

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

ЧЕБОТАРЬОВ В. І., ЛЯХОВСЬКИЙ А. Ф., ДУМІН О. М.

СХЕМОТЕХНІКА ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ КАСКАДІВ

Навчально-методичний посібник
із схемотехніки радіоелектронних пристроїв
для самостійної роботи студентів
фізичних спеціальностей

ХАРКІВ 2004

УДК 621.375
ББК 32.846.я73
Че34

Чеботарьов В. І., Ляховський А. Ф., Думін О. М. Схемотехніка підсилювальних каскадів / Під ред. В. І. Чеботарьова. Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2004. 30 с.

У посібнику розглянуто принципи електронного підсилення сигналів, склад підсилювальних каскадів та їх схемотехніка. Для набуття навичок читання схем наведено низку схемотехнічних рішень різних підсилювальних каскадів, сформульовані завдання для самостійної роботи.

Посібник призначено для студентів фізичних спеціальностей і використовується при вивченні курсу «Основи радіоелектроніки».

В пособии рассмотрены принцип электронного усиления сигналов, состав усилительных каскадов и их схемотехника. Для приобретения навыков чтения схем приведен ряд схемотехнических решений различных разновидностей усилительных каскадов, сформулированы задания для самостоятельной работы.

Пособие предназначено для студентов физических специальностей и используется при изучении курса «Основы радиоэлектроники».

The principle of electronic amplification, the structure of amplifying cascades and their circuit techniques are considered in the presented school-book. The set of circuit solutions for different amplifying cascades is presented to acquire habits of circuit reading. Homeworks are formulated..

The school-book is intended for students of physical professions and used for studying the course «Basics of radioelectronics».

Рецензенти:

ст. наук. співробітник ІРЕ НАН України ім. О. Я. Усикова, док. фіз.-мат. наук, проф. О. О. Булгаков;
завідувач відділу космічної радіофізики РІ НАН України, докт. фіз.-мат. наук, проф. А. О. Мінаков.

Рекомендовано вченою порадою радіофізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол №1? від 21.11.03??)

© ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2004.
© Чеботарьов В. І.,
Ляховський А. Ф., Думін О. М.,
2004.
© Дончик И. Н., макет обкладинки,
2004.

1. Склад підсилювальних каскадів

Підсилення сигналів – найважливіший процес у радіоелектроніці. Він полягає в **збільшенні енергії інформаційних сигналів**. Якщо при цьому вхідний і вихідний сигнали зв'язані лінійною залежністю, то підсилення називають **лінійним**.

Принцип електронного підсилення полягає в керуванні за допомогою електронних приладів електричними струмами і напругами, створюваними стороннім джерелом енергії – джерелом живлення.

Елементарне підсилювальне коло, узагальнена схема якого представлена на рис.1, складається з електронного приладу (*ЕП*), його навантаження (*Н_{ЕП}*) і джерела живлення (*ДЖ*), що утворюють замкнуте коло – контур. Величина струму *I* у контурі регулюється електронним приладом у залежності від вхідного сигналу – вхідної напруги *U_{ВХ}*. За допомогою навантаження електронного приладу *Н_{ЕП}* зміна струму перетворюється у вихідний сигнал – напругу *U_{ВИХ}*. Енергія, яку здатен виділити вихідний сигнал, перевищує енергію вхідного сигналу, затрачену на керування електронним приладом. Найпростіші підсилювальні кола зазвичай називають *підсилювальним каскадом*.

Вкажемо на основні властивості головних складових підсилювального каскаду.

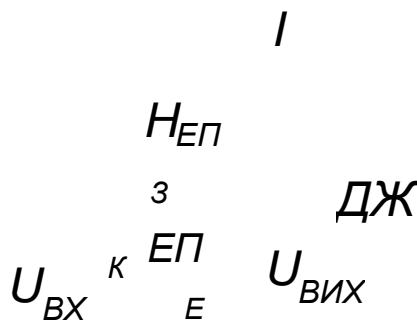
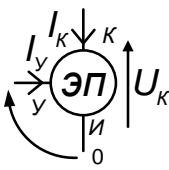
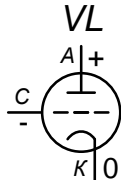
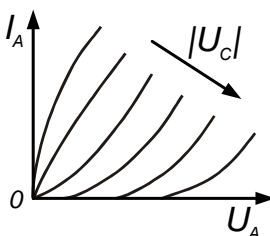
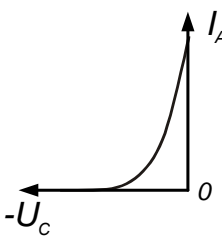
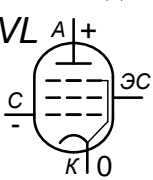
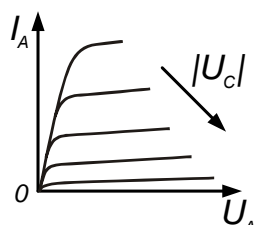
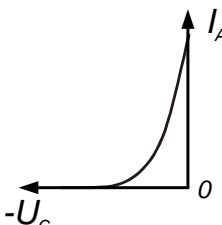
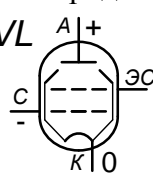
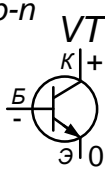
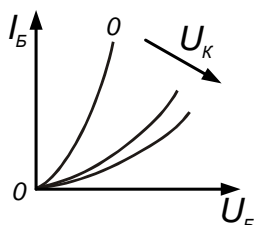
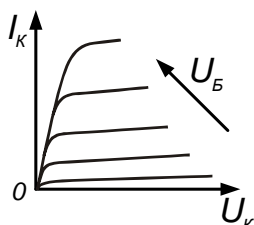
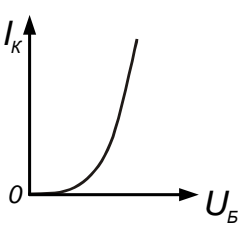
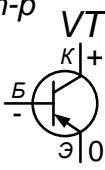
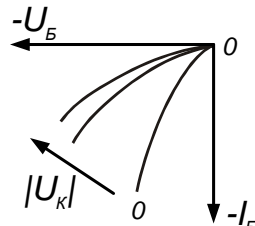
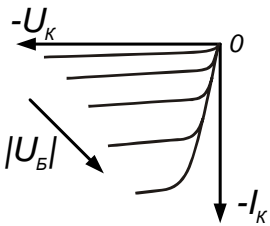
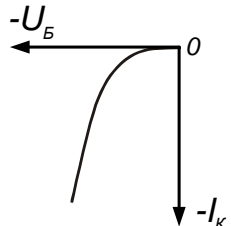


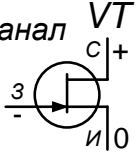
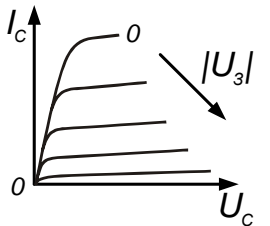
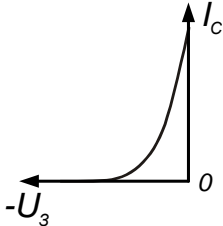
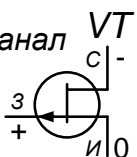
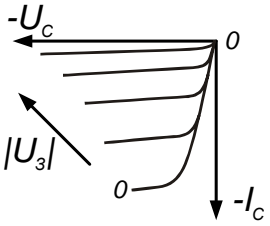
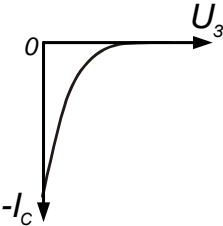

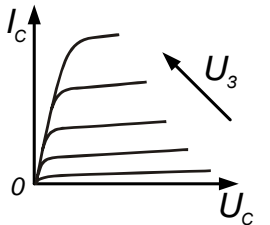
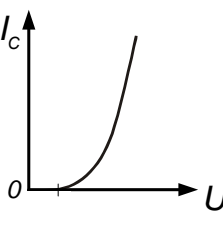

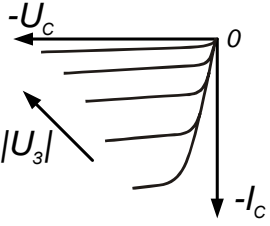
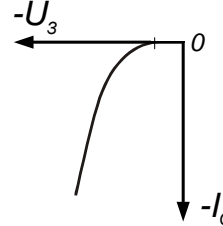
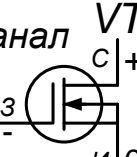
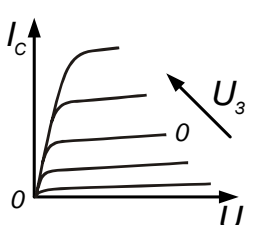
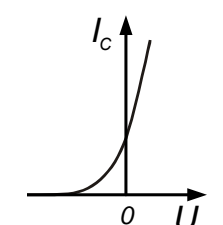
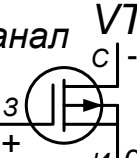
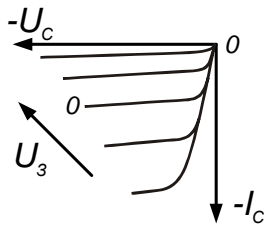
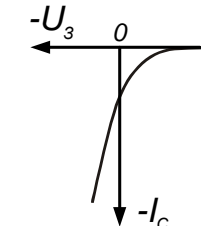
Рис. 1. Елементарне підсилювальне коло

Електронний прилад (ЕП) – керована резистивність, що регулює струм *I*. Різновид *ЕП* і його тип вибирають з урахуванням *енергетичних і спектральних характеристик сигналів*. Резистивні властивості *ЕП* домінують в обмеженому зверху діапазоні частот, характерному для кожного типу приладів. З підвищенням частоти починають виявлятися особливості фізичних процесів в *ЕП* і його конструкції, що додають йому, крім резистивних, ще і ємнісні властивості. Різновиди *ЕП*, що використовуються в підсилювальних каскадах наведено в табл.1. Тут же зазначені знаки полярностей напруг на електродах *ЕП* щодо *емітувального* електрода, при яких *ЕП* знаходиться в активному режимі та можливий лінійний режим роботи *ЕП*, а також представлено вид їхніх статичних *вольт-амперних характеристик (ВАХ): вхідних, вихідних і прохідних*.

Таблиця 1

Умовне позначення ЕП	Вольт-амперні характеристики		
	вхідна	вихідна	прохідна
	Узагальнений електронний прилад (електроди: емітувальний (Е), керувальний (К), збиральний (З))		
	Графік залежності: $I_K (U_K, U_Z)$	Графік залежності: $I_Z (U_K, U_Z)$	Графік залежності: $I_Z (U_K)$
Тріод VL 	Електронні лампи (електроди: катод (К), керувальна сітка (С), анод (А), екрануюча сітка (ЕС))		
	$I_C=0$ (при $U_K<0$)		
Пентод VL 	$I_C=0$ (при $U_K<0$)		
Промієвий тетрод VL 			
$n-p-n$ VT 	Біполярні транзистори (електроди: емітер (Е), база (Б), колектор (К))		
			
$p-n-p$ VT 			

Таблиця 1 (продовження)

Умовне позначення <i>ЕП</i>	Вольт-амперні характеристики		
	вхідна	вихідна	прохідна
Польові транзистори (електроди: витік (<i>В</i>), заслон (<i>З</i>), стік (<i>С</i>), підкладка (<i>П</i>))			
Польові транзистори з керуючим <i>p-n</i> переходом			
<p><i>n</i>-канал <i>VT</i></p> 	$I_3=0$ (при $U_3<0$)		
<p><i>p</i>-канал <i>VT</i></p> 	$I_3=0$ (при $U_3>0$)		
Польові транзистори з індукованим каналом			
<p><i>n</i>-канал <i>VT</i></p> 	$I_3=0$		
<p><i>p</i>-канал <i>VT</i></p> 	$I_3=0$		
Польові транзистори із вбудованим каналом			
<p><i>n</i>-канал <i>VT</i></p> 	$I_3=0$		
<p><i>p</i>-канал <i>VT</i></p> 	$I_3=0$		

Навантаження електронного приладу (H_{EP}) перетворює зміну струму у вихідний сигнал. Як правило, ним є напруга $U_{ВИХ}$, і лише у вихідних каскадах підсилення сигнал – це струм $I_{ВИХ}$, що збуджує кінцевий пристрій (навантаження споживача сигналу). Вибір навантаження EP визначається метою та спектральними характеристиками підсилюваних сигналів. На рис.2 представлені радіоелементи та їхні з'єднання, що знаходять використання в підсилювальних каскадах як навантаження електронних приладів.

