

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем

І.І. БЕХ, С.М. ЛЕВИТСЬКИЙ

**навчальний посібник
для проведення практичних занять
з курсу**

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА

для студентів спеціальності
Е6 "Прикладна фізика та наноматеріали"
факультету радіофізики електроніки та комп'ютерних систем

2-е видання

УДК [621.37/39+621.382.2/.3+621.377] : 004

ББК 32.852 : 32.973.2я73

Л36

Рецензенти:

доктор фіз.-мат. наук, професор Анісімов Ігор Олексійович,
канд. фіз.-мат. наук Кравченко Олексій Євгенович

*Рекомендовано до друку вченою радою
факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем
(протокол № 4 від 27 листопада 2025 року)*

Бех І.І., Левитський С.М.

Л36 РАДІОЕЛЕКТРОНІКА: Навчальний посібник для проведення практичних занять. – 2-е вид., перероблене та доповнене; – Київ : Видавнича лабораторія факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2025. – 96 с.

Навчальний посібник адресовано у першу здобувачам освіти за спеціальністю Е6 "Прикладна фізика та наноматеріали" для самостійної роботи при вивченні обов'язкової навчальної дисципліни "Радіoeлектроніка". Посібник створено як для полегшення засвоєння матеріалу, так і для сприяння розвитку практичних навичок проведення розрахунків радіoeлектронних схем і пристроїв. Він також буде корисним і викладачам при підготовці до занять, і фахівцям, які бажають поновити свої знання з радіoeлектроніки.

УДК [621.37/39+621.382.2/.3+621.377] : 004

ББК 32.852 : 32.973.2я73

© І.І. Бех, С.М. Левитський, 2025

© Видавнича лабораторія радіофізичного факультету
Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	5
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ДОМАШНІХ ЗАВДАНЬ.....	6
1. ДЕЯКІ ЗАДАЧІ З ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ.....	8
1.1. Проходження електричних сигналів через RC-ділник.....	8
1.2. Часткове шунтування коливального контуру активним опором.....	9
1.3. Подільник напруг.....	11
2. ВИПРЯМЛЯЧІ І СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ.....	12
2.1. Схеми випрямлячів.....	12
2.1.1. Однопівперіодний випрямляч.....	12
2.1.2. Двопівперіодний випрямляч.....	13
2.1.3. Мостова схема.....	13
2.2. Ємнісний фільтр.....	14
2.3. Параметричний стабілізатор напруги.....	14
3. ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПАРАМЕТРИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ.....	17
3.1. Характеристики і параметри транзистора увімкненого за схемою зі спільним емітером (СЕ).....	17
3.1.1. Вибір робочої точки на графіках характеристик транзистора.....	17
3.1.2. Визначення h_E -параметрів транзистора у статичному режимі.....	18
3.2. Параметри транзистора, увімкненого за схемою зі спільною базою.....	19
3.3. Динамічний режим роботи транзистора.....	19
3.3.1. Статична та динамічна прохідні характеристика транзистора.....	20
4. ПІДСИЛЮВАЧІ НА ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРАХ.....	22
4.1. Розрахунок елементів схеми підсилювача на польовому транзисторі.....	22
4.2. Визначення коефіцієнту підсилення.....	23
4.3. Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) підсилювача на польовому транзисторі.....	23
5. ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК (ЗЗ) У ПІДСИЛЮВАЧАХ.....	25
5.1. Послідовний зворотний зв'язок за напругою.....	25
5.2. Стійкість багатокаскадного підсилювача, охопленого негативним (на середніх частотах) ЗЗ.....	25
5.3. Паралельний зворотний зв'язок за напругою.....	27
6. ПІДСИЛЮВАЧІ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ.....	28
6.1. Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі як лінійний чотириполюсник. Параметри каскаду.....	28
6.2. Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі, охоплений паралельним негативним зворотним зв'язком.....	28
6.3. Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі, охоплений послідовним негативним зворотним зв'язком.....	29
6.4. Коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача на біполярних транзисторах.....	30
7. ЧАСТОТНІ ВЛАСТИВОСТІ ПІДСИЛЮВАЧІВ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ.....	31
7.1. Частотні властивості біполярного транзистора.....	31
7.2. Еквівалентна схема підсилювача на біполярному транзисторі в області високих частот.....	32
7.3. Амплітудно-частотна характеристика підсилювача на біполярному транзисторі в області високих частот.....	33
8. ПІДСИЛЮВАЧІ МІНЛИВОЇ НАПРУГИ (ПМН).....	34
8.1. Підсилювач мінливої напруги із зсувом рівня постійної напруги на виході.....	34
8.2. Струмове дзеркало.....	34
8.3. Диференціальний підсилювач.....	35
9. ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ (ОП).....	37
9.1. Основні схеми увімкнення операційного підсилювача.....	37
9.1.1. Підсилювач, що не інвертує фазу сигналу (синфазний підсилювач).....	37
9.1.2. Підсилювач, що інвертує фазу сигналу (протифазний підсилювач).....	38
9.1.3. Підсилювач із диференціальним входом (диференціальний підсилювач).....	38
9.2. Вплив зворотного зв'язку за напругою на властивості підсилювальних каскадів на операційному підсилювачі.....	39
9.2.1. Вплив послідовного негативного зворотного зв'язку за напругою на коефіцієнт підсилення підсилювача.....	39
9.2.2. Вплив паралельного негативного зворотного зв'язку за напругою на коефіцієнт підсилення підсилювача.....	39
9.2.3. Вплив негативного зворотного зв'язку за напругою на вихідний опір підсилювача.....	40
9.3. Вплив синфазного сигналу на коефіцієнт підсилення підсилювача.....	40
10. ПРИСТРОЇ АНАЛОГОВОГО ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ.....	42
10.1. Схеми додавання.....	42
10.1.1. Суматор, що інвертує (протифазний суматор).....	42

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА. НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК ДЛЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

10.1.2. Протифазний суматор із масштабними коефіцієнтами вхідних напруг.....	42
10.1.3. Схема додавання-віднімання.....	43
10.2. Схеми інтегрування та диференціювання.....	43
10.2.1. Схема інтегрування на операційному підсилювачі.....	43
10.2.2. Схема диференціювання на операційному підсилювачі.....	44
10.3. Логарифмічні схеми.....	44
10.3.1. Логарифмічний перетворювач (схема логарифмування).....	44
10.3.2. Антилогарифмічний перетворювач (схема піднесення до степеня).....	45
11. РЕЗОНАНСНІ ПІДСИЛЮВАЧІ.....	46
11.1. Резонансний підсилювач на біполярному транзисторі з безпосереднім увімкненням коливального контуру в коло колектора.....	46
11.2. Резонансний підсилювач з автотрансформаторним увімкненням контуру в коло колектора.....	47
11.3. Резонансний підсилювач з каскодним увімкненням біполярних транзисторів.....	48
11.4. Резонансний підсилювач потужності.....	50
12. АВТОГЕНЕРАТОРИ.....	51
12.1. LC-автогенератор з паралельним живленням.....	51
12.2. Вплив інерційності біполярного транзистора на частоту генерації автогенератора.....	52
12.3. Усталена амплітуда коливань на виході автогенератора.....	52
12.4. RC-автогенератор.....	53
13. ІМПУЛЬСНІ СХЕМИ.....	54
13.1. Автоколивальний мультивібратор.....	54
13.2. Затриманий (очікувальний) мультивібратор з колекторно-базовими зв'язками.....	55
13.3. Затриманий мультивібратор з емітерним зв'язком.....	56
13.4. Тригер.....	57
14. ПРОХОДЖЕННЯ СИГНАЛІВ У НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ.....	58
14.1. Нелінійні спотворення сигналів.....	58
14.2. Амплітудна модуляція.....	58
14.3. Перетворення частоти.....	59
14.4. Детектування амплітудно-модульованого сигналу.....	59
15. ЕЛЕМЕНТИ РАДІОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ.....	62
15.1. Підсилювач високої частоти (робота у діапазоні частот).....	62
15.2. Дзеркальний канал супергетеродинного радіоприймача.....	62
15.3. Частотна дискримінація модульованого сигналу.....	63
15.4. Ослаблення за сусіднім каналом.....	64
ГРАФІКИ ВХІДНИХ ТА ВИХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕЯКИХ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ.....	66
ВАРІАНТИ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ.....	73
Практичне заняття 1.....	73
Практичне заняття 2.....	75
Практичне заняття 3.....	76
Практичне заняття 4.....	77
Практичне заняття 5.....	78
Практичне заняття 6.....	80
Практичне заняття 7.....	81
Практичне заняття 8.....	82
Практичне заняття 9.....	83
Практичне заняття 10.....	85
Практичне заняття 11.....	87
Практичне заняття 12.....	89
Практичне заняття 13.....	90
Практичне заняття 14.....	92
Практичне заняття 15.....	94
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	95
НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ.....	96

ПЕРЕДМОВА

У сучасному світі досягнення радіоелектроніки знайшли широке застосування в різних галузях науки та техніки, залишаючись актуальними й надалі. Тому володіння базовими знаннями з радіоелектроніки є невід'ємною складовою успішної роботи сучасного спеціаліста у науковій чи виробничій сферах.

Для ефективного засвоєння знань важливо не лише опанувати теоретичний матеріал, але й навчитися застосовувати його на практиці, що передбачає вирішення конкретних задач, пов'язаних із вибором схем, а також проведення розрахунків основних радіоелектронних пристроїв.

Даний навчальний посібник створений відповідно до програми курсу "Радіоелектроніка", що є обов'язковою складовою освітньої підготовки студентів спеціальності Е6 "Прикладна фізика та наноматеріали". Курс викладається на факультеті радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем для студентів другого курсу у четвертому семестрі, охоплюючи 56 годин лекцій та 28 годин практичних занять. Посібник має на меті полегшити студентам засвоєння матеріалу курсу й сприяти розвитку практичних навичок у вирішенні задач і розрахунках радіоелектронних схем.

Посібник поділено на 15 розділів, кожен із яких охоплює окремі теми або взаємопов'язані питання курсу. У розділах наведено задачі, які студенти виконують як обов'язкові домашні завдання, а також методичні рекомендації для їх розв'язання. Більшість завдань містять контрольні питання, які можна використовувати для самоперевірки та закріплення вивченого матеріалу. Наприкінці посібника розміщено довідковий розділ із графіками характеристик деяких напівпровідникових транзисторів, необхідних для розв'язання задач.

Автор із вдячністю прийме конструктивні зауваження щодо посібника, які допоможуть покращити викладання цієї навчальної дисципліни.

Ігор БЕХ.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ДОМАШНІХ ЗАВДАНЬ

1. Домашні завдання пишуться на подвійних листках із зошита, або на аркушах формату А4. Якщо виходить більше чотирьох сторінок, другий подвійний листок вкладається у перший і сторінки нумеруються. Так само слід нумерувати сторінки аркушів формату А4.
2. Праворуч або ліворуч кожної сторінки слід залишати вільне поле шириною 25-30 мм для нотаток викладача.
3. У заголовку роботи вказується:
 - прізвище та ініціали здобувача освіти;
 - номер академічної групи;
 - номер варіанту;
 - черговий номер і тема домашнього завдання.
4. Умова задачі наводиться повністю, у стовпчик виписуються початкові дані для відповідного варіанту.
5. Початкові та проміжні величини мають бути позначені літерами, що не повторюються (за необхідності з індексом).
6. Схеми акуратно викреслюються під лінійку олівцем або ручкою. Всі елементи на схемі мають бути позначені відповідно до прийнятих в умові та розрахунках. Наприклад, R_C , C_1 , R_{B2} тощо.
7. Розв'язання розбивається на окремі пункти, зміст яких пишеться повністю, наприклад:
Знаходимо величину струму колектора транзистора I_K .
8. Формули мають складатися принаймні із чотирьох членів і містити:
 - позначення шуканої величини;
 - вираз для неї "у літерах";
 - вираз для шуканої величини із підставленими числовими значеннями;
 - остаточний результат із вказанням розмірності.
9. Розмірність пишеться без дужок, у третьому члені розмірність не вказується. Наприклад:

$$h_{22E} \approx \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KE}} \right|_{I_B = \text{const}} = \frac{31 - 26}{6 - 2} = 125 \text{ мСм.}$$

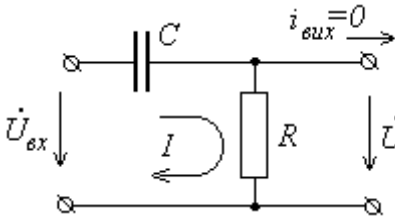
10. Розмірність величин слід вказувати у системі СІ, остаточний результат бажано наводити у одиницях, які подають його максимально компактно, наприклад, 1,87 кОм а не 1870 Ом, або 230 пФ, а не $2,3 \cdot 10^{-10}$ Ф.

11. Враховуючи наближеність початкових даних (наприклад, параметрів транзистора), точність обчислень завищувати не доцільно. Практична точність більшості технічних розрахунків не перевищує трьох значущих цифр, а більша кількість значущих цифр не має сенсу.
12. До усіх нетривіальних та неочевидних місць розрахунку слід надавати короткі письмові коментарі та пояснення. Без цього не можна розраховувати на високу оцінку.
13. Графіки та характеристики мають бути викреслені на міліметровому папері або на папері у клітинку та вклеєні у роботу у відповідних місцях. Допускається побудова графіків та характеристик засобами обчислювальної техніки та їх друкування.
14. Результати обчислень, знаходження яких є метою розрахунку, бажано підкреслити одинарною або подвійною лінією.
15. При порушенні зазначених вище правил оформлення домашніх завдань оцінка за роботу знижуватиметься.

1. ДЕЯКІ ЗАДАЧІ З ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

На першому практичному занятті розглядаються пасивні електричні кола, які знайдуть застосування у подальших задачах.

1.1. Проходження електричних сигналів через RC-дільник.



Запропонована до розгляду схема є послідовним з'єднанням конденсатора з ємністю C і резистора з опором R ; $\tau = R \cdot C$ - стала часу RC -кола.

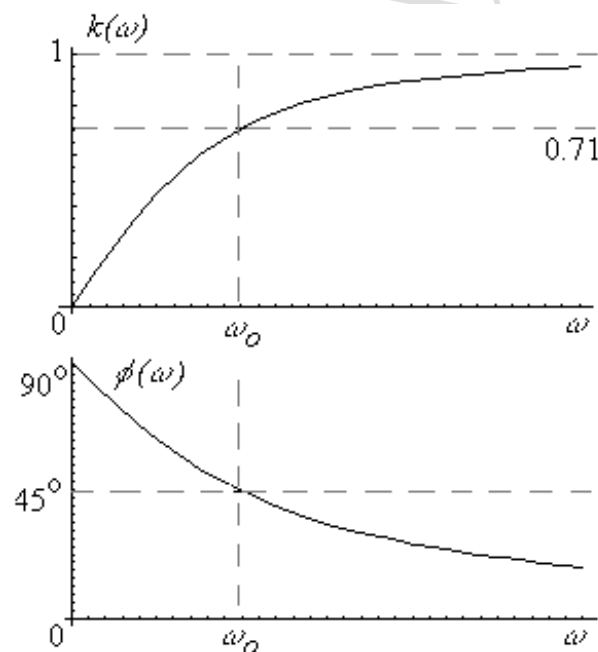
На вхід схеми надходить змінна гармонійна напруга $\dot{U}_{vx}(t) = U_{m1} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}$. Вихідна напруга $\dot{U}_{vyx}(t) = U_{m2} \cdot e^{j \cdot (\omega \cdot t + \varphi)}$ вимірюється на резисторі R .

Примітка: При цьому вважається, що струм через вихідні клема не відгалужується ($i_{vyx}=0$, режим холостого ходу). Якби чотирьохполюсник був навантажений резистором R_n , то його слід було б вважати підключеним паралельно до R .

Треба вивести вираз для комплексної частотної характеристики (КЧХ) цього чотирьохполюсника

$$k(\omega) = \frac{\dot{U}_{vyx}}{\dot{U}_{vx}} = |k(\omega)| \cdot e^{j \cdot \varphi(\omega)},$$

де $|k(\omega)|$ - амплітудно-частотна характеристика (АЧХ), $\varphi(\omega)$ - фазово-частотна характеристика (ФЧХ).



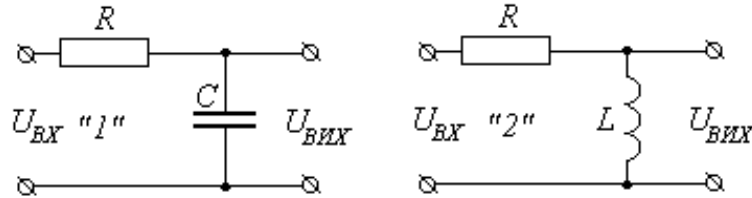
Графіки цих функцій мають такий вигляд:

- при $\omega=0$ $k=0$, бо конденсатор при постійному струмі є еквівалентом розриву кола;
- при $\omega \rightarrow \infty$ величина $k \rightarrow 1$, бо конденсатор є еквівалентом короткого замикання кола;

- через рівень $k(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,71$ графік

АЧХ проходить на частоті $\omega_0 = \frac{1}{\tau}$;

- зсув фази φ в залежності від частоти змінюється від 90° до 0° і проходить через 45° на частоті ω_0 .

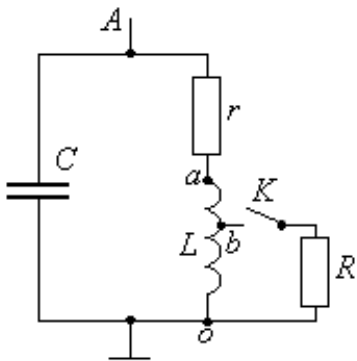


Завдання для самостійної роботи 1.1. Вивести вираз для КЧХ для схеми "1" або "2" (в залежності від індивідуального варіанту), побудувати графіки АЧХ і ФЧХ (у лінійному масштабі). Докладно описати вигляд і зміст одержаних графіків.

1.2. Часткове шунтування коливального контуру активним опором

Основні формули з теорії коливального контуру:

- резонансна частота контуру	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}};$
- характеристичний (хвильовий) опір контуру	$\rho = \omega_0 \cdot L = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} = \sqrt{\frac{L}{C}};$
- еквівалентний опір контуру на резонансній частоті	$R_{\text{екв}} = \frac{\rho^2}{r} = \frac{L}{r \cdot C};$
- добротність контуру	$Q = \frac{\rho}{r} = \frac{\omega_0 \cdot L}{r} = \frac{1}{\omega_0 \cdot r \cdot C};$
- смуга пропускання	$\Omega = \frac{\omega_0}{Q}.$



Завдання для самостійної роботи 1.2. Коливний контур складається з конденсатора C , резистора r та котушки індуктивності $L = L_{ao}$. Через ключ K до котушки у точці "b" може бути приєднаний резистор R . Співвідношення індуктивностей $m = \frac{L_{ao}}{L_{bo}} > 1$.

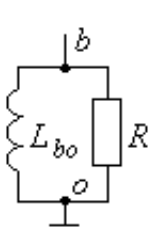
а) розрахувати параметри контуру ω_{00} , ρ_0 , $R_{\text{екв}0}$, Q_0 , Ω_0 при розімкненому ключі K ;

б) розрахувати ці ж параметри ω_0 , ρ , $R_{\text{екв}}$, Q , Ω при замкненому ключі K .

Письмово пояснити зміст використаних еквівалентних перетворень схеми.

Врахувати вплив опору резистора R на параметри контуру можна двома методами.

1. Метод послідовного перерахунку активного опору до складу контуру.

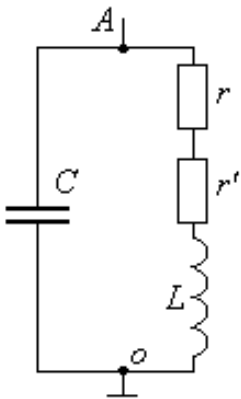


Для цього паралельне з'єднання котушки L_{bo} та резистора R замінюють еквівалентним послідовним з'єднанням котушки з індуктивністю L' та резистора з опором r' . Еквівалентність тут полягає у тому, щоб на частоті ω повний комплексний опір $\dot{Z}_{bo}$ між точками "b" і "o" в обох схемах був однаковим.

$$\dot{Z}_{bo} = \frac{R \cdot j \cdot \omega \cdot L_{bo}}{R + j \cdot \omega \cdot L_{bo}} = j \cdot \omega \cdot R \cdot L_{bo} \cdot \frac{R - j \cdot \omega \cdot L_{bo}}{R^2 + \omega^2 \cdot L_{bo}^2} = \frac{\omega^2 \cdot L_{bo}^2 \cdot R}{R^2 + \omega^2 \cdot L_{bo}^2} + j \cdot \frac{\omega \cdot L_{bo} \cdot R^2}{R^2 + \omega^2 \cdot L_{bo}^2}.$$

При виконанні умови $R^2 \gg \omega^2 \cdot L_{bo}^2$ ця формула спрощується

$$\dot{Z}_{bo} = \frac{\omega^2 \cdot L_{bo}^2}{R} + j \cdot \omega \cdot L_{bo},$$



але спершу слід перевірити виконання вказаної нерівності.

Тоді

$$r' = \frac{\omega^2 \cdot L_{bo}^2}{R}, \quad L' = L_{bo},$$

і контур набуває звичайного вигляду, як показано на рисунку, з загальним активним опором $r_{\Sigma} = r + r'$. Далі розрахунки параметрів контуру ведуться звичайним шляхом.

Примітка: Оскільки при виконанні вищезазначеної нерівності загальна величина індуктивності залишається незмінною, то за частоту ω слід брати власну частоту контуру ω_{00} , обчислену у попередній частині задачі для випадку розімкненого ключа K .

2. Метод паралельного перерахунку активного опору до складу контуру.

Активні опори резисторів r та R перераховуються як паралельно увімкнені між точками "A" і "o":

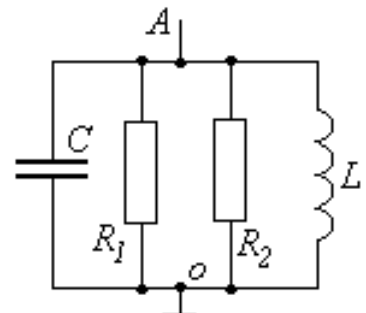
$$R_1 = \frac{L}{r \cdot C}; \quad R_2 = R \cdot m^2.$$

Це можливо також лише при виконанні умови $R^2 \gg \omega^2 \cdot L_{bo}^2$. Загальний еквівалентний опір контуру буде рівний

$$R_{\text{екв}} = R_1 \parallel R_2.$$

Звідси знаходять добротність та смугу пропускання

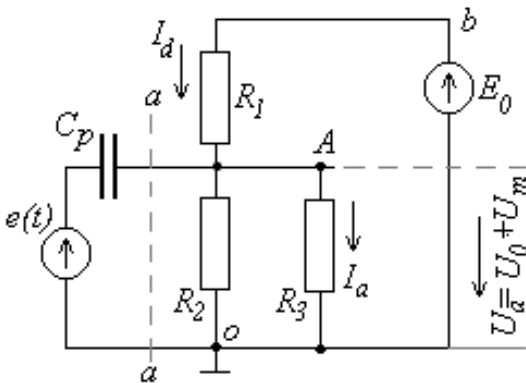
$$Q = \frac{R_{\text{екв}}}{\omega_{00} \cdot L}; \quad \Omega = \frac{\omega_{00}}{Q}.$$



Методи перерахунку обираються самими студентами, вони ж можуть упевнитися у тому, що обидва методи дають однакові результати.

1.3. Подільник напруг

У вхідних колах підсилювачів на біполярних (і польових) транзисторах доводиться зустрічатися зі схемою, зображеною на наведеному рисунку. Вхідна змінна напруга $e(t) = E_m \cdot \cos(\omega \cdot t)$ надходить у точку "А" схеми (на вхід транзистора) через розділовий конденсатор C_p і створює там змінну напругу з амплітудою U_m .



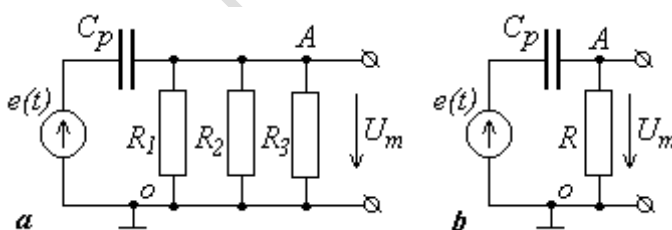
Туди ж від джерела постійної напруги E_0 за допомогою дільника, що складається з резисторів R_1 і R_2 надходить постійна компонента напруги U_0 . Через резистор R_1 дільника тече струм I_d . Резистор R_3 імітує вхідний опір транзистора, через який тече струм I_a .

Завдання для самостійної роботи 1.3. За

заданими E_0 , I_d , I_a , U_0 , ω та відношенню $a = \frac{U_m}{E_m}$ розрахувати параметри усіх елементів схеми. Обґрунтувати еквівалентні перетворення схеми.

З цією метою слід окремо розглядати роботу схеми як для постійних, так і для змінних компонентів струмів і напруг. Для постійних компонентів достатньо відкинути ту частину схеми, що знаходиться ліворуч від пунктирної лінії "aa" і розраховувати величини опорів резисторів R_1 , R_2 , R_3 за законом Ома

Для аналізу роботи схеми за змінними компонентами слід з'єднати точку "b" з точкою "o", бо для джерела постійної напруги, як відомо, внутрішній опір



дорівнює нулеві (або дуже близький до нуля) і за змінною напругою ці точки мають практично однаковий потенціал. Отже, для змінних компонентів еквівалентна схема матиме вигляд, зображений на

наведеному рисунку **а**. Усі три резистори R_1 , R_2 і R_3 виявляються увімкненими паралельно і мають загальний опір R , як це показано на рисунку **б**. Разом із конденсатором C_p цей опір R утворює дільник для змінної напруги $e(t)$, звідки,

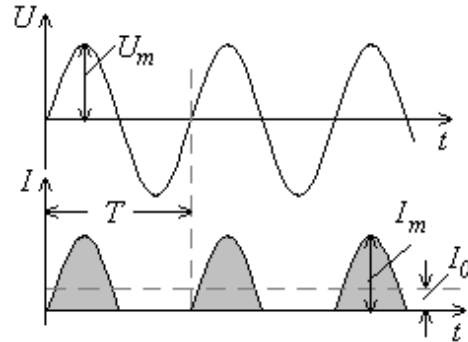
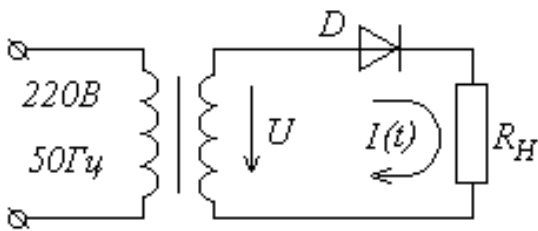
знаючи відношення $a = \frac{U_m}{E_m}$, можна знайти значення ємності C_p .

2. ВИПРЯМЛЯЧІ І СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ

Для живлення радіоелектронних пристроїв від міської мережі доводиться перетворювати змінний 220-вольтовий струм у постійний струм потрібної напруги. Для цього потрібні випрямлячі, які є обов'язковою частиною більшості радіоелектронних приладів і пристроїв.

2.1. Схеми випрямлячів

2.1.1. Однопівперіодний випрямляч



У цьому найпростішому типі випрямлячів струм проходить через напівпровідниковий діод D лише протягом позитивного півперіоду. Якщо напруга на вторинній обмотці трансформатора є $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$, то струм I дорівнюватиме

$$I(t) = \begin{cases} I_m \cdot \sin(\omega \cdot t) = \frac{U_m}{R_H} \cdot \sin(\omega \cdot t) & \text{при } U > 0, R_o < R_H \\ 0 & \text{при } U < 0, R_o \gg R_H \end{cases}$$

Тут і далі вважається, що омичний опір діода R_o у відкритому стані значно менший від опору резистора навантаження R_H , а у закритому стані, навпаки, значно більший.

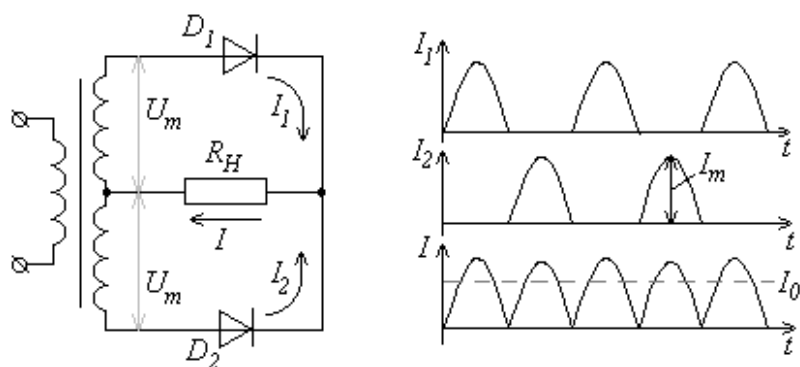
Середнє за період значення струму I_0 через діод та резистор навантаження дорівнює

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^T I(t) \cdot dt = \frac{I_m}{T} \cdot \int_0^{\pi} \sin(\omega \cdot t) \cdot dt = \frac{I_m}{\omega} \cdot T \cdot \int_0^{\pi} \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \\ &= -\frac{I_m}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\omega \cdot t) \Big|_0^{\pi} = \frac{I_m}{\pi} = \frac{U_m}{\pi \cdot R_H} \end{aligned}$$

Тобто середній за період струм дорівнює $I_0 \approx 0,32 \cdot I_m$ від максимального значення струму.

