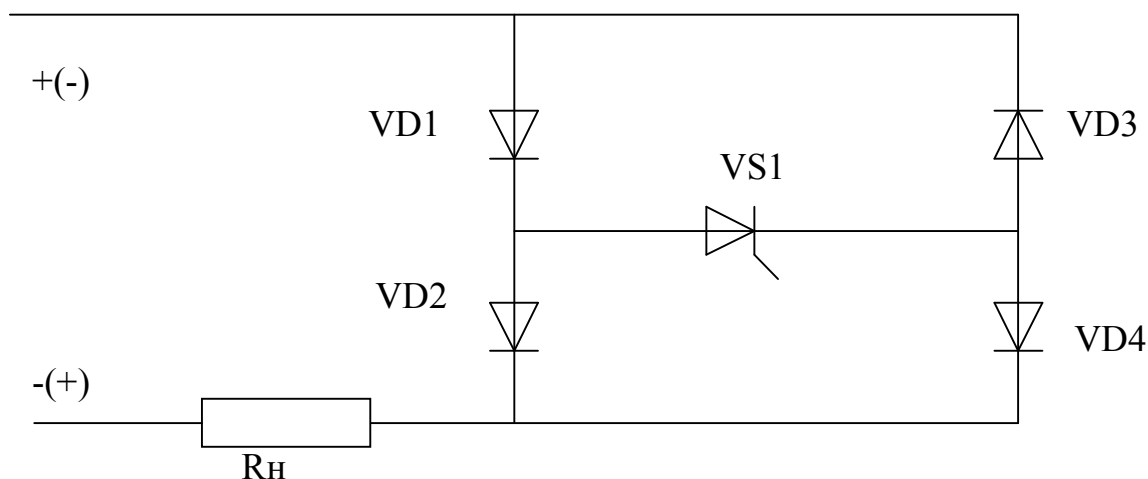
Схема симетрична



Вибір тиристора

$$I_{\text{пр.VS}} = \frac{I_m}{\pi} \quad U_{\text{обр.VS}} = U_{\text{с. max}} \quad I_{\text{пр.VS}} = U_c$$

Мостова схема однофазного регулятора.



Гідність: просте управління тиристором.

Вибір елементів:

$$U_{\text{обр.VD}} = U_{\text{с. max}} \quad - \text{ вибір діода}$$

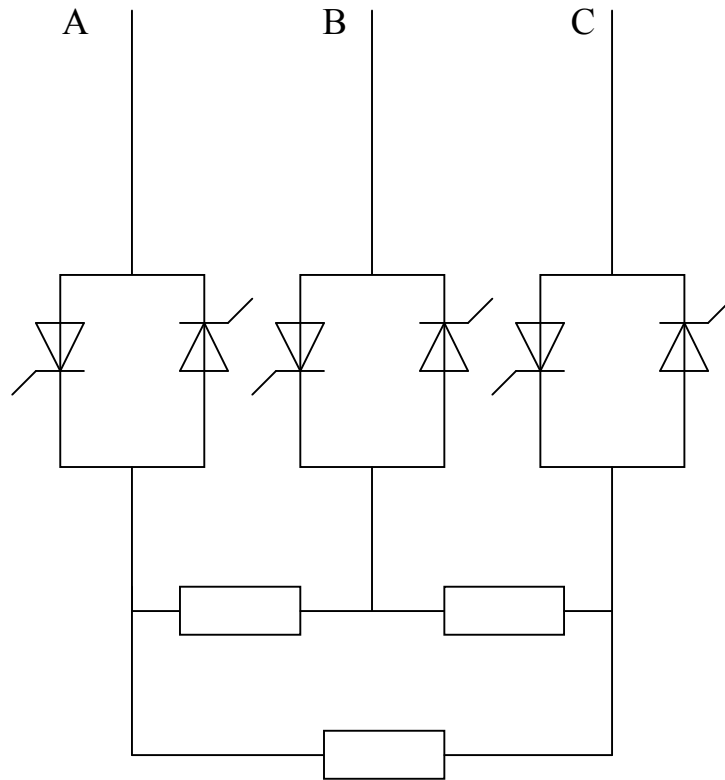
$$I_{\text{пр.VD}} = \frac{I_{\text{н.м}}}{\pi}$$

$$I_{\text{пр.VS}} = \frac{2I_{\text{н.м}}}{\pi} \quad (\text{обидва напівперіоди})$$

$$U_{\text{обр.VS}} = U_{\text{с. м}} \quad - \text{ вибір тиристора}$$

$$I_{\text{пр.VS}} = U_{\text{с.м}}$$

Трифазний регулятор.



### 19.3 Енергетичні характеристики вентильних перетворювачів і їх вплив на мережу живлення

Основним параметром будь-якого перетворювача (випрямляча, інвертора або регулятора  $\sim U$ ), є коефіцієнт використання потужності:

$$K_M = \frac{P_H}{S}$$

При перетворенні напруги виділяються наступні види потужності:

$P_H$  – активна складова

$P_r$  - реактивна складова

$P_{\text{ризик}}$  – потужність спотворень

$P_{\text{несим}}$  – несиметрії фаз

$S$  - повна потужність

$$S = \sqrt{P_H^2 + P_r^2 + P_{\text{ризик}}^2 + P_{\text{несим}}^2}$$

Реактивна потужність, що становить, визначається видом навантаження ( $Q$ ,  $P_r$ )

$P_{\text{ризик}}$  – визначається коефіцієнтом спотворення форми, аналогічна реактивній потужності  $P_r$ .

$P_{\text{несим}}$ . – визначається величиною навантажень в кожній фазі (для 3-х фазному ланцюгу)

$$K_M = \frac{P_H}{\sqrt{P_H^2 + P_p^2 + P_{иск}^2 + P_{несим}^2}} = \frac{P_H}{\sqrt{P_H^2 + P_p^2}} \cdot \frac{\sqrt{P_H^2 + P_p^2}}{\sqrt{P_H^2 + P_p^2 + P_{иск}^2}} \cdot \frac{\sqrt{P_H^2 + P_p^2 + P_{иск}^2}}{\sqrt{P_H^2 + P_p^2 + P_{иск}^2 + P_{несим}^2}}$$

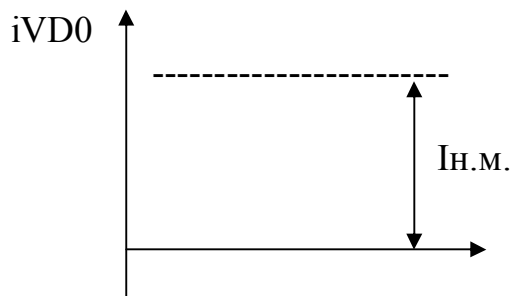
$$= \cos \varphi \cdot K_{иск} \cdot K_{нес.}$$

Якщо на навантаженні напруга буде  $\sin$ , то  $K_{иск} = 1$

Якщо навантаження симетричне на фазі, то  $K_{несим} = 1$

При застосуванні схем перетворення напруги (випрямлячі, інвертори) необхідно додатково застосовувати схеми симетрії.

Робота випрямляча на індуктивне навантаження.



У момент закривання тирристора  $I$  йде через нульовий діод  $VD0$  (не більш ніж  $I_{н.мах}$  - струм навантаження).

$$U_{обр.VD0} = U_{мах.н} \quad - \text{ на навантаженні}$$

При використанні 3-фазної мережі для зменшення несиметрії застосовуються схеми компенсації, які вирівнюють повні опори навантажень в кожній фазі.

Оскільки реально навантаження носить індуктивний характер, то на вході приймача ставиться блок конденсаторів на кожну фазу (елементи для вирівнювання навантаження).