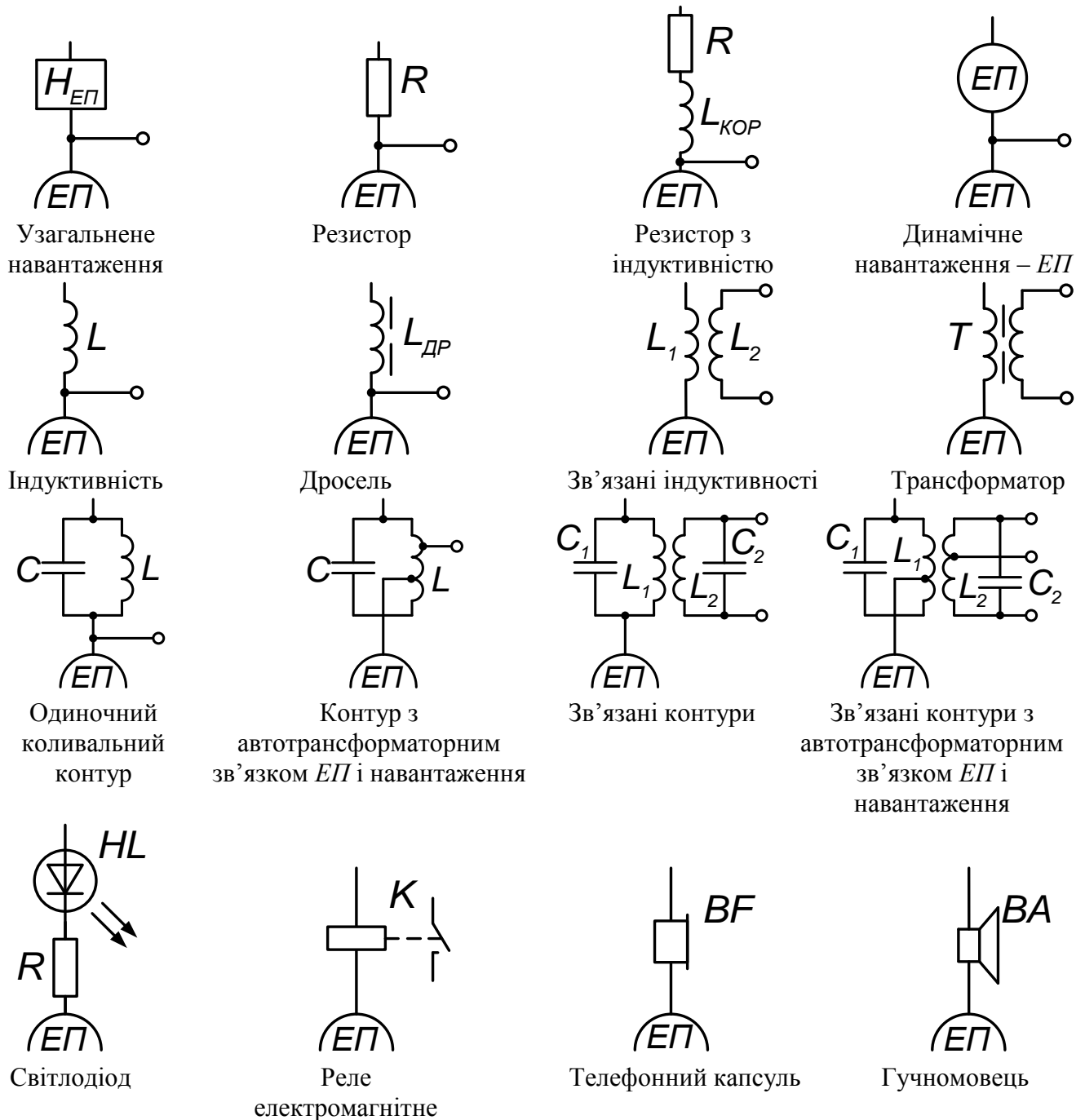


Рис. 2. Навантаження електронних приладів

Джерело живлення (ДЖ) – це джерело постійної напруги $U_{\text{ж}}$. Його енергія перетворюється в енергію вихідного сигналу. Величина $U_{\text{ж}}$ і полярність підключення джерела визначається величиною (рівнем) сигналу і вибором типу *ЕП*. При аналізі підсилювальних каскадів джерела живлення найчастіше представляють ідеальними джерелами напруги, оскільки внутрішній опір реальних джерел живлення малий.

До складу підсилювальних каскадів, поряд з основними, входять ще і допоміжні елементи. За їхньою допомогою задаються значення величин постійних напруг і струмів електродів *ЕП* при відсутності вхідного сигналу, тобто задається режим спокою підсилювального каскаду; забезпечується стабілізація цього режиму, здійснюється зв'язок із суміжними колами та розв'язка каскадів за колом живлення. До числа допоміжних елементів відносяться: блокуючі та розділові конденсатори – $C_{\text{БЛ}}$ і $C_{\text{Р}}$, резистивні подільники напруги – R_1 , R_2 , дроселі – $L_{\text{ДР}}$, трансформатори тощо. Фрагменти схем підсилювальних каскадів, що містять допоміжні елементи представлені на рис.3 і рис.4.

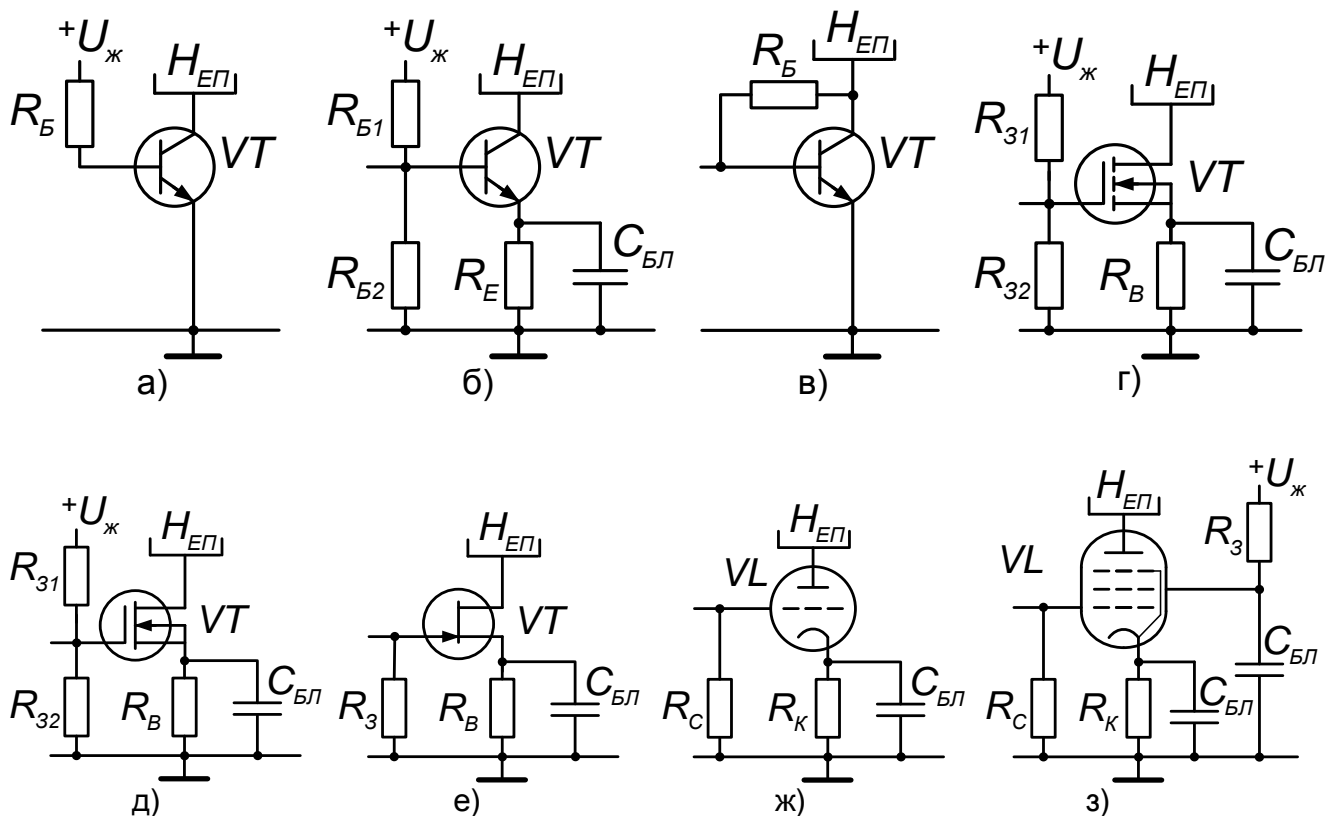


Рис.3. Схеми формування режиму спокою каскаду і його стабілізації:

- а) – в) каскади на біполярних транзисторах із спільним емітером,
- г) – д) каскади на польових транзисторах із спільним витоком,
- е) – з) каскади на електронних лампах із спільним катодом

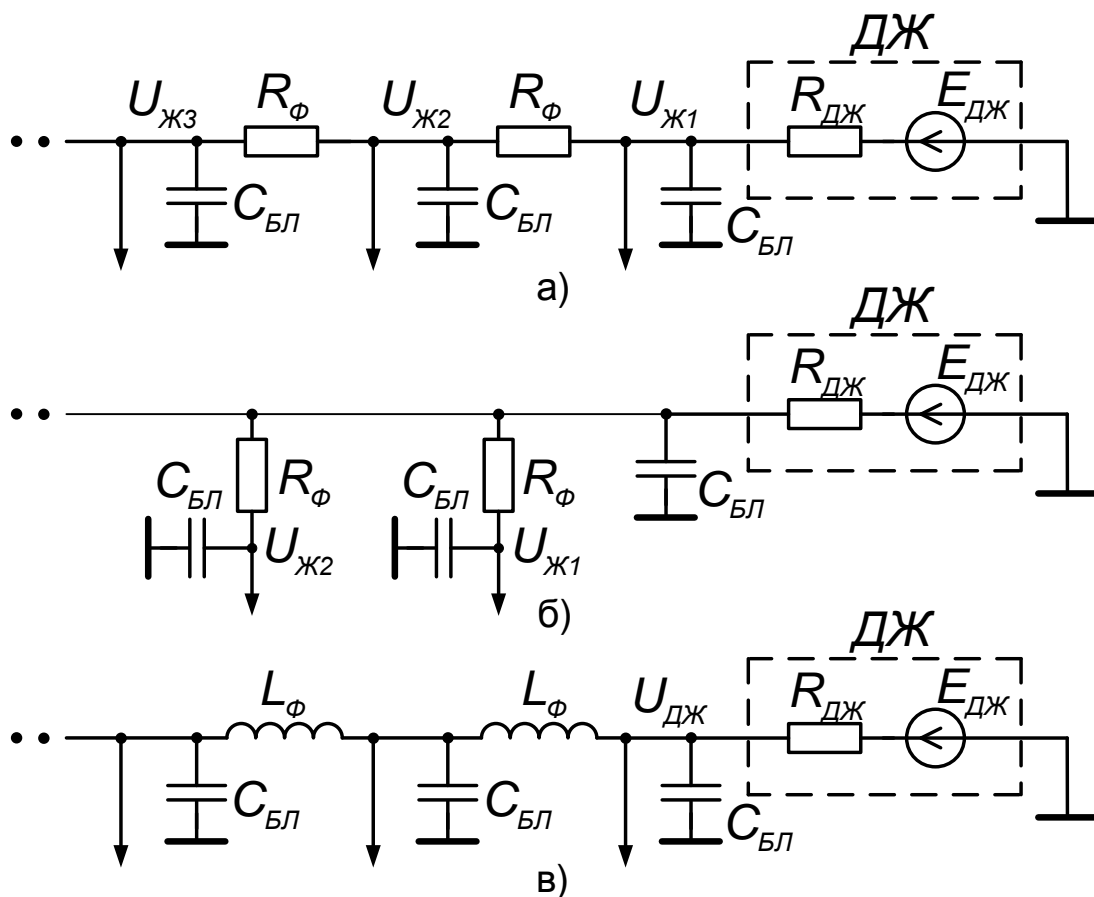


Рис.4. Схеми розв'язки каскадів за колом живлення:
а), б) резистивні (RC -фільтри низьких частот),
в) індуктивні (LC -фільтри низьких частот)

Завдання для самостійної роботи

1. Засвоїти принцип електронного підсилення. У робочому зошиті для самостійної роботи використовуючи рис.1 накреслити і запам'ятати узагальнену схему підсилювального кола (підсилювального каскаду).
2. Використовуючи таблицю 1 накреслити і запам'ятати умовні графічні позначення електронних приладів ($ЕП$), що застосовуються у підсилювачах. Указати знаки полярності напруг, що прикладаються до електродів $ЕП$ щодо емітувального електрода, при яких можливий лінійний режим роботи $ЕП$. Накреслити $ВАХ$ $ЕП$.
3. Використовуючи рис.2 накреслити і запам'ятати умовні графічні позначення радіоелементів, що застосовуються як навантаження $ЕП$.
4. Використовуючи рис.3 накреслити і запам'ятати схеми, що забезпечують формування і стабілізацію режиму спокою каскадів, виконаних на різних $ЕП$.
5. Використовуючи рис.4 накреслити і засвоїти схеми розв'язки підсилювальних каскадів за колом живлення.

Контрольні питання

1. В чому суть процесу підсилення сигналів? За яких умов підсилення називають лінійним?
2. Перелічіть основні складові елементарного підсилювального кола (каскада).
3. Поясніть, як відбувається процес підсилення сигналів?
4. Вкажіть основне призначення *ЕП* у підсилювальному каскаді. Перелічіть різновиди *ЕП*.
5. Укажіть призначення в підсилювальному каскаді навантаження *ЕП*. Перелічіть їх різновиди.
6. Укажіть призначення джерела живлення.
7. Укажіть призначення допоміжних елементів у підсилювачах.

2. Основні схеми підсилювальних каскадів

Для підсилення інформаційних сигналів у залежності від їхнього характеру і мети використання застосовують різні типи підсилювальних каскадів. Вкажемо основні з них. За способом підключення електродів до загального вузла пристрою розрізняють: схеми зі *спільним емітувальним електродом* (спільним емітером СЕ, спільним витоком СВ, спільним катодом СК); схеми зі *спільним збиральним електродом* (спільним колектором – СК, спільним стоком – СС; спільним анодом – СА); схеми зі *спільним керувальним електродом* (спільною базою – СБ, спільним затвором – СЗ, спільною сіткою – СС). Поняття „спільний електрод” у цих різновидах каскадів визначено для змінних складових напруг і струмів щодо *спільного вузла* (корпуса) схеми.

Крім трьох зазначених схем використовують також: схеми з *розділеним навантаженням*, *каскадні схеми*, *диференційні підсилювачі*, схеми зі *складеними транзисторами* тощо. Особливе місце займають *підсилювачі потужності* і каскади на *операційних підсилювачах*.

Розглянемо схемотехніку відзначених підсилювальних каскадів і вкажемо їхні основні властивості.

2.1. Каскади зі спільним емітувальним електродом

Ці підсилювальні кола одержали найбільше поширення в схемотехніці радіоелектронних пристроїв. Їм властиві: інверсія, тобто зміна полярності сигналу, і високий коефіцієнт підсилення, який може досягати декількох сотень, – коефіцієнт передачі сигналу за напругою. Вхідний опір каскаду визначається елементами в колі керувального електрода ЕП, його різновидом, типом і може досягати великої величини. Вихідний опір каскаду визначається, головним чином, опором навантаження електронного приладу. Узагальнена схема і приклади схем каскадів із спільним емітувальним електродом наведені на рис.5.