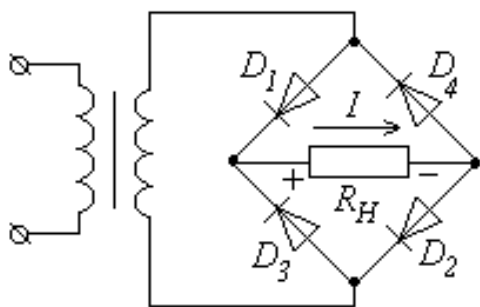
Максимальна зворотна напруга, яку має витримувати діод у закритому стані протягом негативного півперіоду $U_{зв \max} = U_m$, тобто вона дорівнює амплітуді вхідної напруги.

2.1.2. Двопівперіодний випрямляч



У цій схемі діоди D_1 і D_2 працюють по черзі: один протягом першого півперіоду, другий - протягом другого. Але струми обох діодів I_1 і I_2 додаються один до одного на резисторі навантаження R_H . Таким чином у порівнянні з попередньою схемою середнє за період значення струму I_0 через резистор навантаження подвоюється і становить $I_0 \approx 0,63 \cdot I_m$. Середній же струм через кожний з діодів за період складає $I_{0D} \approx 0,32 \cdot I_m$. Максимальна зворотна напруга, що її має витримувати кожний з діодів, дорівнює $2 \cdot U_m$.

2.1.3. Мостова схема



Тут протягом позитивного півперіоду струм проходить через діоди D_1 і D_2 та резистор навантаження, а протягом негативного півперіоду через діоди D_3 і D_4 і знову ж таки через резистор навантаження у тому ж самому напрямку. Отже і тут середнє за період значення струму I_0 через резистор навантаження рівне $I_0 \approx 0,63 \cdot I_m$, а максимальна зворотна напруга на кожному з діодів дорівнюватиме U_m .

Перевагою даної схеми порівняно з попередньою є простіша конструкція трансформатора, а недоліком - потреба у більшій кількості діодів.

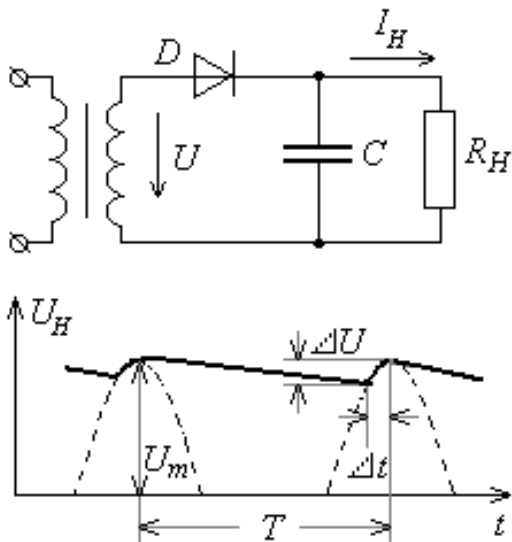
Тип діода	$I_{0 \max}, \text{mA}$ Максимально допустимий середній струм через діод	$U_{зв \max}, \text{V}$ Максимально допустима зворотна напруга, яку може витримувати діод
ГД107Б	20	20
КД102Б	100	300
КД105А	300	200
КД103А	100	50
2Д108Б	100	1000
Д223	50	50

Завдання для самостійної роботи 2.1. Для вказаної у індивідуальному завданні схеми випрямляча визначити середній за період струм через резистор навантаження і діоди, а також максимальну зворотну напругу.

На підставі цього обрати з наведеної таблиці найбільш придатний тип діодів.

Вказівка: Для збільшення максимальної зворотної напруги можна з'єднувати по кілька **однотипних** діодів послідовно.

2.2. Ємнісний фільтр



резистор R_H за законом

$$U_C(t) = U_{R_H} = U_m \cdot e^{-t/\tau}; \quad \tau = R_H \cdot C$$

доти, доки напруга $U(t)$ не перевищить $U_C(t)$. Далі протягом деякого часу Δt конденсатор підзаряджається до U_m і далі процес повторюється.

Щоб обчислити абсолютну величину пульсацій ΔU , треба зробити деякі припущення. Якщо $\tau \gg T$ (T - період між двома підзарядками ємності), то величиною Δt порівняно з T можна знехтувати і вважати, що

$$\Delta U \approx U_m - U_m \cdot e^{-T/\tau} = U_m \cdot (1 - e^{-T/\tau}) \approx U_m \cdot \frac{T}{\tau}.$$

Примітка: Оскільки у дійсності час розрядження ємності менший від T , то одержане значення ΔU буде дещо перебільшеним.

Завдання для самостійної роботи 2.2. Для випрямляча, розглянутого у завданні 2.1, обчислити відносну величину пульсацій $\frac{\Delta U}{U_m}$, якщо резистор навантаження R_H зашунтований конденсатором з ємністю C , а частота змінного струму складає f .

2.3. Параметричний стабілізатор напруги

Для підтримання сталої (точніше, майже сталої) напруги на виході джерела живлення при коливаннях напруги на його вході застосовуються

стабілізатори напруги. Стабілізаторами напруги обладнана більшість сучасних радіоелектронних приладів.

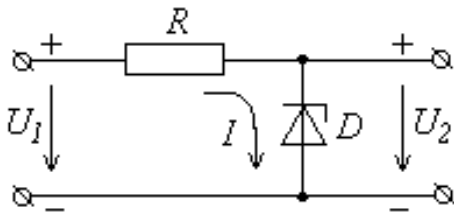


Схема найпростішого параметричного стабілізатора напруги на стабілітроні зображена на наведеному рисунку.

Тут використовується та властивість стабілітрона, що його диференціальний опір

$$r_d = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{U=U_{CT}}$$

в околі робочої точки на вольт-амперній характеристиці (точка "A" на рисунку)

значно менший від омичного $R_0 = \frac{U_{CT}}{I_{CT}}$. Тому

постійна складова вхідної напруги U_{10} ділиться між резистором R і стабілітроном як

$$\frac{U_{20}}{U_{10}} = \frac{R_0}{R + R_0},$$

а невеликі пульсації вхідної напруги ΔU_1 - як

$$\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \frac{r_d}{R + r_d}.$$

Отже, коефіцієнт стабілізації, тобто співвідношення відносних змін напруги на вході і виході стабілізатора, буде визначатися виразом

$$k_{CT} = \frac{\Delta U_1 / U_{10}}{\Delta U_2 / U_{20}} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \cdot \frac{U_{20}}{U_{10}} = \frac{(R + r_d)}{r_d} \cdot \frac{R_0}{(R + R_0)}.$$

Завдання для самостійної роботи 2.3. Розрахувати параметри стабілізатора напруги, навантаженого на резистор R_H заданого опору. За даними таблиці обрати найбільш придатний тип стабілітрона, визначити значення опору резистора R , коефіцієнт стабілізації k_{CT} , а також межі стабілізації за вхідною напругою.

Вказівки:

- 1) Оскільки в даній задачі, на відміну від попереднього розрахунку, є резистор навантаження R_H , то у наведених вище формулах замість r_d і R_0 слід підставляти $r'_d = r_d \parallel R_H$ та $R'_0 = R_0 \parallel R_H$.

- 2) При потребі можна з'єднувати по кілька **однотипних** стабілітронів послідовно, збільшуючи тим вихідну напругу стабілізації U_2 . При цьому у стільки ж разів збільшуються значення r_d і R_O .
- 3) При виборі типу стабілітрона треба мати на увазі, що струм стабілізації I_{CT} стабілітрона має бути сумірним із струмом $I_H = \frac{U_{20}}{R_H}$ через резистор навантаження.

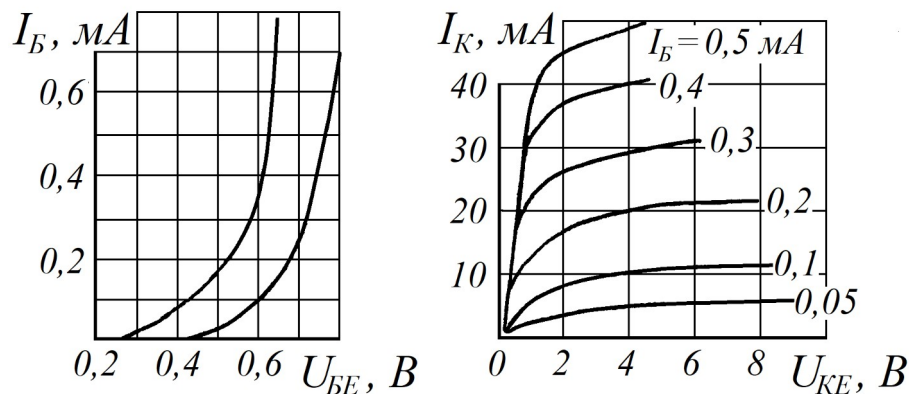
Тип стабілітрона	U_{CT} , В Напруга стабілізації	I_{min} , МА Мінімальний струм стабілітрона	I_{max} , МА Максимальний струм стабілітрона	r_d , Ом Диференціальний опір стабілітрона
Д811	10	3	23	15
Д815Е	15	25	500	3,8
2С224Ж	25	0,5	5,2	70

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПАРАМЕТРИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

3.1. Характеристики і параметри транзистора увімкненого за схемою зі спільним емітером (СЕ)

Основні, найбільш важливі для практики, співвідношення струмів і напруг у транзисторі описуються сімействами характеристик - вхідних та вихідних. Як приклад розглянемо сімейства характеристик транзистора типу КТ201В, увімкненого за схемою зі спільним емітером.

КТ 201 В, Д (n-p-n)



$$\begin{aligned} U_{KE_{max}} &= 10 \text{ В} & I_{K_{max}} &= 20 \text{ мА} \\ P_{K_{max}} &= 0,15 \text{ Вт} & I_{K_{max imp}} &= 100 \text{ мА} \end{aligned}$$

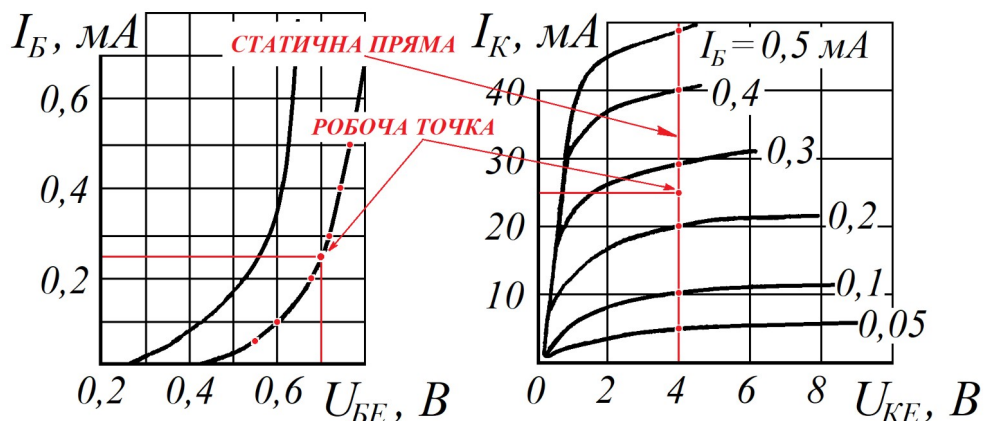
Контрольні питання до завдання 3.1:

1. Як розшифровується позначення транзистора КТ201В? До якого класу транзисторів він належить?
2. При якій напрузі U_{BE} відкриваються германієві і кремнієві транзистори?
3. Чому в довідниках зазвичай наводять лише дві вхідні характеристики - одну для $U_{KE}=0$, а іншу для великих значень U_{KE} ?
4. Де на вихідних характеристиках знаходиться режим насичення? Чому в цьому режимі втрачається керуюча дія струму бази I_B ?
5. Яка область вихідних характеристик вважається робочою?

3.1.1. Вибір робочої точки на графіках характеристик транзистора

Робоча точка, що визначає режим роботи транзистора, зазвичай обирається в робочій частині вихідних характеристик. Задамо два параметри режиму: $U_{KE0}=4 \text{ В}$ і $I_{B0}=0,25 \text{ мА}$.

Примітка: Вихідна характеристика для $I_{B0}=0,25 \text{ мА}$ відсутня. Тому робоча точка встановлюється посередині між характеристиками для 0,2 і 0,3 мА.



По ним визначаються два інших параметри: $I_{K0}=25$ мА та $U_{BE0}=0,7$ В. (Робоча точка на вхідних характеристиках обирається на характеристиці для $U_{KE}=5$ В - пояснити чому).

Такий режим роботи транзистора має назву **статичного** режиму. Тут при зміні колекторного струму транзистора I_K напруга на його колекторі U_K зберігається незмінною.

3.1.2. Визначення h_E -параметрів транзистора у статичному режимі

Параметри транзистора визначаються в околі робочої точки на його вхідних та вихідних характеристиках.

За визначенням параметр h_{21E} є частинною похідною $\frac{\partial I_K}{\partial I_B}$, яку в скінчених приростах наближено можна записати як

$$h_{21E} \approx \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE}=\text{const}} = \frac{29-20}{0,3-0,2} = 90.$$

Цей параметр визначає керуючу дію вхідного струму бази.

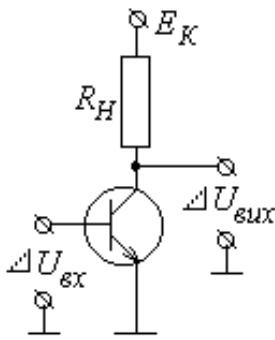
Параметр h_{22E} - вихідна провідність транзистора - визначається кутом нахилу вихідної характеристики відносно осі абсцис в околі робочої точки. Він являє собою частинну похідну $\frac{\partial I_K}{\partial U_{KE}}$ і може бути наближено оцінений як

$$h_{22E} \approx \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KE}} \right|_{I_B=\text{const}} = \frac{31-26}{6-2} = 125 \text{ мСм}.$$

Примітка: За браком характеристики для $I_{B0}=0,25$ мА тут було використано одну із суміжних характеристик, для $I_B=0,3$ мА. Прирости мають бути ані дуже великими, ані дуже малими, бо в обох випадках точність визначення параметрів істотно погіршується.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПАРАМЕТРИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Аналогічним шляхом за кутом нахилу вхідної характеристики відносно осі абсцис в околі робочої точки визначається параметр h_{11E} - вхідний опір транзистора.



$$h_{11E} \approx \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE} = \text{const}} = \frac{0,72 - 0,67}{0,3 - 0,2} = 0,5 \text{ кОм.}$$

Параметр h_{12E} не вдається визначити за браком проміжних вхідних характеристик між характеристиками для $U_{KE}=0 \text{ В}$ і $U_{KE}=5 \text{ В}$. Зазвичай цей параметр має порядок $10^{-4} \div 10^{-3}$.

Примітка: Слід мати на увазі, що зроблені таким шляхом оцінки значень параметрів вельми неточні: в них друга значуща цифра сумнівна, а третя - взагалі не має сенсу.

Завдання для самостійної роботи 3.1. Для вказаного в індивідуальному завданні типу транзистора за заданими U_{KE0} та I_{B0} визначити I_{K0} та U_{BE0} в робочій точці транзистора. Визначити h_E -параметри (h_{11E} , h_{21E} , h_{22E}) в околі робочої точки.

3.2. Параметри транзистора, увімкненого за схемою зі спільною базою

Аналогічним шляхом, за сімействами вхідних і вихідних характеристик для транзистора, увімкненого за схемою СБ, можна визначити його h_B -параметри. Але якщо вже визначені h_E -параметри, то їх можна перевести у h_B -параметри (і навпаки) за нижче наведеними формулами:

$h_{11E} = \frac{h_{11B}}{1 + h_{21B}}$	$h_{11B} = \frac{h_{11E}}{1 + h_{21E}} \approx \frac{h_{11E}}{h_{21E}}$
$h_{12E} = \frac{h_{11B} \cdot h_{22B}}{1 + h_{21B}} - h_{12B}$	$h_{12B} = \frac{h_{11E} \cdot h_{22E}}{1 + h_{21E}} - h_{12E}$
$h_{21E} = -\frac{h_{21B}}{1 + h_{21B}}$	$h_{21B} = -\frac{h_{21E}}{1 + h_{21E}}$
$h_{22E} = \frac{h_{22B}}{1 + h_{21B}}$	$h_{22B} = \frac{h_{22E}}{1 + h_{21E}} \approx \frac{h_{22E}}{h_{21E}}$

Завдання для самостійної роботи 3.2. За h_E -параметрами, визначеними у попередній задачі, підрахувати h_B -параметри транзистора. Порівняти відповідні параметри і викласти свої міркування щодо цього.

3.3. Динамічний режим роботи транзистора

У більшості радіоелектронних схем транзистор застосовується разом з резистором навантаження R_H , увімкненим у коло колектора. За допомогою

цього резистора прирости колекторної напруги ΔI_K , які створюються вхідними сигналами ΔU_{ex} , перетворюються у прирости вихідної напруги $\Delta U_{eux} = \Delta I_K \cdot R_H$ які зазвичай бувають значно більшими від ΔU_{ex} . Саме в цьому полягає принцип підсилення сигналів транзистором.

Такий режим роботи транзистора під навантаженням має назву **динамічного** режиму. На відміну від **статичного** режиму тут при зміні колекторного струму I_K напруга на колекторі U_K не зберігається незмінною, а сама стає залежною від струму I_K згідно рівняння, складеного за II правилом Кірхгофа,

$$U_K = E_K - I_K \cdot R_H, \quad (3.3.1)$$

де E_K - напруга джерела живлення.

Тепер режим транзистора визначається не тільки функціональною залежністю $I_K = f(I_B, U_K)$, яка ілюструється сімейством його вихідних характеристик, але також і рівнянням (3.3.1). Розв'язати цю систему рівнянь і визначити режим роботи транзистора, а, отже, і положення його робочої точки можна лише графічно, побудувавши в координатах (U_{KE}, I_K) одночасно і сімейство вихідних характеристик і **динамічну пряму**, що відповідає рівнянню (3.3.1). Робоча точка визначається як точка перетину динамічної прямої з вихідною характеристикою для заданого струму бази I_B .

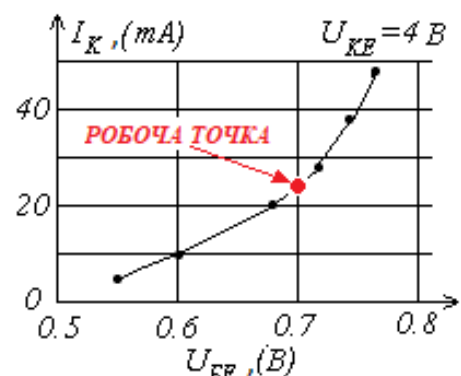
3.3.1. Статична та динамічна прохідні характеристика транзистора

При роботі з радіоелектронними схемами буває корисною так звана **статична прохідна характеристика**, тобто залежність $I_K = f(U_{BE})$ при $U_{KE} = \text{const}$. Така характеристика може бути побудована на підставі вхідних і вихідних характеристик шляхом виключення струму бази I_B . Для розглянутого вище транзистора КТ201В у статичному режимі це можна зробити, склавши таку таблицю:

I_B , (мА)	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
I_K , (мА)	4,5	10	20	29	40	49
U_{BE} , (В)	0,55	0,6	0,67	0,72	0,74	0,76

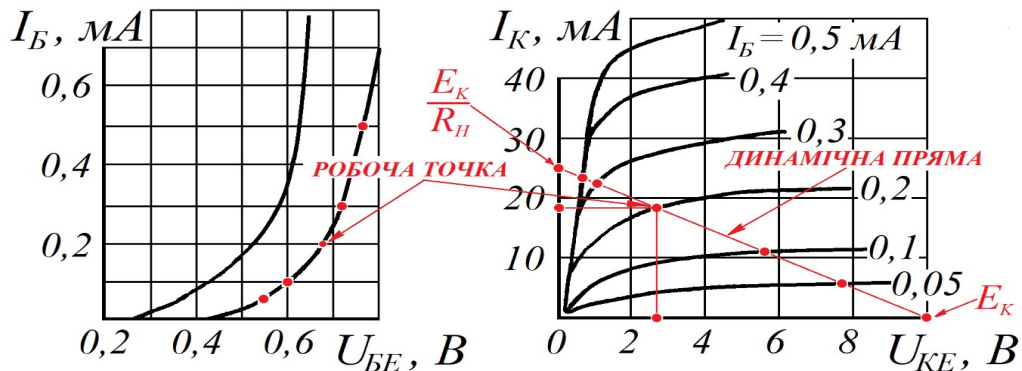
В околі робочої точки ($U_{BE0} = 0,7$ В) можна визначити ще один параметр транзистора - крутість його прохідної характеристики S_{cm} у статичному режимі, яка кількісно описує ефективність керування вихідним колекторним струмом I_K шляхом зміни вхідної напруги U_{BE}

$$S_{cm} = \frac{\partial I_K}{\partial U_{BE}} \approx \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{BE}} = \frac{28 - 20}{0,72 - 0,68} = 200 \text{ мА/В.}$$



3. ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПАРАМЕТРИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

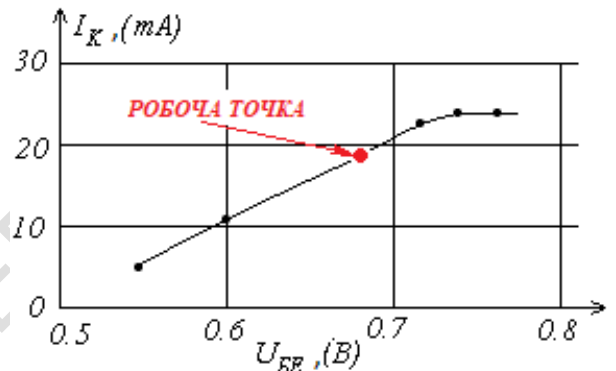
Складемо подібну таблицю для транзистора КТ201В, що працює в динамічному режимі, за умови $E_K=10$ В, $I_{B0}=0,2$ мА, $R_H=400$ Ом. У робочій точці $I_{K0}=18$ мА, $U_{KE0}=2,7$ В. Для цього режиму також може бути побудована прохідна характеристика, яку називають динамічною.



I_B , (мА)	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
I_K , (мА)	5,5	11	18	22	24	24
U_{BE} , (В)	0,55	0,6	0,67	0,72	0,74	0,76

Тоді можна визначити $S_{дин}$ - крутість його прохідної характеристики у динамічному режимі

$$S_{дин} \approx \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{BE}} = \frac{22-11}{0,72-0,6} \approx 92 \text{ мА/В}.$$



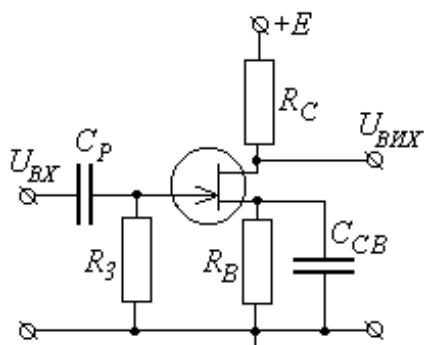
Особливістю цієї динамічної прохідної характеристики порівняно зі статичною є те, що при великих значеннях напруги U_{BE} струм колектора I_K перестає зростати і зберігається незмінним. Причиною є те, що транзистор входить у режим насичення, при якому зміни струму бази I_B не викликають змін струму колектора I_K .

Завдання для самостійної роботи 3.3. За даними E_K та R_H побудувати динамічну пряму та для заданого I_{B0} визначити положення робочої точки транзистора у динамічному режимі (тобто I_{K0} , U_{KE0} та U_{BE0}).

Побудувати статичну та динамічну прохідні характеристики. Письмово пояснити, в чому полягає різниця між ними. Визначити статичну та динамічну крутість в околі робочої точки з заданим I_B .

4. ПІДСИЛЮВАЧІ НА ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРАХ

4.1. Розрахунок елементів схеми підсилювача на польовому транзисторі



Розглянемо як приклад схему підсилювального каскаду на польовому транзисторі з керуючим p - n -переходом (з n -каналом). Розрахунок будемо вести за режимом транзистора: $U_{CB0}=10$ В, $I_{C0}=12$ мА, $U_{3B0}=-1,5$ В, $E=20$ В, а за нижню граничну частоту підсилювального каскаду f_H оберемо 100 Гц.

Негативне зміщення на затворі U_{3B0} утворюється за рахунок протікання струму I_{C0} через резистор R_B . Змінна компонента струму I_C стікає через конденсатор C_{CB} , оминаючи резистор R_B , і, таким чином, не впливає на напругу зміщення U_{3B0} . Тому реактивний опір цього конденсатора має бути значно (принаймні у 100 разів) меншим опору резистора R_B .

Розділовий конденсатор C_P призначений для того, щоб пристрої, які можуть бути підключені до входу каскаду, не могли порушити встановлений режим транзистора. Разом з тим, цей конденсатор не повинен перешкоджати проходженню вхідних змінних сигналів і його реактивний опір має бути значно (принаймні у 100 разів) меншим опору резистора R_3 .

Величини опорів резисторів R_C та R_B визначимо за законом Ома, попередньо склавши рівняння згідно II правила Кірхгофа для вихідного кола:

$$E = I_{C0} \cdot R_C + U_{CB0} + |U_{3B0}| \Rightarrow R_C = \frac{E - U_{CB0} - |U_{3B0}|}{I_{C0}} = \frac{20 - 10 - 1,5}{12 \cdot 10^{-3}} = 700 \text{ Ом};$$

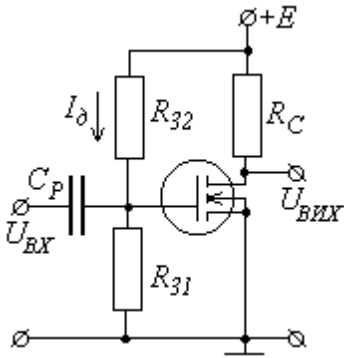
$$|U_{3B0}| = I_{C0} \cdot R_B \Rightarrow R_B = \frac{|U_{3B0}|}{I_{C0}} = \frac{1,5}{12 \cdot 10^{-3}} = 125 \text{ Ом}.$$

Величина опору резистора R_3 у обирається в межах 0,1 - 1,0 МОм за умови, щоб його величина була значно меншою від вхідного опору транзистора, який, зазвичай, становить складає 10^7 - 10^9 Ом. Покладемо, для прикладу, $R_3=300$ кОм.

Мінімальні значення ємностей конденсаторів C_P та C_B обчислюють за нижньою граничною частотою і опором резистора R_3 та R_B відповідно:

$$C_{P \min} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot R_3} = \frac{1}{6,28 \cdot 10^2 \cdot 3 \cdot 10^5} = 5,3 \cdot 10^{-9} = 5,3 \text{ нФ};$$

$$C_{B \min} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot R_B} = \frac{1}{6,28 \cdot 10^2 \cdot 125} = 1,25 \cdot 10^{-5} = 12,5 \text{ мкФ};$$



На практиці отримані значення C_P та C_B збільшують у 10-100 разів.

Завдання для самостійної роботи 4.1. Розрахувати параметри елементів схеми підсилювального каскаду на польовому транзисторі з ізольованим затвором та індукованим n -каналом (МОП- n).

Задаються: U_{CB0} , I_{C0} , $U_{ЗВ0}$, E , R_{31} та f_H .

Вказівки:

- 1) При розрахунках за режимом можна вважати, що струм діляника I_{C0} не відгалужується на затвор транзистора і має бути значно меншим від струму I_{C0} .
- 2) При розрахунках за сигналом резистори R_{31} та R_{32} можна вважати з'єднаними паралельно, бо, як відомо, за змінною компонентою шина живлення $+E$ має потенціал нульового провідника. Величина ємності конденсатора C_P визначається за нижньою граничною частотою f_H та вхідним опором підсилювального каскаду, який, у першому наближенні рівний $R_{ВХ} = (R_{31} \parallel R_{32})$.

4.2. Визначення коефіцієнту підсилення

Контрольні питання до завдання 4.2:

1. Намалюйте еквівалентну (за сигналом) схему підсилювального каскаду на польовому транзисторі; поясніть чому резистори R_i та R_C можна вважати увімкненими паралельно?
2. Запишіть вираз для обчислення коефіцієнту підсилення каскаду k_0 .
3. Намалюйте графік залежності значення k_0 від опору резистора R_C ; зверніть увагу на його насичення за умови $R_C/R_i \gg 1$.

Завдання для самостійної роботи 4.2. Для підсилювального каскаду, розглянутого у попередній задачі, обчислити значення коефіцієнту підсилення k_0 . Додатково даються S - крутість прохідної характеристики транзистора в околі робочої точки і R_i - його внутрішній (вихідний) опір.

4.3. Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) підсилювача на польовому транзисторі

Контрольні питання до завдання 4.3.1:

1. Домалюйте до попередньої еквівалентної (за сигналом) схеми підсилювального каскаду паразитну ємність C_{Π} . Як вона впливає на модуль коефіцієнту підсилення? Чому саме?

2. Запишіть вираз для АЧХ каскаду $k(\omega)$ та намалюйте її графік; як за цим графіком визначити верхню граничну частоту каскаду f_B ?
3. Запишіть вираз для обчислення верхньої граничної частоти каскаду f_B .