## 20 ТРАНЗИСТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НАПРУГИ

### 20.1 Схеми перетворювачів

Для живлення радіоапаратури від джерел постійного струму з низькою напругою (наприклад, акумуляторні батареї) використовуються транзисторні перетворювачі напруги. Перетворювачі широко застосовуються як автономні джерела у високовольтних джерелах живлення і джерелах електроживлення з бестрансформаторним входом.

За способом збудження транзисторні перетворювачі розділяються на два типи: перетворювачі з самозбудженням і перетворювачі з посиленням потужності.

Перетворювачі з самозбудженням виконуються на невеликі потужності (до декількох десятків ватів) по одно- і двухтактной схемам.

Широке застосування отримали двотактні перетворювачі (мал. 9.19). Перетворювач складається з трансформатора  $TV$  і транзисторів  $VT1$ ,  $VT2$ , включених по схемі із загальним емітером. Трансформатор виконаний на магнітопроводі з матеріалу з прямокутною петлею гістерезису (79НМ, 34НКМП). Вхідними затисками перетворювач включений в ланцюг постійного струму з напругою  $U_0$ . Напруга, що знімається з резистора  $R2$  дільника напруги, створює на базах транзисторів позитивний (щодо емітерів) зсув, що забезпечує надійний запуск перетворювача.

Завдяки позитивній ОС транзистори по черзі підключають джерело живлення до первинних обмоткам трансформатора  $w_1$  і  $w_j$ . У вторинній обмотці трансформатора наводиться ЕДС прямокутний форми.

При перетворенні великих потужностей найбільшого поширення набули перетворювачі з використанням підсилювача потужності. Підсилювач управляється від задаючого генератора, як який можна використовувати перетворювач з самозбудженням. Застосування таких перетворювачів доцільне, якщо потрібно забезпечити постійність частоти і напруги на виході, а також незмінність форми кривої змінної напруги при зміні навантаження перетворювача. Схема двотактного підсилювача потужності приведена на мал. 9.20.

Транзистори підсилювача потужності  $VT1$ ,  $VT2$  працюють по черзі. Протягом першого напівперіоду під дією напруги, що управляє, один з транзисторів, наприклад  $VT1$ , відкритий і знаходиться в насиченні, а транзистор  $VT2$  закритий і знаходиться в режимі відсічення. У другий напівперіод транзистори перемикаються. Напруга живлення по черзі прикладається до верхньої і нижньої половин первинної обмотки трансформатора. У вторинній обмотці наводиться ЕДС прямокутної форми.

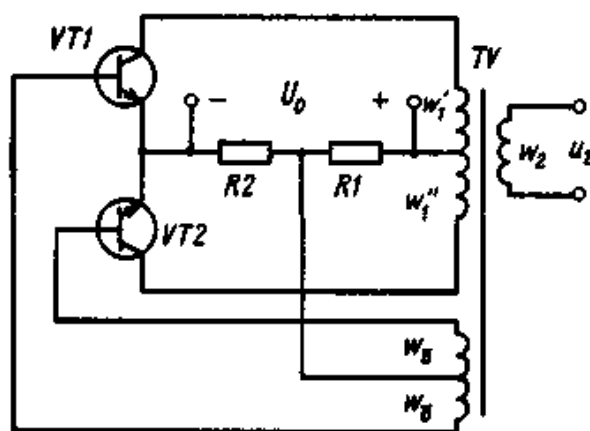


Рис. 9.19

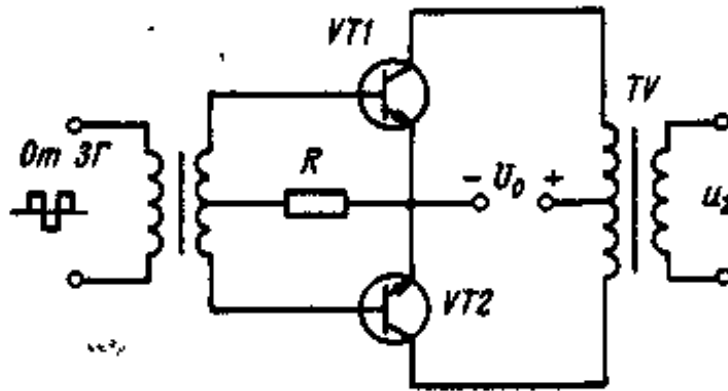


Рис. 9.20

## 20.2 Розрахунок перетворювачів

Початкові дані: напруга живлення  $U_0$ , В; вихідна напруга перетворювача  $U_2$ , В; максимальний струм вторинної обмотки  $I_2$ , А; частота генерації перетворювача  $f$ , Гц. Необхідно знати також вид навантаження (активна, мостовий випрямляч, випрямляч з середньою крапкою, подвоєння напруги).

1. Визначуваний струм відкритого транзистора

$$I_{K_{max}} = I_{2_{max}} U_2 / \eta U_0.$$

Приймаємо  $\eta = 0,72 \dots 0,9$ . Амплітуда струму вторинної обмотки  $I_{2_{max}} = I_2$ , якщо перетворювач працює на активне навантаження, на мостовий випрямляч і ланцюг подвоєння. Якщо навантаженням є двухполуперіодний випрямляч з середньою крапкою, то

2. Максимальна напруга на закритому транзисторі рівна

$$U_{K3inai} = 2,4 U_0.$$

3. По максимальному струму  $I_{K_{max}}$  і максі мальному напрузі  $U_{K3inai}$  вибираємо тип транзисторів VT1, VT2:

$$I_{K_{max}} \approx (2 \dots 3) I_{K_{max}} \text{ (для рис. 9.19);}$$

$$I_{K_{max}} \approx (1,3 \dots 1,5) I_{K_{max}} \text{ (для рис. 9.20).}$$

4. Струм бази транзистора рівний  $I_{B_{\text{нп}}} = (1,3 - 1,5) I_{K_{\text{нп}}} / h_{21} I_{B_{\text{нп}}}$ . где  $I_{B_{\text{нп}}}$  мінімальне значення коефіцієнта передачі струму VT1, VT2 в схемі з ОЕ.

5. Напряга базових обмоток  $U_B = 2,5 \dots 3,5 \text{ В}$ .

6. Опори резисторів R1, R2, КБ рівні:

$$\begin{aligned} R_1 &= U_0 R_2 / (0,5 \dots 1); \\ R_2 &= [U_1 - (0,5 \dots 0,7) I_{B_{\text{нп}}}] / I_{B_{\text{нп}}}; \\ R_B &= (1,4 \dots 2) / I_{B_{\text{нп}}}. \end{aligned}$$

Розрахунок параметрів трансформатора. Магнітопровід трансформатора у перетворювача з самозбудженням виготовляється з матеріалу з прямокутною петлею гістерезису (50НП34НКМП, 79НМ). У перетворювача з підсилювачем потужності сердечник трансформатора виготовляється з матеріалів з високою магнітною проникністю (34НКМП, 40НКМП, феритів 2000НМ1, 2000НМ3).

Магнітопровід трансформатора вибирається по твору  $S_{\text{ст}} \cdot S_{\text{ок}}$ :

$$S_{\text{ст}} S_{\text{ок}} S_r \cdot 10^2 / 2f B j k_m k_c \eta.$$

$S_r = 1,3 U_2 I_2$  (активне навантаження перетворювача або мостовий випрямляч);  $S_r = 2,1 U_2 I_2$  (навантаження - двухполупериодный випрямляч з середньою крапкою):  $U = 1,5 \text{ Т}$  для сплаву 50НП;  $U = 0,85 \text{ Т}$  для 79НМ;  $U = 1,5$  для сплаву 34НКМП.

У перетворювачах з самозбудженням  $B = B_s$ , а в перетворювачах з підсилювачем потужності  $B = (0,7 \dots 0,8) B_s$ .

При використанні феритів 2000НМ  $B = (0,15 \dots 0,2) \text{ Т}$ .