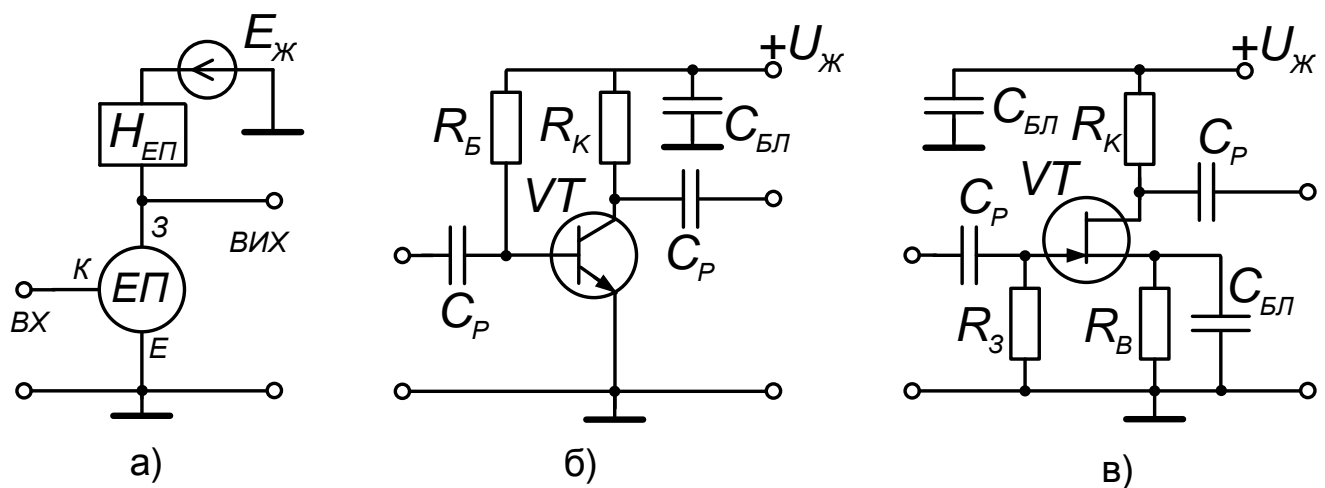


Рис.5. Схеми каскадів із спільним емітувальним електродом:

а) узагальнена схема,

- б) резисторний підсилювач на біполярному транзисторі,
в) резисторний підсилювач на польовому транзисторі,

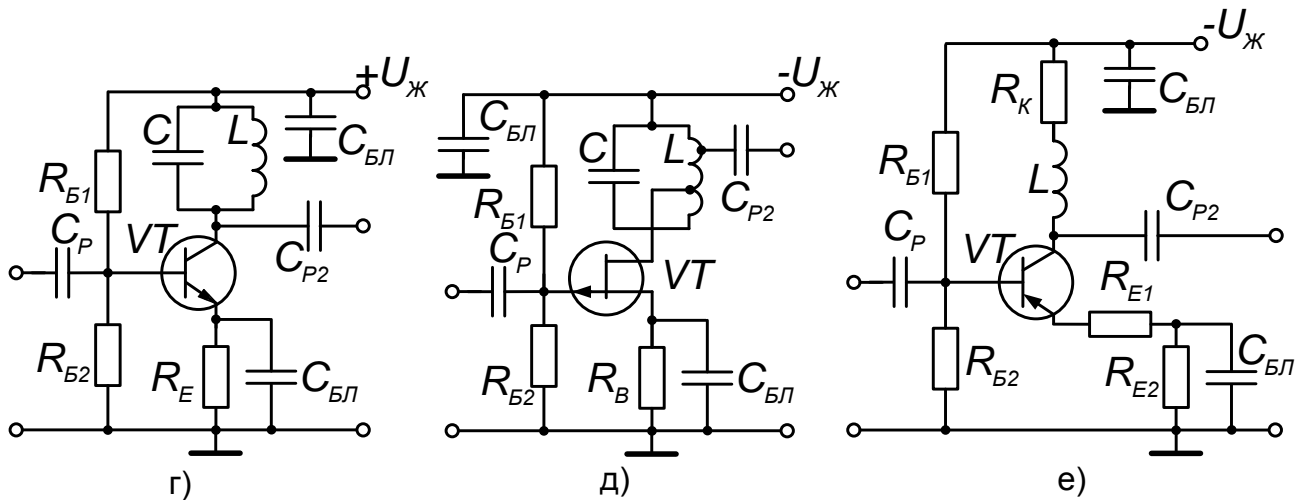


Рис.5. Схеми каскадів із спільним емітувальним електроном (продовження):

- г) резонансний підсилювач на біполярному транзисторі,
г) резонансний підсилювач на польовому транзисторі з автотрансформаторним зв'язком з коливальним контуром,
д) широкопasmовий підсилювач на біполярному транзисторі.

Завдання для самостійної роботи

1. Засвоїти властивості підсилювальних каскадів із спільним емітувальним електроном.
2. У робочому зошиті для самостійної роботи накреслити ряд схем таких каскадів використовуючи всі різновиди ЕП, що представлені в таблиці 1, різновиди навантажень ЕП, які неведені на рис.2, а також схеми формування режиму спокою ЕП, що показані на рис.3.

2.2. Каскади зі спільним збиральним електроном

Такі каскади не інвертують сигнал, а їхній коефіцієнт передачі сигналу за напругою близький до одиниці. Тому їх називають *повторювачами*. Високий вхідний і низький вихідний опір повторювачів визначили їх широке використання як вхідні, буферні і вихідні каскади радіоелектронних пристроїв. Глибокий негативний зворотний зв'язок, властивий повторювачам, ослабляє частотну залежність опору навантаження електронного приладу H_{EP} , тому найчастіше як навантаження H_{EP} використовують резистор. На рис.6 наведені узагальнена схема та приклади схем повторювачів.

Завдання для самостійної роботи

1. Засвоїти властивості підсилювальних каскадів із спільним збиральним електроном.

2. У робочому зошиті для самостійної роботи накреслити ряд схем таких каскадів використовуючи всі різновиди ЕП, що представлені в таблиці 1.

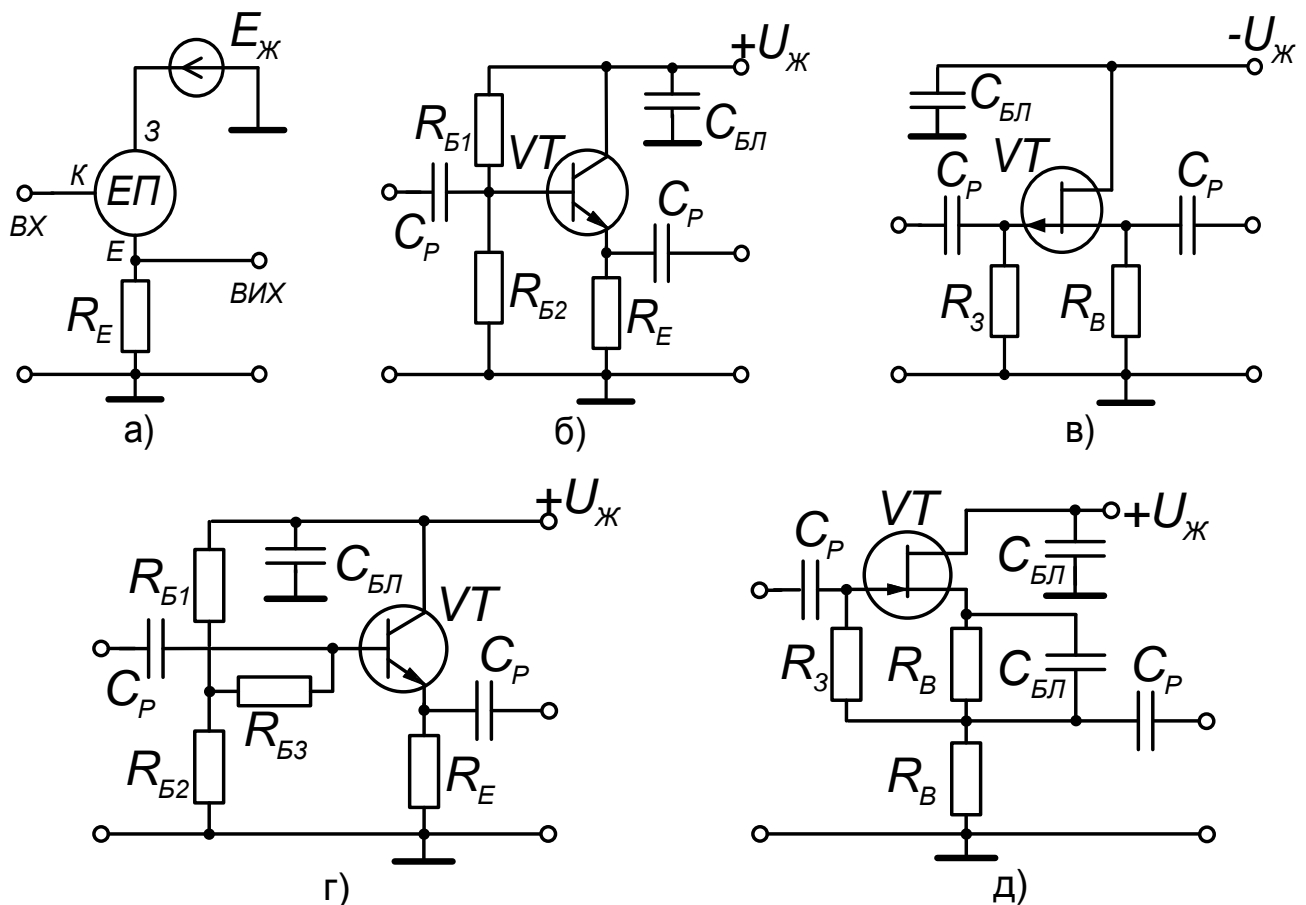


Рис.6. Схеми каскадів із спільним збиральним електродом (повторювачі):

- а) узагальнена схема,
- б) повторювач на біполярному транзисторі,
- в) повторювач на польовому транзисторі,
- г) повторювач на біполярному транзисторі з підвищеним входним опором,
- д) повторювач на польовому транзисторі з підвищеним входним опором

2.3. Каскади зі спільним керувальним електродом

Такі каскади мають низький входний опір, а вихідний опір і величина коефіцієнта підсилення такі ж, як і в каскадів, що зібрані за схемою зі спільним емітувальним електродом. Однак, на відміну від останніх вони не інвертують сигнал і мають ту перевагу, що з міжелектродних ємностей ЕП на їхню роботу впливає лише ємність між емітувальним і керувальним електродами ЕП $C_{ЕК}$. Це розширює частотний діапазон підсилення і визначає широке використання таких каскадів для підсилення високочастотних сигналів. Схеми каскадів із спільним керувальним електродом наведені на рис.7.

Завдання для самостійної роботи

1. Засвоїти властивості підсилювальних каскадів із спільним керувальним електродом.

2. У робочому зошиті для самостійної роботи накреслити ряд схем таких каскадів використовуючи різновиди ЕП, що представлені в таблиці 1.

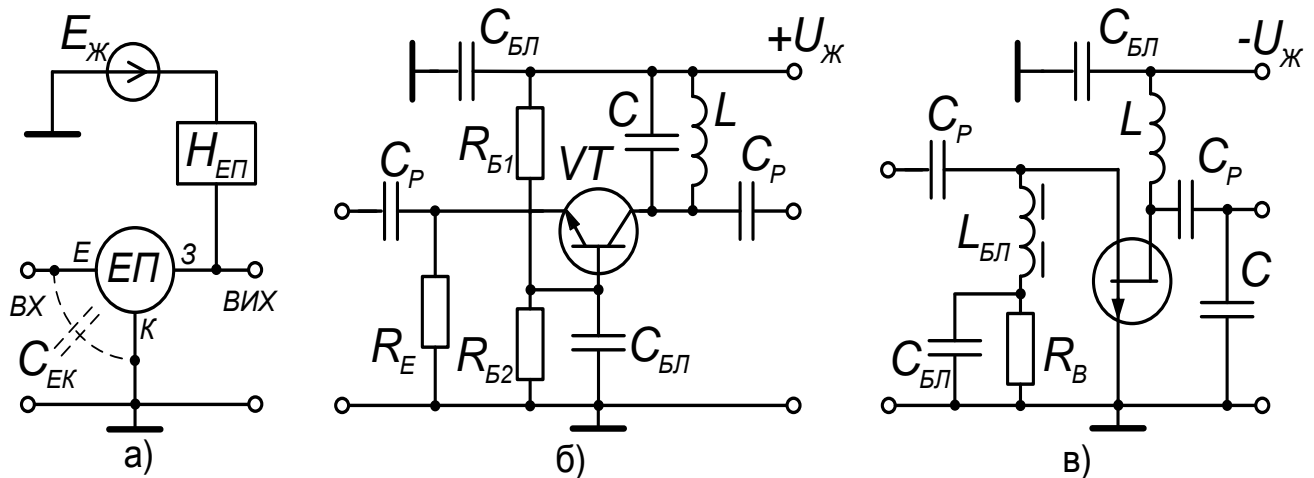


Рис.7. Схеми каскадів із спільним керувальним електродом:

- а) узагальнена схема каскаду,
- б) резонансний підсилювач на біполярному транзисторі,
- в) резонансний підсилювач на польовому транзисторі

2.4. Каскади з розділеним навантаженням

Ці підсилювальні каскади сполучають властивості інвертуючих каскадів (п. 2.1) і повторювачів (п. 2.2). Їх використовують для одержання двох копій сигналів, що відрізняються полярністю (знаком), і називають *фазоінверторами*. Їм властивий глибокий негативний зворотний зв'язок, тому, як і у повторювачів, у них в якості навантаження ЕП H_{EP} використовують резистори, а коефіцієнт передачі сигналу за напругою в емітувальному плечі близький до одиниці. Коефіцієнт передачі сигналу за напругою у збиральному плечі відрізняється від нього знаком і може мати ту ж величину. Вхідний опір каскаду може досягати високих значень, а вихідний – визначаються величинами опорів навантажень ЕП R_E і R_3 . Схеми каскадів з розділеним навантаженням наведені на рис.8.

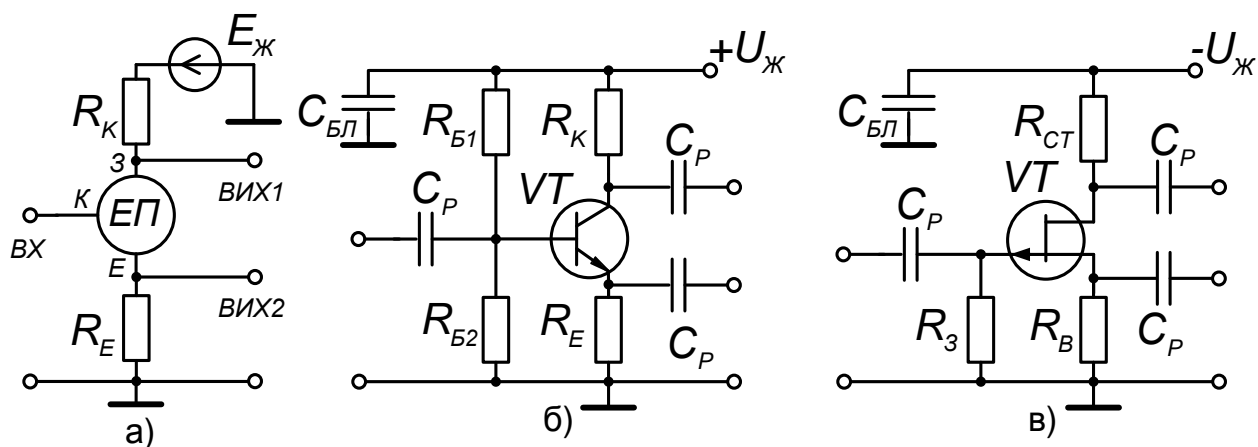


Рис.8. Схеми каскадів з розділеним навантаженням (фазоінверторів):

- а) узагальнена схема каскаду,
- б) фазоінвертор на біполярному транзисторі,
- в) фазоінвертор на польовому транзисторі

Завдання для самостійної роботи

1. Засвоїти властивості підсилювальних каскадів з розділеним навантаженням.
2. У робочому зошиті для самостійної роботи накреслити ряд схем таких каскадів використовуючи різновиди ЕП, що представлені в таблиці 1.