Завдання для самостійної роботи 4.3.1. Для підсилювального каскаду, розглянутого у попередніх задачах, обчислити верхню граничну частоту підсилення f_B . Для цього додатково дається величина паразитної ємності C_{π} .

Вказівка: Паразитна ємність увімкнена на виході каскаду паралельно до R_i та R_c .

Контрольні питання до завдання 4.3.2:

1. Намалюйте схему корекції АЧХ підсилювального каскаду з котушкою корекції та поясніть принцип її дії.
2. Як виглядає графік АЧХ за умови недокорекції та перекорекції?
3. Виведіть вираз для знаходження оптимального значення індуктивності $L_{C\ opt}$ котушки корекції.
4. Покажіть, як при цьому зміниться верхня гранична частота каскаду?

Завдання для самостійної роботи 4.3.2. Обчислити оптимальну величину індуктивності L_c котушки, яка вмикається послідовно з резистором R_c у схемі корекції АЧХ підсилювального каскаду. Знайти, як при цьому зміниться верхня гранична частота каскаду?

Вказівка: Для спрощення розрахунків можна вважати, що внутрішній опір транзистора $R_c \rightarrow \infty$.

5. ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК (ЗЗ) У ПІДСИЛЮВАЧАХ

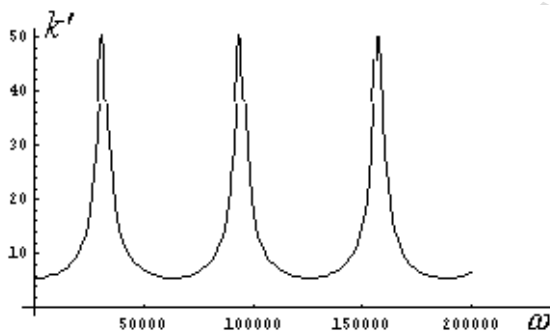
5.1. Послідовний зворотний зв'язок за напругою

Контрольні питання до завдання 5.1:

1. Що таке зворотний зв'язок (ЗЗ) у підсилювачі?
2. Намалюйте структурну схему підсилювача, охопленого послідовним ЗЗ за напругою.
3. Запишіть загальний вираз для модуля коефіцієнту підсилення k' підсилювача, охопленого послідовним ЗЗ за напругою.
4. Що таке позитивний і негативний ЗЗ (ПЗЗ і НЗЗ)? Напишіть вираз для k' при ПЗЗ і НЗЗ.

Завдання для самостійної роботи 5.1. Підсилювач з коефіцієнтом підсилення $k = k \cdot e^{j\psi_k}$ охоплений послідовним ЗЗ за напругою через чотириполосник зворотного зв'язку з коефіцієнтом передачі $\beta = \beta \cdot e^{j\psi_\beta}$ де $\psi_\beta = \omega \cdot T$. Що буде являти собою АЧХ такого підсилювача? Наведіть графік і дайте письмові пояснення його вигляду.

На яких частотах $f^{(+)}$ зворотний зв'язок буде позитивним, а на яких $f^{(-)}$ негативним? Розрахувати модулі коефіцієнту підсилення на цих частотах.



Позитивний ЗЗ матиме місце за умови $\psi = \psi_k + \psi_\beta = 2 \cdot n \cdot \pi$, негативний - за умови $\psi = \psi_k + \psi_\beta = (2 \cdot n - 1) \pi$, де $n=0, 1, 2, 3 \dots$. При цьому:

$$k^+ = \frac{k}{1 - k \cdot \beta} ; k^- = \frac{k}{1 + k \cdot \beta}$$

Тоді графік АЧХ підсилювача матиме вигляд періодичних максимумів та мінімумів. Це так званий гребінчастий фільтр.

5.2. Стійкість багатокаскадного підсилювача, охопленого негативним (на середніх частотах) ЗЗ

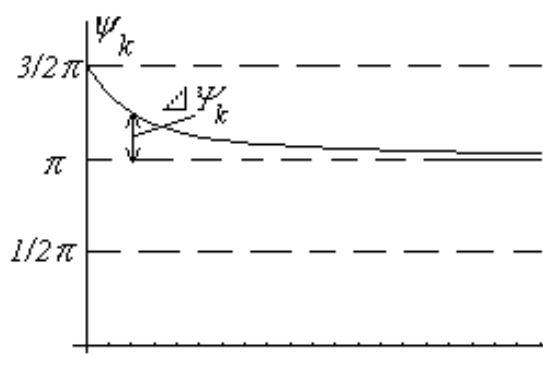
Розглянемо випадок, коли підсилювач, що складається з N ідентичних каскадів, охоплений загальним негативним (на середніх частотах) зворотним зв'язком з коефіцієнтом ЗЗ β . Для спрощення будемо вважати, що β не залежить від частоти і є дійсною величиною (тобто чотириполосник зворотного зв'язку не вносить зсуву фази до сигналу). Кожний з каскадів

підсилювача має комплексний коефіцієнт підсилення (комплексну частотну характеристику) $\dot{k}(\omega)$.

Запишемо вираз для $\dot{k}(\omega)$ в області низьких частот для підсилювального каскаду на польовому транзисторі:

$$\dot{k}_H(\omega) = -\frac{k_0}{1 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot \tau_H}} = \frac{K_0 \cdot e^{j \cdot \pi} \cdot (1 + j \cdot \frac{1}{\omega \cdot \tau_H})}{1 + \frac{1}{(\omega \cdot \tau_H)^2}} = \frac{k_0 \cdot e^{j \cdot \pi} \cdot (1 + j \cdot p)}{1 + p^2},$$

де $\tau_H = R_3 \cdot C_P$ - стала часу вхідної RC-комірки, а $p = \frac{1}{\omega \cdot \tau_H}$.



Запишемо вирази для АЧХ та ФЧХ окремого каскаду та схематично намалюємо графік ФЧХ у області низьких частот:

$$k_H(\omega) = \frac{k_0}{\sqrt{1+p^2}} - \text{АЧХ},$$

$$\psi_k(\omega) = \pi + \arctg(p(\omega)) = \pi + \Delta \psi_k(\omega) - \text{ФЧХ}.$$

Очевидно, що в області нижніх частот вирази для АЧХ та ФЧХ N-каскадного підсилювача матимуть такий вигляд:

$$K_H(\omega) = \left(\frac{k_0}{\sqrt{1+p^2}} \right)^N - \text{АЧХ},$$

$$\Psi_k(\omega) = N \cdot \pi + N \cdot \arctg(p(\omega)) = N \cdot \pi + N \cdot \Delta \psi_k(\omega) - \text{ФЧХ}.$$

Фазова умова самозбудження багатокаскадного підсилювача може бути записана так:

$$\Psi_k(\omega) + \Psi_\beta(\omega) = 2 \cdot n \cdot \pi, \text{ де } n=0, 1, 2, 3 \dots$$

Оскільки за умовою задачі $\Psi_\beta(\omega) = 0$, то остаточно отримаємо

$$N \cdot \pi + N \cdot \Delta \psi_k(\omega) = 2 \cdot n \cdot \pi.$$

Зокрема для трикаскадного підсилювача ($N=3$)

$$3 \cdot \pi + 3 \cdot \arctg\left(\frac{1}{\Omega \cdot \tau_H}\right) = 2 \cdot n \cdot \pi,$$

де Ω - частота, на якій ця умова виконується, тобто частота, на якій підсилювач **може (але зовсім не обов'язково)** самозбудитися. Визначимо цю частоту, наприклад, для $n=2$ ¹:

¹ Для інших значень n результат буде циклічно повторюватися.

$$\arctg\left(\frac{1}{\Omega \cdot \tau_H}\right) = \frac{1}{3} \cdot (4 \cdot \pi - 3 \cdot \pi) = \frac{\pi}{3} \Rightarrow \frac{1}{\Omega \cdot \tau_H} = \operatorname{tg} \frac{\pi}{3} = \sqrt{3} \approx 1,73 \Rightarrow \Omega = \frac{1}{1,73 \cdot \tau_H}.$$

А чи буде виконуватися на цій частоті ще й амплітудна умова самозбудження? Для трикаскадного підсилювача вона набуває вигляду:

$$K(\Omega) \cdot \beta = \left(\frac{k_0}{\sqrt{1 + p^2(\Omega)}} \right)^3 \cdot \beta = \left(\frac{k_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\Omega \cdot \tau_H} \right)^2}} \right)^3 \cdot \beta = \left(\frac{k_0}{\sqrt{1 + 3}} \right)^3 \cdot \beta = \frac{k_0^3}{8} \cdot \beta > 1.$$

Якщо і ця умова виконується, то самозбудження підсилювача неодмінно відбудеться.

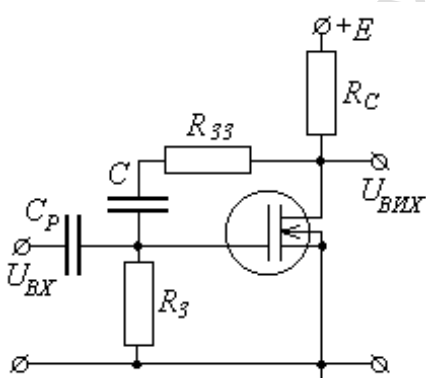
Завдання для самостійної роботи 5.2. Підсилювач, що складається з трьох послідовно увімкнених однакових каскадів на польових транзисторах, охоплений загальним негативним (на середніх частотах) зворотним зв'язком з частотно-незалежним дійсним коефіцієнтом ЗЗ β . Коефіцієнт підсилення окремого каскаду (на середніх частотах) дорівнює k_0 , стала часу вихідного кола $\tau_B = R_H \cdot C_{\Pi}$.

На якій частоті в області високих частот негативний ЗЗ перетвориться на позитивний? Чи самозбудиться при цьому підсилювач?

До розв'язку додати докладні коментарі та пояснення.

Вказівка: Задача розв'язується за такою ж схемою, як і розглянутий вище приклад для області низьких частот.

5.3. Паралельний зворотний зв'язок за напругою



Контрольні питання до завдання 5.3:

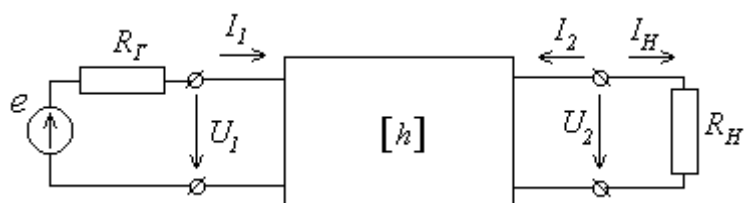
1. Розгляньте схему підсилювального каскаду на МДН-транзисторі з вбудованим n -каналом, охопленого паралельним зворотним зв'язком завдяки резистору R_{33} . Для чого у цю схему введено конденсатор C ?
2. Детально поясніть, як цей вид ЗЗ впливає на вхідний опір каскаду?

3. Як це вплине на нижню граничну частоту каскаду?

Завдання для самостійної роботи 5.3. Чому дорівнюватиме нижня гранична частота f'_H (на рівні $\frac{k_0}{\sqrt{2}}$) каскаду, якщо між стоком і затвором увімкнено резистор R_{33} ? Чому вона була б рівна при $R_{33} = \infty$?

6. ПІДСИЛЮВАЧІ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

6.1. Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі як лінійний чотириполюсник. Параметри каскаду



Розглянемо роботу біполярного транзистора, навантаженого резистором R_H . Власне біполярний транзистор на схемі подано як лінійний

чотириполюсник, що описується h -параметрами. На вхід транзистора подано напругу U_1 від генератора e , який має внутрішній опір R_G . Співвідношення струмів та напруг пов'язані відомими рівняннями для лінійного чотириполюсника в системі h -параметрів:

$$\begin{cases} U_1 = h_{11} \cdot I_1 + h_{12} \cdot U_2 \\ I_2 = h_{21} \cdot I_1 + h_{22} \cdot U_2 \end{cases}$$

Завдання для самостійної роботи 6.1. За заданими h_E -параметрами транзистора, опором резистора навантаження R_H та внутрішнім опором генератора R_G обчислити значення параметрів підсилювача на біполярному транзисторі, увімкненому за схемою зі спільним емітером (СЕ): k_i , k_U , $R_{вх}$ та $R_{вих}$.

Перевести h_E -параметри у h_B -параметри та обчислити значення тих же параметрів підсилювача, в якому біполярний транзистор увімкнений за схемою зі спільною базою (СБ).

Порівняти результати обчислень та зробити письмові висновки.

Вказівки:

- 1) Вирази для обчислення значень k_i , k_U , $R_{вх}$, $R_{вих}^2$, а також формули для переведення h_E -параметрів у h_B -параметри³ запозичити з підручника.
- 2) Значення опорів резисторів R_H та R_G для підсилювача СЕ та СБ однакові.

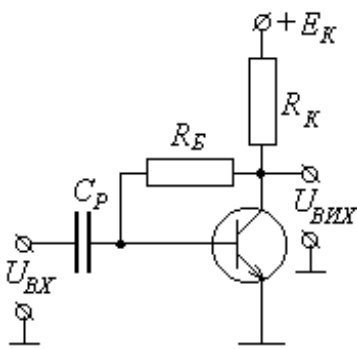
6.2. Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі, охоплений паралельним негативним зворотним зв'язком

Для стабілізації робочої точки транзистора у підсилювальному каскаді інколи застосовують паралельний негативний зворотний зв'язок за режимом.

2 Сторінка 50. Левитський С.М. Основи радіоелектроніки: Підручник. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2007. – 455 с. ISBN 966-594-967-5.

3 Сторінки 131-133. Левитський С.М. Основи радіоелектроніки: Підручник. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2007. – 455 с. ISBN 966-594-967-5.

Для цього, наприклад, колектор і базу біполярного транзистора з'єднують резистором зворотного зв'язку R_B .

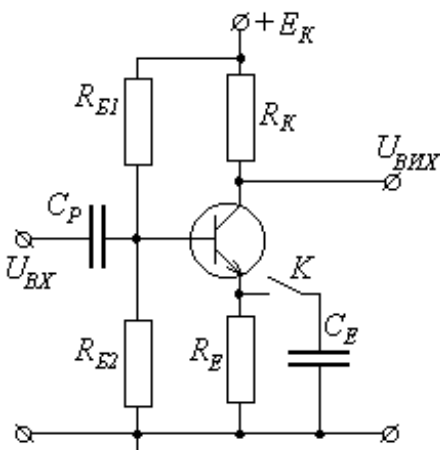


Завдання для самостійної роботи 6.2. Для схеми підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, охопленого паралельним негативним зворотним зв'язком, за заданим режимом транзистора (U_{KE0} , I_{K0} , U_{BE0} , I_{B0}), його параметром h_{21E} та напругою живлення E_K обчислити значення опорів резисторів R_K та R_B , а також коефіцієнт температурної нестабільності s .

Контрольні питання до завдання 6.2:

1. Який фізичний зміст має коефіцієнт температурної нестабільності s ? Виведіть вираз, згідно з яким він визначається для даної схеми?
2. Як обчислити значення опорів резисторів R_K та R_B ?

6.3. Підсилювальний каскад на біполярному транзисторі, охоплений послідовним негативним зворотним зв'язком



Інший, більш широко вживаний метод стабілізації робочої точки транзистора у підсилювальному каскаді полягає у застосуванні послідовного негативного зворотного зв'язку за режимом. Для цього, наприклад, у коло емітера біполярного транзистора вмикають резистор R_E .

Контрольні питання до завдання 6.3:

1. Як введення у схему підсилювача резистора R_E сприяє стабілізації режиму роботи транзистора?
2. Як впливає наявність резистора R_E на вхідний опір підсилювального каскаду?
3. Навіщо резистор R_E зазвичай шунтують конденсатором C_E великої ємності? З яких саме міркувань обирається величина цієї ємності?
4. З яких міркувань обирається значення струму I_D , що протікає через ділник з резисторів R_{B1} - R_{B2} ?
5. З яких міркувань обирають величину ємності розділового конденсатора C_P ?

Завдання для самостійної роботи 6.3. Для схеми підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, охопленого послідовним негативним зворотним зв'язком, за даними R_K , режимом та параметрами транзистора

і нижньою граничною частотою каскаду f_H обчислити значення параметрів елементів схеми R_E , C_E , R_{B1} , R_{B2} та коефіцієнт температурної нестабільності s .

Обчислити коефіцієнт підсилення каскаду за напругою k_U , вхідний опір каскаду R_{BX} та необхідну величину ємності розділового конденсатора C_P для випадків **а)** наявності та **б)** відсутності конденсатора C_E (тобто коли ключ K **а)** замкнений та **б)** розімкнений).

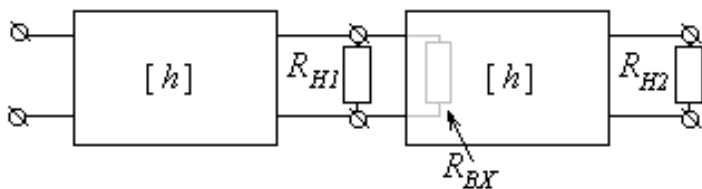
Дані про режим транзистора та його параметр h_{21E} запозичити з умови завдання 6.2.

Вказівки:

1) Формули, необхідні для розв'язання задачі, запозичити із згаданого вище підручника.

2) Значення струму I_D , що протікає через ділянку з резисторів R_{B1} - R_{B2} має бути значно меншим від значення струму I_{K0} , але значно більшим від значення I_{B0} . Тому зазвичай його обирають як середнє пропорційне між I_{K0} та I_{B0} : $I_D = \sqrt{I_{K0} \cdot I_{B0}}$.

6.4. Коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача на біполярних транзисторах



При послідовному з'єднанні підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах роль навантаження R'_{H_i} для даного (наприклад, i -того) каскаду

відіграє паралельне сполучення резистора навантаження цього каскаду R_{H_i} та вхідного опору наступного каскаду $R_{BX_{i+1}}$: $R'_{H_i} = R_{H_i} \parallel R_{BX_{i+1}}$.

Загальний коефіцієнт підсилення за струмом та за напругою такого багатокаскадного підсилювача дорівнює добутку відповідних коефіцієнтів усіх каскадів з урахуванням наведених вище міркувань щодо R'_{H_i} .

Завдання для самостійної роботи 6.4. Обчислити загальний коефіцієнт підсилення за напругою підсилювача, що складається з двох ідентичних каскадів.

Дані про параметри транзисторів і величини опорів резисторів навантаження запозичити із умови завдання 6.1.

7. ЧАСТОТНІ ВЛАСТИВОСТІ ПІДСИЛЮВАЧІВ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

7.1. Частотні властивості біполярного транзистора

Контрольні питання до завдання 7.1:

1. Чим обумовлюється інерційність біполярного транзистора?
2. Намалюйте фізичну еквівалентну схему біполярного транзистора у області високих частот (схему Джіаколетто). Який фізичний зміст мають елементи цієї схеми r_{B1B} , r_{B1E} , r_{B1K} , C_E , r_{KE} , C_K ?
3. Чому джерело струму у вихідному колі схемі Джіаколетто керується не вхідною напругою V_{BE} , а напругою V_{B1E} ?
4. Які елементи схеми моделюють частотні властивості реального біполярного транзистора?
5. Чи змоделювали б вони частотні властивості транзистора, якби r_{B1B} був рівний нулю?

Вирази для обчислення параметрів елементів схеми Джіаколетто через параметри реального транзистора:

- крутість прохідної характеристики транзистора в околі робочої точки можна знайти згідно виразу

$$S = \frac{1}{r_d} = I_{E0} \cdot \frac{e}{k \cdot T},$$

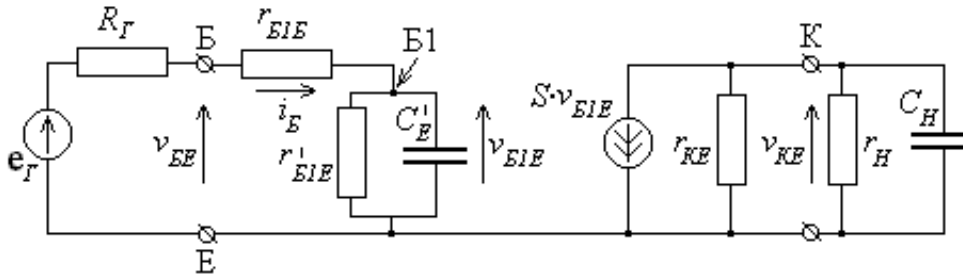
де r_d - диференціальний опір відкритого емітерно-базового переходу, $I_{E0} \approx I_{K0}$ - постійний (режимний) струм через емітерно-базовий перехід та режимний струм колектора; наближено $S(\frac{mA}{V}) \approx 40 \cdot I_{K0}(mA)$;

- опір резистора r_{B1E} :	$r_{B1E} = \frac{h_{21E}}{S};$
- опір резистора r_{B1B} :	$r_{B1B} = h_{11E} - r_{B1E};$
- опір резистора r_{B1K} :	$r_{B1K} = \frac{r_{B1E}}{h_{12E}};$
- опір резистора r_{KE} :	$r_{KE} = \frac{1}{h_{22E} - h_{12E} \cdot S};$
- ємність конденсатора C_E :	$C_E = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{h_{21E}} \cdot r_{B1E}}.$

Завдання для самостійної роботи 7.1. За заданими h_E -параметрами транзистора, струмом I_{K0} та граничною частотою f_{h21E} обчислити значення параметрів елементів схеми Джіаколетто.

7.2. Еквівалентна схема підсилювача на біполярному транзисторі в області високих частот

В області високих частот еквівалентна схема підсилювального каскаду на біполярному транзисторі має вигляд:



Тут до схеми Джіаколетто приєднуються: на вході джерело сигналу e_r (генератор) з внутрішнім опором R_r , на виході - резистор навантаження r_H , який може бути зашунтований конденсатором C_H .

Для зручності аналізу частотних властивостей підсилювального каскаду в області високих частот елементи C_K та r_{B1K} , які утворюють внутрішній паралельний негативний зворотний зв'язок у транзисторі, перераховують на вхід схеми у елементи C'_E та r'_{B1E} , значення параметрів яких обчислюють згідно виразів

$$C'_E = C_E + C_K \cdot (1 + k_{\text{внутр}}) \text{ та } r'_{B1E} = \left(r_{B1E} \parallel \frac{r_{B1K}}{1 + k_{\text{внутр}}} \right),$$

де $k_{\text{внутр}} = \frac{V_{\text{вих}}}{V_{B1E}} = S \cdot (r_H \parallel r_{KE}) = S \cdot R_H$ - внутрішній коефіцієнт підсилення каскаду,

який завжди буває більшим за зовнішній коефіцієнт підсилення $k_{\text{зовн}} = \frac{V_{\text{вих}}}{V_{BE}}$.

Оскільки внутрішній опір ідеального джерела вхідного сигналу e_r дорівнює нулю, то конденсатор C'_E зашунтовано опором $r''_{B1E} = r'_{B1E} \parallel (r_{B1E} + R_r)$, і вхідне коло транзистора, яке і обумовлює його інерційність, буде тепер мати сталу часу

$$\tau_T = r''_{B1E} \cdot C'_E.$$

Але до інерційності власне транзистора у схемі підсилювача додається ще й інерційність, обумовлена зовнішніми реактивними елементами схеми, а саме ємністю навантаження C_H , що увімкнена паралельно до резистора

навантаження у вихідному колі підсилювача. Вираз для сталої часу цього кола має вигляд

$$\tau_H = R_H \cdot C_H,$$

а загальна інерційність схеми (у першому наближенні) залежить від суми вхідної і вихідної сталих часу

$$\tau = \tau_T + \tau_H.$$

Ця величина й визначатиме верхню граничну частоту підсилювального каскаду $f_B = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot \tau)}$, яка завжди менша від граничної частоти самого транзистора f_{h21E} .

Завдання для самостійної роботи 7.2. Обчислити значення верхньої граничної частоти підсилювача на транзисторі, розглянутому в завданні 7.1. (додатково задаються значення r_H , R_H , C_K , C_H).

7.3. Амплітудно-частотна характеристика підсилювача на біполярному транзисторі в області високих частот

Контрольні питання до завдання 7.3:

1. Запишіть вираз для внутрішнього коефіцієнту підсилення каскаду на низьких та середніх частотах.
2. Запишіть вираз для зовнішнього коефіцієнту підсилення каскаду на низьких та середніх частотах. Зверніть увагу на те, що $k_{зовн} < k_{внутр}$.
3. Запишіть вираз для зовнішнього коефіцієнту підсилення на довільній (не малій) частоті f , у тому числі і для $f = f_{h21E}$. Схематично намалюйте графік АЧХ підсилювача на біполярному транзисторі в області високих частот. Позначте на ньому верхню граничну частоту каскаду. Зверніть увагу на те, що $k(f_{h21E})$ буде істотно меншим, ніж $k_{зовн} / \sqrt{2}$. Поясніть цей факт.

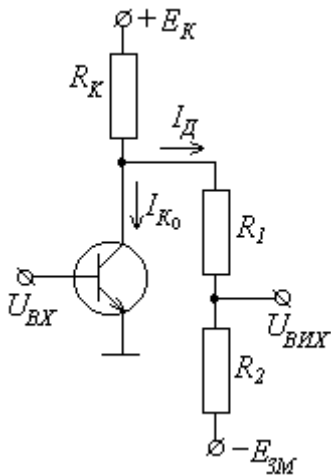
Завдання для самостійної роботи 7.3. Обчислити значення коефіцієнту підсилення підсилювача, розглянутого в завданнях 7.1 та 7.2

- а) на низькій частоті (внутрішній і зовнішній);
- б) на частоті f_{h21E} (граничній частоті самого транзистора).

8. ПІДСИЛЮВАЧІ МІНЛИВОЇ⁴ НАПРУГИ (ПМН)

(підсилювачі мінливої напруги і струму, диференціальні підсилювачі, операційні підсилювачі)

8.1. Підсилювач мінливої напруги із зсувом рівня постійної напруги на виході



Контрольні питання до завдання 8.1:

1. Чим відрізняється підсилювач мінливої напруги від підсилювача змінної напруги?
2. Намалюйте схему каскаду ПМН із зсувом рівня постійної напруги на виході. З якою метою тут поставлено резисторний дільник R_1 - R_2 ? З яких міркувань обирають величини опорів цих резисторів?
3. Запишіть вирази для внутрішнього і зовнішнього коефіцієнтів підсилення схеми.

Завдання для самостійної роботи 8.1. Розрахувати параметри елементів каскаду підсилювача мінливої напруги із зсувом рівня постійної напруги на виході. Визначити внутрішній і зовнішній коефіцієнти підсилення.

Вказівки:

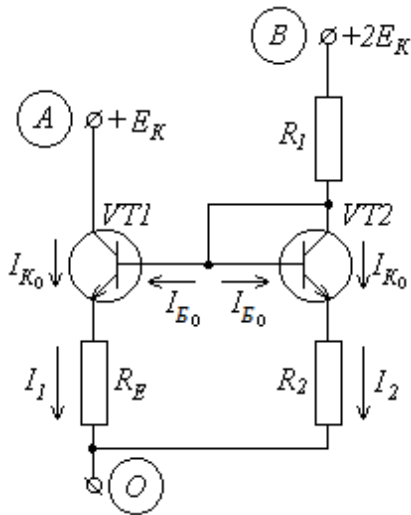
- 1) Струм дільника I_D дорівнює режимному колекторному струму транзистора I_{K0} .
- 2) При розрахунках опором навантаження транзистора вважати паралельне сполучення $R_K \parallel (R_1 + R_2)$. Дати письмове пояснення що до цього.

8.2. Струмове дзеркало

Контрольні питання до завдання 8.2:

1. Намалюйте схему струмового дзеркала. Які властивості має ця схема, де і з якою метою вона застосовується?
2. Виведіть вираз для співвідношення струмів I_1 та I_2 у гілках цієї схеми? Спираючись на нього поясніть, чому ця схема має таку назву.
3. Навіщо у схемі струмового дзеркала потрібен транзистор VT2? Чому його база коротко з'єднана з колектором?

⁴ Тут і надалі термін "мінлива" вживається на заміну застарілого і не зовсім вірного терміну "постійна".



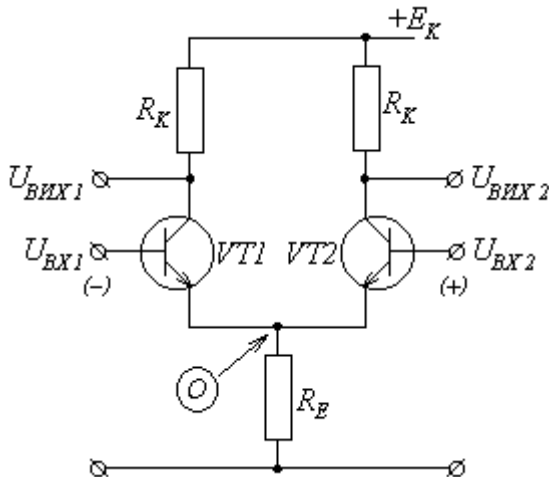
4. Запишіть вирази для омичного та диференціального опорів струмового дзеркала (між точками "А" і "О")?

Завдання для самостійної роботи 8.2. На транзисторах, режим і параметри яких вказано в завданні 8.1, розрахувати струмове дзеркало: визначити параметри елементів його схеми R_E , R_1 , R_2 , а також омичний і диференціальний опір між точками "А" і "О".

Вказівки:

- 1) Режимна напруга у точці "В" дорівнює $2 \cdot E_K$, а в точці "А" дорівнює E_K .
- 2) Струми через транзистори рівні і дорівнюють I_{K0} .