Величина  $j, k_m, k_c$ , до. визначають так само, як в § 9.4.  $\eta = 0,8 \dots 0,95$ .

Число витків вторинної, первинної і базової обмоток перетворювача рівне

$$\begin{aligned} w_1 &= U_0 10^4 / (4f B S_{\text{ст}} k_c); \\ w_2 &= (U_2 / U_0) w_1; \\ w_B &= (U_B / U_0) w_1. \end{aligned}$$

Визначаємо струми в обмотках трансформатора

$$I_1 = I_{K_{\text{нп}}} \sqrt{2}; I_B = I_{B_{\text{нп}}} \sqrt{2}.$$

## МОДУЛЬ 3. МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА

### 21 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ ЦИФРОВИХ ПРИБОРІВ

#### 21.1 Елементи алгебри логіки

Цифрові пристрої використовують ключовий режим роботи активних елементів. У таких пристроях сигнали приймають 2 значення («є» - «ні» «1» - «0»).

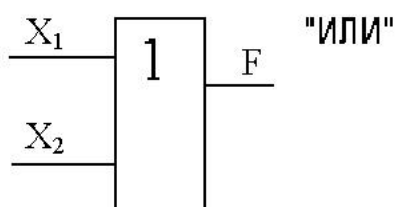
Для опису роботи логічного пристрою застосовується функція алгебри логіки (ФАЛ). Всі дії логічного пристрою здійснюються на основі наступних логічних операцій.

1). Логічне додавання

$F=X_1+X_2+$ , де  $X_1, X_2$  – логічні сигнали.

Таблиця станів

$X_1$	$X_2$	F
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

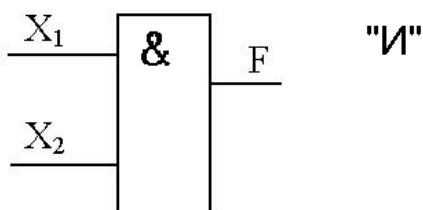


2). Логічне множення

$F=X_1 \cdot X_2$ , де  $X_1, X_2$  – логічні сигнали.

Таблиця станів

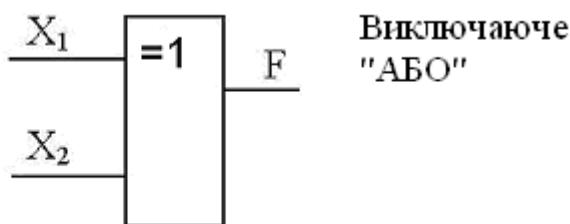
$X_1$	$X_2$	F
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1



3). Виключаюче «АБО»

$F=X_1 \oplus X_2 \oplus \dots$ , де  $X_1, X_2$  – логічні сигнали.

$X_1$	$X_2$	F
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	0

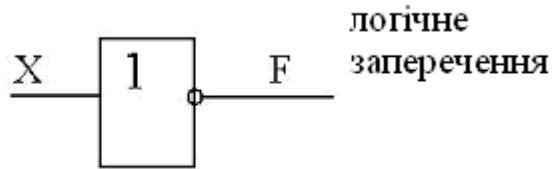




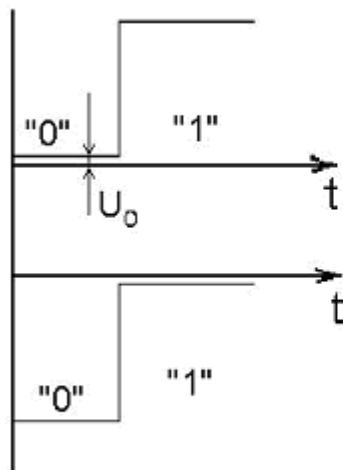
#### 4). Інверсія

$$F = \overline{X}$$

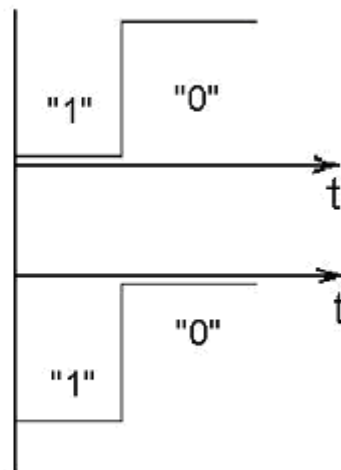
X	F
0	1
1	0



Вказані функції можуть виконувати логічні елементи.  
Види логічних елементів – позитивні і негативні.



додатня логіка

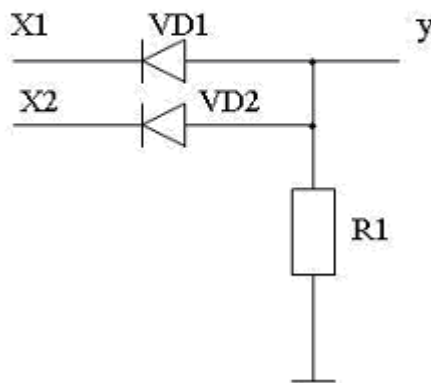


від'ємна логіка

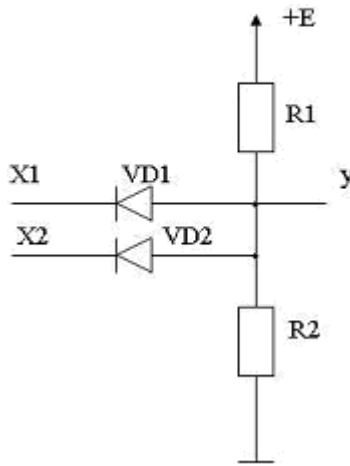
До  $p$  – коефіцієнт розгалуження, вказує яке тах число входів можна підключити до одного виходу логічного елемента.

Реалізація логічних елементів:

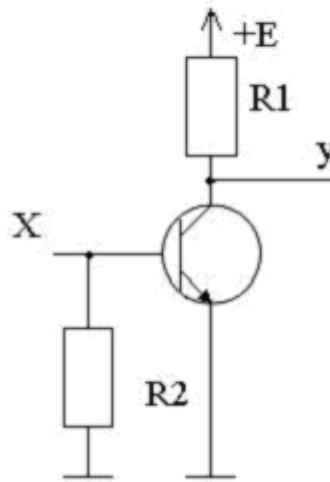
реалізація елемента  
"АБО"



реалізація елемента  
"І"



реалізація елемента  
"Ні"



Логічні елементи, виконані на діодних ключах ~ діодної логіки (ДЛ).

Сучасні логічні елементи випускаються у вигляді окремих мікросхем. Будуються на біполярних або польових транзисторах. Якщо логіка на біполярних транзисторах, то логіка ТТЛ. Для збільшення швидкодії застосовують переходи Шотки (ТТЛШ).

Емітерносвязанная логіка (ЕСЛ).

КМОП – комплементарно польові транзистори.