2.5. Каскодні підсилювачі

Каскодний підсилювач, узагальнена схема якого представлена на рис.9а, власне кажучи є модифікацією каскаду зі спільним емітувальним електродом (п.2.1. рис.5а). До його складу входять два електронних прилади: основний EP_1 , який ввімкнено за схемою зі спільним емітувальним електродом і допоміжний EP_2 , ввімкнений за схемою зі спільним керувальним електродом. Допоміжний EP_2 фактично виконує роль екрана, що розділяє основний EP_1 і його навантаження H_{EP} .

Таким чином, каскодна схема подібно тому, як і схема зі спільним емітувальним електродом може мати великий вхідний опір та високий коефіцієнт підсилення і, при цьому, як і схема зі спільним керувальним електродом, вона має мінімальну прохідну ємність. Каскодні схеми застосовують для підсилення високочастотних сигналів.

Схеми каскодних підсилювачів наведені на рис.9.

Завдання для самостійної роботи

1. Засвоїти властивості каскодних підсилювачів.
2. У робочому зошиті для самостійної роботи накреслити ряд схем таких каскадів використовуючи різновиди ЕП, представлених в таблиці 1, різновиди

навантажень $EП$, які наведено на рис.2 і схеми формування режиму спокою $EП$, що наведені на рис.3.

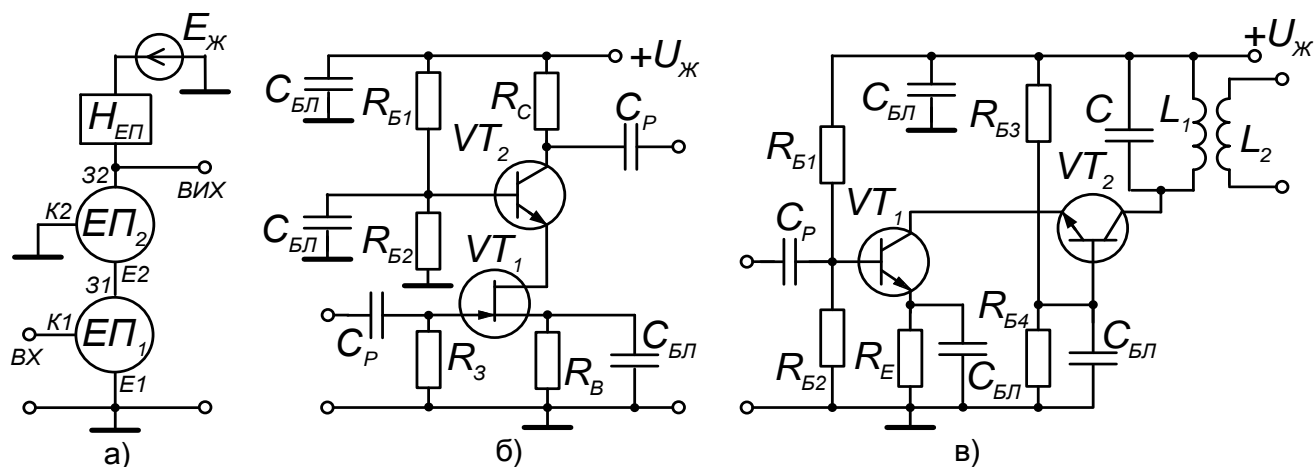


Рис.9. Схеми каскодних підсилювачів:

- а) узагальнена схема,
- б) резисторний каскодний підсилювач,
- в) резонансний каскодний підсилювач

2.6. Каскади зі складеними транзисторами

З'єднання двох транзисторів, що представлені на рис.10, імітують один транзистор з поліпшеними параметрами. Такі з'єднання називають *складеними транзисторами* і використовують у схемах, що працюють з великими струмами, наприклад, у вихідних каскадах підсилення потужності та у стабілізаторах напруги. У вхідних каскадах підсилювальних схем складені транзистори використовують, коли необхідно забезпечити великий вхідний опір. Схеми каскадів зі складеними транзисторами представлені в п. 2.7 і в п. 2.9.

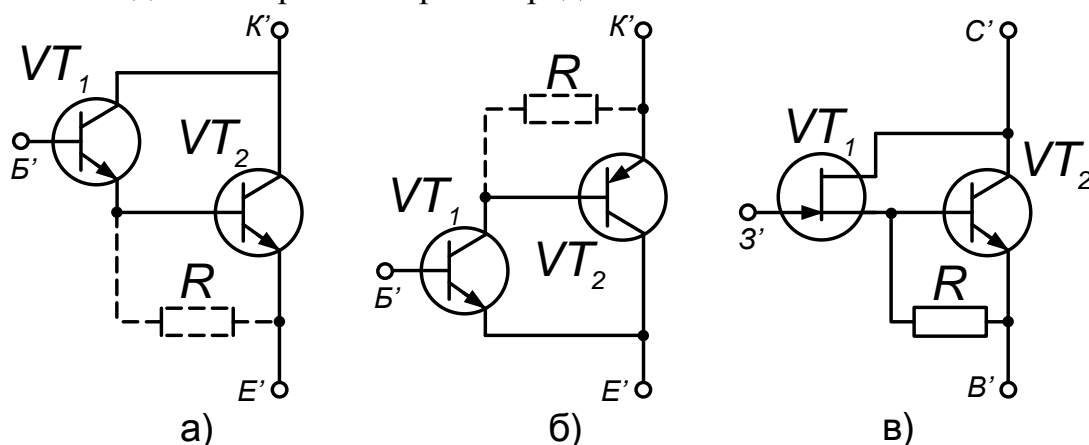


Рис.10. Складені транзистори:

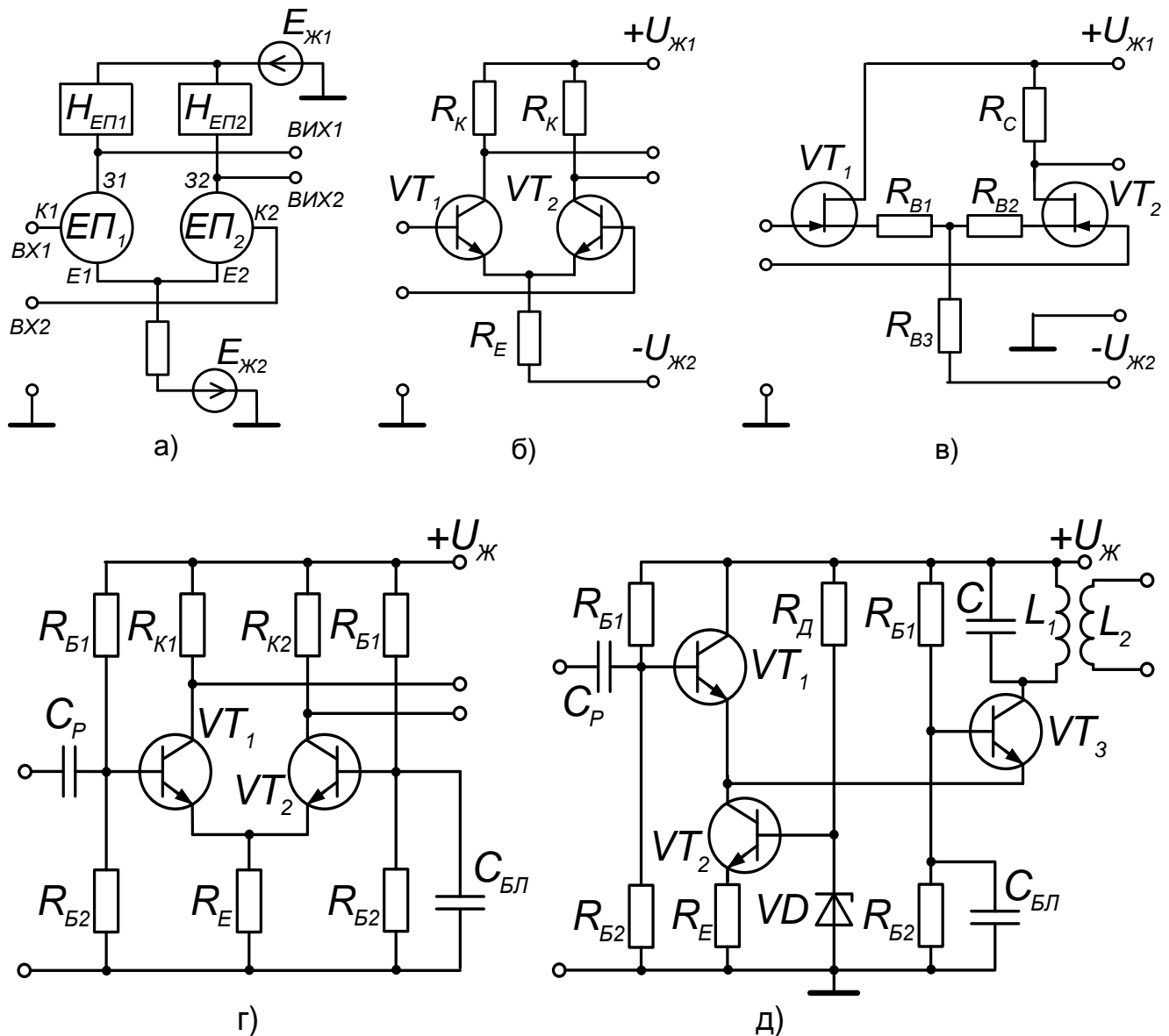
- а) комбінація біполярних транзисторів з однаковим типом провідності (пара Дарлінгтона),
- б) комбінація біполярних транзисторів з різними типами провідності (парадоксна пара),
- в) комбінація польового і біполярного транзисторів (пара Дарлінгтона)

Завдання для самостійної роботи

1. Засвоїти призначення і схемотехніку складених транзисторів.
2. У робочому зошиті для самостійної роботи накреслити схеми з'єднання транзисторів, що утворюють складені транзистори.

2.7. Диференційні каскади

Диференційний підсилювальний каскад має великий коефіцієнт підсилення різницевої вхідної напруги і нечуттєвий до його синфазної складової. При високій симетрії, яка легко досягається в інтегральних схемах, каскад нечуттєвий до змін температури, пульсацій напруги джерела живлення і синфазних сигналів наводки. У теперішній час диференційний підсилювач є основною схемною конфігурацією, на базі якої створюються численні підсилювальні схеми. Схеми диференційних каскадів наведені на рис.11.



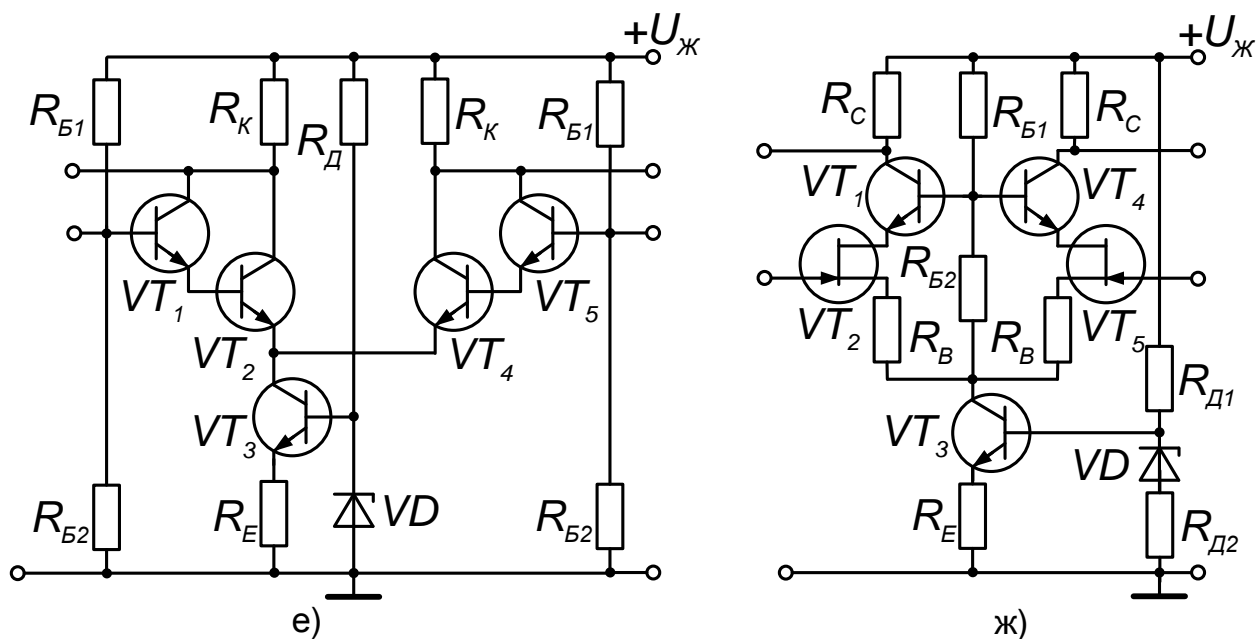


Рис.11. Схеми диференційних каскадів:

- а) узагальнена схема,
- б) симетричний диференційний підсилювач на біполярних транзисторах,
- в) несиметричний диференційний підсилювач на польових транзисторах,
- г) фазоінвертор на диференційному каскаді,
- г) резонансний підсилювач на диференційному каскаді,
- д), е) симетричні диференційні підсилювачі на складених транзисторах

Завдання для самостійної роботи

1. Засвоїти властивості диференційних підсилювальних каскадів.
2. У робочому зошиті для самостійної роботи накреслити ряд схем симетричних і несиметричних диференційних підсилювальних каскадів використовуючи різновиди транзисторів, навантажень H_{EP} і допоміжних елементів.