8.3. Диференціальний підсилювач



Контрольні питання до завдання 8.3:

1. Намалюйте схему каскаду диференціального підсилювача. Чому він має таку назву та які його основні властивості?
2. Де у цієї схеми синфазний вхід, а де протифазний? Чому вони отримали такі назви?
3. Запишіть вирази для визначення напруги на виході 1 та виході 2.
4. Виведіть вираз для диференціальних (різницевих) коефіцієнтів підсилення k_p цієї схеми? За яких умов ці вирази є справедливими?
5. Що таке коефіцієнт підсилення синфазного сигналу?
6. Що таке коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу? Який у нього практичний зміст?

Завдання для самостійної роботи 8.3. Скласти схему диференціального підсилювача, в якому замість емітерного резистора R_E увімкнене струмове дзеркало з диференціальним опором $R_{E \text{ diff}}$. Живлення усієї схеми є двополярним ($\pm E_K$); постійна напруга в точці "О" дорівнює нулю.

Обчислити опір резистора R_K , коефіцієнти підсилення різницевого і синфазного сигналів, коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу. Останній подайте у децибелах.

Вказівки:

- 1) Дані про транзистори та їх режим запозичити із умови завдання 8.1.
- 2) При розрахунку різницевого коефіцієнту підсилення враховувати вихідну провідність транзистора.

І.І. БЕХ, С.М. ЛЕВИТСЬКИЙ

9. ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ (ОП)

9.1. Основні схеми увімкнення операційного підсилювача

Контрольні питання до завдання 9.1:

1. Що таке "операційний підсилювач"? Для чого було створено операційний підсилювач? Поясніть зміст його назви.
2. Яке призначення мають виводи операційного підсилювача?
3. Які основні властивості має операційний підсилювач?
4. Намалюйте структурну схему операційного підсилювача та поясніть роль кожного вузла у забезпеченні його основних властивостей.
5. В чому полягає сутність наближення "ідеального підсилювача!"?

9.1.1. Підсилювач, що не інвертує фазу сигналу (синфазний підсилювач)⁵

Контрольні питання до завдання 9.1.1:

1. Намалюйте схему синфазного підсилювача та поясніть принцип її дії.
2. У наближенні "ідеального підсилювача" виведіть вираз для коефіцієнту підсилення k синфазного підсилювача.
3. З яких міркувань обирають параметри елементів схеми підсилювального каскаду на операційному підсилювачі при заданому коефіцієнті підсилення k ?

Максимальне значення суми опорів $(R_1 + R_{33})$ визначається струмом зміщення I_{3M} , який зазвичай вказано у технічній документації на операційний підсилювач. На практиці вважають, що струм через резистор R_{33} у колі зворотного зв'язку $I_{R_{33}} = 20 \cdot I_{3M}$ при $U_{BX} = \frac{+U_{Ж}}{2}$. Тоді:

$$(R_1 + R_{33})_{\max} = + \frac{U_{Ж}}{2} \cdot \frac{1}{20 \cdot I_{3M}}.$$

Наприклад, для операційного підсилювача 140УД7 $I_{3M_{\max}} = 500 \text{ нА}$. Тому при $U_{Ж} = \pm 15 \text{ В}$ маємо: $(R_1 + R_{33})_{\max} = \frac{7,5}{10^{-5}} = 750 \text{ кОм}$. Мінімальне значення суми опорів $(R_1 + R_{33})$ визначається вихідним струмом операційного підсилювача. Для 140УД7 воно складає близько 2 кОм. Проте такі малі

5 Сторінки 44-46. І.І. Бех. "Аналогові електронні пристрої": підручник. - Київ : Видавнича лабораторія факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, -2024, - 258 с. <https://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2025/01/I.I.-Beh.-Analogovi-elektronni-prystroyi.pdf>

значення використовують зрідка, бо в цьому випадку вихідного струму не вистачає для навантаження.

Інший спосіб обрання параметрів елементів схеми підсилювального каскаду на операційному підсилювачі полягає у тому, що обов'язково повинна виконуватися нерівність $R_{33} \ll R_{BX}(ОП)$ із запасом, не меншим, ніж у 100 разів. Тут $R_{BX}(ОП)$ - вхідний диференціальний опір власне операційного підсилювача, який також вказано у технічній документації.

Завдання для самостійної роботи 9.1.1. Для схеми синфазного підсилювача на операційному підсилювачі задано опори резисторів R_1 та R_{33} . Знайти величину коефіцієнту підсилення k .

9.1.2. Підсилювач, що інвертує фазу сигналу (протифазний підсилювач)⁶

Контрольні питання до завдання 9.1.2:

1. Намалюйте схему протифазного підсилювача та поясніть принцип її дії
2. У наближенні "ідеального підсилювача" виведіть вираз для коефіцієнту підсилення k протифазного підсилювача на операційному підсилювачі.

Завдання для самостійної роботи 9.1.2. Для схеми протифазного підсилювача на операційному підсилювачі задано опори резисторів R_1 та R_{33} . Знайти величину коефіцієнту підсилення k .

9.1.3. Підсилювач із диференціальним входом (диференціальний підсилювач)⁷

Контрольні питання до завдання 9.1.3:

1. Намалюйте схему диференціального підсилювача на операційному підсилювачі та поясніть принцип її дії.
2. У наближенні "ідеального підсилювача" виведіть вираз для коефіцієнту підсилення k та для значення напруги $U_{ВИХ}$ на виході такого підсилювача. Яку у мову при цьому бажано виконати?

Завдання для самостійної роботи 9.1.3. Для диференціального підсилювача на операційному підсилювачі задано опори резисторів $R_{33}=R'_{33}$, $R_1=R_2$ та напруги на його входах U_1 та U_2 . Знайти величину напруги на виході схеми $U_{ВИХ}$.

6 Сторінки 46-48. І.І. Бех. "Аналогові електронні пристрої": підручник. - Київ : Видавнича лабораторія факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, -2024, - 258 с. <https://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2025/01/I.I.-Beh.-Analogovi-elektronni-prystroyi.pdf>

7 Сторінки 48-50. І.І. Бех. "Аналогові електронні пристрої": підручник. - Київ : Видавнича лабораторія факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, -2024, - 258 с. <https://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2025/01/I.I.-Beh.-Analogovi-elektronni-prystroyi.pdf>

9.2. Вплив зворотного зв'язку за напругою на властивості підсилювальних каскадів на операційному підсилювачі

9.2.1. Вплив послідовного негативного зворотного зв'язку за напругою на коефіцієнт підсилення підсилювача⁸

Контрольні питання до завдання 9.2.1:

1. Проаналізуйте, як послідовний негативний зворотній зв'язок впливає на коефіцієнт підсилення підсилювального каскаду на операційному підсилювачі.
2. Вкажіть причини неідеальності синфазного підсилювача, зібраного з використанням реального операційного підсилювача.
3. Виведіть вираз для знаходження коефіцієнту підсилення синфазного підсилювача, зібраного з використанням реального операційного підсилювача.
4. Як оцінити похибку у визначенні коефіцієнту підсилення реального підсилювального каскаду?

Завдання для самостійної роботи 9.2.1. Коефіцієнт підсилення власне операційного підсилювача рівний A . Обчислити значення коефіцієнту підсилення k_{pe} реального синфазного підсилювача та оцінити похибку у визначенні k_{pe} . Значення опорів резисторів R_1 та R_{33} запозичити із умови завдання 9.1.1. Знайти мінімальне значення A для забезпечення значення коефіцієнту підсилення $k_{pe} = k_a \pm a\%$ реального синфазного підсилювача.

9.2.2. Вплив паралельного негативного зворотного зв'язку за напругою на коефіцієнт підсилення підсилювача⁹

Контрольні питання до завдання 9.2.2:

1. Проаналізуйте, як паралельний негативний зворотній зв'язок впливає на коефіцієнт підсилення підсилювального каскаду на операційному підсилювачі.
2. Вкажіть причини неідеальності протифазного підсилювача, зібраного з використанням реального операційного підсилювача.

8 Сторінки 53-58. І.І. Бех. "Аналогові електронні пристрої": підручник. - Київ : Видавнича лабораторія факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, -2024, - 258 с. <https://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2025/01/I.I.-Beh.-Analogovi-elektronni-prystroyi.pdf>

9 Сторінки 58-63. І.І. Бех. "Аналогові електронні пристрої": підручник. - Київ : Видавнича лабораторія факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, -2024, - 258 с. <https://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2025/01/I.I.-Beh.-Analogovi-elektronni-prystroyi.pdf>

3. Виведіть вираз для знаходження коефіцієнту підсилення реального протифазного підсилювача.

Завдання для самостійної роботи 9.2.2. У схемі протифазного підсилювача використано операційний підсилювач з власним коефіцієнтом підсилення A . Обчислити значення коефіцієнту підсилення k_{pe} реального протифазного підсилювача та оцінити похибку у визначенні k_{pe} . Значення опорів резисторів R_1 та $R_{зз}$ запозичити із умови завдання 9.1.2. Знайти мінімальне значення A для забезпечення значення коефіцієнту підсилення $k_{pe} = k_b \pm b\%$ реального протифазного підсилювача.

9.2.3. Вплив негативного зворотного зв'язку за напругою на вихідний опір підсилювача¹⁰

Контрольні питання до завдання 9.2.3:

1. Проаналізуйте, як негативний зворотній зв'язок впливає на ефективний вихідний опір підсилювача.

Завдання для самостійної роботи 9.2.3. Нехай коефіцієнт підсилення власне операційного підсилювача рівний A (запозичити із умови завдання 9.2.1), коефіцієнт передачі кола зворотного зв'язку β , а паспортна величина вихідного опору власне операційного підсилювача $R_{вих}(ОП)$. Обчислити значення ефективного вихідного опору підсилювального каскаду $R_{вих зз}$?

9.3. Вплив синфазного сигналу на коефіцієнт підсилення підсилювача¹¹

Контрольні питання до завдання 9.3:

1. Дайте означення коефіцієнту підсилення синфазного сигналу $k_{сс}$? Які значення $k_{сс}$ притаманні типовому операційному підсилювачу?
2. Дайте означення коефіцієнту ослаблення синфазного сигналу $k_{осс}$. В чому полягає його зміст? Які значення $k_{осс}$ притаманні типовому операційному підсилювачу?
3. Як впливає величина $k_{осс}$ на значення реального коефіцієнту підсилення підсилювального каскаду k_{pe} порівняно із його ідеальним значенням k_{id} ?

10 Сторінки 63-68. І.І. Бех. "Аналогові електронні пристрої": підручник. - Київ : Видавнича лабораторія факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, -2024, - 258 с. <https://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2025/01/I.I.-Beh.-Analogovi-elektronni-prystroyi.pdf>

11 Сторінки 72-73. І.І. Бех. "Аналогові електронні пристрої": підручник. - Київ : Видавнича лабораторія факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, -2024, - 258 с. <https://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2025/01/I.I.-Beh.-Analogovi-elektronni-prystroyi.pdf>

4. Як оцінити похибку у визначенні коефіцієнту підсилення реального підсилювального каскаду на операційному підсилювачі, пов'язану зі скінченням значенням $k_{осс}$?

Завдання для самостійної роботи 9.3. Для схеми синфазного підсилювача на операційному підсилювачі задано опори резисторів R_1 та $R_{зз}$ (запозичити із умови завдання 9.1.1), значення коефіцієнту підсилення власне операційного підсилювача A (запозичити із умови завдання 9.2.1), та величину коефіцієнту ослаблення синфазного сигналу $k_{осс}$. Обчислити значення значення коефіцієнту $k_{ре}$ реального синфазного підсилювача, та оцінити похибку у визначенні $k_{ре}$, пов'язану зі скінченням значенням $k_{осс}$.

І.І. БЕХ, С.М. ЛЕВИТСЬКИЙ

10. ПРИСТРОЇ АНАЛОГОВОГО ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

10.1. Схеми додавання¹²

10.1.1. Суматор, що інвертує (протифазний суматор)

Контрольні питання до завдання 10.1.1:

1. Намалюйте схему протифазного суматора та поясніть принцип її дії.
2. У наближенні "ідеального підсилювача" виведіть вираз для напруги на виході протифазного суматора. При виконанні якої умови він є справедливим?

Завдання для самостійної роботи 10.1.1. Для схеми протифазного суматора з двома входами визначити напругу $U_{\text{вих}}$ на виході, якщо задано напруги на його входах U_1 та U_2 .

10.1.2. Протифазний суматор із масштабними коефіцієнтами вхідних напруг

Контрольні питання до завдання 10.1.2:

1. Що таке масштабний коефіцієнт у схемі протифазного суматора? Для чого він потрібен?
2. У наближенні "ідеального підсилювача" виведіть вираз для напруги на виході протифазного суматора з масштабними коефіцієнтами. При виконанні якої умови він є справедливим?

Завдання для самостійної роботи 10.1.2. Для схеми протифазного суматора з масштабними коефіцієнтами і двома входами визначити напругу $U_{\text{вих}}$ на виході, якщо задано напруги на його входах U_1 та U_2 , опори резисторів R_1 та R_2 , а опір резистора в колі зворотного зв'язку рівний $R_{33}=330 \text{ кОм}$.

Якщо узагальнити вираз для напруги на виході протифазного суматора з масштабними коефіцієнтами на випадок n входів, то можна записати:

$$U_{\text{вих}} = - \left(U_1 \cdot \frac{R_{33}}{R_1} + U_2 \cdot \frac{R_{33}}{R_2} + \dots + U_n \cdot \frac{R_{33}}{R_n} \right).$$

Аналіз цієї формули дозволяє зробити дуже важливий висновок: якщо

$R_1=R_2=\dots=R_n$ і $R_{33}=\frac{R_1}{n}$, тоді:

¹² Сторінки 129-133. І.І. Бех. "Аналогові електронні пристрої": підручник. - Київ : Видавнича лабораторія факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, -2024, - 258 с. <https://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2025/01/I.I.-Beh.-Analogovi-elektronni-prystroyi.pdf>

$$U_{\text{вих}} = -\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n U_k ,$$

тобто вихідна напруга є середнім арифметичним вхідних напруг, взятим з оберненим знаком.

10.1.3. Схема додавання-віднімання

Контрольні питання до завдання 10.1.3:

1. Намалюйте схему додавання-віднімання та поясніть принцип її дії.
2. Запишіть вираз для знаходження значення напруги $U_{\text{вих}}$ на виході схеми додавання-віднімання у наближенні "ідеального підсилювача".
3. Яку умову слід виконати для того, щоб цей вираз був справедливим?
4. Чи буде схема додавання-віднімання працювати правильно, якщо ця умова не буде виконана? Поясніть відповідь.
5. Що слід робити, якщо ця умова не виконується?

Завдання для самостійної роботи 10.1.3. Для схеми додавання-віднімання з чотирма входами (два протифазних і два синфазних) задано опори резисторів $R_{33}=R'_{33}$, R_1 , R_2 , R'_1 , R'_2 . Напруги, прикладені до протифазних входів, рівні U_1 та U_2 ; прикладені до синфазних входів - U'_1 та U'_2 . Обчислити значення напруги $U_{\text{вих}}$ на виході схеми?

10.2. Схеми інтегрування та диференціювання

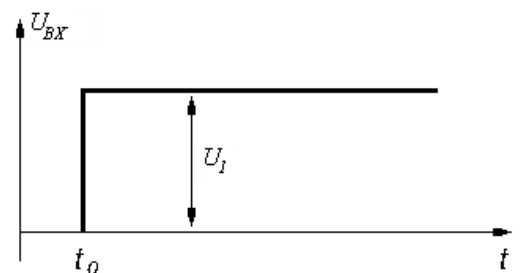
10.2.1. Схема інтегрування на операційному підсилювачі¹³

Контрольні питання до завдання 10.2.1:

1. Що таке інтегрування і який зміст воно має в радіоелектроніці?
2. Намалюйте схему інтегрування на операційному підсилювачі і поясніть принцип її дії.
3. У наближенні "ідеального підсилювача" виведіть вираз для напруги на виході схеми інтегрування.

Завдання для самостійної роботи 10.2.1.

Для схеми інтегрування на операційному підсилювачі вихідна напруга задана виразом $U_{\text{вих}} = K_1 \cdot \int U_{\text{вх}} \cdot dt$. Як буде виглядати сигнал на виході схеми



13 Сторінки 134-137. І.І. Бех. "Аналогові електронні пристрої": підручник. - Київ : Видавнича лабораторія факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, -2024, - 258 с. <https://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2025/01/I.I.-Beh.-Analogovi-elektronni-prystroyi.pdf>

інтегрування, якщо на його вхід подати стрибок напруги, форма якого показана на рисунку? Намалювати графік залежності вихідного сигналу від часу. Знайти значення опору резистора R , якщо ємність конденсатора рівна C . Обчислити значення напруги $U_{\text{вих}}$ на виході схеми інтегрування через час Δt після моменту t_0 , якщо $U_1 = +1 \text{ В}$?

10.2.2. Схема диференціювання на операційному підсилювачі¹⁴

Контрольні питання до завдання 10.2.2:

1. Намалюйте схему диференціювання на операційному підсилювачі і поясніть принцип її дії.
2. У наближенні "ідеального підсилювача" виведіть вираз для напруги на виході схеми диференціювання.

Завдання для самостійної роботи 10.2.2. Знайти значення ємності конденсатора C , при якому напруга на виході схеми диференціювання на операційному підсилювачі матиме вигляд $U_{\text{вих}} = K_2 \cdot \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}$, якщо опір резистора рівний R . Чому буде рівна напруга на виході схеми диференціювання через час Δt після надходження вхідного сигналу виду $U_{\text{вх}} = \alpha \cdot t$.

10.3. Логарифмічні схеми¹⁵

10.3.1. Логарифмічний перетворювач (схема логарифмування)

Контрольні питання до завдання 10.3.1:

1. Які саме електронні елементи використовують при побудові логарифмічного перетворювача на основі операційного підсилювача? Поясніть, чому.
2. Намалюйте схему логарифмічного перетворювача з біполярним транзистором у колі зворотного зв'язку та поясніть принцип її дії. Які переваги має ця схема порівняно із логарифмічним перетворювачем на діоді?
3. У наближенні "ідеального підсилювача" виведіть вираз для напруги $U_{\text{вих}}$ на виході логарифмічного перетворювача на біполярному транзисторі.

14 Сторінки 145-148. І.І. Бех. "Аналогові електронні пристрої": підручник. - Київ : Видавнича лабораторія факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, -2024, - 258 с. <https://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2025/01/I.I.-Beh.-Analogovi-elektronni-prystroyi.pdf>

15 Сторінки 151-158. І.І. Бех. "Аналогові електронні пристрої": підручник. - Київ : Видавнича лабораторія факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, -2024, - 258 с. <https://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2025/01/I.I.-Beh.-Analogovi-elektronni-prystroyi.pdf>

Завдання для самостійної роботи 10.3.1. Для логарифмічного перетворювача на напівпровідниковому діоді знайти значення напруги $U_{\text{вих}}$ на його виході, якщо відомі напруга $U_{\text{вх}}$ на вході, опір резистора R та струм насичення зворотно зміщеного діода I_0 .

10.3.2. Антилогарифмічний перетворювач (схема піднесення до степеня)

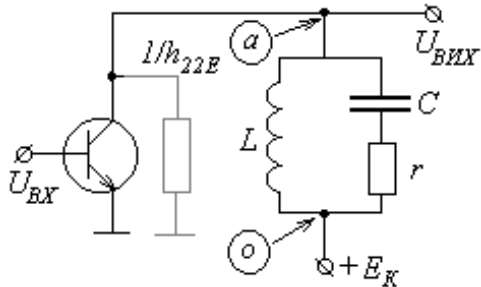
Контрольні питання до завдання 10.3.2:

1. Що таке антилогарифмічний перетворювач? Для чого він використовується?
2. Намалюйте схему антилогарифмічного перетворювача з біполярним транзистором та поясніть принцип її дії.
3. У наближенні "ідеального підсилювача" виведіть вираз для вихідної напруги антилогарифмічного перетворювача з біполярним транзистором.

Завдання для самостійної роботи 10.3.2. Для схеми антилогарифмічного перетворювача на напівпровідниковому діоді знайти значення напруги $U_{\text{вих}}$ на його виході, якщо задано напругу $U_{\text{вх}}$ на вході, опір резистора R та струм насичення зворотно зміщеного діода I_0 .

11. РЕЗОНАНСНІ ПІДСИЛЮВАЧІ

11.1. Резонансний підсилювач на біполярному транзисторі з безпосереднім увімкненням коливального контуру в коло колектора



Контрольні питання до завдання 11.1:

1. Намалюйте схему каскаду резонансного підсилювача з безпосереднім увімкненням коливального контуру у коло колектора біполярного транзистора.
2. Напишіть вирази для знаходження основних параметрів, що характеризують коливний контур:
 - резонансної частоти контуру ω_0 ;
 - характеристичного (хвильового) опору контуру ρ_0 ;
 - еквівалентного опору контуру на резонансній частоті $R_{екв0}$;
 - добротності ненавантаженого контуру Q_0 ;
 - смуги пропускання контуру Ω_0 .
3. Запишіть вираз для знаходження коефіцієнту підсилення цього каскаду на резонансній частоті.
4. Детально поясніть, як впливає шунтуюча дія вихідної провідності транзистора на добротність і частотну вибірковість резонансного підсилювача?

Врахувати вплив шунтуючої дії вихідної провідності транзистора h_{22E} на добротність і частотну вибірковість резонансного підсилювача можна пригадавши, що вихідний опір транзистора $R_{вих} = 1/h_{22E}$ увімкнений паралельно до $R_{екв0}$ ненавантаженого контуру і, отже, тепер ефективний еквівалентний опір навантаженого контуру буде визначатися виразом

$$R'_{екв0} = R_{вих} \parallel R_{екв0} = \frac{1}{h_{22E}} \parallel R_{екв0}.$$

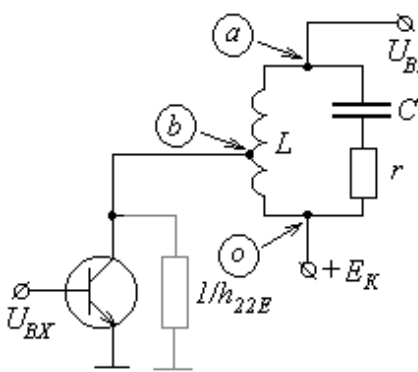
Звідси можна обчислити ефективну добротність навантаженого контуру:

$$Q' = \frac{R'_{екв0}}{\rho}.$$

Відповідно смуга пропускання контуру, яка і обумовлює вибірковість резонансного підсилювача, буде тепер рівна $\Omega' = \frac{\omega_0}{Q}$, де ω_0 - резонансна частота контуру.

Завдання для самостійної роботи 11.1. Для зображеної вище схеми каскаду резонансного підсилювача розрахувати коефіцієнт підсилення на резонансній частоті, ефективну добротність і смугу пропускання.

11.2. Резонансний підсилювач з автотрансформаторним увімкненням контуру в коло колектора



Шунтування контуру вихідною провідністю біполярного транзистора зменшує коефіцієнт підсилення каскаду і розширює його смугу пропускання (тобто погіршує його частотну вибірковість).

Зменшити ефект від цього шунтування можна підключаючи транзистор лише до частини котушки індуктивності контуру (тобто автотрансформаторно), до деякої проміжної точки "b". Тоді увесь контур буде зашунтований не вихідним опором транзистора $R_{вих} = 1/h_{22E}$, а перерахованим опором $R'_{вих} = R_{вих} \cdot m^2$, де $m = \frac{L_{ao}}{L_{bo}} > 1$ - коефіцієнт трансформації, а L_{ao} та L_{bo} - значення індуктивності між відповідними точками котушки. В цьому випадку ефективний еквівалентний опір навантаженого контуру буде рівним $R'_{екв0} = R'_{вих} \parallel R_{екв0}$, і його добротність знизиться меншою мірою, ніж у випадку безпосереднього увімкнення контуру в коло колектора.

Положення точки "b" слід обирати з умови узгодження вихідного опору транзистора $R_{вих} = 1/h_{22E}$ з еквівалентним опором контуру між точками "b" і "o":

$$R_{еквbo} = R_{вих} \Rightarrow \frac{R_{екваo}}{m^2} = \frac{1}{h_{22E}}.$$

При такому оптимальному узгодженні транзистор буде віддавати у контур максимальну потужність, і вихідний сигнал (тобто і коефіцієнт підсилення) буде максимальним.

Завдання для самостійної роботи 11.2. Розрахувати оптимальне значення індуктивності котушки зв'язку L_{bo} , оптимальний коефіцієнт підсилення каскаду і смугу його пропускання. Одержані результати порівняти з результатами, отриманими у попередньому завданні.

Вказівки:

1) Дані про контур і транзистор запозичити із умови завдання 11.1.

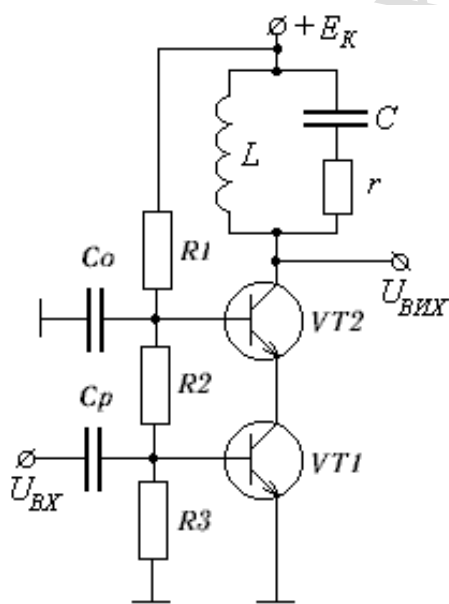
2) Завдання 11.2 слід розв'язувати у такій послідовності:

- з умови оптимального узгодження $R_{екв\,bo} = \frac{1}{h_{22E}}$ знайти оптимальне значення коефіцієнту трансформації m_{opt} і з нього одержати оптимальне значення індуктивності котушки зв'язку L_{bo} ;
- за умови оптимального узгодження знайти “внутрішній” коефіцієнт підсилення k_b у точці “b” схеми, вважаючи, що транзистор навантажено на еквівалентний опір $R_{екв\,bo} = \frac{1}{h_{22E}}$;
- “зовнішній” коефіцієнт підсилення k_a (у точці “a” схеми, тобто на виході каскаду) дорівнює $m \cdot k_b$;
- значення ефективної добротності навантаженого контуру і відповідну смугу його пропускання можна обчислити, користуючись виразами

$$Q' = \frac{R'_{екв0}}{\rho} = \frac{Q}{2}, \quad \Omega' = \frac{\omega_0}{Q'};$$

- дати фізичне пояснення, чому ефективна добротність навантаженого контуру зменшується вдвічі.

11.3. Резонансний підсилювач з каскодним увімкненням біполярних транзисторів



коло колектора;

Порівняно із схемами резонансних підсилювачів, розглянутими у попередніх завданнях, застосування каскодного увімкнення біполярних транзисторів дає такі переваги:

- вихідний опір транзисторів, увімкнених за каскодною схемою дорівнює $1/h_{22B}$ і є значно більшим, ніж вихідний опір окремого транзистора, увімкненого за схемою CE; тому транзистори меншою мірою шунтують контур та погіршують коефіцієнт підсилення і вибірковість каскаду, що, у свою чергу, дозволяє безпосередньо вмикати контур в

- параметр внутрішнього зворотного зв'язку при каскодному увімкненні транзисторів дорівнює $H_{12}=h_{12E}^{(1)} \cdot h_{12B}^{(2)}$, що значно менше ніж у окремого транзистора; тим самим усувається небезпека самозбудження підсилювача через його внутрішній зворотний зв'язок.

Тому каскодне увімкнення транзисторів охоче застосовується у багатокаскадних резонансних підсилювачах.

Завдання для самостійної роботи 11.3. Для резонансного підсилювача, транзистори якого увімкнені за касодною схемою, обчислити k_0 - коефіцієнт підсилення на резонансній частоті та $k(\Delta f)$ - значення коефіцієнту підсилення при розстроюванні контуру на величину Δf .