3) Логіка роботи представлена у вигляді функції алгебри – логіки (ФАЛ).

$$F = x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 + x_2 \cdot x_4 \cdot x_3 + \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_4 + x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$$

Для мінімізації ФАЛ, в якій не більше 4 змінних, можна використовувати парти Карно.

	x1x			
x3x4	00	01	11	10
00			1	
01	1		1	
11	1	1	1	
10				

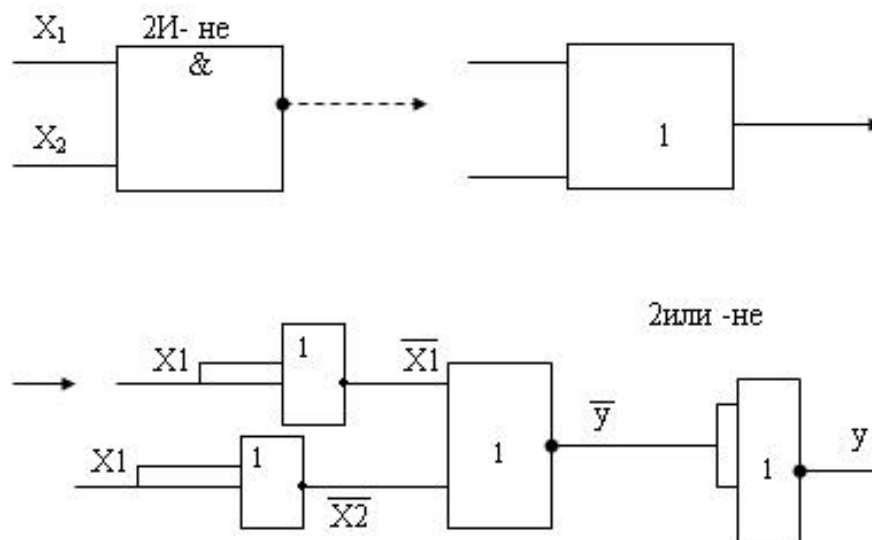
$$F = x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_4 + x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_4$$

## 22 КОМБІНАЦІЙНІ ЛОГІЧНІ ПРИСТРОЇ

### 22.1 Синтез логічних пристроїв

Будь-який логічний пристрій виконується на конкретній елементній базі. Перед проектуванням складається алгоритм роботи і записується ФАЛ пристрою. Для побудови будь-яких пристроїв досить мати:

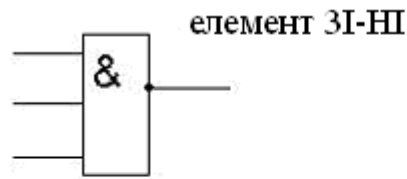
2И – НЕ, Перехід



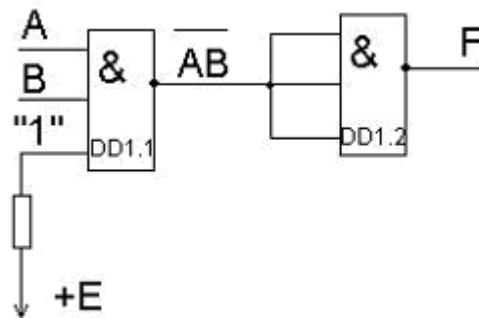
При реалізації логічного  $f$  зустрічаються випадки коли логічні елементи мають більше входів, чим число змінних, тому деякі входи залишаються вільними. У реальних умовах вільні входи залишати не допускається. Два способи підключення невикористаних входів:

1. невикористаний вхід з'єднується з входом на який подається змінна.
2. на невикористаний вхід подається пасивний рівень для даного логічного елементу.

Пасивним – називається логічний сигнал (про або t), який не міняє стан елементу.



реалізація логічного пристрою на 3І-НІ елементах



## 22.2 Типові комбінаційні пристрої

Дес. Код	Д	З	У	А
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1

До типових комбінаційних пристроїв відносяться шифратор, який перетворює десятковий код в двійковий, для синтезу шифратора необхідно скласти таблицю стану.

$$A = 1+3+7+9+5=25$$

$$У = 2+3+6+7=18$$

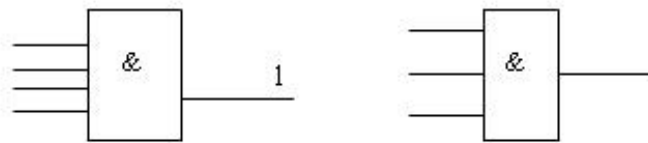
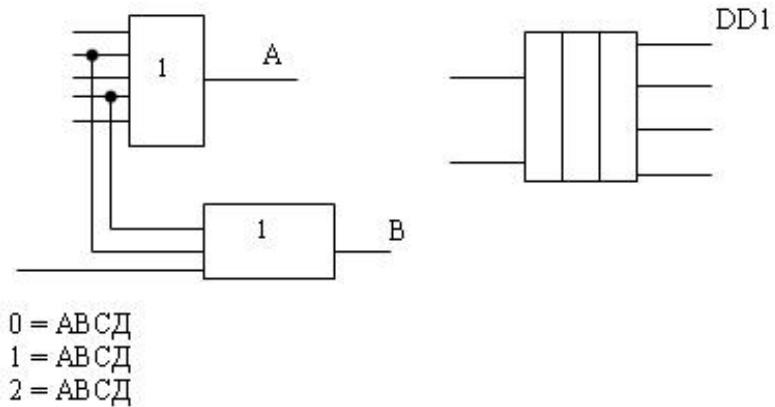
$$З = 4+5+6+7=22$$

$$Д = 8+9=17$$

Надмірні стани можна використовувати для мінімізації.

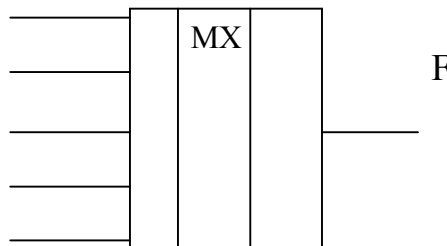
Шифратор – перетворювач кодів

Дешифратор – виконує зворотну операцію



Мультиплексор – пристрій що виконують комутацію (з'єднання декількох входів на один вихід), при ньому номер входу визначається адресою, наприклад, нам необхідно

$$F = D_0 * A_0 * A_1 + D_1 * A_0 * A_1 + D_2 * A_0 * A_1 + D_3 * A_0 * A_1$$



Демультимплексор – пристрій, який підключає єдиний вхід на безліч виходів.

## 23 ПОСЛІДОВНІ ЛОГІЧНІ ПРИСТРОЇ

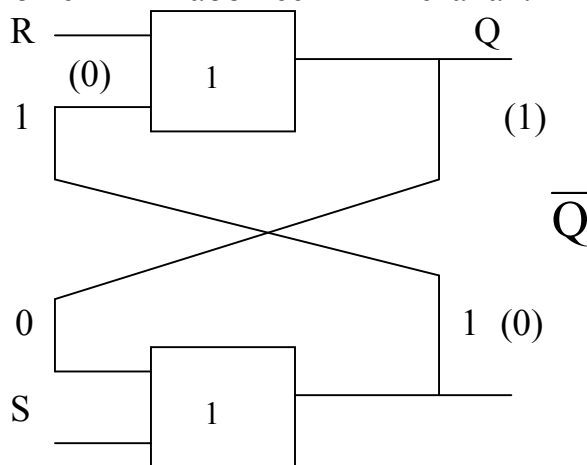
### 23.1 Тригери

Пристрої (тригери) тригерів призначені для запам'ятовування цифрової інформації. Можуть бути побудовані на транзисторах, логічних елементах, операційних підсилювачах і інших пристроях. Зазвичай тригер має як мінімум один стійкий стан. Тригер будується на двох підсилювальних каскадах, які охоплюють полож. обр. св. Тригери бувають асинхронні і синхронні. Тригери мають один або два виходи, один – прямий, інший – інверсний. Входи тригера визначають його функціональні можливості.

RS- тригер, який служить як елемент пам'яті. Вхід S – вхід установки (на прямому виході встановлює логич. 1.. 2ой входи.). R- вхід скидання, на прямому виході – логич. 0. Вихід тригера позначається Q.

Q-прямой  $\bar{Q}$  - інверсний

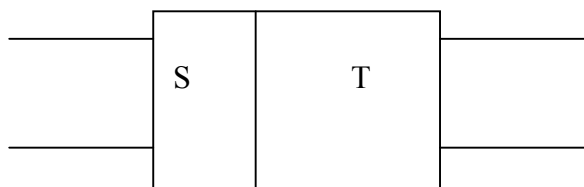
Стан тригера характеризує його таблиця стану. Вказаний тригер може знаходитися в двох стійких або нестійких станах.