2.8. Каскади на операційних підсилювачах

Операційний підсилювач (ОП) – являє собою мікросхему високоякісного підсилювача постійного струму з диференційним входом. ОП має високий вхідний опір, низький вихідний опір, високий коефіцієнт передачі напруги різницевого сигналу. Завдяки своїй дешевизні та мініатюрності ОП знайшли широке застосування в схемотехніці сучасних радіоелектронних пристроїв. У лінійних каскадах з ОП завжди використовують глибокий зовнішній негативний зворотний зв'язок, що стабілізує характеристики схеми, так, що вони практично перестають залежати від параметрів ОП і визначаються тільки зовнішніми колами. На рис.12 наведені узагальнена схема та приклади схем каскадів з ОП.

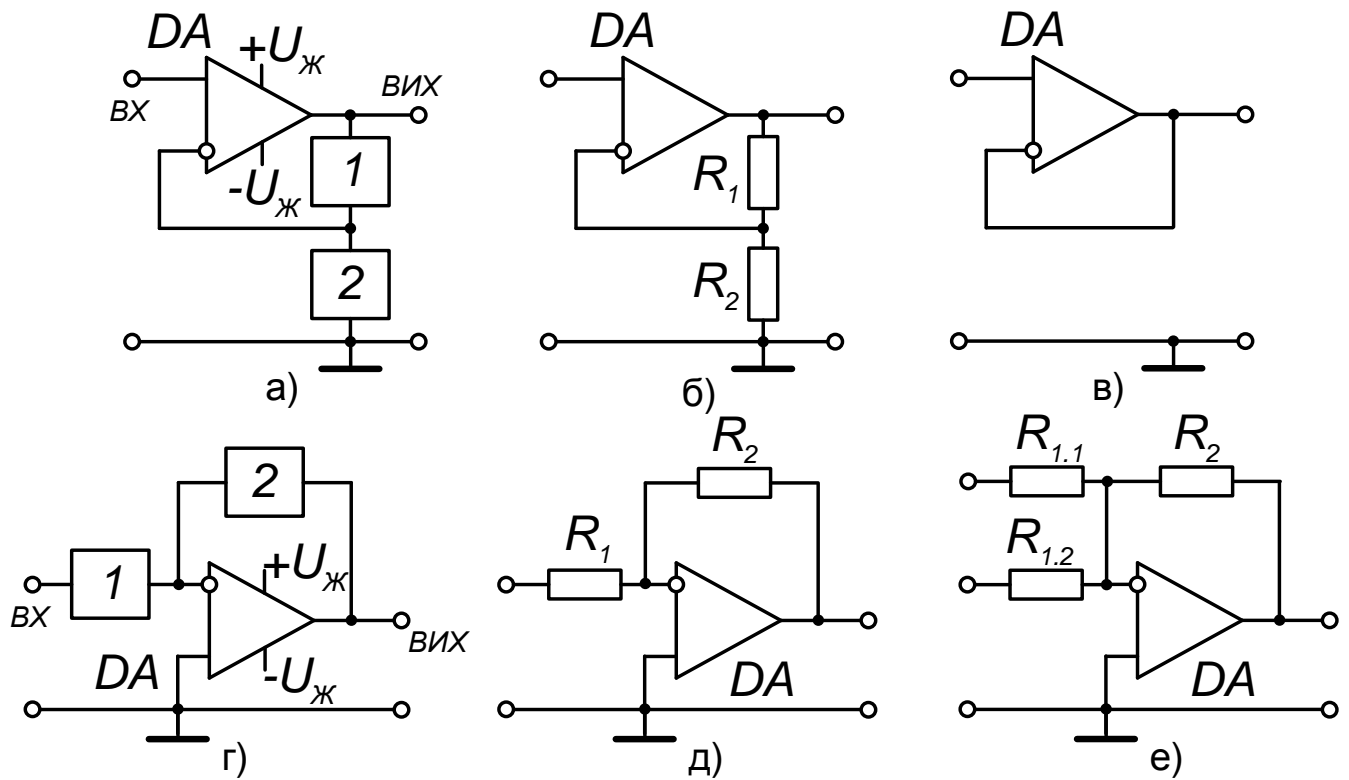
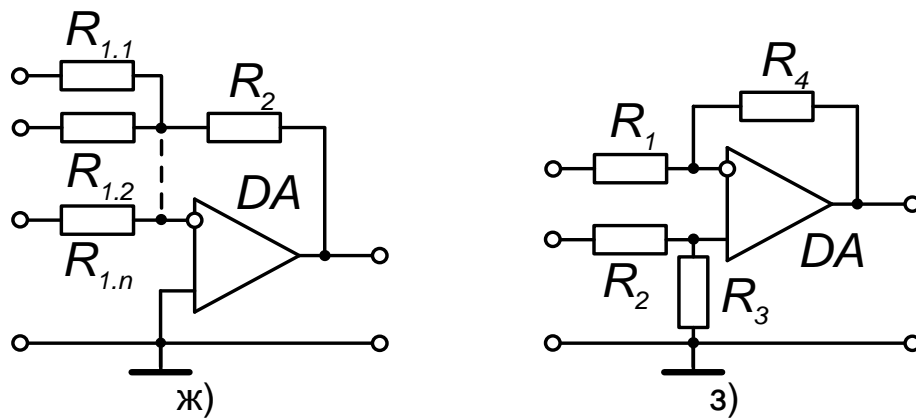


Рис.12. Схеми каскадів на операційних підсилювачах:
 а) узагальнена схема каскаду, що не інвертує сигнали,
 б) підсилювач на ОП, який не інвертує сигнали,
 в) повторювач на ОП,
 г) узагальнена схема каскаду, що інвертує сигнали,
 г) підсилювач на ОП, який інвертує сигнали,
 д) інвертуючий суматор на ОУ,



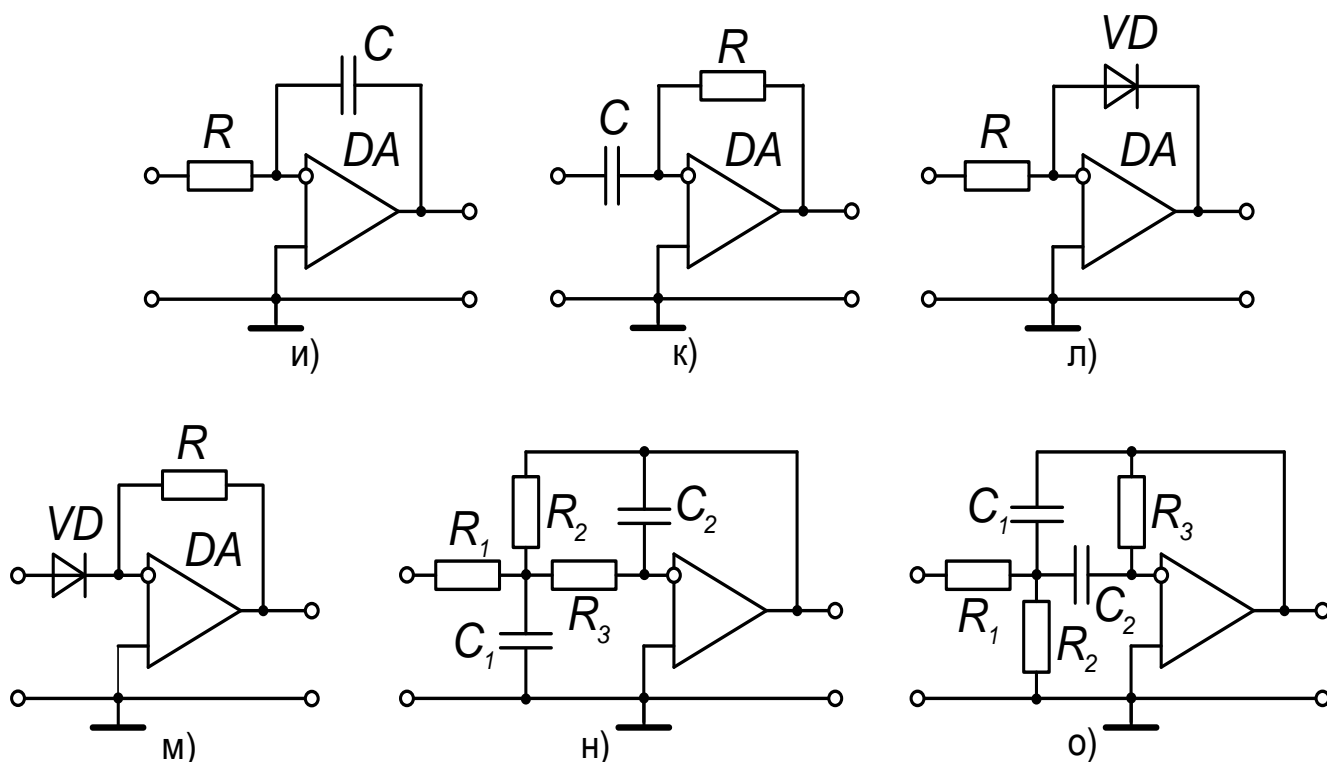


Рис.12. Схеми каскадів на операційних підсилювачах (продовження):

- е) інвертуючий суматор на ОП,
- є) підсилювач на ОП, що віднімає сигнали,
- ж) інтегруючий підсилювач на ОП,
- з) підсилювач, що диференціює, на ОП,
- и) підсилювач, що логарифмує, на ОП,
- і) підсилювач, що потенціює, на ОП,
- ї), й) активні RC-фільтри на ОП

Завдання для самостійної роботи

1. Засвоїти основні властивості операційних підсилювачів (ОП) і принцип їхнього використання в схемотехніці пристроїв підсилення й аналогової обробки сигналів.
2. У робочому зошиті для самостійної роботи накреслити ряд схем каскадів з ОП використовуючи приклади, представлені на рис.12.

2.9. Вихідні каскади підсилювачів потужності

Ці підсилювальні каскади забезпечують задану вихідну потужність в кінцевому навантаженні. При цьому, перетворюючи енергію джерела живлення в змінний струм у навантаженні, вони повинні забезпечувати високий ККД – відношення потужностей змінного струму в навантаженні та постійного струму, що подається від джерела живлення. Вихідна потужність і ККД – найважливіші параметри цих підсилювальних каскадів.

Основою схемотехніки підсилювачів потужності є каскади зі спільним емітувальним електродом і каскади зі спільним збиральним електродом (п.2.1,

п.2.2). У них використовують одиночні і складені *ЕП*, а також їхнє паралельне з'єднання та двотактні схеми вмикання *ЕП*.

Для збільшення ККД використовують економічні режими роботи *ЕП*, за яких частину періоду колювання струм *ЕП* дорівнює нулю. Розрізняють такі режими роботи *ЕП*: А, В, АВ, С тощо.

У режимі роботи А струм *ЕП* ніколи не дорівнює нулю, його постійна складова, яка дорівнює половині максимального струму *ЕП*, - велика, тому ККД схеми низький – менший 50%. Через це режим А в підсилювачах потужності використовують порівняно рідко.

У режимі роботи В струм *ЕП* протягом одного напівперіоду колювання відмінний від нуля, повторюючи підсилюваний сигнал, а протягом іншого напівперіоду – дорівнює нулю. У режимі роботи АВ струм *ЕП* відмінний від нуля протягом проміжку часу більшого, ніж половина періоду колювання. У режимі роботи С струм *ЕП* відмінний від нуля протягом проміжку часу меншого, ніж половина періоду колювання.

Очевидно, що в режимах роботи В, АВ і С з'являються сильні нелінійні спотворення сигналу. Ці спотворення в режимах роботи В і С зменшують, а в режимі роботи АВ усувають застосовуючи двотактні схеми включення *ЕП*. За такого включення два *ЕП* (чи дві групи *ЕП*) поперемінно працюють в активному режимі, по черзі підсилюючи різнополярні складові сигналу. За відсутності вхідного сигналу в режимах роботи В і С обоє *ЕП* закриті, тобто їхній струм спокою дорівнює нулю. У режимі роботи АВ за відсутності вхідного сигналу струм спокою малий. Тому, двотактні схеми в режимах роботи В, АВ і С мають істотно більш високий ККД у порівнянні з режимом А.

Режим А використовують для лінійного підсилення потужності як високочастотних так і низькочастотних сигналів. Приклади схем, у яких реалізується зазначений режим, наведені на рис.13.

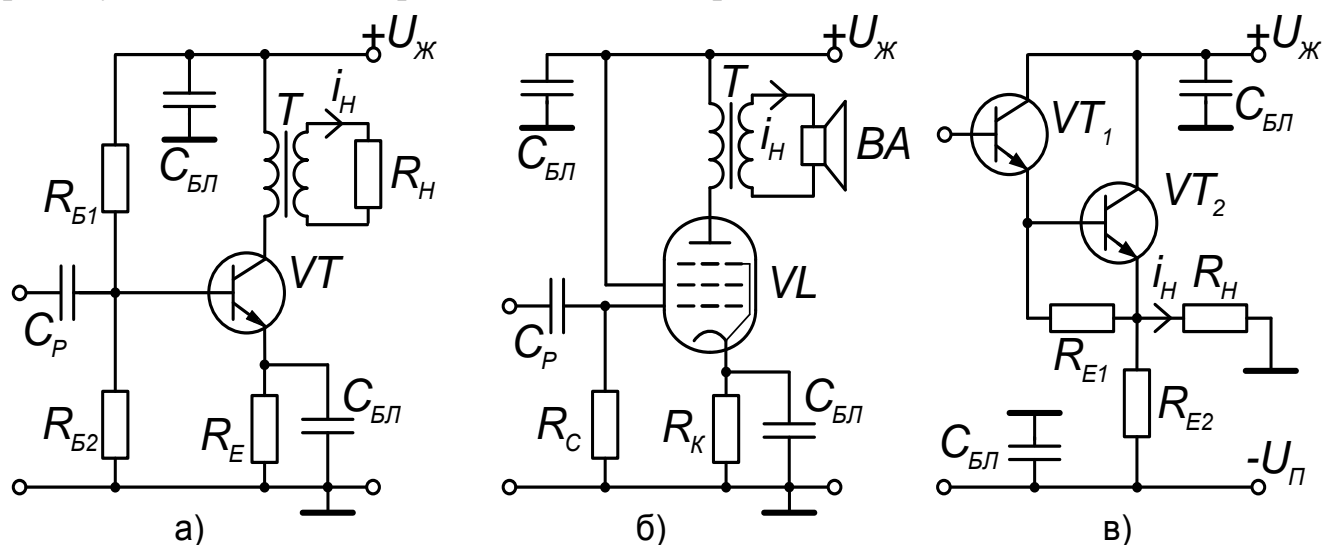


Рис.13. Схеми каскадів підсилення потужності в режимі роботи А:

- а) підсилювач потужності низькочастотних сигналів на біполярному транзисторі,
- б) підсилювач потужності низькочастотних сигналів на пентоді,
- в) повторювач на складених біполярних транзисторах

Двотактним режимам роботи В і С властивий злам передатної характеристики поблизу нуля, що призводить до появи перехідних нелінійних спотворень сигналів. При резонансному підсиленні височастотних сигналів (радіосигналів) ці спотворення усуваються фільтруючими властивостями резонаторів.