Вказівки:

- 1) Дані про контур і транзистор запозичити із умови завдання 11.1.
- 2) Завдання 11.3 слід розв'язувати у такій послідовності:
 - коефіцієнт підсилення на резонансній частоті обчислюється за звичайною формулою

$$k_0 = \frac{H_{21}}{H_{11}} \cdot \frac{R_{екв0}}{1 + H_{22} \cdot R_{екв0}},$$

у якій фігурують H - параметри для каскодного увімкнення транзисторів ($H_{11}=h_{11E}$, $H_{21}=h_{21E}$, $H_{22}=h_{22B}$), а $R_{екв0}$ відповідає ненавантаженому контуру;

- за умови, коли виконується нерівність $H_{22} \cdot R_{екв0} \ll 1$ (виконання умови обов'язково перевірити!), то можна використовувати спрощений вираз

$$k_0 = \frac{H_{21}}{H_{11}} \cdot R_{екв0};$$

- при розстроюванні контуру на величину Δf модуль еквівалентного опору контуру дорівнюватиме

$$|Z_{екв}| = \frac{R_{екв0}}{\sqrt{1+x^2}}, \quad x = 2 \cdot Q_0 \cdot \frac{\Delta f}{f_0},$$

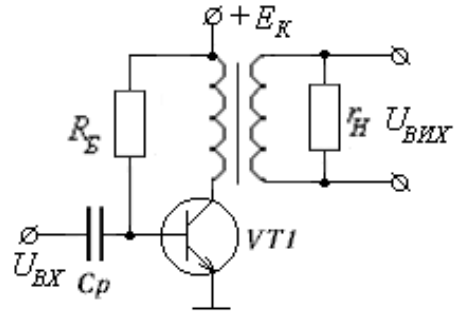
де f_0 - резонансна частота контуру, Q_0 - добротність ненавантаженого контуру. Отже

$$k(\Delta f) = \frac{k_0}{\sqrt{1+x^2}}.$$

11.4. Резонансний підсилювач потужності

Контрольні питання до завдання 11.4:

1. Намалюйте схему каскаду резонансного підсилювача потужності класу A^{16} на біполярному транзисторі та поясніть, у чому полягає відмінність між резонансним підсилювачем потужності та резонансним підсилювачем напруги?
2. Чому в резонансному підсилювачі потужності при негармонічному струмі колектора на виході все ж таки одержують гармонічну напругу?
3. Якими параметрами режиму транзистора визначається кут відсічення струму колектора? Обґрунтуйте відповідь.
4. Зі зменшенням кута відсічення к.к.д. резонансного підсилювача потужності зростає. Чому в такому разі не намагаються зробити кут відсічення якомога меншим?
5. Із зростанням напруженості режиму ξ к.к.д. зростає. Чому ж тоді зазвичай обмежуються величинами ξ , що не перевищують одиниці?



Завдання для самостійної роботи 11.4. Для вказаного в індивідуальному завданні типу транзистора розрахувати схему підсилювального каскаду потужності в режимі класу А. Обчислити максимальну потужність сигналу, к.к.д. одержаного підсилювача та коефіцієнт трансформації трансформатора, якщо задано опір резистора навантаження r_H ?

Вказівки:

- 1) Втратами потужності у трансформаторі можна знехтувати.
- 2) Завдання 11.4 слід розв'язувати у такій послідовності:
 - обрати на графіку сімейства вихідних характеристик транзистора положення робочої точки і визначити E_K та I_{K0} ;
 - визначити амплітуди змінних компонентів напруги колектор-емітер U_{Km} та струму колектора I_{Km} (покласти $\xi=0,8$);
 - обчислити корисну потужність підсиленого сигналу P_K ;
 - обчислити споживану підсилювачем потужність P_0 та його к.к.д η ;
 - обчислити опір навантаження у колі колектора транзистора R_H та коефіцієнт трансформації m ;
 - обчислити значення опору резистора R_B в колі бази.

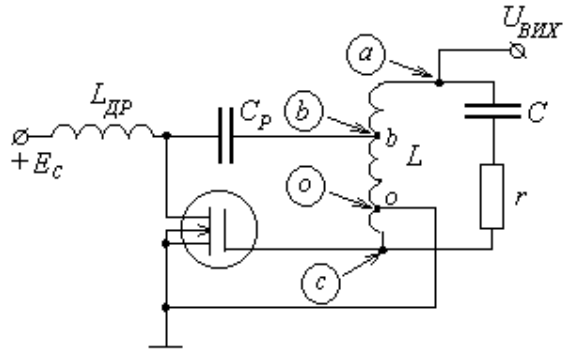
¹⁶ Сторінки 208-212, 214-217. Левитський С.М. Основи радіоелектроніки: Підручник. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2007. – 455 с. ISBN 966-594-967-5

12. АВТОГЕНЕРАТОРИ

12.1. LC-автогенератор з паралельним живленням

Контрольні питання до завдання 12.1:

1. Що таке автогенератор?
2. Намалюйте схему автогенератора з паралельним живленням на МДН-транзисторі з ізольованим затвором та вбудованим n -каналом, увімкненого за схемою індуктивної триточки. Поясніть призначення кожного з елементів цієї схеми.
3. Як у цій схемі реалізовано позитивний зворотний зв'язок?
4. У чому полягає принцип паралельного живлення схеми автогенератора?



Завдання для самостійної роботи 12.1. Для схеми автогенератора з паралельним живленням на МОН-транзисторі з ізольованим затвором та вбудованим n -каналом, увімкненого за схемою індуктивної триточки, обчислити:

- а) оптимальну величину коефіцієнту увімкнення контуру m_{opt} та відповідне значення індуктивності зв'язку контуру з транзистором L_{bo} ;
- б) величину коефіцієнту зворотного зв'язку β , необхідного для самозбудження автогенератора, та індуктивності зворотного зв'язку L_{co} ;
- в) величину ємності розділового конденсатора C_P та індуктивності котушки дроселя L_{DP} .

Вказівки:

- 1) Оскільки, зазвичай, $L_{co} \ll L_{bo} < L_{ao}$, то можна вважати, що $L_{ao} \approx L_{ac} = L$, де L - загальна індуктивність котушки контуру.
- 2) Мають бути виконані нерівності $X_{C_P} \ll R_{екв\ bo}$; $X_{L_{DP}} \gg (R_{екв\ bo} \parallel R_i)$; запас цих нерівностей слід взяти рівним 10.
- 3) Завдання 12.1 слід розв'язувати у такій послідовності:
 - визначити частоту генерації;
 - визначити загальний еквівалентний опір контуру;

- визначити коефіцієнт автотрансформації m_{opt} для оптимального увімкнення контуру і величину індуктивності зв'язку контуру з транзистором L_{bo} (для цього скористатися рівністю $R_{екв\ bo} \equiv R_{bo} = R_i$);
- визначити коефіцієнт підсилення (внутрішній, по відношенню до точки "b" схеми, та зовнішній, по відношенню до точки "a");
- визначити коефіцієнт зворотного зв'язку β (запас нерівності $k \cdot \beta > 1$ взяти рівним 1,5) і величину індуктивності зворотного зв'язку L_{bo} ;
- визначити величину ємності розділового конденсатора C_p та індуктивності котушки дроселя $L_{др}$.

12.2. Вплив інерційності біполярного транзистора на частоту генерації автогенератора

Контрольні питання до завдання 12.2:

1. Як впливає інерційність транзистора на фазовий зсув між емітерно-базовою напругою і струмом колектора?
2. Як цей фазовий зсув компенсується у схемі автогенератора для того щоб зберегти виконання фазової умови самозбудження?
3. Як цей фазовий зсув пов'язаний з частотою сигналу, що буде генеруватися автогенератором? Запишіть відповідний вираз.

Завдання для самостійної роботи 12.2. За заданим кутом φ фазового зсуву, що утворюється внаслідок інерційності транзистора, обчислити зсув частоти генерації $\Delta f = f - f_0$, де f_0 - власна частота коливального контуру. Дані про параметри контуру запозичити із завдання 12.1.

12.3. Усталена амплітуда коливаний на виході автогенератора

Контрольні питання до завдання 12.3:

1. Чим обумовлюється встановлення скінченої амплітуди коливаний на виході автогенератора?
2. Яким поліномом може бути апроксимована прохідна характеристика транзистора? Запишіть цей вираз.
3. Запишіть загальне рівняння, що дає змогу обчислити значення усталеної амплітуди коливаний на виході автогенератора і поясніть зміст величин, що входять до цього рівняння.
4. Чим відрізняється жорсткий режим самозбудження автогенератора від м'якого?

5. При якому співвідношенні коефіцієнтів поліному апроксимації реалізується м'який режим, а при якому - жорсткий? Поясніть, чому.

Завдання для самостійної роботи 12.3. Обчислити усталену амплітуду коливань на виході автогенератора при заданих коефіцієнтах поліному a_1 , a_3 та a_5 . У який бік буде змінюватися величина амплітуди коливань, якщо її початкове значення буде рівне $V_{BE0}=0,5$ В? Поясніть відповідь.

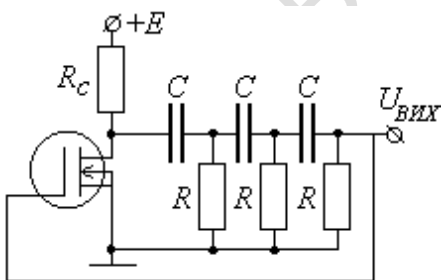
Вказівка:

Еквівалентний опір контуру разом з вихідним опором транзистора становить $R'_{екв} = (R_{екв} \parallel \frac{1}{h_{22E}})$; β - коефіцієнт зворотного зв'язку.

12.4. RC-автогенератор

Контрольні питання до завдання 12.4:

1. Чому на низьких (звукових) частотах краще застосовувати RC-автогенератори, а не LC-автогенератори?
2. У чому полягає ідея створення RC-автогенератора? Яким вимогам має задовольняти чотиріполюсник зворотного зв'язку в RC-автогенераторі?
3. Поодинокі RC-комірки обертає фазу гармонічного сигналу на кут φ . Чи можна при послідовному ввімкненні кількох таких комірок для визначення загального оберту фази підсумовувати кути φ кожної з них?
4. Зобразіть схему RC-автогенератора на МДН-транзисторі з ізолюваним затвором та вбудованим n -каналом з RC-комірками, що інтегрують. За яких умов ця схема самозбудиться? На якій частоті?
5. Чому форма коливань, генерованих RC-автогенераторами, зазвичай відрізняється від гармонічної? Що слід зробити, щоб форма генерованих коливань наблизилась до гармонічної?

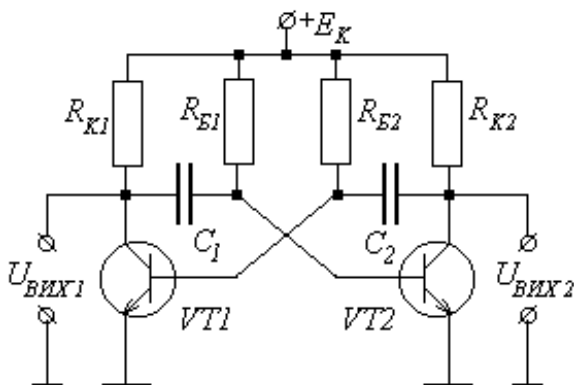


Завдання для самостійної роботи 12.4. У схемі RC-автогенератора з RC-комірками, що інтегрують, на МДН-транзисторі з ізолюваним затвором та вбудованим n -каналом, задано напругу живлення E , режим транзистора U_{CB0} , I_{C0} , і динамічні параметри транзистора R_i та S . Опір резисторів $R=100$ кОм, ємність конденсаторів C . На скільки перевиконана амплітудна умова самозбудження? Чому рівна частота генерованих коливань.

13. ІМПУЛЬСНІ СХЕМИ

13.1. Автоколивальний мультивібратор

Контрольні питання до завдання 13.1:



1. Намалюйте схему авто-коливального мультивібратора (у симетричному вигляді) та поясніть принцип її дії.
2. Яка напруга буде на колекторі транзистора, коли він закритий, і яка, коли він відкритий?
3. Якою буде величина амплітуди імпульсу, генерованого симетричним

мультивібратором?

4. Яким елементом схеми симетричного мультивібратора забезпечується утримання транзистора, наприклад, VT1, у закритому стані? Протягом якого часу транзистор перебуватиме у закритому стані?
5. Якою умовою забезпечується перебування транзистора, наприклад, VT2, у стані насичення?
6. З яких міркувань обирають значення опорів резисторів R_{K1} та R_{K2} ?
7. Чи встигнуть перезарядитися ємності C_1 та C_2 протягом перебування відповідних транзисторів у закритому стані? Які для цього мають виконуватися умови?

Завдання для самостійної роботи 13.1. Обчислити параметри елементів схеми симетричного мультивібратора і напругу живлення E_K .

Вказівки:

1) Для зручності розрахунків обрати $R_{K1}=R_{K2}=R_K$ та $R_{B1}=R_{B2}=R_B$; несиметричність мультивібратора забезпечується відповідним вибором величин C_1 та C_2 .

2) Струм колектора транзистора I_K має складати 0,5 від максимально допустимого струму I_{Kmax} .

3) Струм бази I_B має складати 1,5 від струму насичення бази (тобто має виконуватися рівність $R_B = \frac{h_{21E} \cdot R_K}{1,5}$).

4) Параметр $a = \frac{\theta_1}{\theta_2}$ - це співвідношення тривалості θ_1 та θ_2 імпульсів на виходах мультивібратора, $T = \theta_1 + \theta_2$ - період слідування цих імпульсів (період роботи мультивібратора).

5) Завдання 13.1 слід розв'язувати у такій послідовності:

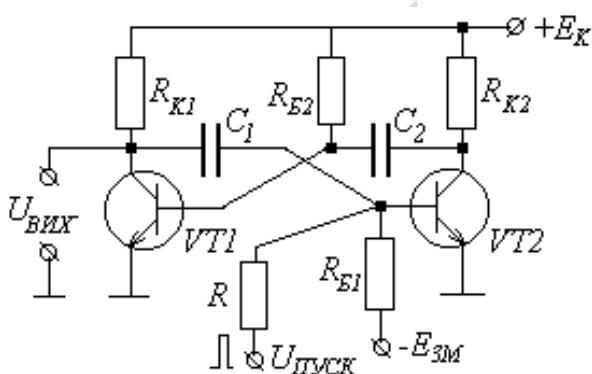
- визначити напругу живлення E_K ;
- визначити величину опору резистора R_K у колі колектора кожного транзистора;
- визначити величину опору резистора R_B у колі бази кожного транзистора;
- визначити величини тривалості θ_1 та θ_2 імпульсів на виходах мультивібратора;
- визначити величини ємностей конденсаторів C_1 та C_2 ;
- перевірити на виконання такі нерівності

$$\begin{aligned} R_{K1} \cdot C_1 &\ll R_{B2} \cdot C_2, \\ R_{K2} \cdot C_2 &\ll R_{B1} \cdot C_1, \end{aligned}$$

- запас кожної нерівності взяти рівним 5.

13.2. Затриманий (очікувальний) мультивібратор з колекторно-базовими зв'язками

Контрольні питання до завдання 13.2:



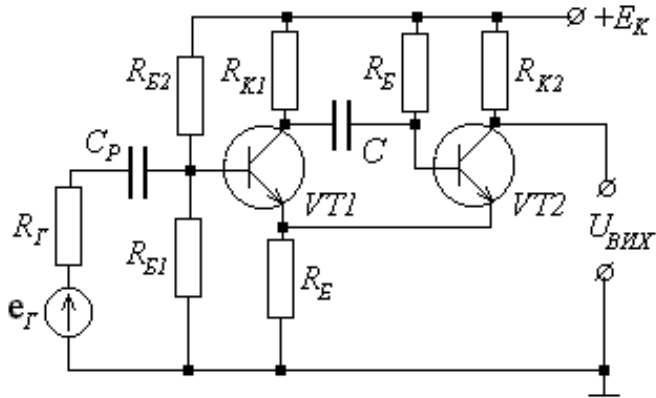
1. Як можна перетворити автоколивальний мультивібратор на затриманий? Намалюйте схему затриманого мультивібратора з колекторно-базовими зв'язками та коротко поясніть принцип її дії.
2. Якими елементами схеми визначається тривалість імпульсу, генерованого затриманим мультивібратором з колекторно-базовими зв'язками?
3. Який недолік притаманний схемі затриманого мультивібратора з колекторно-базовими зв'язками? Як його усунути?

Завдання для самостійної роботи 13.2. Затриманий мультивібратор з колекторно-базовими зв'язками утримується у постійно-стійкому стані негативною напругою $-E_{ЗМ}$, яка подається через резистор R_{B2} на базу

транзистора $VT2$. Мультивібратор запускається позитивним імпульсом з амплітудою $U_{\text{пуск}}$ від зовнішнього джерела через внутрішній опір цього джерела R . Визначити, якою має бути амплітуда імпульсу запуску, щоб мультивібратор спрацював?

13.3. Затриманий мультивібратор з емітерним зв'язком

Контрольні питання до завдання 13.3:



заокруглений як у звичайного затриманого мультивібратора з колекторно-базовими зв'язками?

1. Намалюйте схему затриманого мульти-вібратора з емітерним зв'язком та коротко поясніть принцип її дії.
2. Чому в затриманому мультивібраторі з емітерним зв'язком передній фронт вихідного імпульсу різкий, а не заокруглений як у звичайного затриманого мультивібратора з колекторно-базовими зв'язками?
3. Запропонуйте спосіб керування величиною порогу спрацьовування затриманого мультивібратора з емітерним зв'язком, який запускається позитивним пусковим імпульсом?
4. Якими елементами схеми визначається проміжок часу після закінчення вихідного імпульсу, коли затриманий мультивібратор з емітерним зв'язком стане знову придатним для спрацьовування від наступного пускового імпульсу?

Завдання для самостійної роботи 13.3. Для схеми затриманого мультивібратора задано E_K , опори резисторів R_{B1} , R_{B2} і R_E , та напругу U_{RE} , яка утримує транзистор $VT1$ закритим. У відкритому стані транзистори перебувають у режимі насичення. Якими мають бути опори резисторів R_{K1} і R_{K2} ?

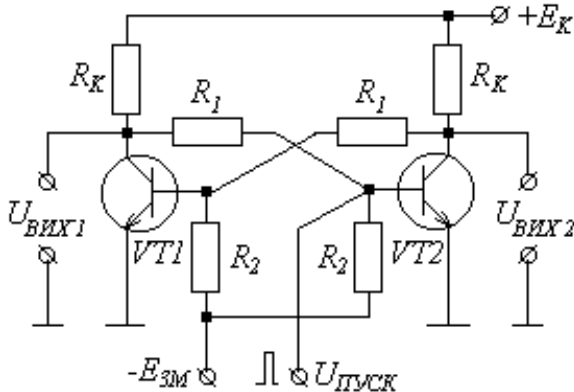
Вказівки:

- 1) Напругою $U_{KE \text{ нас}}$ відкритих до насичення транзисторів знехтувати, поклавши її рівною нулю.
- 2) Завдання 13.3 слід розв'язувати у такій послідовності:
 - знайти струм I_{K2} у колі колектора відкритого транзистора $VT2$;
 - визначити величину опору резистора R_{K2} у колі колектора відкритого транзистора $VT2$;
 - знайти напругу U_{B1} на базі закритого транзистора $VT1$;

- виходячи з умови, що при відкритому транзисторі $VT1$ напруга на резисторі R_E не повинна перевищувати напругу U_{B1} на базі закритого транзистора $VT1$, знайти струм I_{K1} у колі колектора відкритого транзистора $VT1$;
- визначити величину опору резистора R_{K1} у колі колектора відкритого транзистора $VT1$.

13.4. Тригер

Контрольні питання до завдання 13.4:



1. Намалюйте схему тригера на біполярних транзисторах з колекторно-базовими зв'язками (у симетричному вигляді) та коротко поясніть принцип її дії.
2. Поясніть, яким чином можна змінити стан виходів тригера на протилежний.
3. Чому для керування тригером краще подавати позитивний імпульс на базу закритого транзистора, а не негативний – на базу відкритого?
4. Для чого в тригері рекомендується шунтувати опір зв'язку R_1 конденсатором невеликої ємності?
5. Поясніть, чому тригер називають елементом "електронної пам'яті".

Завдання для самостійної роботи 13.4. Для схеми симетричного тригера задано E_K , опори резисторів R_K , R_1 і R_2 , h -параметри транзисторів та напругу насичення на колекторі відкритого транзистора $U_{KE \text{ нас}}$. Якої величини (у вольтах) має бути напруга зміщення $-E_{ЗМ}$? Перевірити виконання умови запирання закритого транзистора та нерівності $k \cdot \beta > 1$.

Вказівка:

Завдання 13.4 слід розв'язувати у такій послідовності:

- користуючись виразом для умови насичення відкритого транзистора визначити абсолютну величину напруги зміщення $|E_{ЗМ}|$;
- перевірити виконання умови запирання закритого транзистора;
- обчислити значення опору навантаження транзистора $R_H = (R_K \parallel (R_1 + R_2))$ та перевірити виконання нерівності $k \cdot \beta > 1$.

14. ПРОХОДЖЕННЯ СИГНАЛІВ У НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

14.1. Нелінійні спотворення сигналів

Контрольні питання до завдання 14.1:

1. В чому полягає сутність нелінійних спотворень сигналу?
2. Що є причиною нелінійних спотворень сигналу?
3. Як кількісно визначається рівень нелінійних спотворень сигналу?
4. Запишіть вираз для знаходження коефіцієнту нелінійних спотворень (клірфактору) сигналу?
5. Як апроксимується прохідна (або передавальна) характеристика нелінійного елемента електричного кола в околі його робочої точки?

Завдання для самостійної роботи 14.1. В околі робочої точки транзистора прохідна характеристика апроксимується поліномом виду

$$I_k = a_0 + a_1 \cdot U(t) + a_2 \cdot U^2(t) + a_3 \cdot U^3(t) + \dots,$$

де $U(t) = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t)$. Визначити коефіцієнт нелінійних спотворень k_f .

Вказівка:

До першої гармоніки сигналу робить внесок також і кубічний член полінома.

14.2. Амплітудна модуляція

Контрольні питання до завдання 14.2:

1. Що таке модуляція сигналів? Навіщо потрібна модуляція?
2. Чому високочастотна компонента модульованого сигналу має назву "сигнал-носій", а його частота - "частота-носій"?
3. Що являє собою амплітудно-модульований сигнал? Намалюйте його графік.
4. Що таке глибина амплітудної модуляції?
5. Як залежить глибина амплітудної модуляції від положення робочої точки на прохідній характеристиці нелінійного елемента електричного кола?
6. Що собою являє спектр амплітудно-модульованих коливань?
7. Як реально здійснюється процес амплітудної модуляції? Намалюйте схему амплітудного модулятора та коротко поясніть принцип її дії.

Завдання для самостійної роботи 14.2. Прохідна характеристика нелінійного елементу електричного кола апроксимується степеневим законом $I = \alpha \cdot U^\beta$. На вхід кола подано високочастотний сигнал-носії, низькочастотний інформаційний сигнал з амплітудою U_m і постійне зміщення U_0 . Навантаженням нелінійного елементу служить коливальний контур, настроєний на частоту-носії. Визначити глибину амплітудної модуляції високочастотного сигналу-носія m .

Вказівка:

Нагадаємо, що $m = \frac{2 \cdot b}{a} \cdot U_m$, де $a = \left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=U_0}$ - крутість прохідної характеристики нелінійного елемента електричного кола в околі робочої точки, а $b = \frac{1}{2} \cdot \left. \frac{d^2 I}{dU^2} \right|_{U=U_0}$ - її кривина.

14.3. Перетворення частоти

Контрольні питання до завдання 14.3:

1. У чому полягає процес перетворення частоти?
2. Намалюйте схему перетворювача частоти на транзисторі та коротко поясніть принцип її дії.
3. Запишіть вираз для знаходження амплітуди сигналу комбінаційної частоти на виході цієї схеми.
4. Чи залежить ця амплітуда від напруги постійного зміщення U_0 ?
5. Доведіть, що при амплітудній модуляції одного з вхідних сигналів перетворювача частоти його вихідний сигнал (з комбінаційною частотою) буде так само амплітудно-модульованим.

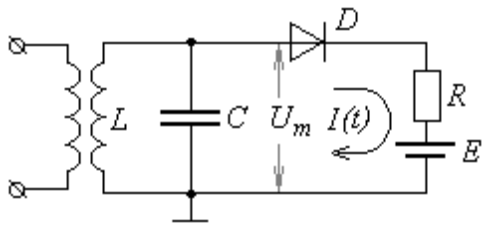
Завдання для самостійної роботи 14.3. Обчислити амплітуду вихідної напруги на різницевій (-) або сумарній (+) частоті (в залежності від варіанту індивідуального завдання), що створюється перетворювачем частоти на транзисторі.

14.4. Детектування амплітудно-модульованого сигналу

Контрольні питання до завдання 14.4:

1. Навіщо потрібно детектувати високочастотний амплітудно-модульований сигнал?
2. Що являє собою процес детектування?
3. Яким способом може бути здійснене детектування?

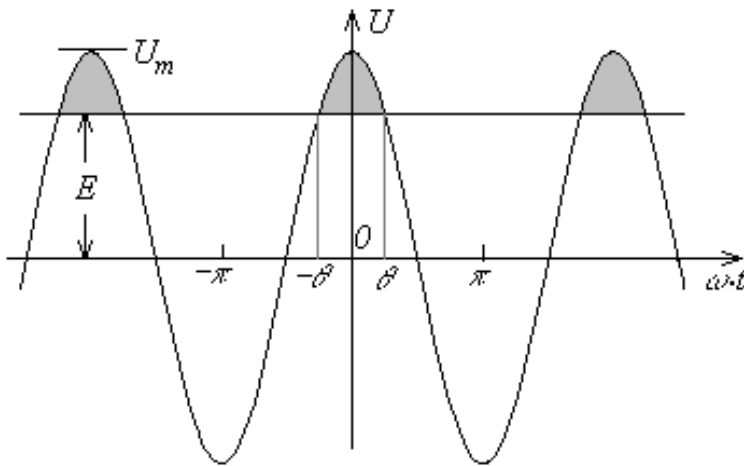
4. Намалюйте найпростішу схему амплітудного детектора на напівпровідниковому діоді та коротко поясніть принцип її дії.



Завдання для самостійної роботи 14.4.

Коливальний контур, що має власну добротність Q_0 , навантажено діодним детектором. Напруга на контурі змінюється за гармонійним законом $U(t) = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t)$, де U_m амплітуда напруги на контурі. Резистор R увімкнено послідовно з джерелом ЕРС $E = a \cdot U_m$. Обчислити значення ефективної добротності навантаженого контуру.

Вказівки:



1) Внутрішні опори прямо зміщеного діода і джерела ЕРС малі порівняно з опором навантаження R .

2) Струм протікає через діод лише у моменти часу, коли $U_m \cdot \cos(\omega \cdot t) > E$.

3) Навантаження на контур створює лише перша гармоніка

струму $I(t)$.

4) Завдання 14.4 слід розв'язувати у такій послідовності:

- знайти вхідний опір детектора

струм $I(t)$ протікає через резистор навантаження у вигляді відрізків косинусоїдальної функції (див. рисунок) з кутом відсікання

$$\theta = \arccos\left(\frac{E}{U_m}\right) = \arccos(a),$$

$$\text{бо } U_m \cdot \cos(\theta) = E.$$

Вираз для амплітуди першої гармоніки струму $I(t)$ має вигляд

$$I_{m_1} = \frac{1}{\pi} \int I(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) d(\omega \cdot t),$$

а для вхідного опору детектора

$$R_{BX} = \frac{U_m}{I_{m_1}};$$

- знайти ефективний еквівалентний опір навантаженого контуру

$$R'_{екв} = R_{екв} \parallel R_{BX},$$

де $R_{екв}$ - еквівалентний опір ненавантаженого контуру;

- знайти ефективну добротність навантаженого контуру

$$Q' = R'_{екв} / \rho,$$

де $\rho = \sqrt{L/C}$ - хвильовий опір контуру.

І.І. БЕХ, С.М. ЛЕВИТСЬКИЙ

15. ЕЛЕМЕНТИ РАДІОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

15.1. Підсилювач високої частоти (робота у діапазоні частот)

Контрольні питання до завдання 15.1:

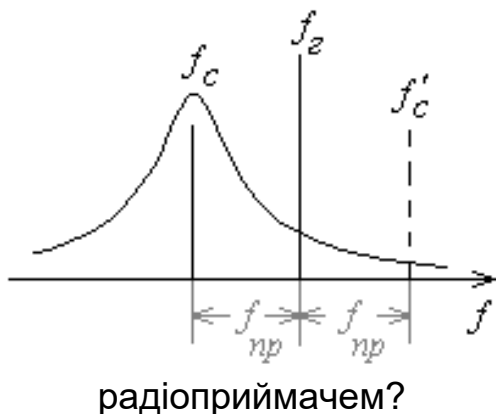
1. Намалюйте схему окремого каскаду підсилювача високої частоти (каскаду резонансного підсилювача) та коротко опишіть принцип її дії.
2. Запишіть вираз для коефіцієнту підсилення цього каскаду на будь-якій довільній частоті, відмінній від резонансної та на резонансній частоті.
3. Як здійснюється перестроювання цього каскаду на іншу резонансну частоту (довжину хвилі)?
4. Чи буде змінюватися коефіцієнт підсилення цього каскаду при його перестроюванні на іншу резонансну частоту (довжину хвилі)?
5. На якому кінці діапазону довжин хвиль (довгохвильовому чи короткохвильовому) коефіцієнт підсилення буде більшим? Обґрунтуйте відповідь.

Завдання для самостійної роботи 15.1. Коливальний контур у каскаді підсилювача високої частоти перестроюється у діапазоні довжин хвиль від λ_1 до λ_2 шляхом зміни величини ємності C конденсатора. У скільки разів буде відрізнятися коефіцієнт підсилення каскаду на короткохвильовому і довгохвильовому кінцях діапазону?

Вказівка:

Вважати, що добротність контуру і параметри транзистора не залежать від частоти.

15.2. Дзеркальний канал супергетеродинного радіоприймача



Контрольні питання до завдання 15.2:

1. Намалюйте структурну схему супергетеродинного радіоприймача та коротко поясніть, у чому полягає принцип її дії?
2. Чи однозначно при цьому визначаються частоти інформаційних сигналів, які будуть сприйматися супергетеродинним

3. Що таке "дзеркальний канал" супергетеродинного радіоприймача? На якій частоті він буде розташований по відношенню до частоти основного каналу?
4. Як можна придушити (послабити) сигнал дзеркального каналу? Як кількісно визначити міру придушення (послаблення) сигналу дзеркального каналу?