R	S	$Q_t$	$Q_{t+1}$
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	0
1	1	0	*
0	0	1	1
0	1	1	1
1	0	1	0
1	1	1	*

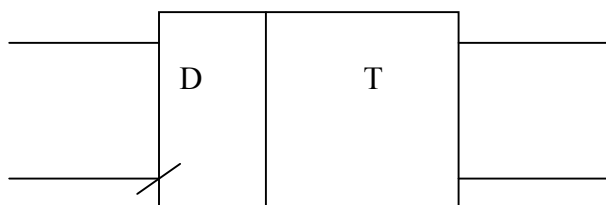
\*заборонений стан для цього тригера.

### DD1

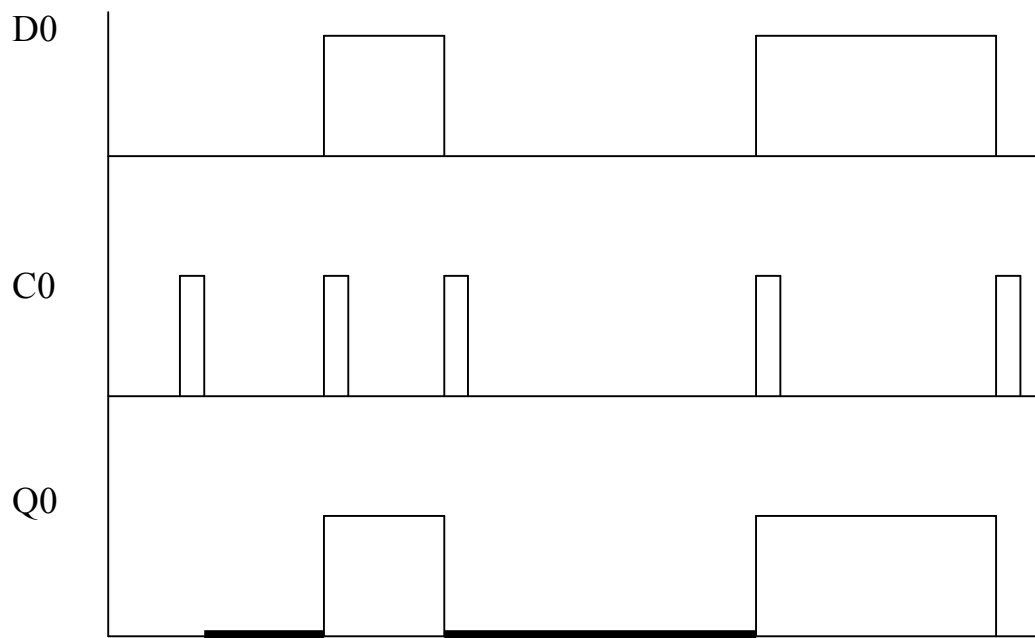


RS - тригер є асинхронним.

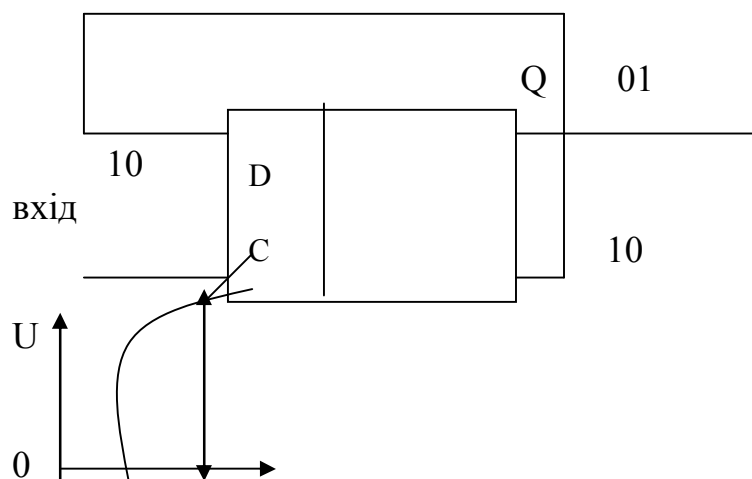
D - тригер синхронний.



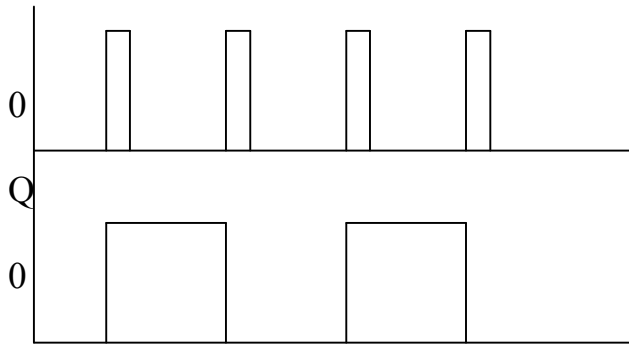
Інформація на вході D з'являється.



T-тригер



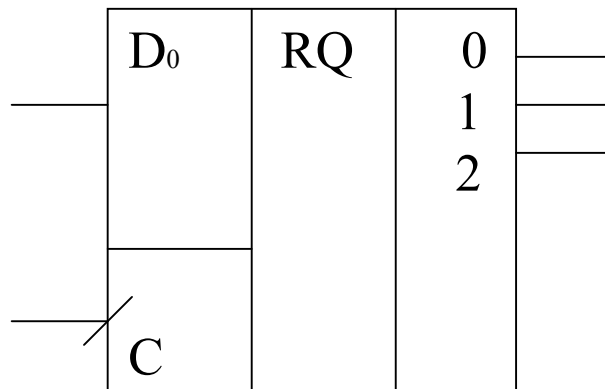
$T_{тр}$  – дільник частоти, на  $T_{тр}$  будуються перетнуті схеми.



### 23.2 Регістри

Регістри – логічні пристрої для тимчасового зберігання цифрової інформації, це синхронні пристрої. Всі регістри будуються на основі трієрів. Кількість стійких станів регістра визначають кількість трієрів.

Паралельні регістри призначені для зберігання цифрової інформації в паралельному ході.



Що зрушують – для перетворення послідовного ходу в паралельному ході.

### 23.3 Лічильники

Лічильники – для рахунку цифрової інформації, основна характеристика коефіцієнтів рахунку. Коефіцієнт рахунку визначає кількість станів лічильника. Всі лічильники будуються на основі Т-триггерів.

$$R_{cr} = 2^n$$

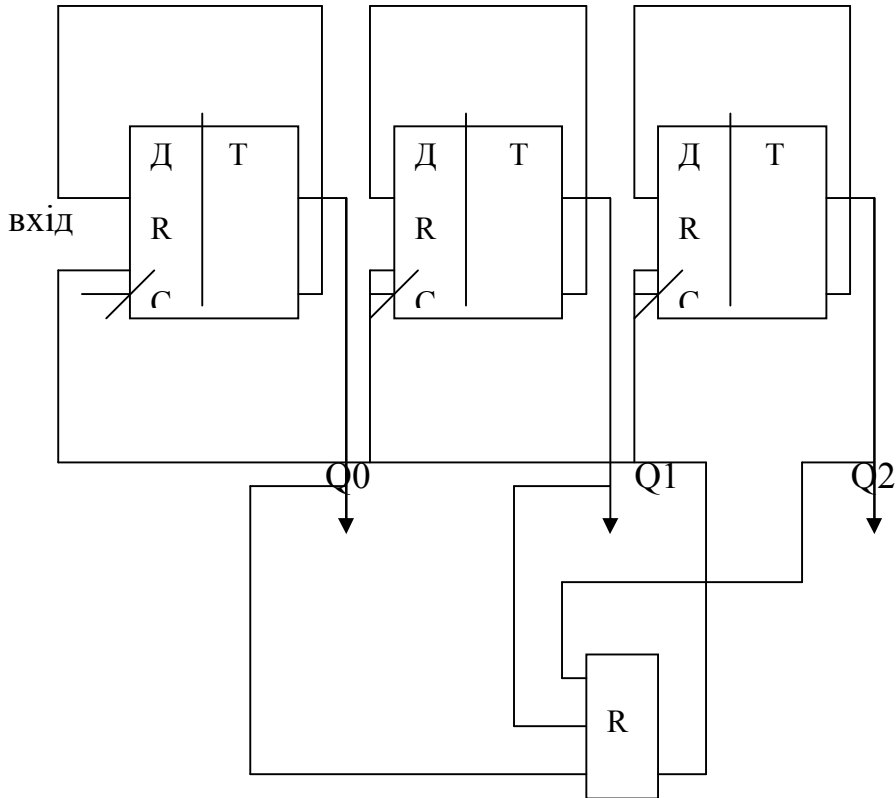


n – кількість триєрів.