Приклади схем, у яких реалізується двотактний режим В, наведено на рис.14.

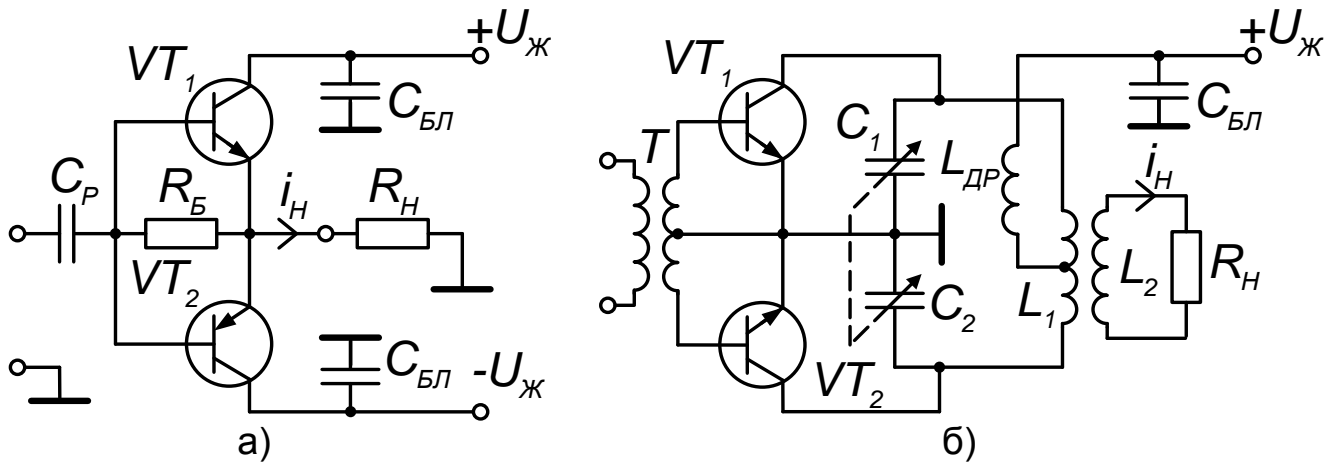


Рис.14. Схеми каскадів підсилення потужності в двотактному режимі роботи В:
а) двотактний повторювач на комплементарній парі біполярних транзисторів,
б) двотактний підсилювач потужності радіосигналів на біполярних транзисторах

У двотактному режимі роботи АВ до керувального електроду *ЕП* прикладаються напруги зсуву, що забезпечують невеликі початкові струми *ЕП*. За рахунок цього перехідні нелінійні спотворення в достатній мірі зменшуються. Цей режим знаходить саме широке застосування в підсилювачах потужності низькочастотних сигналів. Приклади схем підсилювачів, у яких реалізований режим роботи АВ, наведені на рис.15.

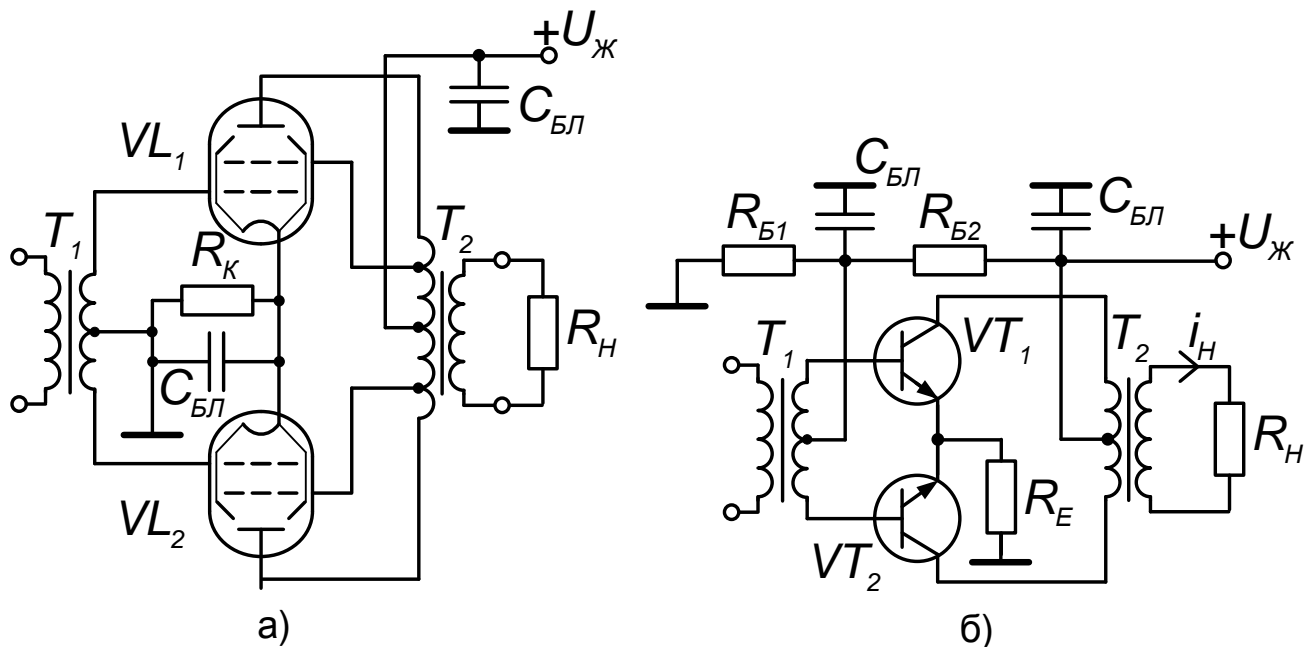
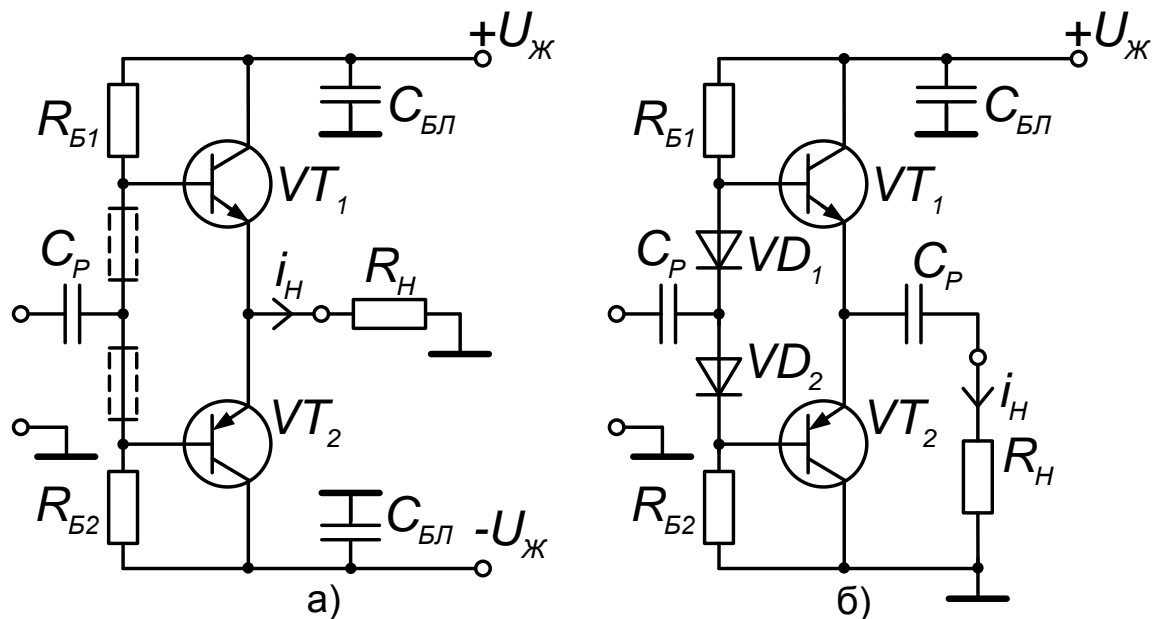


Рис.15. Схема двотактних трансформаторних підсилювачів потужності сигналів звукових частот у режимі роботи АВ:
а) підсилювач потужності на променевих тетрах,

б) підсилювач потужності на біполярних транзисторах

Підсилювачі потужності звукових частот мають особливості, які зумовлені: широким частотним і великим динамічним діапазонами підсилюваних сигналів; високими вимогами, що ставляться до рівня нелінійних спотворень; невеликими опорами акустичних перетворювачів (гучномовців), яким нерідко притаманні резонансні явища. Через малий вихідний опір підсилювачі потужності легко перевантажуються і виходять з ладу, тому в них використовують схемні рішення, що обмежують максимальну величину вихідного струму. Вихідні напруги і вихідні струми в цих підсилювачів є знакозмінними, тому їхні кінцеві каскади часто живлять від двополярних джерел живлення. Усі відзначені особливості зумовлюють схемотехнічну складність високоякісних підсилювачів потужності звукових частот.

Нині для підсилення акустичних сигналів найбільш розповсюдженими є каскади, основа яких – двотактний повторювач, який працює у режимі АВ, на комплементарних одиночних чи складених транзисторах, доповнений колами формування напруги зсуву та схемами обмеження вихідного струму. Приклади схем останніх каскадів підсилювачів потужності звукової частоти наведені на рис.16 – рис.18.



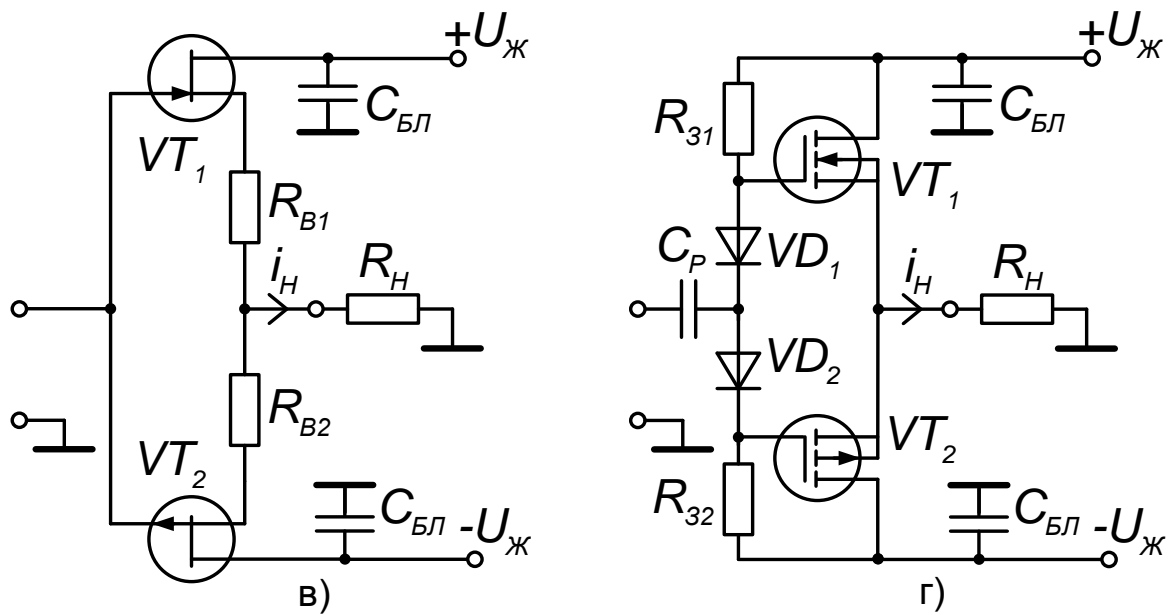


Рис.16. Схеми двотактних підсилювачів потужності на комплементарних транзисторах:
а), б) підсилювачі потужності на біполярних транзисторах,
в), г) підсилювачі потужності на польових транзисторах

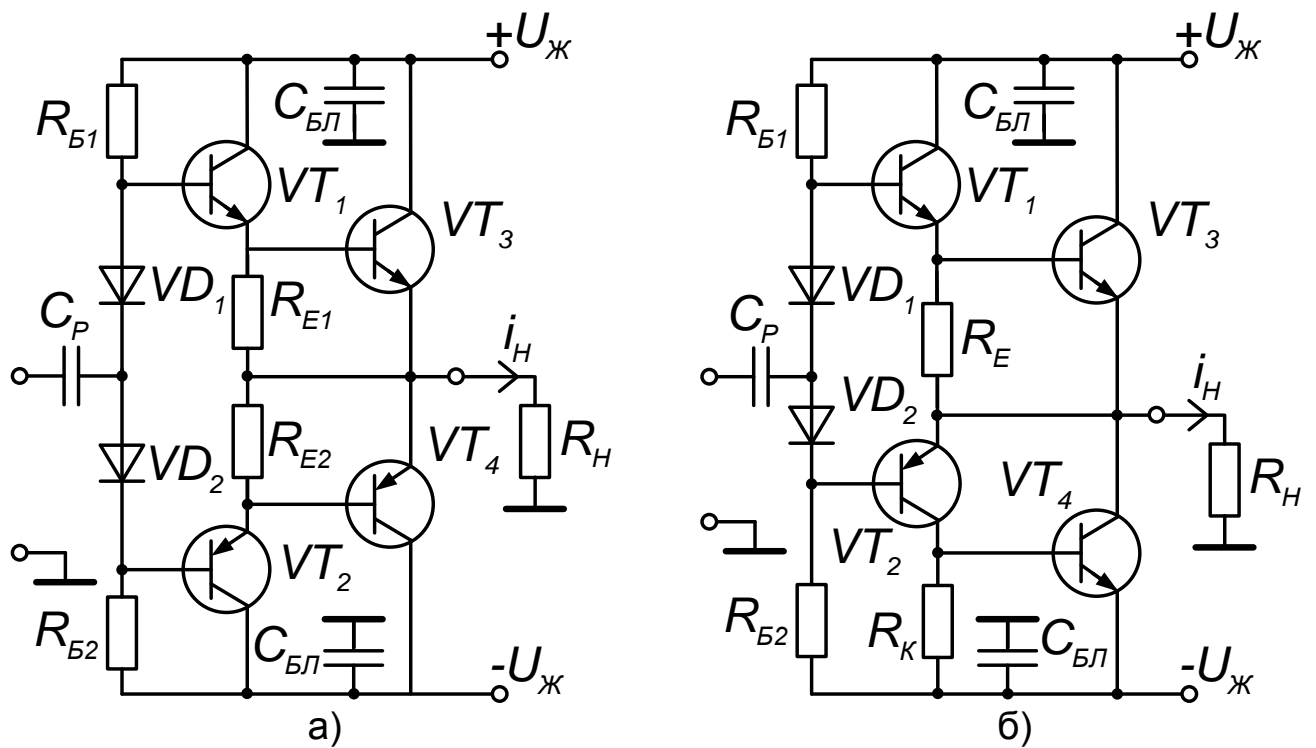


Рис.17. Схеми двотактних підсилювачів потужності на складених комплементарних транзисторах