Завдання для самостійної роботи 15.2. Частота гетеродину супергетеродинного радіоприймача дорівнює f_e , частота сигналу, що має сприйматися - f_c . Добротність коливального контуру, що здійснює преселекцію, дорівнює Q_0 . Розрахувати послаблення сигналу дзеркального каналу і подати отриманий результат у децибелах.

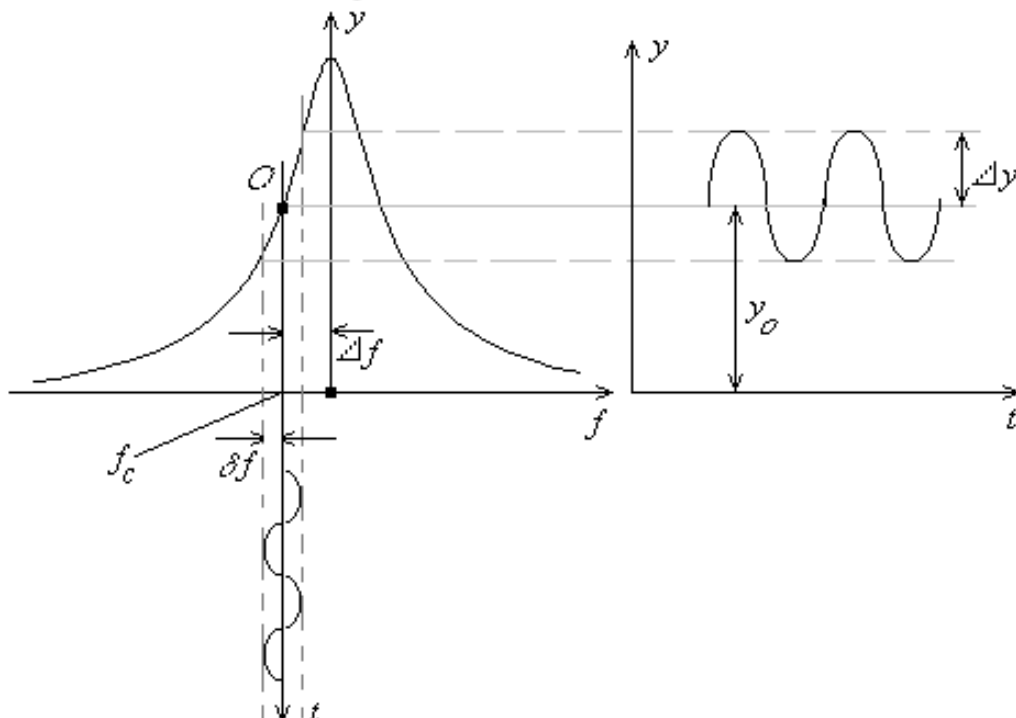
Вказівка:

Якщо $f_e < f_c$, то слід брати $f_{пр} = |f_e - f_c|$.

15.3. Частотна дискримінація модульованого сигналу

Контрольні питання до завдання 15.3:

1. В чому полягає суть частотної дискримінації модульованого сигналу? Для якого виду модуляції її зазвичай застосовують?
2. Що таке девіація частоти δf при частотній модуляції і як вона пов'язана з індексом модуляції M_f ?
3. Поясніть, як здійснюється частотна дискримінація ЧМ-сигналів за допомогою поодинокого коливального контуру?



4. Як будуть пов'язані між собою прирости амплітуди Δu сигналу на виході частотного дискримінатора з девіацією частоти δf ЧМ-сигналу?
5. З яких міркувань обирається частота оптимального розстроювання Δf_{opt} коливального контуру, що здійснює частотну дискримінацію?
6. Запишіть вираз для залежності $y=f(x)$ амплітуди сигналу на виході частотного дискримінатора, де $x=2 \cdot Q_0 \cdot \frac{\Delta f}{f_0}$ - безрозмірне розстроювання контуру, f_0 - резонансна частота контуру.
7. Як пов'язана глибина амплітудної модуляції m з величиною амплітуди u сигналу на виході частотного дискримінатора?

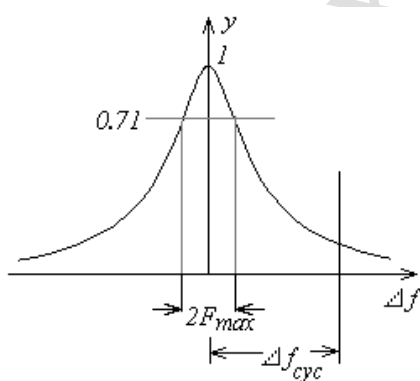
Завдання для самостійної роботи 15.3. Для частотної дискримінації ЧМ-сигналу використовується розстроєний поодинокий коливальний контур. Резонансна частота контуру дорівнює f_0 , частота інформаційного сигналу рівна f_{mod} , індекс частотної модуляції рівний M_f , власна добротність ненавантаженого контуру рівна Q_0 .

Обчислити величину оптимального розстроювання контуру Δf_{opt} для одержання максимального ефекту дискримінації? Якою при цьому буде глибина амплітудної модуляції m продискримінованого сигналу?

15.4. Ослаблення за сусіднім каналом

Контрольні питання до завдання 15.4:

1. Намалюйте графік АЧХ каскаду резонансного підсилювача та поясніть, що таке смуга пропускання каскаду?



2. Якою має бути ширина смуги пропускання каскаду резонансного підсилювача, якщо максимальна частота у спектрі інформаційного сигналу дорівнює F_{max} ?
3. Чому рівне максимально допустиме значення нерівномірності АЧХ каскаду резонансного підсилювача у смузі пропускання?
4. Як пов'язана добротність контуру каскаду резонансного підсилювача із шириною смуги пропускання?
5. Яким буде послаблення сусіднього радіоканалу, що відстоїть від резонансної частоти контуру f_0 на величину Δf_{cyc} ?
6. Поясніть, чому селективність каскаду резонансного підсилювача і рівномірність підсилення у смузі його пропускання суперечать одна

одній? Як можна подолати цю суперечність?

Завдання для самостійної роботи 15.4. Обчислити величину послаблення сусіднього радіоканалу, що відстоїть на $\Delta f_{\text{сус}}$ від резонансної частоти контуру f_0 , якщо максимальна частота у спектрі інформаційного сигналу дорівнює F_{max} .

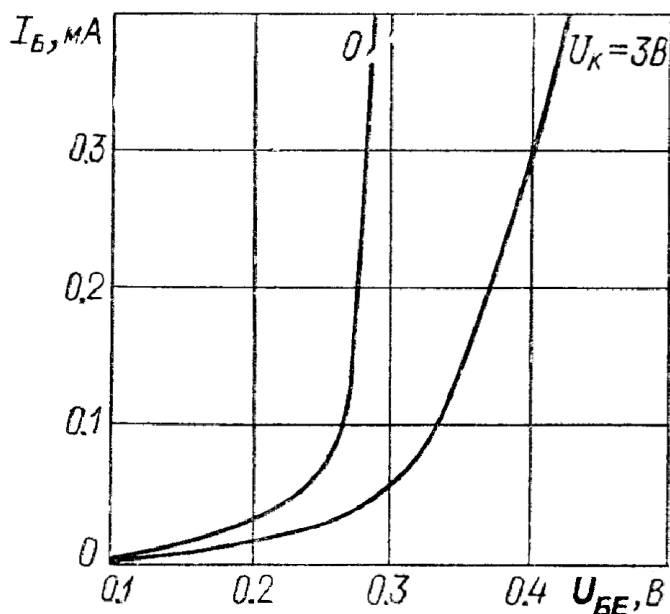
Вказівки:

1) Нерівномірність підсилення у смузі пропускання коливального контуру не повинна перевищувати 3 дБ.

2) Для розв'язання задачі слід спочатку знайти добротність контуру, яка б забезпечила потрібну смугу пропускання, а потім підрахувати значення послаблення сусіднього радіоканалу.

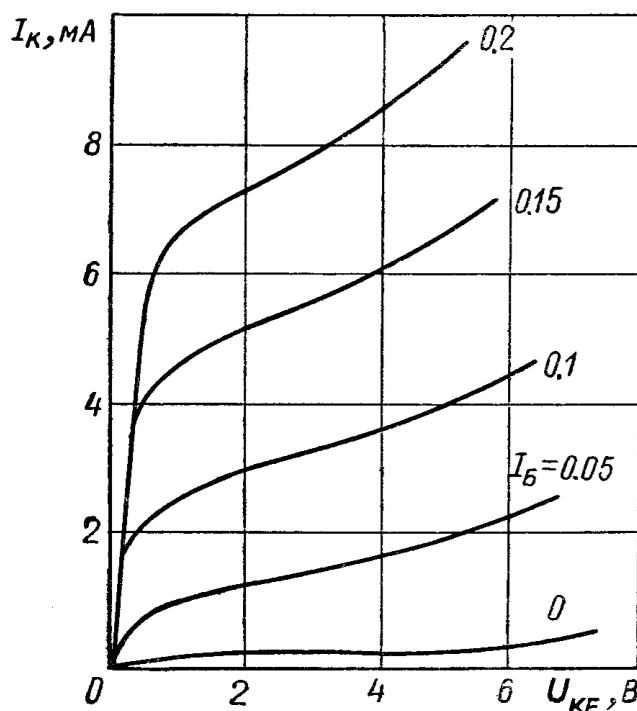
ГРАФІКИ ВХІДНИХ ТА ВИХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕЯКИХ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

1Т374А (п-р-п)



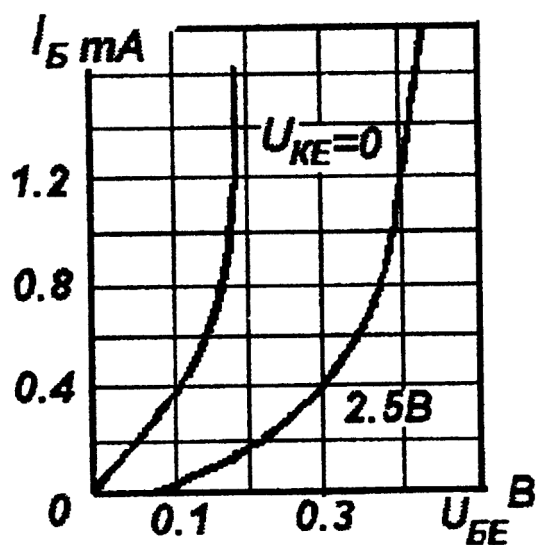
$U_{KE\text{ макс}} = 6V$ $I_{K\text{ макс}} = 10mA$

$P_{K\text{ макс}} = 25Вт$



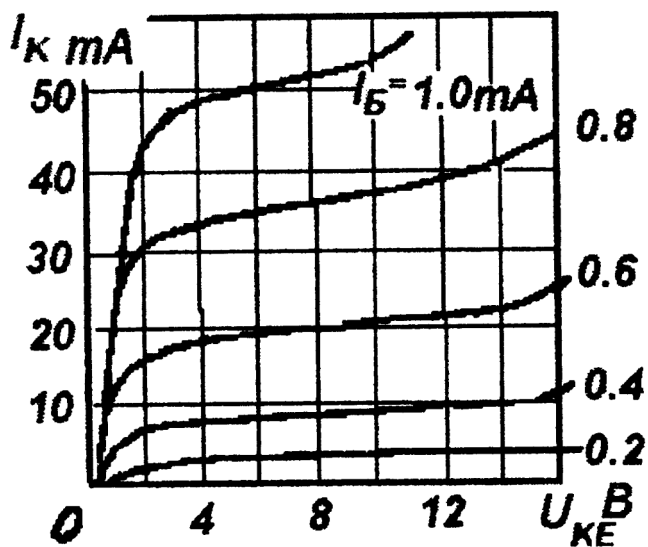
ГТ 308А

(р-п-р)



$U_{KE\text{ макс}} = 12V$

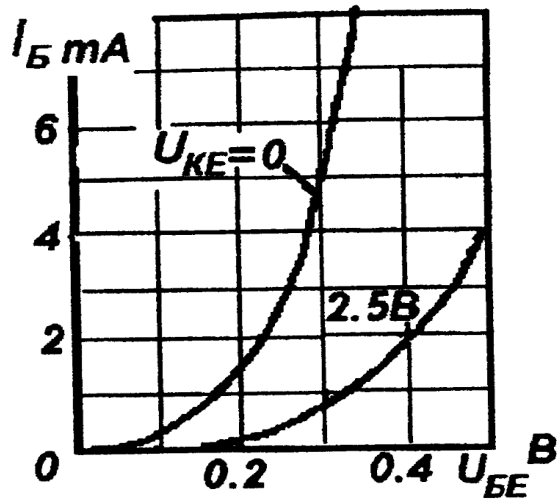
$P_{K\text{ макс}} = 0.15Вт$



$I_{K\text{ макс}} = 50mA$

$I_{K\text{ макс имп}} = 120mA$

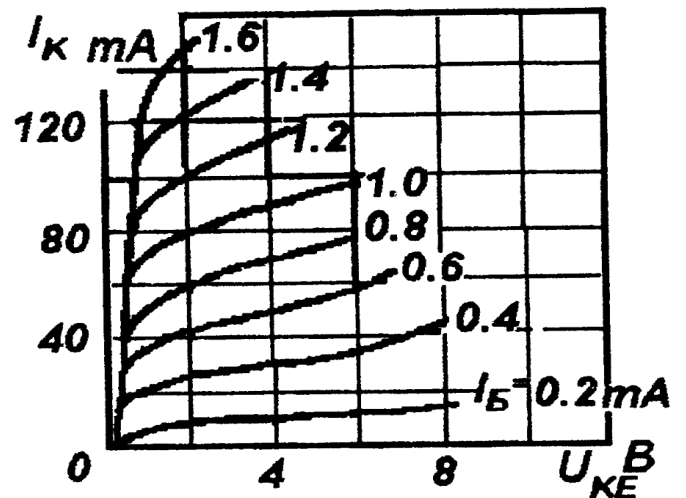
ГТ 320А



$$U_{KE_{\text{макс}}} = 12\text{В}$$

$$P_{K_{\text{макс}}} = 200\text{ мВт}$$

(p - n - p)

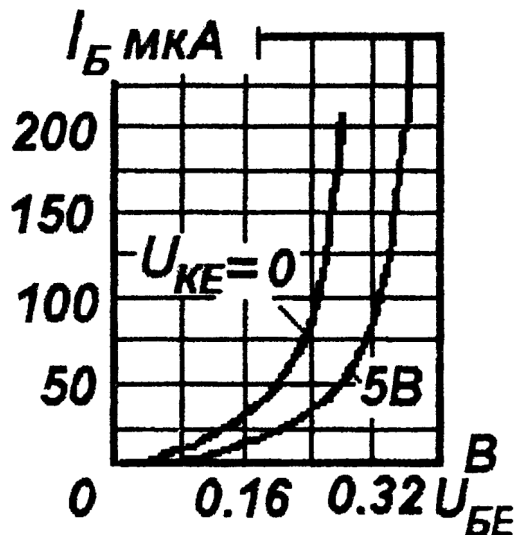


$$I_{K_{\text{макс}}} = 150\text{mA}$$

$$I_{K_{\text{макс имп}}} = 300\text{mA}$$

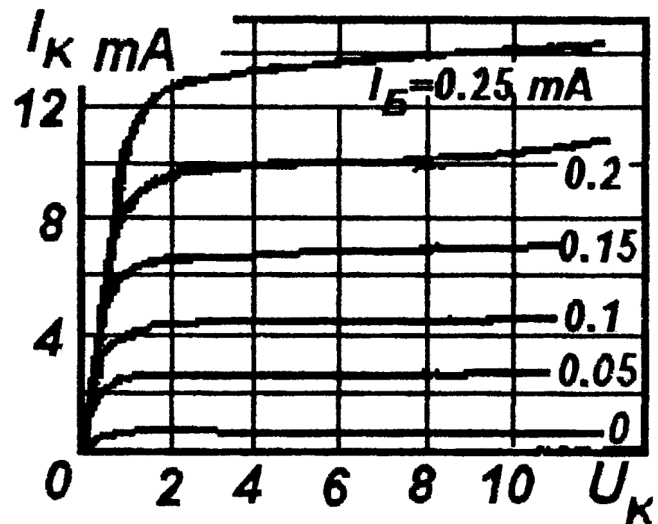
ГТ 322В

(p - n - p)



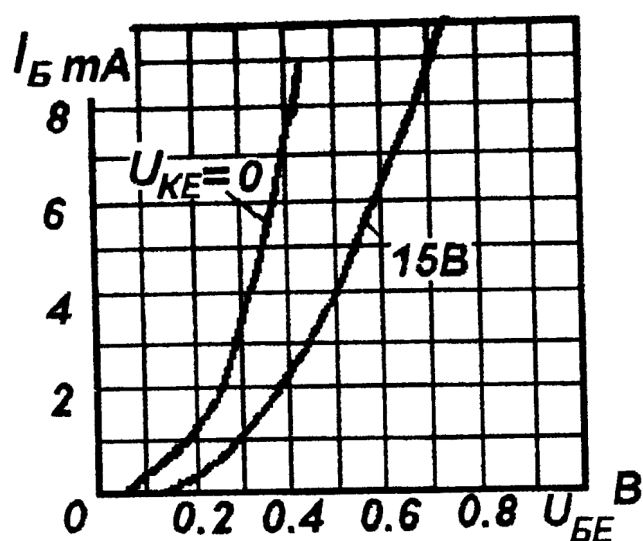
$$U_{KE_{\text{макс}}} = 10\text{В}$$

$$P_{K_{\text{макс}}} = 50\text{мВт}$$



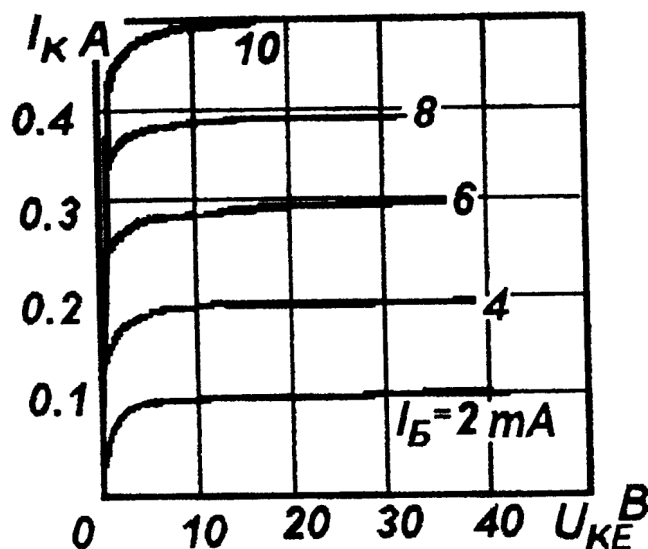
$$I_{K_{\text{макс}}} = 5\text{mA}$$

ГТ 404В (n - p - n)



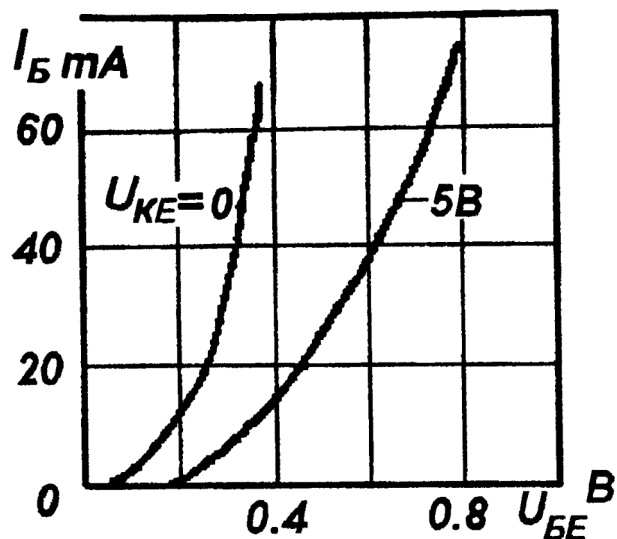
$$U_{KE_{\text{макс}}} = 40\text{В}$$

$$P_{K_{\text{макс}}} = 0.6\text{ Вт}$$



$$I_{K_{\text{макс}}} = 0.5\text{ А}$$

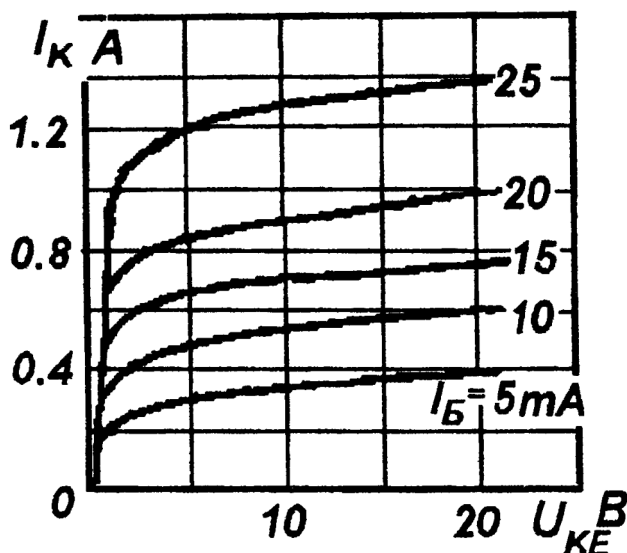
ГТ 703А



$$U_{KE_{\text{макс}}} = 20\text{В}$$

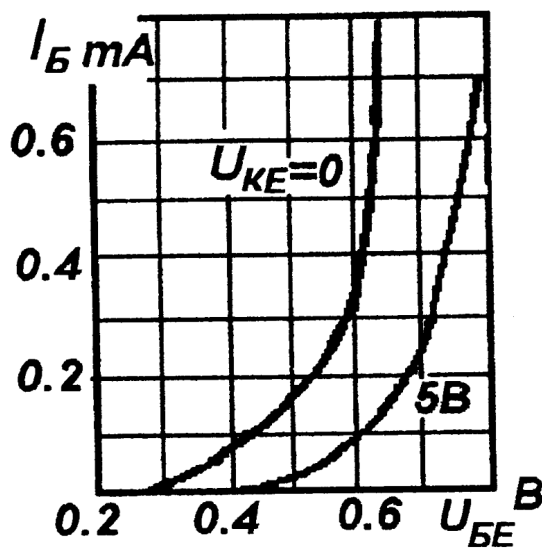
$$P_{K_{\text{макс}}} = 1.6\text{ Вт} \quad (\text{з радіатором } 15\text{Вт})$$

(p - n - p)



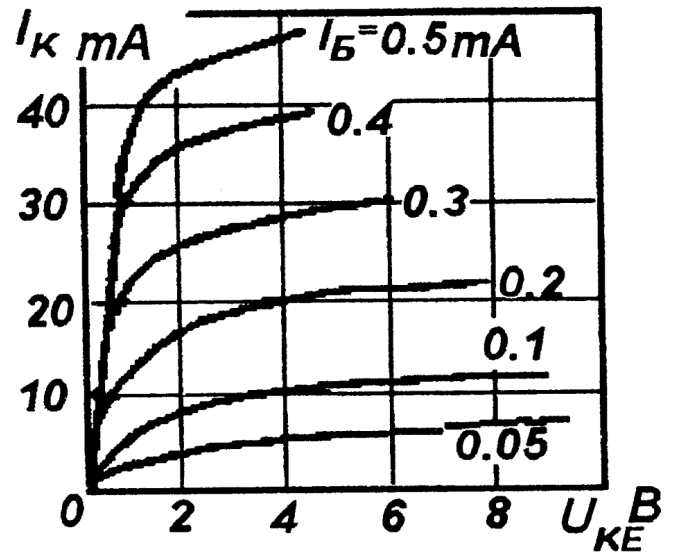
$$I_{K_{\text{макс}}} = 3.5\text{ А}$$

КТ 201 В,Д (n - p - n)



$$U_{KE_{\text{макс}}} = 10 \text{ В}$$

$$P_{K_{\text{макс}}} = 0.15 \text{ Вт}$$

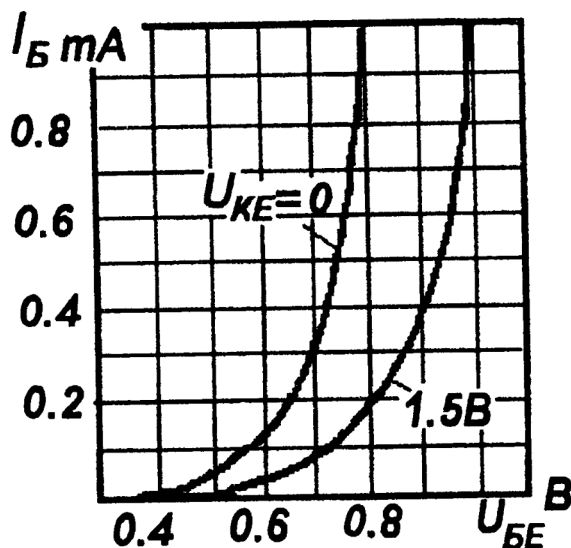


$$I_{K_{\text{макс}}} = 20 \text{ mA}$$

$$I_{K_{\text{макс имп}}} = 100 \text{ mA}$$

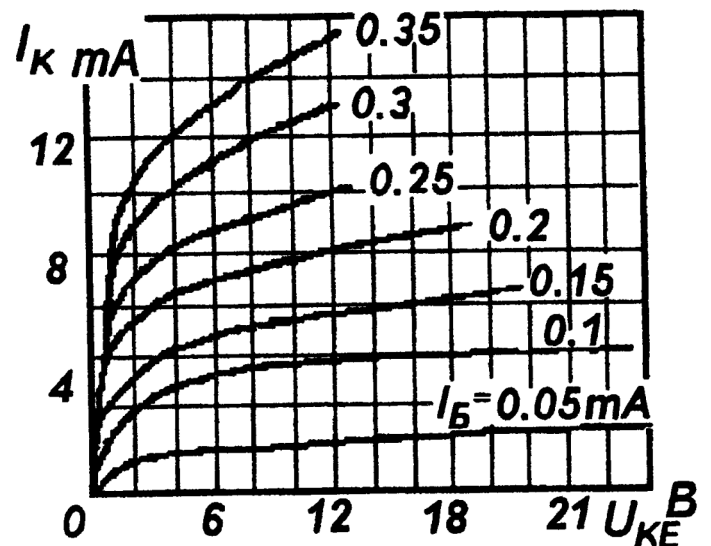
КТ 339Д

(n - p - n)



$$U_{KE_{\text{макс}}} = 25 \text{ В}$$

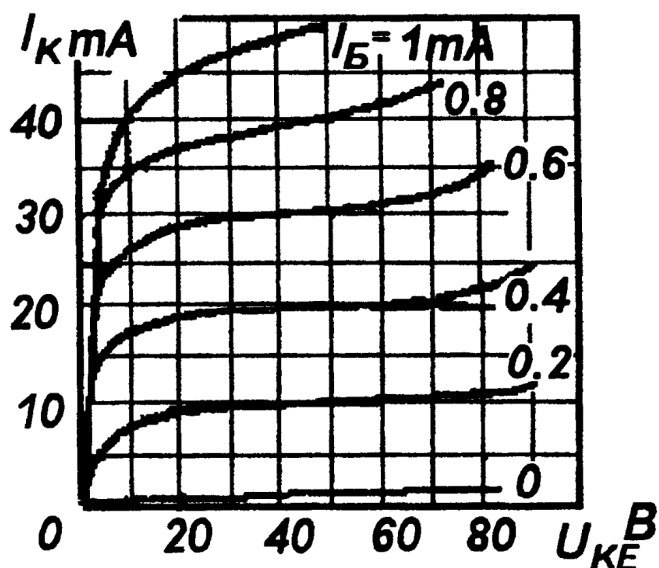
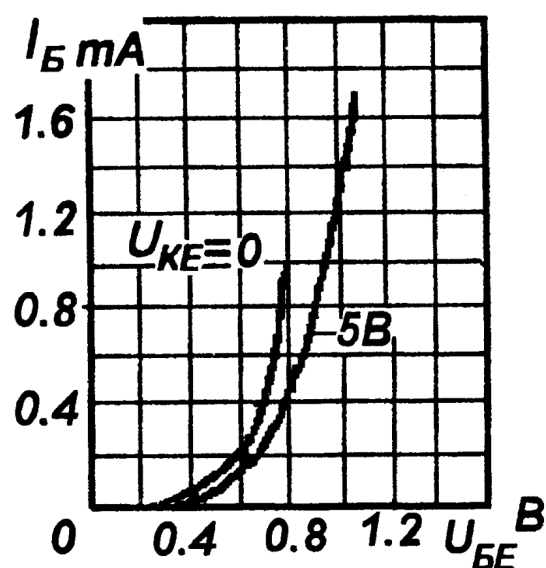
$$P_{K_{\text{макс}}} = 0.25 \text{ Вт}$$



$$I_{K_{\text{макс}}} = 25 \text{ mA}$$

КТ 601А

(n - p - n)