Лічильники бувають що підсумовують і віднімають.

$$R_{cr} = 2^3 = 8$$

$$N = R_{cr} - 1 = 7$$



$$R_{cr} = 7$$

$$n=3$$

Для примусового зменшення коефіцієнта рахунку використовують додаткові логічні документи.

Таблиця станів

0	→	000	000
1	→	001	001
6	→	110	010
7	→	111	011
			100
			<hr/> 101
			111

### 24.1 Компаратор

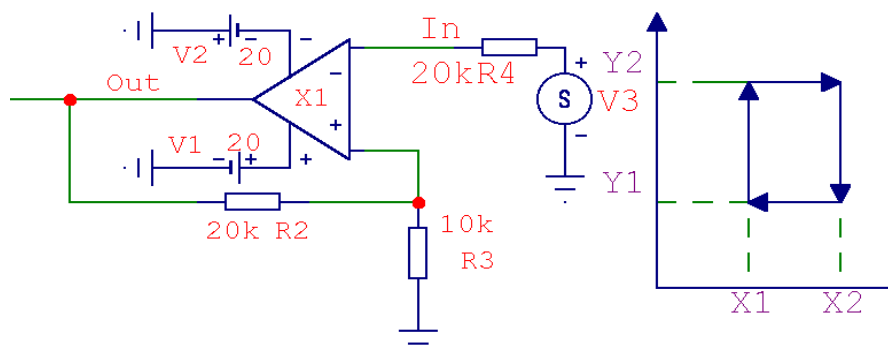
Компаратором (comparator) називають аналогову схему, яка видає сигнал високого рівня на виході при перевищенні рівня сигналу на одному з входів над порогом спрацьовування і сигнал низького рівня (лог.0) інакше.

Звичайний операційний підсилювач може бути з успіхом застосований для роботи як компаратор, такий зображений на мал. 8.1 компаратор інакше називають тригером Шмідта[9].

Вказаний елемент має статичну характеристику

$V_{\text{вых}} = F(V_{\text{вх}})$  звану петлю гістерезису. Це означає, що при збільшенні вхідної напруги спрацьовування компаратора відбувається в одній точка, а при зменшенні в іншій. Різниця  $X_2 - X_1$  називають шириною петлі гістерезису, що визначає погрішність компаратора.

На мал. 8.2 показана схема ідеального тригера Шмідта з позитивним зворотним зв'язком, який задає поріг спрацьовування компаратора. Статична характеристика ідеального компаратора має ширину петлі гістерезису рівну нулю.



Мал. 24.1 Компаратор – тригер Шмідта і його статична характеристика

### 24.2 Інтегральний таймер

Таймером (timer) називають аналого - цифрову інтегральну схему, що має 2 пороги спрацьовування, - верхній і нижній. Приклад таймера типу SE555 або NE555, а точніше його комп'ютерна MicroCap - модель, приведена далі на мал. 8.3. Функціональна схема цього таймера містить два компаратори, RS - тригер, резистивний дільник напруги і вихідні каскади. Напруга живлення таймера змінюється в межах 5 - 15 В.

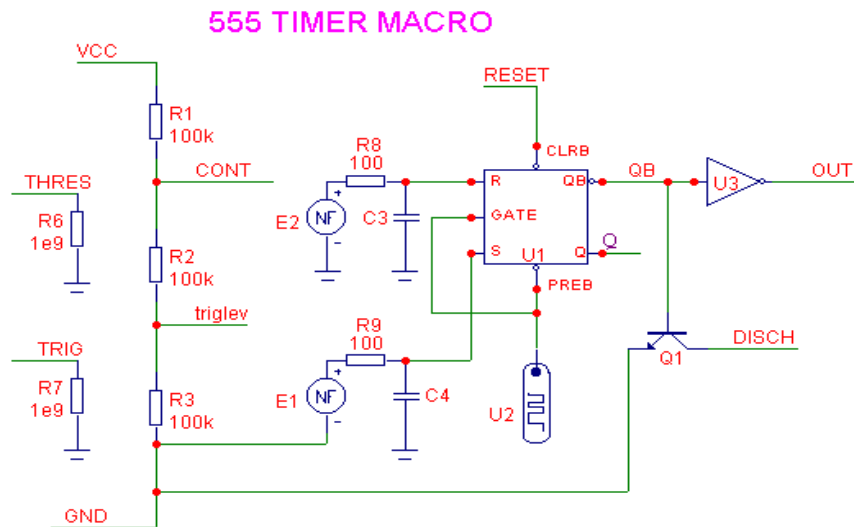


Рис.24.3 - Функціональна схема таймера

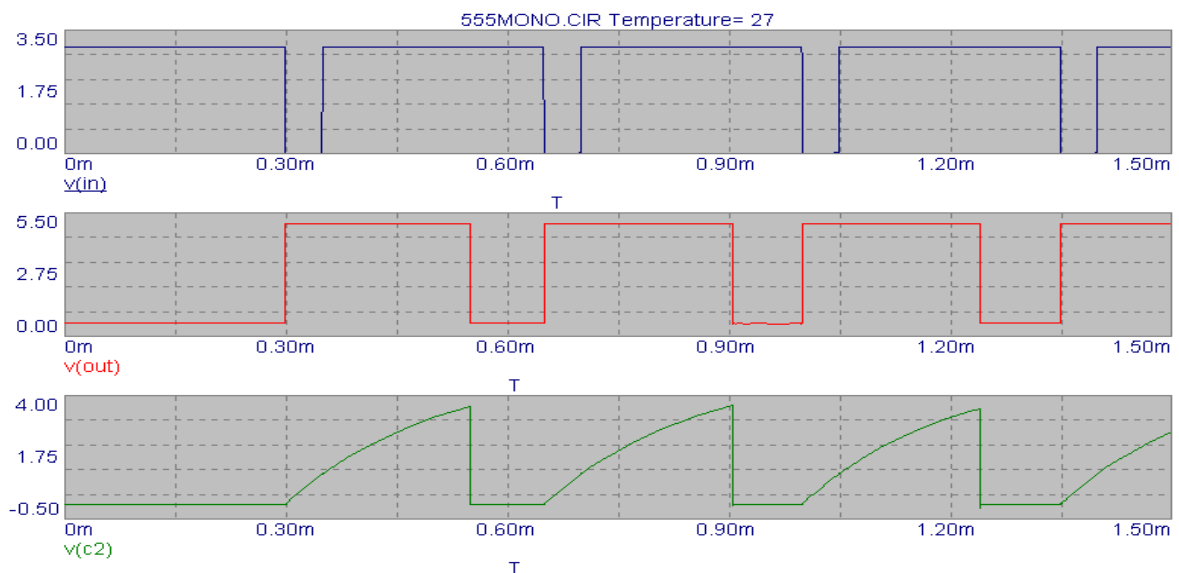
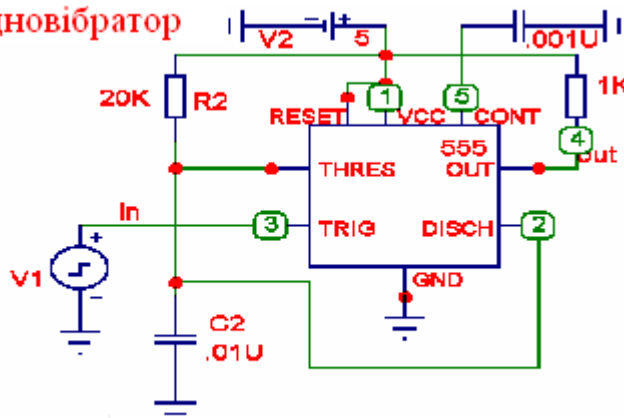
Резистивний дільник подає на нижній компаратор  $trig$  порогову напругу  $U_n = U_{п+}/3$ , а на верхній  $thres$  -  $U_v = 2U_{п+}/3$ . Якщо на вхід  $trig$  подається напруга менше, ніж  $U_n$ , то тригер встановлюється в стан 1, якщо на вході  $thres$  напруга стане більше, ніж  $U_v$ , то тригер встановиться в стан 0. Сигнал  $reset$  відповідає установці тригера в початковий стан, а також дозволу і забороні роботи таймера. Вихід  $out$  інформаційний, вихід  $disch$  - струмовий з відкритим колектором. Входи NF моделюють роботу нижнього і верхнього компараторів.