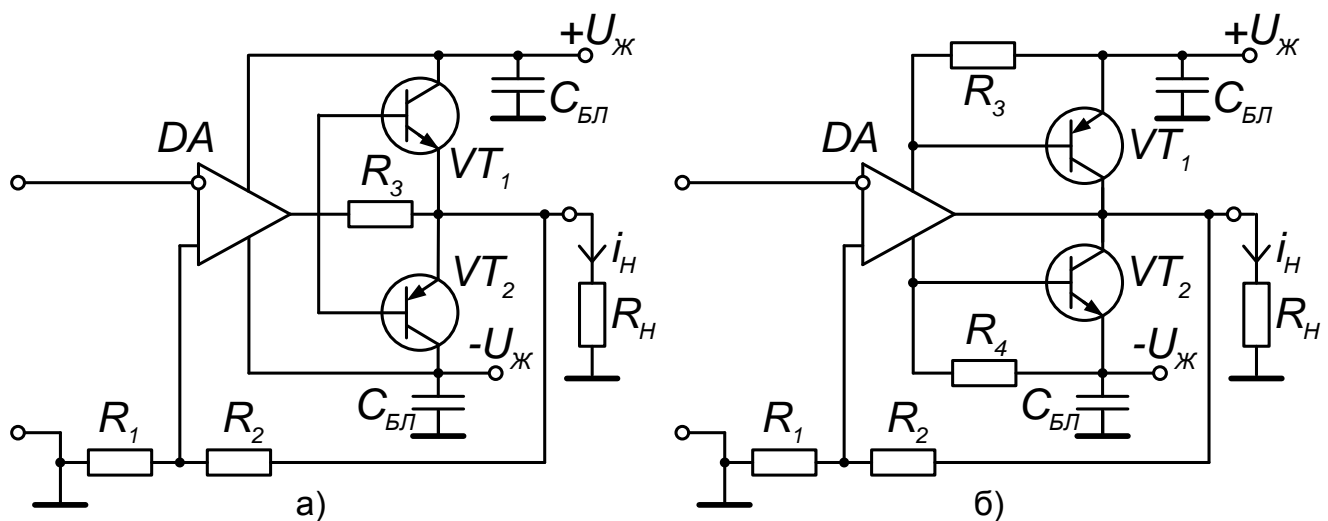


Рис.18. Схеми двотактних підсилювачів потужності на комплементарних транзисторах, що збуджуються операційними підсилювачами

Завдання для самостійної роботи

1. Засвоїти призначення та основні параметри каскадів підсилення потужності.
2. Засвоїти класифікацію режимів роботи *ЕП* у каскадах підсилення потужності.
3. Засвоїти особливості режиму роботи А. У робочому зошиті накреслити схеми транзисторного і лампового каскадів підсилення потужності в цьому режимі.
4. Засвоїти особливості режиму роботи В. У робочому зошиті накреслити схеми транзисторного і лампового резонансних каскадів підсилення потужності в цьому режимі.
5. Засвоїти особливості режиму роботи АВ. У робочому зошиті накреслити схеми транзисторного і лампового трансформаторних каскадів підсилення потужності в цьому режимі.
6. Засвоїти особливості підсилення потужності сигналів звукових частот. У робочому зошиті накреслити ряд схем безтрансформаторних двотактних каскадів підсилення потужності на комплементарних транзисторах.

3. Регулятори в підсилювачах

У підсилювачах різного призначення звичайно передбачають регулятори їхніх параметрів і характеристик.

3.1. Регулятори підсилення

Регулювання підсилення в заданих межах досягається або запровадженням згасання за допомогою резистивних подільників напруги, або за допомогою негативного зворотного зв'язку в підсилювальних каскадах. Варіанти схем регуляторів обох типів представлено на рис.19а та рис.19б.

У підсилювачах низької частоти звуковідтворюючих пристроїв нерідко використовують частотно-залежні регулятори гучності, які забезпечують при знижених рівнях гучності більш природнє відтворення сигналів, чим при звичайному регулюванні. Такі регулятори, що називаються тонкомпенсуючими, штучно піднімають спектральні складові нижніх і верхніх частот при загальному малому рівні звуку. Схеми тонкомпенсуючих регуляторів гучності наведено на рис.19в – рис.19г.

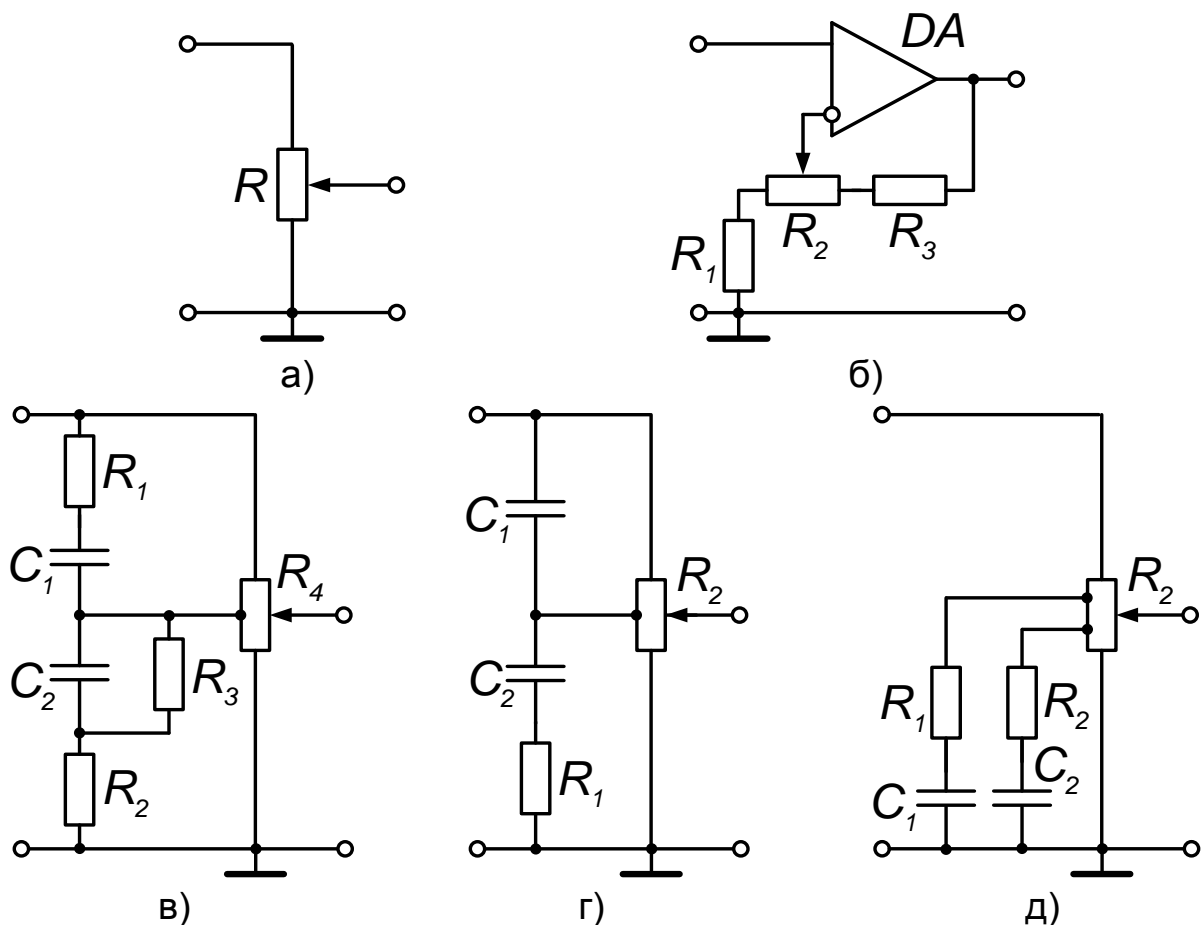


Рис.19. Схеми регуляторів підсилення:
а) пасивний регулятор підсилення,
б) активний регулятор підсилення,
в) – г) тонкомпенсуючі регулятори гучності

3.2. Регулятори частотних характеристик

Регулювання частотних характеристик у підсилювачах високої частоти радіоприймальних пристроїв звичайно здійснюють зміною резонансної частоти контурів за допомогою змінних конденсаторів (рис.20).

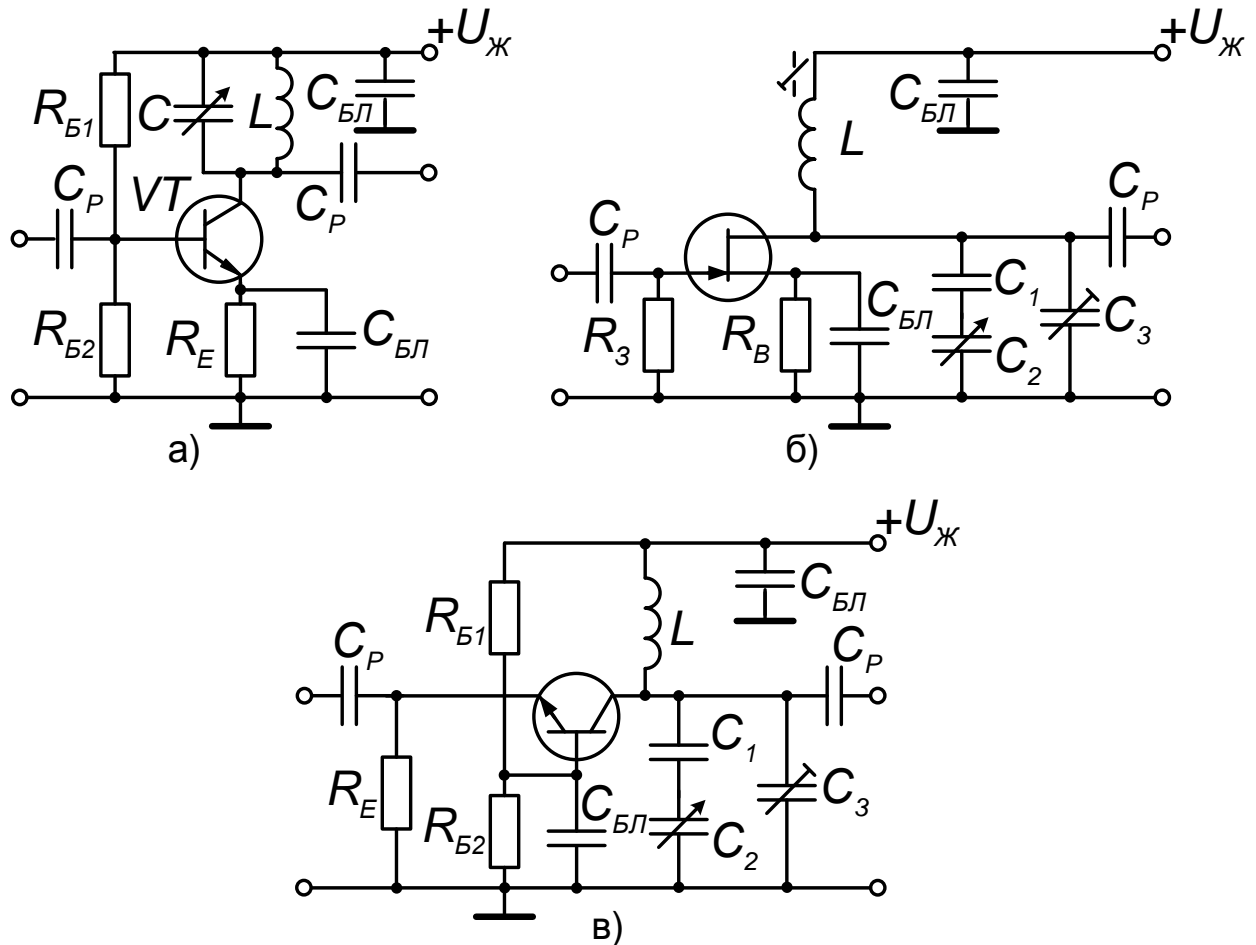


Рис.20. Схеми перестроєння частоти резонансних підсилювачів:
а), в) резонансні підсилювачі на біполярному транзисторі,
б) резонансний підсилювач на польовому транзисторі

У підсилювачах низької частоти звуковідтворюючих пристроїв регулювання частотної характеристики – регулювання тембру звуку здійснюють роздільним регулюванням рівня спектральних складових сигналів у певних частотних смугах. Для цього використовують RC-кола, які в пасивних регуляторах тембру діють як частотно-залежні подільники напруги, а в активних регуляторах тембру утворюють ланку частотно-залежного негативного зворотного зв'язку. Приклади схем пасивних частотних коректорів нижніх і верхніх частот і пасивного регулятора тембру наведено на рис.21. Приклади схем активних регуляторів тембру подано на рис.22а. У багатосмугових регуляторах тембру, так званих еквайзерах, використовують активні регульовані смугові фільтри, центральні частоти смуг котрих рознесені на певний інтервал частот, наприклад, на одну октаву. Приклад схеми еквайзера представлено на рис.22б.