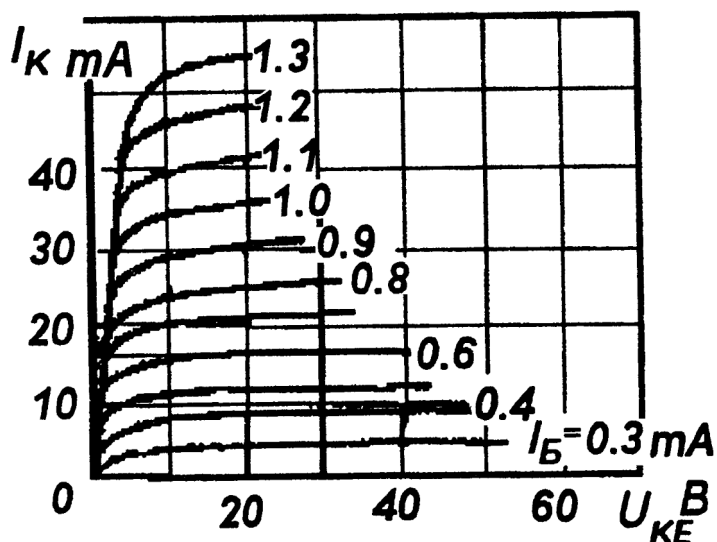
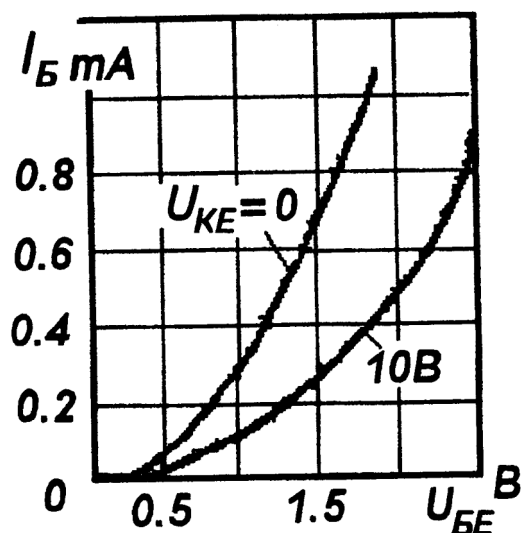
$$U_{KE \text{ макс}} = 100 \text{ В}$$

$$I_{K \text{ макс}} = 30 \text{ мА}$$

$$P_{K \text{ макс}} = 0.25 \text{ Вт (з радіатором 0.5 Вт)}$$

КТ602А

(n - p - n)

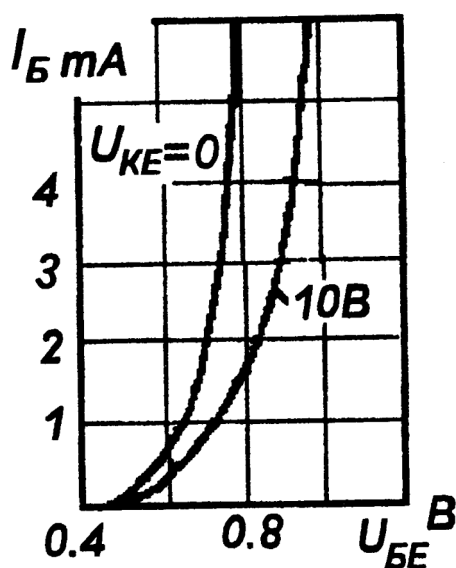


$$U_{KE \text{ макс}} = 100 \text{ В}$$

$$I_{K \text{ макс}} = 75 \text{ мА}$$

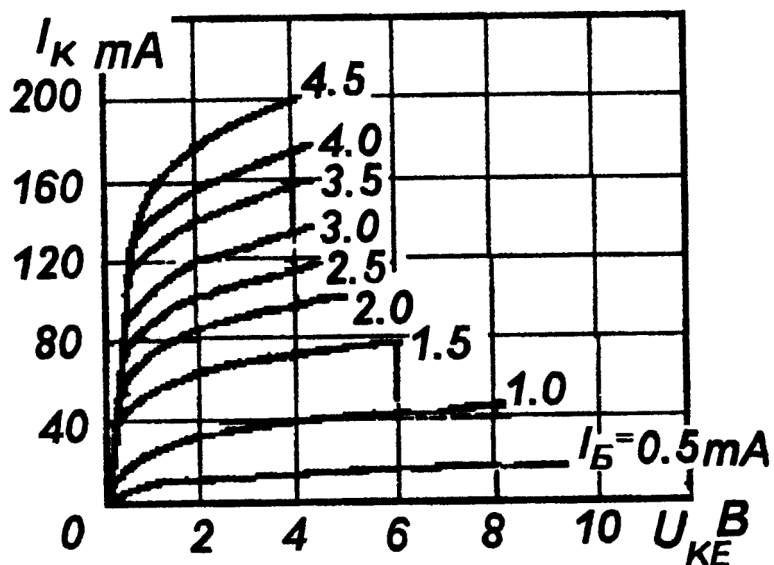
$$P_{K \text{ макс}} = 0.85 \text{ Вт (з радіатором 2.8 Вт)}$$

КТ 603А (n - p - n)



$$U_{KE_{\text{макс}}} = 30V$$

$$P_{K_{\text{макс}}} = 0.5 \text{ Вт}$$

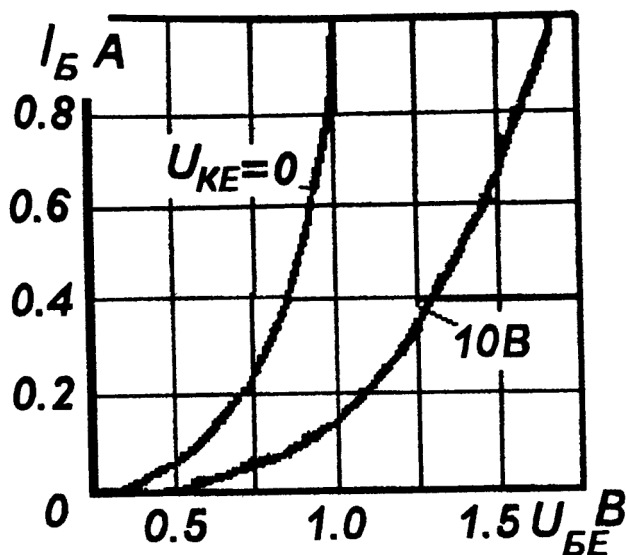


$$I_{K_{\text{макс}}} = 0.3A$$

$$I_{K_{\text{макс}}} = 0.6A$$

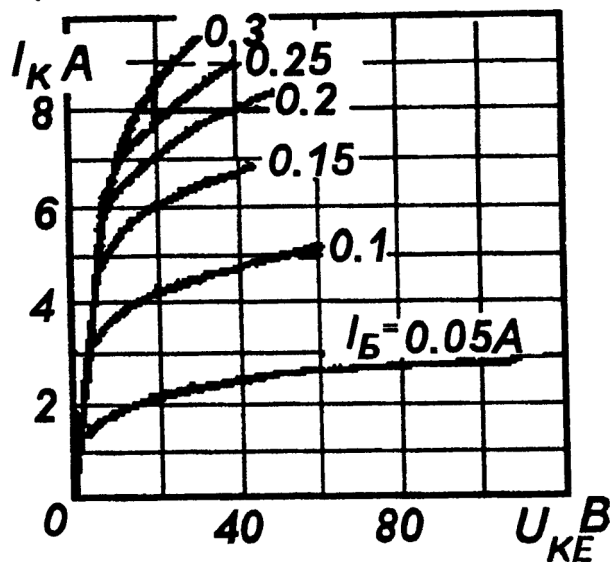
КТ 902А

(n - p - n)



$$U_{KE_{\text{макс}}} = 110V$$

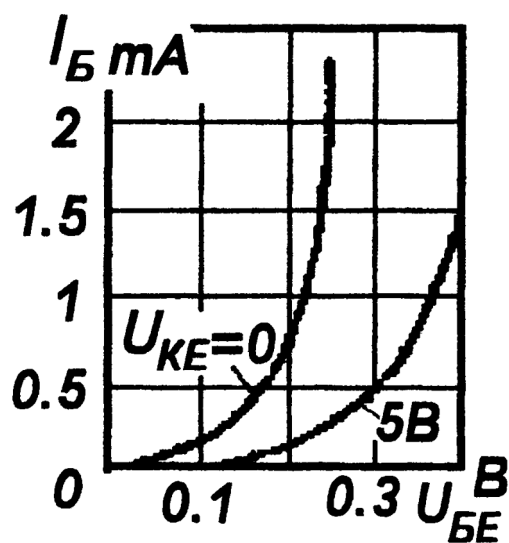
$$P_{K_{\text{макс}}} = 30 \text{ Вт}$$



$$I_{K_{\text{макс}}} = 5A$$

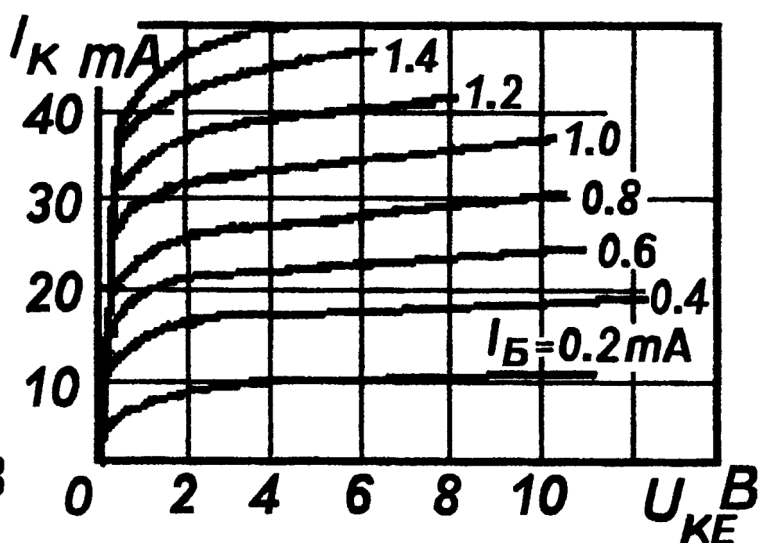
$$I_{B_{\text{макс}}} = 2A$$

МП 42Б (р - п - р)



$$U_{KE \text{ макс}} = 15 \text{ В}$$

$$P_{K \text{ макс}} = 0.2 \text{ Вт}$$



$$I_{K \text{ макс}} = 30 \text{ мА}$$

$$I_{K \text{ макс імп}} = 150 \text{ мА}$$

ВАРІАНТИ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ

Практичне заняття 1.

Завдання 1.1							
Варіант	Тип схеми	R , кОм	C або L , нФ або мГн	Варіант	Тип схеми	R , кОм	C або L , нФ або мГн
1	1	4	10	14	2	27	50
2	1	15	30	15	2	1,2	0,3
3	1	45	50	16	1	25	40
4	2	0,7	100	17	2	14	50
5	2	1,2	0,3	18	1	0,7	500
6	1	15	100	19	2	3	8
7	2	5	20	20	1	17	100
8	1	22	1000	21	1	3	10
9	1	3	10	22	1	17	800
10	2	5	20	23	1	12,5	800
11	2	1,8	3	24	2	1,3	3
12	2	20	50	25	1	3	10
13	1	20	100	26	1	25	50

Завдання 1.2											
Варіант	L , мГн	r , Ом	C , пФ	m	R , кОм	Варіант	L , мГн	r , Ом	C , пФ	m	R , кОм
1	720	18	48	1,5	36	14	240	15	54	2,2	15
2	240	15	54	2,2	15	15	200	13	50	2,4	20
3	450	20	50	3,5	15	16	200	4	150	1,4	30
4	750	10	300	3	25	17	240	12	60	1,9	50
5	720	18	48	1,5	36	18	240	40	350	1,8	12
6	50	12	100	2,5	15	19	180	5	90	1,5	32
7	190	25	90	1,5	20	20	1200	15	400	2,5	50
8	150	10	100	2	7	21	190	25	90	1,5	20
9	1500	50	800	3	10	22	150	10	100	2	7
10	400	25	120	2	25	23	1500	50	800	3	10
11	200	20	300	1,6	10	24	450	20	50	3,5	15
12	450	20	50	3,5	15	25	750	10	300	3	25
13	750	10	300	3	25	26	270	7	330	2,7	49

Завдання 1.3

Варіант	E_0 , В	I_d , мА	I_a , мА	U_0 , В	ω , рад/с	a	Варіант	E_0 , В	I_d , мА	I_a , мА	U_0 , В	ω , рад/с	a
1	7	3	0,6	1,2	100	0,71	14	9	3	0,1	3	100	0,9
2	15	5	0,8	2,4	120	0,9	15	5	4,5	0,1	0,7	140	0,9
3	7	5	0,2	2	140	0,6	16	9	2	0,1	1	200	0,7
4	30	12	1,2	5	160	0,71	17	12	6	0,15	0,8	180	0,75
5	15	6	0,5	2,4	180	0,85	18	20	5	0,5	4,8	90	0,75
6	5	5	0,3	1,5	200	0,9	19	16	9	0,6	5,3	100	0,8
7	16	5	0,2	3,6	200	0,95	20	5	10	0,8	0,8	200	0,85
8	10	5	0,15	3	120	0,72	21	3	1,5	0,1	0,5	270	0,9
9	6	3	0,5	0,5	150	0,71	22	7	4	0,3	0,9	180	0,9
10	10	1,2	0,1	1,2	80	0,6	23	15	3	0,3	1,2	300	0,71
11	12	15	1,2	1,8	90	0,6	24	12	5	0,5	2,4	180	0,71
12	25	5	0,5	2,4	120	0,65	25	20	7	1	2,5	120	0,83
13	12	7	0,3	2,4	100	0,5	26	16	4	0,5	3	210	0,65

Практичне заняття 2.

Завдання 2.1 – 2.2											
Варіант	Схема	U_m , В	R_H , кОм	f , Гц	C , мкФ	Варіант	Схема	U_m , В	R_H , кОм	f , Гц	C , мкФ
1	2	18	0,45	50	800	14	3	30	1	50	600
2	2	220	2	400	20	15	2	70	3,5	50	400
3	2	20	0,2	1000	120	16	2	30	4	400	25
4	3	190	2,5	1000	12	17	3	27	0,3	500	120
5	1	1200	20	100	30	18	3	220	1,5	50	100
6	1	120	6	50	60	19	1	120	1,2	1000	40
7	3	127	0,7	400	100	20	1	270	20	50	80
8	3	220	2,5	50	350	21	2	45	0,1	100	2000
9	3	12	5	50	40	22	1	20	0,05	400	1000
10	2	1500	120	50	3,5	23	1	250	10	50	100
11	2	17	0,04	1000	200	24	3	30	0,4	50	1000
12	1	28	1,2	400	300	25	2	150	1	100	120
13	1	35	1	50	500	26	1	110	0,3	78	2000

Завдання 2.3													
Варіант	U_{10} , В	U_{20} , В	R_H , кОм	I_{max} , мА	I_{min} , мА	r_d , Ом	Варіант	U_{10} , В	U_{20} , В	R_H , кОм	I_{max} , мА	I_{min} , мА	r_d , Ом
1	80	50	4	23	3	15	14	70	45	0,25	500	25	3,8
2	18	10	0,6	23	3	15	15	60	45	0,25	500	25	3,8
3	34	20	1,2	23	3	15	16	45	30	0,3	500	25	3,8
4	36	20	2,4	23	3	15	17	30	15	0,3	500	25	3,8
5	100	75	2,6	5,2	0,5	70	18	30	15	0,3	500	25	3,8
6	85	60	5	23	3	15	19	70	45	1,5	500	25	3,8
7	45	30	3	23	3	15	20	60	40	2	23	3	15
8	45	30	0,25	500	25	3,8	21	32	20	1,4	23	3	15
9	50	30	0,34	500	25	3,8	22	110	75	20	5,2	0,5	70
10	40	25	4,5	5,2	0,5	70	23	70	50	15	5,2	0,5	70
11	20	10	0,8	23	3	15	24	42	25	10	5,2	0,5	70
12	32	20	1,3	23	3	15	25	80	50	4	23	3	15
13	75	45	0,35	500	25	3,8	26	30	22	1,6	23	3	15

Практичне заняття 3.

Завдання 3.1 – 3.2				Завдання 3.3			Завдання 3.1 – 3.2				Завдання 3.3		
Варіант	Тип	U_{KE0} , В	I_{B0} , мА	E_K , В	R_H , кОм	I_{B0} , мА	Варіант	Тип	U_{KE0} , В	I_{B0} , мА	E_K , В	R_H , кОм	I_{B0} , мА
1	КТ601А	40	0,2	60	2	0,2	14	КТ339Д	6	0,1	12	1,2	0,1
2	КТ602А	20	0,6	45	0,85	0,9	15	ГТ320А	6	0,2	8	0,2	0,2
3	КТ339Д	8	0,2	20	2	0,2	16	КТ603А	3	2,5	6	0,03	2,5
4	ГТ320А	2	1	5	0,033	1	17	ГТ703А	7,5	20	15	0,01	20
5	КТ603А	4	1,5	10	0,05	1,5	18	МП42Б	6	0,6	10	0,4	0,6
6	МП42Б	8	0,4	12	0,4	0,4	19	КТ601А	80	0,4	75	2,5	0,4
7	КТ601А	60	0,4	100	4	0,4	20	КТ602А	15	0,6	42	0,7	0,6
8	КТ602А	20	0,8	60	1,2	0,8	21	КТ339Д	6	0,25	18	1,5	0,25
9	КТ339Д	10	0,15	24	2	0,15	22	ГТ320А	5	0,4	8	0,08	0,2
10	КТ603А	2	3	4	0,02	3	23	КТ603А	3	2	8	0,05	2
11	ГТ703А	15	10	12,5	0,01	10	24	ГТ703А	10	15	20	0,01	15
12	МП42Б	4	0,8	6	0,2	0,8	25	МП42Б	10	0,2	15	0,5	0,2
13	КТ602А	10	0,6	30	0,5	0,6	26	ГТ320А	5	0,4	8	0,5	0,4

Практичне заняття 4.

Варіант	Завдання 4.1 – 4.3								
	$U_{св0}$, В	$U_{зв0}$, В	$I_{с0}$, мА	E , В	$R_{з1}$, МОм	f_H , Гц	S , мСм	R_i , кОм	C_L , пФ
1	6	0,6	11	20	1	140	7	4	115
2	8	0,6	12	20	0,5	150	8	3,5	210
3	10	0,8	10	20	0,3	125	9	2	150
4	12	1,2	12,5	25	0,1	120	10	3	130
5	13	1,2	14	30	0,15	110	11	4	110
6	12	1	12	30	0,15	25	7	4	50
7	11	1	10	25	0,3	50	6	2,5	75
8	10	0,8	10	30	0,5	75	5	2	90
9	9	0,8	9	27	0,2	100	4	3,5	57
10	11	1,2	8	25	0,3	25	9	4	80
11	8	1	12	20	0,2	40	8	3,5	70
12	12	1,4	10	25	0,25	30	7	3	60
13	10	1,2	10	25	0,1	20	6	2,5	50
14	12,5	1,2	15	25	0,3	150	10	3	125
15	14	1,2	15	30	0,2	145	9	5,5	115
16	13	1,2	12	30	0,1	45	8	5	80
17	12	1	12	25	0,2	100	12	5	50
18	11	1	10	30	0,15	90	13	2	70
19	10	0,8	8	25	0,1	80	14	3	90
20	9	0,8	10	25	0,4	75	13	2,5	120
21	8	0,8	9	25	1	110	5	3	93
22	7	0,6	9	20	0,1	130	6	4,5	87
23	14	1,22	15	30	0,5	70	12	4	110
24	12,5	1	11	30	0,3	60	11	4,5	100
25	13	1,2	13	30	0,15	50	10	4,5	90
26	11	0,9	12	33	0,4	90	9	2,7	113

Практичне заняття 5.

Завдання 5.1

Варіант	k	ψ_k , рад	β	τ , мкс	Варіант	k	ψ_k , рад	β	τ , мкс
1	8	0	0,1	50	14	45	π	0,02	40
2	12	π	0,05	30	15	12	0	0,02	60
3	40	π	0,01	20	16	6	0	0,08	100
4	16	π	0,012	1	17	8	0	0,1	10
5	5	0	0,05	100	18	16	π	0,01	40
6	12	0	0,016	200	19	18	0	0,05	60
7	30	π	0,02	30	20	18	0	0,05	60
8	25	0	0,01	150	21	12	0	0,04	20
9	12	π	0,012	200	22	60	π	0,01	100
10	8	π	0,08	16	23	50	π	0,012	200
11	6	0	0,03	20	24	10	π	0,08	100
12	10	π	0,03	300	25	20	0	0,03	10
13	12	π	0,05	60	26	32	0	0,006	80

Завдання 5.2

Варіант	k_0	β	R_H , кОм	C_L , пФ	Варіант	k_0	β	R_H , кОм	C_L , пФ
1	10	0,01	8	25	14	8	0,012	10	15
2	10	0,015	6	25	15	12	0,01	1,5	12
3	8	0,005	5	30	16	5	0,01	8	25
4	12	0,003	40	5	17	12	0,003	0,5	40
5	8	0,01	10	10	18	10	0,01	12	15
6	6	0,012	8	25	19	5	0,01	4,5	40
7	15	0,002	12	20	20	5	0,01	4,5	40
8	10	0,003	6	35	21	10	0,003	2	8
9	12	0,01	5,5	20	22	6	0,003	1,5	10
10	4	0,01	4	20	23	8	0,005	16	12
11	8	0,003	1,2	20	24	12	0,002	12	15
12	6	0,003	12	6	25	12	0,001	10	20
13	10	0,005	4	20	26	7	0,004	14	45

Завдання 5.3													
Варіант	C_P , нФ	R_3 , кОм	S , мСм	R_i , кОм	R_c , кОм	R_{33} , кОм	Варіант	C_P , нФ	R_3 , кОм	S , мСм	R_i , кОм	R_c , кОм	R_{33} , кОм
1	20	200	6	12	4	600	14	12	120	14	7	3	150
2	30	140	4	5	3	300	15	5	40	6	10	20	300
3	50	150	5	4	4	400	16	50	60	8	5	14	240
4	12	120	6	8	2	600	17	10	500	5	10	4	1000
5	5	300	14	12	0,4	750	18	12	20	12	3	0,5	100
6	10	600	10	10	2	1000	19	120	120	14	7	0,6	360
7	10	400	12	12	0,5	700	20	20	50	10	5	0,6	140
8	150	120	3	6,5	1,5	300	21	150	300	6	14	3	700
9	20	250	4	5	2,5	600	22	20	400	14	8	1,8	500
10	12	300	6	13	4	500	23	80	300	10	12	0,8	120
11	10	60	12	5	3	100	24	100	350	12	20	1,2	400
12	5	500	15	10	1,5	500	25	10	250	8	20	1	750
13	100	20	7	3	2	40	26	45	350	13	23	0,4	580

Практичне заняття 6.

Варіант	Завдання 6.1						Завдання 6.2						Завдання 6.3			
	$h_{11E}, \text{кОм}$	$h_{12E} \times 10^{-4}$	h_{21E}	$h_{22E}, \text{мСім}$	$R_H, \text{кОм}$	$R_{ГЕН}, \text{кОм}$	$U_{KE0}, \text{В}$	$I_{K0}, \text{мА}$	$U_{BE0}, \text{В}$	$I_{B0}, \text{мА}$	$E_K, \text{В}$	h_{21E}	$R_K, \text{кОм}$	$h_{11E}, \text{кОм}$	$h_{22E}, \text{мСім}$	$f_H, \text{Гц}$
1	3,5	3	100	0,04	5	0,7	6	8	0,4	0,25	16	20	0,9	0,6	0,12	80
2	0,5	1	72	0,04	1,9	0,2	9	8	0,6	0,15	20	32	1,1	0,4	0,1	100
3	0,8	1,8	80	0,12	3,6	0,15	5	12	0,6	0,2	15	40	0,6	0,6	0,2	40
4	1,6	1	40	0,12	2,4	0,25	3	2,5	0,2	0,05	6	50	0,8	3	0,05	60
5	0,3	2	50	0,05	4	0	3	6	0,4	0,1	8	40	0,6	1,2	0,05	120
6	1,9	25	50	0,15	3,5	0,15	10	10	0,5	0,1	20	40	0,8	1	0,02	30
7	0,8	2	45	0,1	3	0,5	10	7	0,4	0,2	20	40	1	0,6	0,02	40
8	1,5	10	42	0,24	5	0,7	5	5	0,3	0,15	12	25	0,9	0,4	0,03	20
9	0,8	3	24	0,15	2	0,3	4	6	0,2	0,1	12	36	1,2	0,5	0,01	40
10	0,4	1	40	0,05	1,5	0,2	6	4	0,4	0,12	12	24	1	0,6	0,06	25
11	1,2	2	20	0,08	1	0,15	5	5	0,3	0,05	12	20	1	1	0,1	40
12	0,7	1	40	0,1	4	0,5	5	6	0,4	0,1	15	24	1,2	0,9	0,05	18
13	1,5	3	90	0,12	5,5	0,35	12	6	0,4	0,1	20	30	1	0,8	0,1	40
14	1,2	1	40	0,2	2	0,4	12	5	0,5	0,12	18	40	0,6	0,8	0,12	100
15	1,2	2	60	0,15	5	0,2	3	2,5	0,2	0,05	6	50	0,8	3,5	0,05	50
16	0,5	30	40	0,5	2,5	0,1	5	12	0,6	0,2	15	40	0,5	0,6	0,22	20
17	3	10	100	0,1	1,2	0,3	5	5	0,3	0,05	12	20	1	1	0,1	45
18	1	1	50	0,2	4	0,2	10	10	0,5	0,1	20	60	0,7	0,8	0,1	30
19	0,6	15	40	1	5	0	5	8	0,4	0,1	16	20	1	1,2	0,15	40
20	1,5	0,6	20	0,05	5	0,5	3	2,5	0,2	0,05	7	50	1	3,5	0,05	15
21	2,5	1	60	0,2	3	0	3	10	0,4	0,1	8	40	0,3	1,2	0,05	60
22	0,5	30	40	0,5	2,5	0,1	4	5	0,2	0,1	10	25	1	0,6	0,05	20
23	1,5	4	36	0,02	7,5	0,1	12	30	0,5	1	40	50	0,8	0,4	0,15	40
24	1,2	6	50	0,25	1,5	0,2	6	4	0,5	0,12	12	36	0,8	0,8	0,08	24
25	2,5	10	120	0,1	4	0,45	4	2,5	0,2	0,07	8	50	1,2	3	0,05	40

Практичне заняття 7.

Варіант	Завдання 7.1						Завдання 7.2 і 7.3			
	h_{11E} , КОМ	$h_{12E} \times 10^{-4}$	h_{21E}	h_{22E} , МСім	I_{K0} , МА	f_{h21E} , МГц	R_H , КОМ	$R_{ГЕН}$, КОМ	C_K , пФ	C_H , пФ
1	0,8	1	60	0,15	4	10	1	0,4	4	40
2	1	1	40	0,1	3	8	1,5	0,12	5	60
3	1,5	1	60	0,05	2	12	2	0,5	4	40
4	0,35	1	60	0,16	5	12	0,5	0,2	7	100
5	0,7	2	45	0,8	2	15	0,5	0,25	4	40
6	0,35	3	55	0,6	6	12	0,9	0,12	4	15
7	1,2	2	54	0,45	6	4,8	0,4	0,45	8	45
8	0,9	3	20	0,74	8	10	1,5	0,04	6	100
9	0,8	3	70	0,12	5,5	8	1,2	0,6	9	50
10	0,75	10	48	0,6	4	2,5	1,5	0,19	10	20
11	0,8	3	36	0,3	2	7,5	0,8	0,05	4,5	30
12	0,4	4	18	1	8	4,5	0,8	0,12	6	45
13	0,3	0,8	24	2	12	19	0,4	0,4	4	200
14	1,2	8	40	0,4	3	12	1,5	0,5	2	15
15	0,4	4	25	0,9	8	7	1	0,1	8	40
16	0,65	10	90	1,5	5	2,5	0,8	0,2	5	20
17	0,8	0,3	50	1	10	8	1,5	0,8	5	35
18	1,5	1,2	40	0,12	5	10	0,5	1	4,5	400
19	1,7	5	90	0,7	2	10	0,4	0,1	8	20
20	0,8	2	40	0,5	2	12,5	1,5	0,4	7	50
21	0,54	5	32	1	3,5	4,8	1	0,25	5	40
22	0,5	0,3	24	1,2	12	5,6	1,2	0,9	4,5	150
23	1,2	5	60	0,6	7,5	1,8	0,7	0,65	5,6	82
24	0,8	0,8	45	0,12	4	3,5	0,45	0,45	2,5	80
25	0,35	1,2	50	0,15	5	2,2	0,8	0,15	8	250

Практичне заняття 8.