Основна схема включення таймера відповідає режиму моновібратора (див. рис 24.4). Моновібратор (одновибратор), як визначено було раніше, - це схема, що забезпечує один стійкий стан. Початковий, стійкий стан забезпечується подачею на вхід  $reset$  постійної напруги від джерела живлення при цьому конденсатор  $C2$  розряджений.

Перехід схеми в другий нестійкий стан забезпечується дією на вхід  $trig$  напруги, значення якої нижче за поріг спрацьовування  $U_n$ . Час перебування моновібратора в нестійкому стані визначається величиною постійною часу  $t = R2 * C2$  (див. тимчасові діаграми рис.24.4).

При зменшенні напруги на вході  $trig$  нижче за поріг спрацьовування  $U_n$  тригер перекидається в стан 1, а конденсатор  $C2$  заряджає через резистор  $R2$ , що приводить до зростання напруги на вході  $thres$  вище за поріг  $U_v$  і тригер повертається в стан 0. Потім конденсатор  $C2$  розряджається, чим забезпечується початковий стан. Вхід  $cont$  служить для управління режимом коливань.

### 555 Одновібратор

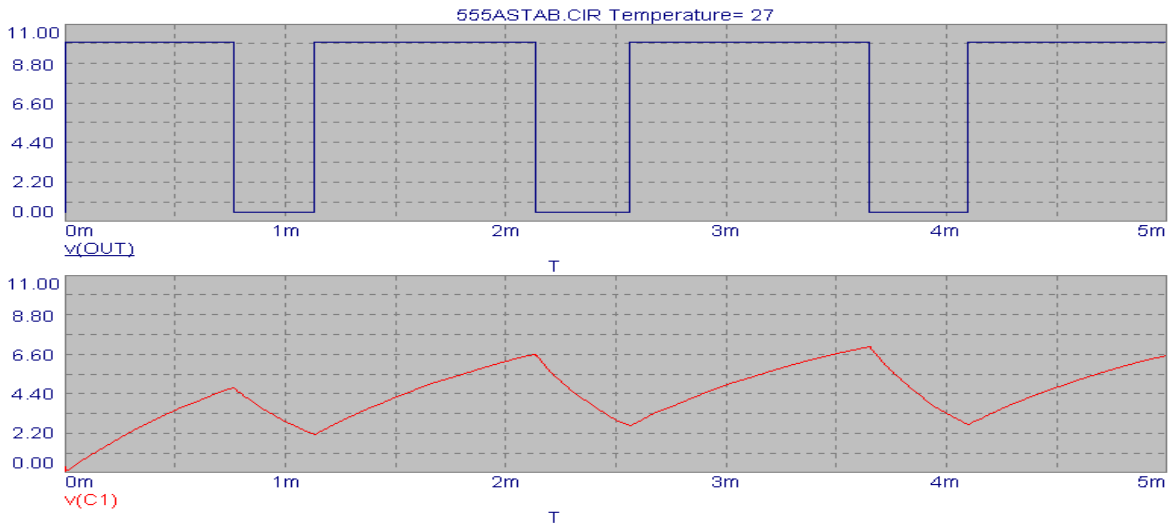


Мал. 24.4 - Моновібратор на таймері і його тимчасова діаграма.

У мультивібраторній схемі включення таймера (див. мал. 24.5) обидва безперервні входи таймера trig and thres підключаються до конденсатора C1. При включенні живлення (за умовчанням модель таймера використовує напругу джерела живлення  $VDD = 5V$ ). Для того, щоб змінити напругу необхідно привласнити в моделі параметру VDD інше значення, наприклад, (param v555\_vdd=10) конденсатор C1 заряджає через R2 +R1 до напруги верхнього порогу спрацьовування тригера. Після спрацьовування тригера конденсатор C1 розряджається через R1 і вихід disch на землю.

Падіння напруги на конденсаторі C1 до нижнього порогу спрацьовування викликає повернення тригера в початковий стан. Потім

цикл повторюється і на виході формуються прямокутні імпульси. Постійні часу розряду і заряду конденсатора визначають тривалість імпульсу і паузи коливань.



Ріс.24.5 - Мультивібратор на таймері і діаграма його роботи.

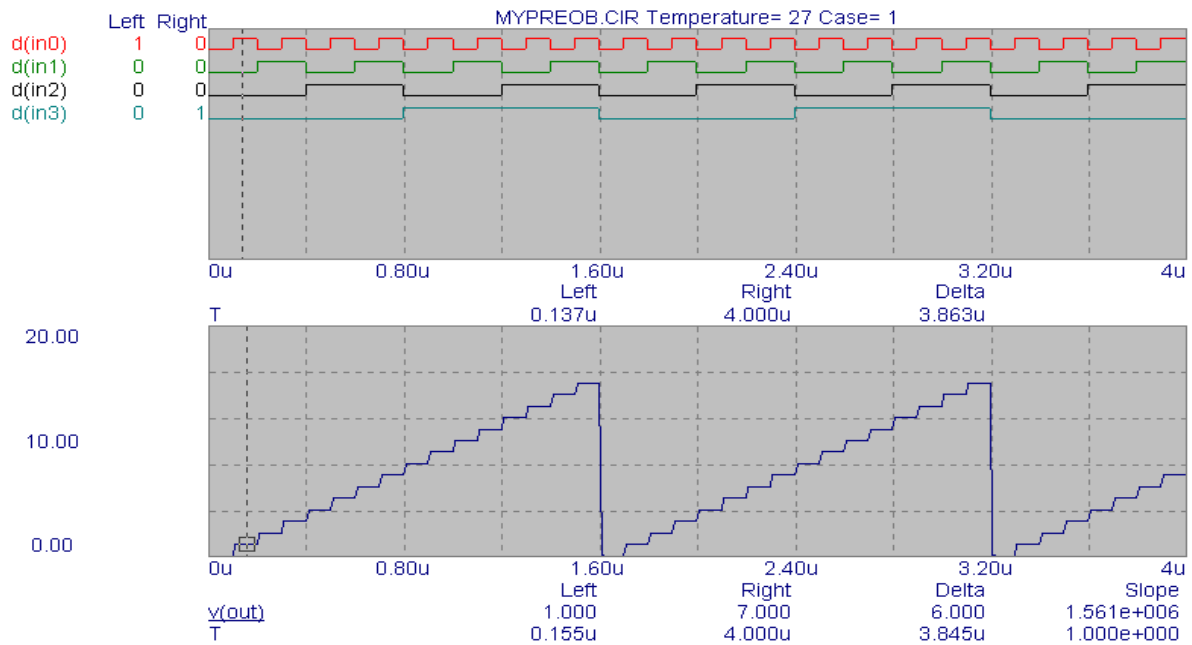
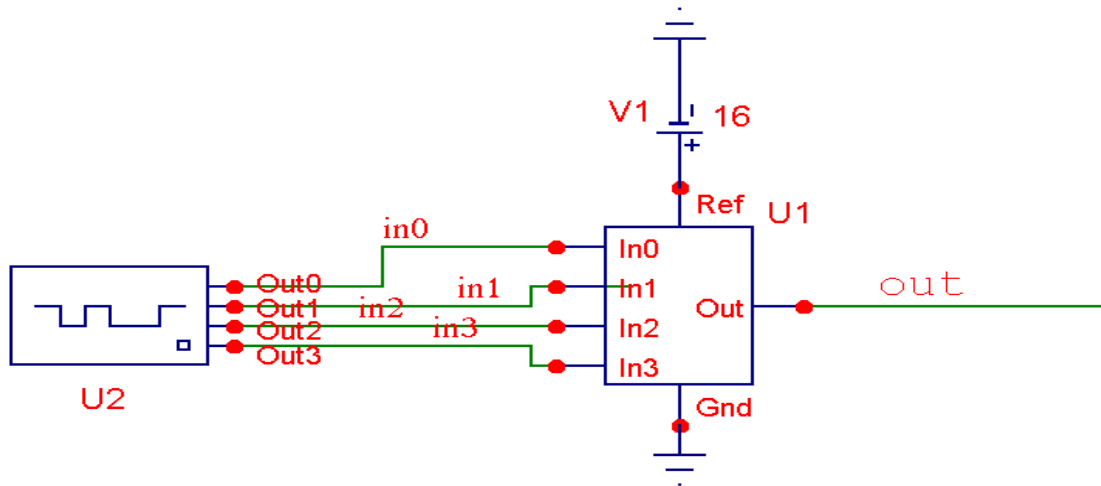
### 24.3 Цифро – аналогові перетворювачі (ЦАП)

Цифро - аналогові перетворювачі (Digital – to - Analog Converter) служать для перетворення n- розрядного коду в аналоговий сигнал струму або напруги.

Для побудови ЦАП застосовують схему, резистори якої мають величину, кратну ступеню 2, тобто R, 2R, 4R, 8R, 16R і так далі при R=1Ом. Вихідна напруга, що формується на навантаженні R<sub>n</sub> рівно:  $U_{\text{вих}} = E \cdot \frac{q_n}{2^n} + R_n$ .

Транзисторні ключі q<sub>1</sub>,q<sub>2</sub>,q<sub>3</sub>,q<sub>4</sub> = 0 або 1 і управляються розрядами коду, а через розрядні резистори протікають струми кратні ступені 2 і підсумовуються на навантаженні.

Один квант напруги приблизно рівний  $e_0 = E/2^n \cdot R_n$  еквівалентна провідність -  $1/R_n = 1/R \cdot q_1 + 1/2R \cdot q_2 + 1/4R \cdot q_3 + 1/8R \cdot q_4$  і так далі На мал. 24.7. приведена функціональна схема ЦАП і діаграма його роботи.



Мал. 24.7 Функціональна схема і діаграма ЦАП.

При  $V1 = 16 \text{ В}$  і  $n = 4$ , значення кванта напруги  $e0 = V1/2^n = 16/16 = 1\text{В}$ .

На діаграмі видно, що в діапазоні кодів від 0000 до 1111, ЦАП формує ступінчасту наростаючу напругу від 1 до 16 В.

## 24.4. Аналого – цифрові перетворювачі (АЦП)

Аналого - цифрові перетворювачі (Analog – to – Digital Converter) служать для перетворення аналогового сигналу струму або напруги в n-розрядний код.

Побудова аналого - цифрові перетворювачі пов'язано з процесами дискретизації і квантування аналогових сигналів.

Квантування - це процес представлення аналогової величини дискреними квантами за відповідною шкалою.

Дискретизацією називається процес представлення аналогової величини дискретними відліками в часі. Вказані перетворення застосовуються окремо до аналогової величини або спільно.

Число рівнів квантування N визначається по очевидній формулі:  $N - 1 = U_{\max} - U_{\min}/q$ , де  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$  - нижня і верхня межі зміни аналогової величини, q- крок квантування.

Відносна погрішність квантування рівна відношенню абсолютної погрішності  $D_{ky}$  квантування до різниці меж аналогової величини  $d_{ky} = D_{ky}/U_{\max} - U_{\min} * 100\%$ . Очевидно, що  $k_y$  рівна q/2 або q, отже  $q = d_{ky} * (U_{\max} - U_{\min})/50$  при  $U_{\min} = 0$   $q = k_y * U_{\max} / 50$ . Підставивши у вираз для N значення q маємо  $N = 50/ d_{ky} + 1$ , а для  $D_{ky} = q$   $N = 100/ d_{ky} + 1$ .

Число розрядів коду  $n = \lceil \log_2 N \rceil$ , де  $\lceil \rceil$  - знак округлення у велику сторону. В даний час застосовуються АЦП просторового кодування, послідовного наближення, паралельного типу і інтегруючого типу.

Просторові АЦП застосовуються для прочитування штрих - кодів, нанесених на предмети і товари. Принцип їх дії пов'язаний з отриманням різних по інтенсивності оптичних сигналів при освітленні світлих і темних ділянок штрих - коду.

Принцип дії АЦП послідовного наближення пов'язаний з тим, що код в основному регістрі міняється так, що відбувається урівноваження вхідної напруги іншою напругою, що знімається з ЦАП, приєднаному до даного регістра. Урівноваження починається із старшого розряду регістра, який встановлюється в лог.1, після чого оцінюється знак різниці між вхідною напругою і напругою, формованим ЦАП. Якщо знак позитивний, то даний розряд регістра залишається включеним, якщо ж знак негативний, то розряд регістра скидається в лог.0. Далі перетворення відбувається аналогічно і в результаті в регістрі формується код аналогової величини.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс): Учебник для вузов. Под. ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 768 с.: ил.
2. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум: Навч. посіб. /За ред.. А.Г.Соскова. 2-е вид. –К.: Каравела, 2004. – 432 с.
3. Гусев В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов / В.Г.Гусев, Ю.М.Гусев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 790 с.: ил.
4. Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: Учеб. пособие. – Ростов н/Д: изд-во «Феникс», 2001. – 448 с.
5. Схемотехніка електронних систем: У 3 кн. Кн. 1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: Підручник /В.І.Бойко, А.М.Гуржій, В.Я.Жуйков та ін. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища шк., 2004. – 366 с.: іл.
6. Схемотехніка електронних систем: У 3 кн. Кн. 2. Цифрова схемотехніка: Підручник /В.І.Бойко, А.М.Гуржій, В.Я.Жуйков та ін. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища шк., 2004. – 423 с.: іл.
7. Кучумов А.И. Электроника и схемотехника: Учебное пособие. – М.: Гелиос АРВ. 2002. – 304 с.
8. Скаржепа В.А., Луценко А.Н. Электроника и микросхемотехника. Ч.1. Электронные устройства информационной автоматики: Учебник / Под общ. ред. А.А. Краснопрошиной. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.
9. Краснопрошина А.А., Скаржепа В.А., Кравец П.И. Электроника и микросхемотехника. Ч.2. Электронные устройства промышленной автоматики: Учебник / Под общ. ред. А.А. Краснопрошиной. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 303 с.
10. Скаржепа В.А. и др. Электроника и микросхемотехника. Лабораторный практикум. Учебник / Под общ. ред. А.А. Краснопрошиной. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989.