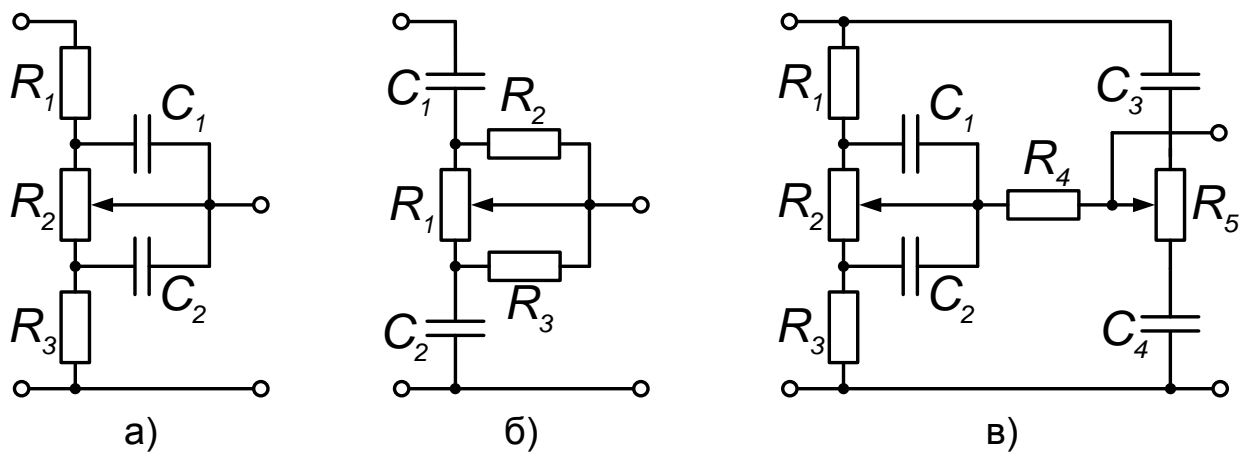


Рис.21. Схеми пасивних частотних коректорів:

- а) коректор нижніх частот,
- б) коректор верхніх частот,
- в) регулятор тембру

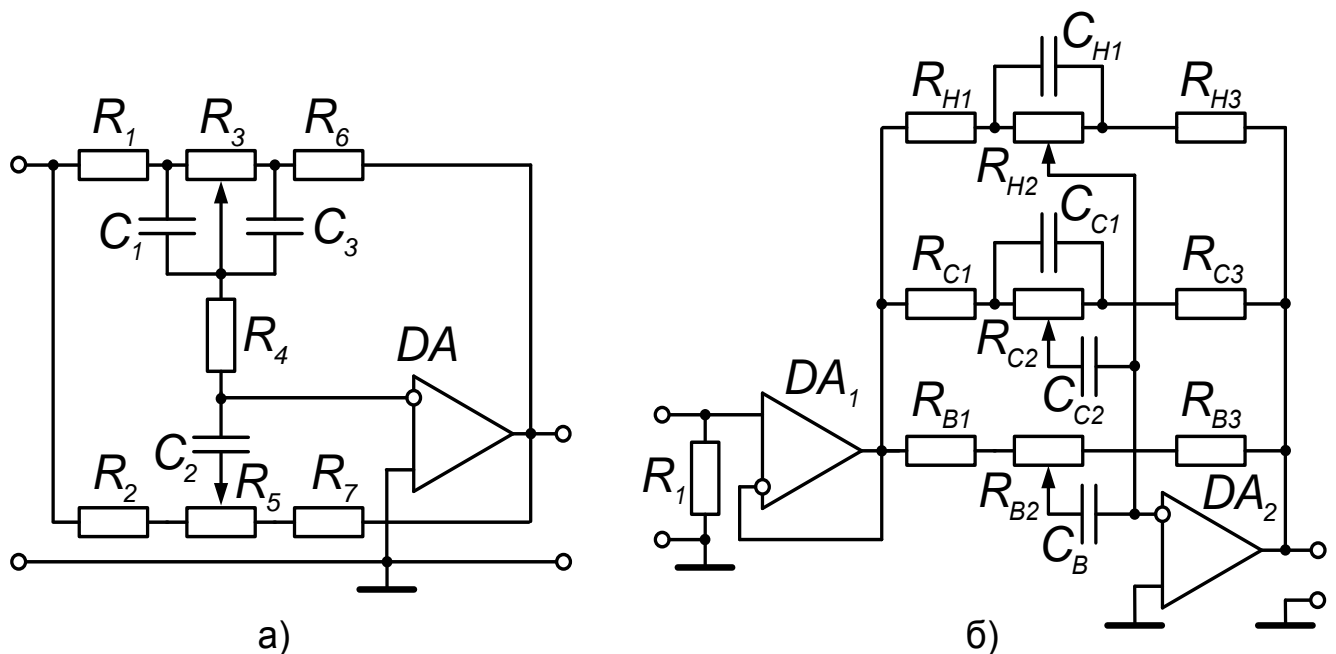


Рис.22. Схеми активних регуляторів тембру

Завдання для самостійної роботи

Засвоїти та запам'ятати способи регулювання підсилення і частотних характеристик у підсилювачах звукової частоти. Накреслити схеми пасивних регуляторів гучності і регуляторів тембру.

4. Зворотні зв'язки в підсилювачах

Зворотним зв'язком називають явище, при якому результати якого-небудь процесу впливають на його хід. У підсилювачах це вплив вихідного сигналу на процес підсилення або вплив напруг і струмів каскаду на його режим спокою. Саме отут знайшов широке використання *негативний зворотний зв'язок* (НЗЗ). За

глибокого НЗЗ стан системи зі зворотним зв'язком і її коефіцієнт передачі сигналу визначаються головним чином колом зворотного зв'язку, а вплив елементів кола прямої передачі сигналу, у тому числі *ЕП* каскаду, стає незначним.

У підсилювальних каскадах за допомогою НЗЗ забезпечують стабілізацію режиму спокою *ЕП*, наприклад, у схемах, наведених на рис.3б – рис.3є.

Позитивні властивості каскадів із спільним збиральним електродом (повторювачів), розглянутих у п.2.2, каскадів з розділеним навантаженням, розглянутих у п.2.4 і каскадів на ОП, розглянутих у п.2.9 обумовлені присутнім в них глибоким НЗЗ.

НЗЗ використовують у регуляторах підсилення і регуляторах частотних характеристик підсилювачів (п.3). У радіоприймальних пристроях за допомогою НЗЗ здійснюють автоматичне регулювання підсилення радіосигналів тощо.

У підсилювачах низької частоти звуковідтворюючих пристроїв НЗЗ використовують у каскадах підсилювачів-коректорів для формування таких частотних характеристик підсилювача, що усувають частотні спотворення сигналів, які зумовлені як частотними попередніми спотвореннями сигналів при їх записі на носій, так і частотними характеристиками голівок, що знімають сигнал з носія. Приклади схем підсилювачів-коректорів наведені на рис.23.

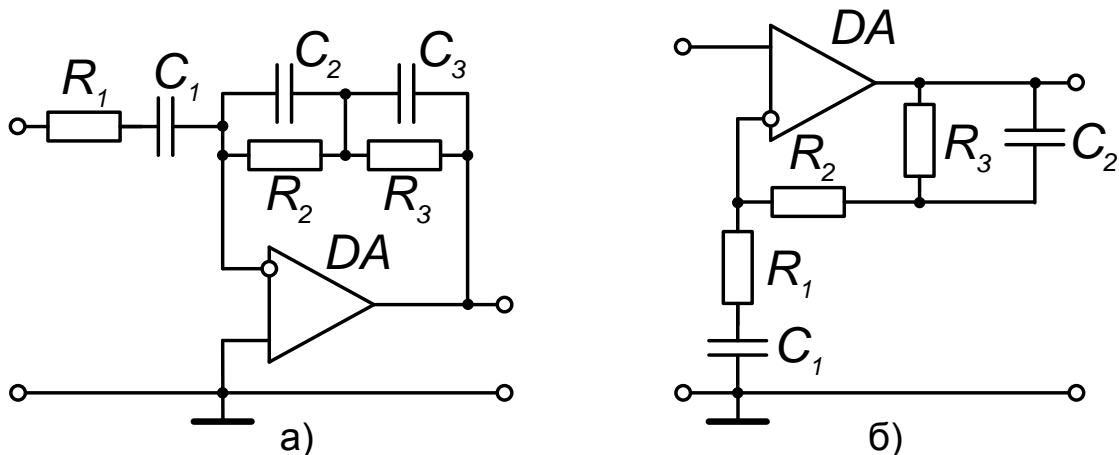


Рис.23.Схеми підсилювачів-коректорів частотних характеристик:

а) для програвачів грамплатівок,

б) для магнітофонів

Нарешті, НЗЗ є самим ефективним засобом стабілізації форми сигналів, тобто засобом боротьби зі спотвореннями сигналів як лінійними, так і нелінійними. Приклад схеми підсилювача, у якій одна з ланок НЗЗ забезпечує стабілізацію режиму спокою, а інша – стабілізацію форми сигналу, подано на рис.24.

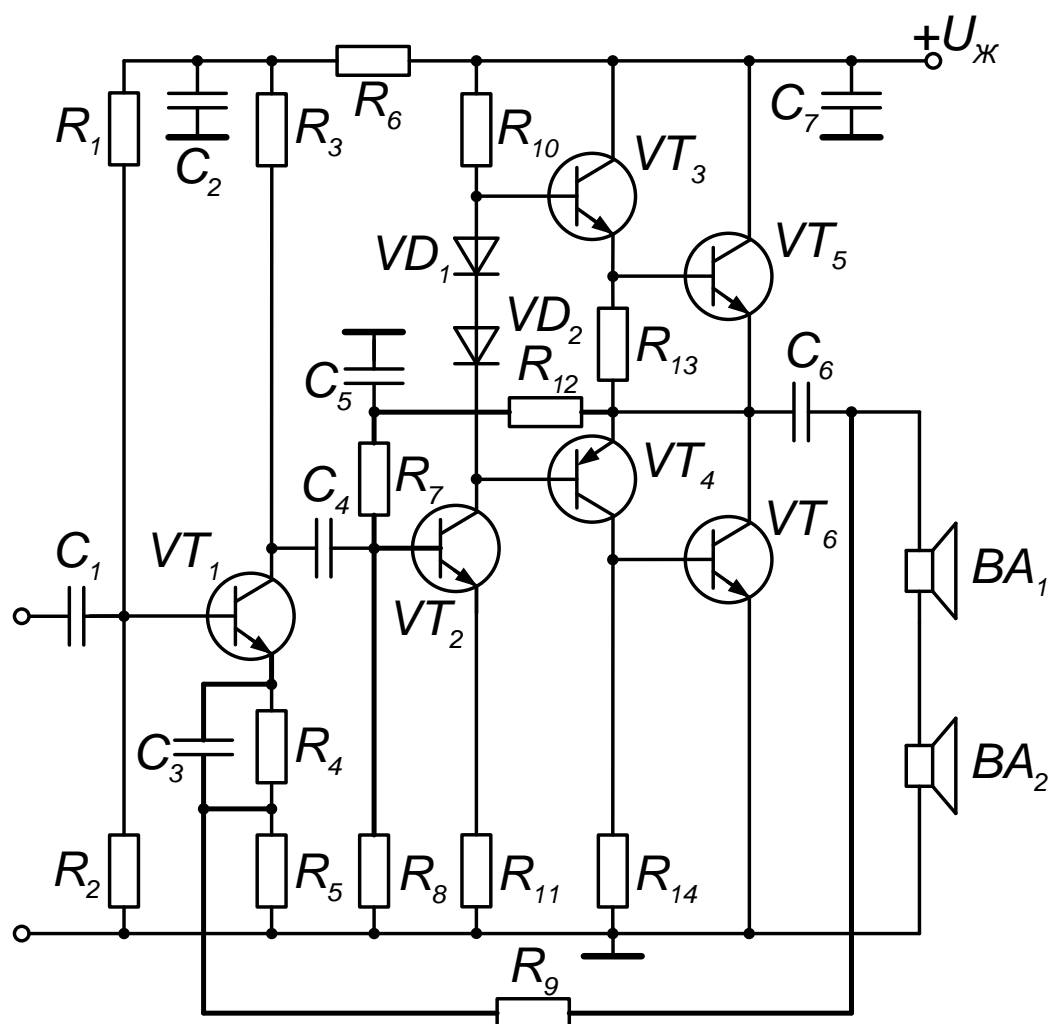


Рис.24. Схема підсилювача сигналів звукової частоти, охопленого НЗЗ.

Завдання для самостійної роботи

1. Засвоїти поняття *зворотний зв'язок*. Засвоїти та запам'ятати з якою метою використовується *негативних зворотних зв'язків* (НЗЗ) у підсилювачах. Розглянути принципову схему підсилювача, представлену на рис.24. Накреслити її, визначити в ній кількість каскадів, їхній різновид і призначення кожного елемента схеми. Вказати елементи, що забезпечують НЗЗ у підсилювачі.

2. Накреслити на листі формату А4 функційну і принципову схеми підсилювача звукової частоти, до складу якого входять: тонкомпенсуючий регулятор гучності; попередній підсилювач; регулятор тембру; двокаскадний передкінцевий підсилювач і підсилювач потужності (двотактний повторювач на комплементарній парі складених транзисторів), які охоплені НЗЗ, що стабілізує режим спокою і форму сигналу; акустична система; джерело живлення, до складу якого входять силовий трансформатор, випрямляч і стабілізатор напруги компенсаційного типу.

Список літератури

1. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс). Учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 1999. – 768 с
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем.- М.: Мир, 1983.- 512 с., ил.
3. Хорвиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х томах. Пер с англ. – М.:Мир, 1983. – Т 1. 598 с., ил.
4. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике: Пер с нем. – М.: Мир, 1991. – 446 с., ил.
5. Справочник по радиоэлектронным устройствам: в 2-х томах. Под ред. Д.П. Линде. – М.: Энергия, 1978. – 440 с., ил.- (Радиоэлектроника).
6. Чеботарёв В.И. Теоретические основы радиотехники. Часть 1: Учебн. пособие. – Харьков: ХГУ, 1989. – 100 с.
7. Чеботарёв В.И. Теоретические основы радиотехники. Часть 2: Учебн. пособие. – Харьков: ХГУ, 1990. – 104 с.

Зміст

стор.

1. Склад підсилювальних каскадів.....	3
2. Основні схеми підсилювальних каскадів.....	10
2.1. Каскади зі спільним емітувальним електродом	11
2.2. Каскади зі спільним збиральним електродом.....	12
2.3. Каскади зі спільним керувальним електродом.....	13
2.4. Каскади з розділеним навантаженням.....	14
2.5. Каскодні підсилювачі.....	15
2.6. Каскади зі складеними транзисторами.....	16
2.7. Диференційні каскади.....	17
2.8. Каскади на операційних підсилювачах.....	18
2.9. Вихідні каскади підсилювачів потужності.....	20
3. Регулятори в підсилювачах.....	25
3.1. Регулятори підсилення.....	26
3.2. Регулятори частотних характеристик.....	26
4. Зворотні зв'язки в підсилювачах.....	28
Список літератури.....	31

Навчальне видання

Чеботарьов Вадим Іванович
Ляховський Анатолій Федорович
Думін Олександр Миколайович

Схемотехніка підсилювальних каскадів

Редактор І. Ю. Агаркова
Коректор О. В. Гавриленко
Комп'ютерна верстка Н. В. Аксьонова
Макет обкладинки І. М. Дончик

Підписано до друку 15.01.04. Формат 60х84/16
Обл.-вид. 3,75. Розумів. друк. арк. 3,49. Тираж 300 прим.

61077, Харків, майдан Свободи, 4, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
організаційно-видавничий відділ НМЦ

Надруковано ПП Азамаєв В. Р.
Харків, вул. Героїв праці, 17