Варіант	Завдання 8.1 - 8.3									
	U_{KE0} , В	I_{K0} , МА	U_{BE0} , В	I_{E0} , МА	h_{11E} , КОМ	h_{21E}	h_{22E} , мКСім	E_K , В	$ E_{3M} $, В	$R_{E\text{ diff}}$, КОМ
1	9	12	0,4	0,25	0,3	65	240	20	10	100
2	4,8	3,6	0,6	0,15	0,54	37	125	10	5	135
3	5,2	7,6	0,6	0,2	0,94	46	325	12,6	6,3	172
4	4,5	7,2	0,2	0,05	1,43	39	75	12,6	6,3	342
5	10	20	0,4	0,1	0,5	50	250	25	15	200
6	4,7	5,1	0,5	0,1	1,1	64	157	12,6	6,3	357
7	7,4	15	0,4	0,2	0,32	46	375	15	10	148
8	5	3	0,3	0,15	1,7	36	58	12	7	274
9	8	5	0,2	0,1	0,85	55	136	16	10	246
10	6	4	0,4	0,12	1,3	67	231	15	10	78
11	6,5	3,7	0,3	0,05	0,74	58	114	17	13	216
12	8	8	0,4	0,1	0,8	80	80	24	15	180
13	5	3	0,4	0,1	2	34	75	15	10	200
14	12	8	0,5	0,12	0,2	50	500	25	15	50
15	10	5	0,2	0,05	1	75	150	20	15	500
16	8,4	4,6	0,6	0,2	0,67	56	60	16	12	260
17	5,3	3,5	0,3	0,05	0,53	35	353	13	8	135
18	4,4	2,4	0,5	0,1	0,42	44	42	12	8	124
19	7	1,7	0,4	0,1	7	77	77	17	7	177
20	5	10	0,2	0,05	1	50	100	15	10	150
21	4,7	7,2	0,4	0,1	0,78	65	56	12,6	6,3	234
22	3,3	2,1	0,2	0,1	2,2	27	50	7	5	238
23	12	30	0,5	1	0,1	37	450	20	15	130
24	4,5	5	0,5	0,12	0,6	43	500	10	6	150
25	6	3	0,2	0,07	1,2	20	100	10	10	220

Практичне заняття 9.

Варіант	Завдання 9.1							
	9.1.1		9.1.2		9.1.3			
	R_1 , кОм	R_{33} , кОм	R_1 , кОм	R_{33} , кОм	R_1 , кОм	R_{33} , кОм	U_1 , В	U_2 , В
1	10	100	10	1100	10	100	-0,12	0,19
2	12	372	12	744	12	382	0,25	-0,03
3	14	588	14	616	14	588	0,06	0,28
4	16	464	16	464	16	464	0,14	0,17
5	18	666	18	756	18	666	-0,28	0,02
6	20	440	20	480	20	440	0,03	0,23
7	22	946	22	880	22	946	0,18	0,11
8	24	720	24	792	24	720	0,24	0,04
9	26	442	26	624	26	442	0,07	0,22
10	28	896	28	1204	28	896	0,13	0,18
11	30	540	30	930	30	540	0,21	0,08
12	32	864	32	1440	32	864	0,09	0,27
13	34	680	34	1190	34	680	0,19	0,14
14	36	1224	36	1080	36	1224	0,26	0,05
15	38	950	38	1102	38	950	0,02	0,26
16	40	1560	40	2320	40	1560	0,11	0,16
17	42	1008	42	756	42	1008	0,27	0,01
18	44	1628	44	1188	44	1628	0,08	0,25
19	46	1886	46	1656	46	1886	0,15	0,13
20	48	1200	48	1248	48	1200	0,23	0,06
21	50	2200	50	2550	50	2200	0,05	0,29
22	34	510	11	1133	23	442	0,26	-0,24
23	14	896	13	403	29	896	-0,16	0,07
24	22	902	17	731	31	540	-0,01	0,13
25	63	1071	19	646	37	864	0,25	-0,21

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА. НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК ДЛЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Варіант	Завдання 9.2								Завдання 9.3
	9.2.1			9.2.2			9.1.3		
	A	k_a	$a, \%$	A	k_b	$b, \%$	β	$R_{вих}(ОП), \text{кОм}$	
1	100000	110	1	1000	11	0,1	0,129	2	15000
2	10000	62	0,8	10000	32	0,2	0,129	4	20000
3	1000	44	0,6	100000	43	0,3	0,062	6	25000
4	10000	29	0,4	100000	30	0,4	0,172	8	30000
5	100000	42	0,2	100000	38	0,5	0,143	10	35000
6	10000	24	0,9	10000	23	0,6	0,152	1	40000
7	1000	40	0,7	1000	44	0,7	0,151	3	45000
8	10000	33	0,5	10000	31	0,8	0,158	5	50000
9	100000	24	0,3	100000	18	0,9	0,116	7	60000
10	10000	43	0,1	100000	33	1	0,148	9	70000
11	1000	31	1	100000	19	0,1	0,155	2	80000
12	10000	45	0,8	10000	28	0,2	0,165	4	90000
13	100000	35	0,6	1000	21	0,3	0,149	6	100000
14	10000	30	0,4	10000	35	0,4	0,116	8	95000
15	1000	29	0,2	100000	26	0,5	0,093	10	85000
16	10000	58	0,9	100000	40	0,6	0,140	1	75000
17	100000	18	0,7	100000	25	0,7	0,151	3	65000
18	10000	27	0,5	10000	38	0,8	0,146	5	55000
19	1000	36	0,3	1000	42	0,9	0,156	7	45000
20	10000	26	0,1	10000	26	1	0,097	9	35000
21	100000	51	1,1	100000	45	0,05	0,145	2	25000
22	10000	33	0,2	100000	27	0,3	0,159	3	19000
23	1000	44	0,8	10000	58	0,6	0,152	7	17000
24	10000	29	0,04	1000	11	0,09	0,157	11	13000
25	100000	19	0,05	10000	31	0,1	0,161	1	11000

Практичне заняття 10.

Варіант	Завдання 10.1												
	10.1.1		10.1.2		10.1.3								
	U_1 , В	U_2 , В	R_1 , кОМ	R_2 , кОМ	R_{33} , кОМ	R_1 , кОМ	R_2 , кОМ	R'_1 , кОМ	R'_2 , кОМ	U_1 , В	U_2 , В	U'_1 , В	U'_2 , В
1	3	-2,5	100	1100	200	10	45	32	40	0,1	-0,3	-0,2	0,1
2	-2	-2,4	382	744	400	22	37	20	68	-0,2	0,5	-0,4	0,7
3	1	-2	588	616	300	37	51	12	38	0,3	-0,2	0,3	-0,2
4	0,5	-1,4	464	464	500	43	27	6,8	59	0,4	0,7	0,5	-0,6
5	0,4	-1,1	666	756	100	51	63	15	18	0,5	-0,4	-0,1	0,3
6	-2,5	0,1	440	480	220	68	17	23	28	-0,6	0,6	-0,7	0,5
7	2,7	0,4	946	880	420	12	41	36	43	0,5	-0,1	0,6	-0,4
8	1,7	0,5	720	792	320	27	33	25	65	-0,4	0,5	0,4	-0,7
9	0,7	0,6	442	624	480	39	57	17	31	0,3	-0,3	-0,2	0,1
10	0,8	0,7	896	1204	120	45	24	5,1	55	-0,2	0,7	-0,5	0,6
11	-1,4	0,8	540	930	240	54	66	13	13	0,1	-0,2	0,3	-0,2
12	1,5	1	864	1440	340	62	11	28	26	-0,2	0,6	0,7	-0,5
13	0,1	1,5	680	1190	460	15	48	39	46	0,3	-0,4	-0,1	0,3
14	-1,1	1,6	1224	1080	140	23	36	21	62	-0,4	0,1	-0,6	0,4
15	2,1	1,7	950	1102	260	32	52	15	35	0,5	-0,3	0,2	-0,1
16	2,8	1,8	1560	2320	360	48	20	3,3	53	0,6	0,9	0,4	-0,9
17	1,8	2,1	1008	756	440	56	60	19	16	0,5	-0,2	-0,3	0,2
18	-2,4	2,6	1628	1188	160	64	13	22	22	-0,4	0,7	-0,5	0,6
19	0,6	2,7	1886	1656	280	19	43	31	49	0,3	-0,4	0,1	-0,3
20	1,6	2,8	1200	1248	380	26	37	24	60	-0,2	0,6	0,7	-0,5
21	2,6	3	2200	2550	180	35	53	12	37	0,1	-0,1	0,6	0,4
22	1,1	-1,3	442	1133	470	21	37	11	43	-0,3	0,4	0,1	-0,3
23	-1,3	-1,7	896	403	430	23	41	19	33	0,4	-0,1	0,6	-0,4
24	-2,1	-2,3	540	731	410	27	33	13	23	-0,5	0,3	-0,2	0,1
25	-1,7	-1,9	864	646	370	31	29	17	13	-0,6	0,9	-0,4	0,9

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА. НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК ДЛЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Варіант	Завдання 10.2							Завдання 10.3					
	10.2.1			10.2.2				10.3.1			10.3.2		
	K_1	C , мкФ	Δt , мс	K_2 , с	R , кОм	Δt , мс	α , МВ/с	U_{BX} , В	R , кОм	I_0 , нА	U_{BX} , В	R , кОм	I_0 , нА
1	-10	1	2	-2	200	1	-2,5	1,4	240	40	0,190	200	40
2	-12	2	4	-3	400	1	-2,4	1,5	340	30	0,180	380	10
3	-14	7	6	-4	300	2	-2	0,1	460	20	0,170	180	32
4	-16	8	8	-5	500	2	-1,4	1,1	140	10	0,160	200	22
5	-18	6	10	-6	100	3	-1,1	2,1	260	32	0,150	400	12
6	-20	5	1	-7	220	3	0,1	2,8	360	22	0,140	300	34
7	-22	1,1	3	-8	420	4	0,4	1,8	440	12	0,130	500	24
8	-11	2,2	5	-9	320	4	0,5	2,4	160	34	0,120	100	14
9	-13	2,6	7	-10	480	5	0,6	0,6	280	24	0,117	220	36
10	-15	3	9	-11	120	5	0,7	1,6	380	14	0,185	420	26
11	-17	3,4	4	-12	240	6	0,8	2,6	180	36	0,175	320	30
12	-19	3,8	2	-13	340	6	1	3	200	26	0,165	480	20
13	-21	4,2	8	-14	460	7	1,5	2	400	16	0,155	120	16
14	-8	4	6	-15	140	7	1,6	1	300	38	0,145	240	38
15	-6	3	3	-16	260	8	1,7	0,5	500	28	0,135	340	28
16	-4	2	1	-17	360	8	1,8	0,4	100	18	0,125	460	18
17	-2	6	7	-18	440	8	2,1	2,5	220	33	0,027	140	33
18	-9	3	5	-19	160	9	2,6	2,7	420	23	0,069	260	23
19	-7	1,4	9	-20	280	9	2,7	1,7	320	13	0,032	360	13
20	-5	5	10	-21	380	10	2,8	0,7	480	35	0,140	440	35
21	-3	9	8	-22	180	10	3	0,8	120	25	0,046	160	25
22	-19	5	13	-19	230	11	-1,3	1,9	370	11	0,123	130	47
23	-17	13	7	-17	310	11	-1,7	2,7	230	33	0,147	470	19
24	-11	7	17	-13	470	12	-2,3	3,3	410	19	0,137	230	31
25	-7	11	21	-11	190	12	-1,9	4,1	190	43	0,117	370	23

Практичне заняття 11.

Завдання 11.1 - 11.3							
Варіант	L , мкГн	C , пФ	Q_0	h_{11E} , кОм	h_{21E}	h_{22E} , мСім	Δf , кГц
1	700	850	73	1,8	30	0,04	2,8
2	300	410	68	2,7	16	0,03	2,2
3	145	540	65	2,1	32	0,1	6
4	235	710	84	1,4	22	0,11	5,1
5	110	130	70	2,8	18	0,06	16
6	500	1200	83	2,6	37	0,1	2,3
7	650	370	80	2,5	16	0,03	8,1
8	800	800	70	3	20	0,03	2
9	60	200	67	2	46	0,12	16
10	850	700	70	2,5	18	0,04	3
11	400	300	80	2,3	20	0,05	6
12	150	500	55	1,4	20	0,1	9
13	150	900	90	3	18	0,09	4,2
14	120	80	65	2,8	20	0,03	18
15	600	200	30	0,21	57	0,11	12
16	150	1000	80	0,25	18	0,1	7,8
17	120	100	60	1	50	0,1	9
18	585	200	30	1,5	25	0,04	18
19	111	777	55	0,7	17	0,02	7
20	162	987	78	0,96	24	0,1	6,3
21	634	1100	72	2,6	32	0,05	3,2
22	113	100	60	1,2	20	0,05	19
23	120	650	50	0,9	18	0,1	10
24	700	100	50	1,7	15	0,02	10
25	300	500	40	2,8	24	0,06	7,9

Завдання 11.4

Варіант	Тип	$U_{KE\ max},$ В	$I_{K\ max},$ мА	$r_H,$ Ом	Варіант	Тип	$U_{KE\ max},$ В	$I_{K\ max},$ мА	$r_H,$ Ом
1	1Т374А	6	10	1000	14	ГТ404В	40	500	220
2	ГТ308А	12	50	320	15	КТ339Д	25	25	1800
3	ГТ320А	12	150	150	16	КТ602А	100	75	2500
4	ГТ322В	10	5	2500	17	ГТ703А	20	3500	18,5
5	ГТ404В	40	500	200	18	КТ902А	110	5000	28
6	ГТ703А	20	3500	25	19	ГТ320А	12	150	180
7	МП42Б	15	30	1000	20	КТ201В	10	20	1100
8	КТ201В	10	20	500	21	КТ603А	30	300	210
9	КТ339Д	25	25	2400	22	1Т374А	6	10	1200
10	КТ601А	100	30	5000	23	ГТ322В	10	5	2300
11	КТ602А	100	75	2200	24	ГТ308А	12	50	360
12	КТ603А	30	300	180	25	КТ601А	100	300	5200
13	КТ902А	110	5000	32	26	МП42Б	15	30	1150

Практичне заняття 12.

Завдання 12.1 - 12.2							Завдання 12.3					Завдання 12.4					
Варі- ант	L , мкГн	C , пФ	Q_0	R_i , кОм	S , мА/В	φ , рад	a_1 , мА/В	a_3 , мА/В ³	a_5 , мА/В ⁵	β	$R'_{\text{екв}}$, кОм	E , В	$U_{\text{св0}}$, В	$I_{\text{с0}}$, мА	R_i , кОм	S , мА/ В	C , нФ
1	510	175	75	14	7	0,4	150	-5000	0	0,008	20	20	12,5	3,5	20	17,5	5
2	490	125	100	15	8	0,3	20	500	-400	0,03	0,5	40	25	2,5	15	7,5	3
3	470	100	95	13	9	0,18	500	-6000	0	0,01	15	36	20	2,9	17,5	7,5	2
4	450	150	85	11	10	0,11	45	300	-300	0,02	1	28	15	3,3	12,5	11,6	3
5	430	200	75	9	9	0,6	80	-6000	0	0,01	3	15	10	2,5	25	18,4	6
6	410	250	65	7	8	0,1	40	400	-400	0,008	2	27	19	2,3	15	12,3	4
7	390	350	55	5	7	0,3	450	-4500	0	0,01	10	34	17	3,2	7,5	11,4	4,5
8	370	300	45	6	6	0,3	30	400	-600	0,02	5	30	15	3	27,5	8	5,5
9	350	100	35	8	5	0,12	200	-6000	0	0,014	15	24	13	2,6	25	9	6
10	330	120	70	10	6	0,4	30	300	-500	0,01	2,5	13	7	5,4	3,25	39	6,5
11	310	140	50	12	7	0,5	500	-5000	0	0,02	1	19	11	5,2	4,5	29	8
12	290	160	80	14	8	0,1	50	200	-500	0,015	3,5	16	9	6,8	3,5	39,6	8,5
13	270	180	60	12,5	9	0,9	150	-6000	0	0,005	25	32	20	7,7	5,5	27,4	7
14	250	200	90	11,5	10	0,3	35	300	-350	0,022	2	31	18	1,7	30	5,5	6,5
15	230	220	85	10,5	9	0,14	400	-3000	0	0,02	8	29	16	2,5	40	7,5	6
16	210	240	65	9,5	8	0,17	45	250	-350	0,012	3	22	14	1,4	25	6,8	5,5
17	190	260	55	8,5	7	0,13	100	-7000	0	0,01	20	17	12	0,8	30	6,5	5
18	170	280	45	7,5	6	0,4	500	-5500	0	0,018	0,5	21	13	2	15	11,2	7,5
19	150	300	75	6,5	5	0,2	70	400	-550	0,018	3,7	29	15	1,1	7,5	7,5	6,5
20	130	250	90	5	6	0,1	450	-6500	0	0,015	0,7	17	11	0,8	25	6	2,5
21	110	200	70	15	7	0,5	50	400	-450	0,016	3,5	25	14	1,4	25	6	3
22	90	180	50	13	8	0,5	350	-7000	0	0,02	1,5	20	12	1,5	35	7	5
23	70	160	40	11	9	0,19	40	450	-600	0,014	2,5	37	22,5	1,8	35	5	4
24	50	140	60	9	10	0,2	250	-6000	0	0,01	1	33	17,5	1,9	9	7,4	8
25	40	120	80	7	9	0,6	30	450	-500	0,012	1,5	13	7,5	0,6	4	12,3	6

Практичне заняття 13.

Варіант	Завдання 13.1					Завдання 13.2		
	U_m , В	a	T , мкс	I_{kmax} , мА	h_{21E}	E_{3M} , В	$R_{Б2}$, кОм	R , Ом
1	12,5	3,5	200	85	50	9	50	1
2	25	2,5	150	75	30	5	28	1,2
3	20	1,5	175	65	25	9	55	1,4
4	15	0,3	125	50	30	12	89	1,6
5	10	0,5	1250	40	65	20	163	1,8
6	19	1	1750	30	40	16	147	2
7	17	2	750	20	45	5	47	2
8	15	3	2750	100	55	3	19	1,2
9	13	0,6	250	50	60	7	47	1,5
10	7	1,4	3250	150	65	15	53	0,8
11	11	1,2	450	100	80	12	53	0,9
12	9	0,8	3500	55	85	20	127	1,2
13	20	0,7	550	25	70	16	87	1
14	18	1,5	3000	35	65	7	37	1
15	16	2,5	400	45	60	15	93	1,4
16	14	0,4	2500	60	55	7	77	2
17	12	3	300	50	50	30	233	1,8
18	13	2	150	55	75	15	81	0,9
19	15	1,8	475	75	65	5	27	1
20	11	1,6	2500	80	25	16	160	2
21	14	1,4	250	60	30	10	131	2,7
22	12	1,2	350	40	50	6	65	1,8
23	22,5	0,8	3500	20	40	10	145	3
24	17,5	0,6	300	120	80	12	133	1,8
25	7,5	0,4	4000	100	60	25	137	1,2

ВАРІАНТИ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ

Варіант	Завдання 13.3					Завдання 13.4							
	$E_K, \text{В}$	$R_{B1}, \text{кОм}$	$R_{B2}, \text{кОм}$	$R_E, \text{кОм}$	$U_{RE}, \text{В}$	$E_K, \text{В}$	$R_K, \text{кОм}$	$R_1, \text{кОм}$	$R_2, \text{кОм}$	$h_{11E}, \text{кОм}$	h_{21E}	$h_{22E}, \text{мСм}$	$U_{KE \text{ нас.}}, \text{В}$
1	16	8	56	1	6	12	3	6	10	2	40	0,1	0,5
2	20	4	25	1	4,3	15	2	7	11	1	50	0,5	0,5
3	10	3	13	0,8	4,2	20	4	7	14	1	28	0,1	0,2
4	12,6	4	11	1,5	5,7	20	3	8	13	1,2	35	0,9	0,9
5	12,6	11	60	1,4	6,8	20	2	6	12	3	42	0,12	0,2
6	25	11	75	1,3	6	15	3	4	10	2	25	0,2	1
7	12,6	3	10	1,2	6	27	2	6	13	6	20	0,16	1,5
8	15	5,5	23	1,9	8	30	2	12	20	1,2	47	0,5	0,4
9	12	1,5	7	1,4	5,5	25	1	9	23	1,3	21	0,3	0,4
10	16	2,5	6	1,5	6	30	1,5	17	36	1,4	35	0,7	0,8
11	15	13	50	1,6	7	27	8	19	38	1,5	44	0,15	0,15
12	17	5	10	1,3	8	25	7	28	42	1,5	65	0,12	1,3
13	24	1,5	5	1,3	9	20	1,2	8	19	3	27	0,2	1
14	15	12	40	1,7	9	25	7	20	40	1,5	47	0,16	0,8
15	26	7	14	3	14	25	4	11	21	1	37	0,7	0,6
16	20	13	30	3	11	25	1,4	5,7	11,3	3	23	0,15	0,1
17	16	24	64	1,6	10	30	9	19	39	3	47	0,7	0,2
18	13	4	18	0,9	5	30	1,8	7,7	13,9	7	33	0,3	1,5
19	12	5	27	1	6	25	0,9	12	60	5	81	0,15	1,3
20	17	6	36	1,3	6,3	30	2,7	17,9	35	1,3	27	0,5	0,46
21	15	5	34	1,5	5	25	2	13,9	27	3	31	0,16	0,4
22	12,6	7,3	17	1,7	6,3	25	2,7	19	33	5	31	0,1	0,6
23	7	3	9	1,1	3,5	25	2,8	19,1	36	1,7	65	0,6	0,25
24	17	1,8	9	0,7	4	20	6	13	33	11	25	0,1	0,2
25	13	7	19	0,9	5,5	30	1,8	11,3	24	7	25	0,13	2

Практичне заняття 14.

Варіант	Завдання 14.1				Завдання 14.2			Завдання 14.3									сумарна (+), різницєва (-)
	a_1 , мА/В	a_2 , мА/В ²	a_3 , мА/В ³	U_m , В	β	U_0 ,В	U_m ,В	f_1 , МГц	f_2 , МГц	C , пФ	Q_0	B , А/В ²	U_{m1} , В	U_{m2} , В	h_{22E} , мСім		
1	55	15	17	1,2	1,9	11	2,5	1	0,6	900	65	0,3	0,02	0,3	0,7	+	
2	54	12	19	1,9	1,7	1,8	2,2	1	0,6	900	65	0,3	0,02	0,3	0,7	-	
3	63	13	18	1,3	1,3	2	3,8	4,8	7,9	150	60	0,2	0,01	0,25	0,2	+	
4	52	14	16	1,7	1,1	18	24	8,4	7,9	150	60	0,2	0,001	0,25	0,2	-	
5	41	11	16	1,3	1,8	2	1,6	3	2,4	250	45	0,2	0,02	0,2	0,1	+	
6	45	8	10	0,6	1,5	8	1,68	3	2,4	250	45	0,2	0,02	0,2	0,1	-	
7	46	5	12	1,2	1,3	1,3	2,2	1,3	1,6	300	40	0,13	0,02	0,2	0,15	+	
8	57	7	12	0,7	1,4	3,9	3	16	13	300	40	0,13	0,02	0,2	0,15	-	
9	48	10	12	1,4	1,2	19	16,6	4,6	4,4	600	50	0,2	0,01	0,3	0,3	+	
10	39	9	14	1,1	1,9	2,9	1,7	4,6	4,4	600	50	0,2	0,01	0,3	0,3	-	
11	48	11	13	1,6	1,6	9	2,74	1,1	0,8	1100	70	0,3	0,2	0,3	0,08	+	
12	53	8	14	0,8	1,4	1,4	2,3	1,1	0,8	1100	70	0,3	0,02	0,3	0,08	-	
13	55	11	16	1,1	1,6	5	4,1	3,1	2,6	310	55	0,3	0,02	0,2	0,12	+	
14	45	15	18	1,4	2,1	4	1,8	3,1	2,6	320	55	0,3	0,02	0,2	0,12	-	
15	35	12	17	1,2	1,8	11	2,85	4,5	4,3	500	40	0,1	0,005	0,3	0,022	+	
16	25	5	7	0,4	1,6	1,6	2,5	8,3	7,8	150	50	0,2	0,01	0,15	0,2	-	
17	50	8	15	1,5	1,1	32	17	1	0,7	1000	60	0,3	0,02	0,2	0,05	+	
18	40	7	10	0,7	1,4	20	15	15	12	200	30	0,12	0,01	0,2	0,1	-	
19	50	12	14	1,5	1,5	4	3	3	2,5	300	50	0,2	0,01	0,1	0,2	+	
20	70	15	20	1,5	1,3	20	6,7	4,8	7,8	250	50	0,2	0,02	0,1	0,5	-	
21	50	10	12	0,8	2	3	2	8,4	7,8	200	50	0,2	0,01	0,1	0,5	+	
22	60	12	19	1,8	1,7	1	0,8	1,6	1,2	300	30	0,1	0,01	0,3	0,1	-	
23	60	10	15	1	1,5	2,5	1,4	16	12	300	30	0,1	0,01	0,3	0,1	+	
24	30	8	11	1,2	2	6	5	4,5	4,2	500	50	0,1	0,005	0,3	0,02	-	
25	40	10	15	1,2	2,2	5	3,8	4,5	4,2	500	50	0,1	0,005	0,3	0,02	+	

Завдання 14.4

Варіант	R , кОм	a	Q_0	L , мкГн	C , пФ	Варіант	R , кОм	a	Q_0	L , мкГн	C , пФ
1	10	0,5	50	120	500	14	3	0,7	60	200	150
2	4	0,4	36	200	500	15	6	0,66	66	100	140
3	20	0	40	300	400	16	11	0,6	60	100	250
4	3	0,75	67	200	150	17	5	0,3	60	100	800
5	6	0,6	66	140	166	18	11	0	50	250	480
6	12	-0,25	60	100	200	19	2,2	0,85	60	150	200
7	5	-0,12	50	100	1000	20	5	0,71	55	100	100
8	10	-0,1	40	250	500	21	11	0,55	55	150	222
9	2	-0,2	60	200	150	22	5,5	0,22	55	111	1111
10	5	-0,3	50	100	100	23	5	0,1	50	500	400
11	12	0,6	66	120	160	24	8	0,8	80	200	180
12	5	0,5	55	180	1555	25	4,5	0,54	54	145	120
13	10	0,1	100	400	400	26	14	-0,21	75	160	400

Практичне заняття 15.

Варіант	Завдання 15.1					Завдання 15.2			Завдання 15.3				Завдання 15.4		
	L , мкГн	Q_0	λ_1 , м	λ_2 , м	h_{22E} , мкс/ім	f_a , МГц	f_c , МГц	Q_0	f_0 , МГц	f_{mod} , кГц	Q_0	M_f	f_0 , МГц	$\Delta f_{сус}$, кГц	F_{max} , кГц
1	29	66	51	184	35	7	9,5	95	54	45	150	2	7	140	11
2	13	78	45	110	15	3,9	2,6	60	4	22	25	0,7	8	150	12
3	35	50	54	140	40	3,65	3,15	35	75	75	75	0,75	9	125	10
4	81	49	49	120	75	5	7	75	67	85	48	2,1	10	120	12,5
5	76	38	95	210	55	8,2	9,5	78	43	55	76	2	11	110	14
6	45	55	50	125	80	12	14	43	27,1	54,3	58	1,3	7	25	12
7	87	44	270	800	40	5	7	75	15	30	30	3	6	50	10
8	92	38	95	264	55	15	18	85	11	11	110	1,1	5	75	10
9	233	27	1670	3420	25	8	9,5	95	8	12	33	2	4	100	9
10	133	43	1200	3400	35	5	4,1	75	5,3	25	22	2	9	25	8
11	1,2	97	10	25	30	14	16,5	45	6	12	65	0,85	8	40	12
12	23	64	65	190	30	1,21	1,45	55	8,7	21	43	3	7	30	10
13	185	23	750	2000	25	12	17	45	12	32	85	0,85	6	20	10
14	52	52	52	205	20	3,9	2,6	65	16,5	35	100	1,3	10	150	15
15	63	52	52	140	20	6	8	80	21	50	30	4	9	145	15
16	12	78	45	210	25	4,3	5,7	37	1,2	5	34	2	8	45	12
17	155	55	1550	3550	20	22	20	90	4,4	7	65	1	12	100	12
18	183	59	1600	3550	20	4,2	5,7	78	8	12,3	25	4	13	90	10
19	233	27	1650	3420	35	10	6,5	56	50	100	50	2	14	80	8
20	185	23	750	2000	85	6	8	47	55	132	120	1	13	75	10
21	49	49	49	187	25	1,35	1,03	45	2,22	3,6	42	2	5	110	9
22	18	33	13	29	30	14	16,5	67	5,1	15	50	1,5	6	130	9
23	13	76	25	100	10	5	4,1	75	2	6	50	1	12	70	15
24	27	66	51	184	20	8	9,5	100	8	32	46	1,2	11	60	11
25	27	66	51	184	20	8	9,5	100	3,3	6,4	47	2,1	10	50	13

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. С.М. Левитський. Основи радіоелектроніки. Підручник. - Київ: ВПЦ "Київський університет", - 2007 р., - 455 с.
2. І.І. Бех, С.М. Левитський. Фізичні основи комп'ютерної електроніки. - К.: ТОВ "Карбон", - 2010 р., - 233 с.
3. С.М. Левитський. Основи радіоелектроніки. Навчальний посібник. - Київ: ВПЦ "КУ", - 2002 р., - 83 с.
4. І.І. Бех. "Аналогові електронні пристрої". Підручник. - К.: Видавнича лабораторія радіофізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, - 2024 р., - 258 с.
5. І.І. Бех. Збірник задач з аналогової електроніки. Навчальний посібник. - К.: Видавнича лабораторія радіофізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, - 2013 р., - 65 с.
6. Bruce Carter, Ron Mancini. Op Amps for Everyone (fifth edition). Elsevier Inc., - 2018, - 458 p.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

БЕХ Ігор Іванович, **Левитський** Сергій Михайлович

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА

навчальний посібник
для проведення практичних занять

Формат 60x80¹⁶. Ум. авт. арк. 6. Наклад 100.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний.
Підписано до друку 27.11.2025

Видавнича лабораторія факультету
радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка