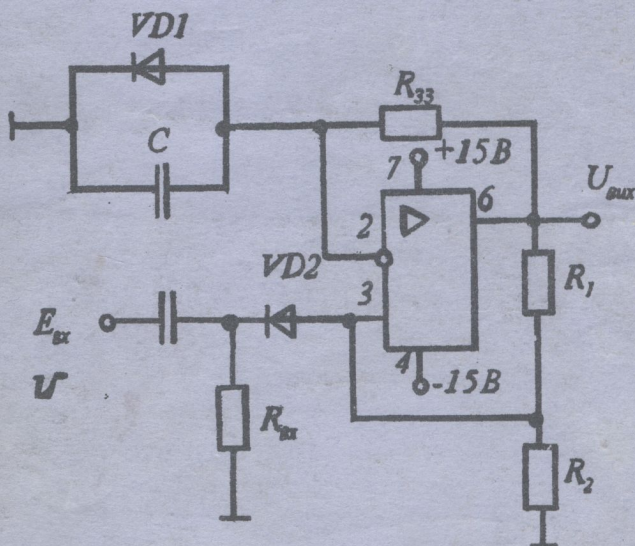


М.І.БАНДАК, Ю.В.ШАБАТУРА, В.В.ПРИСЯЖНЮК

ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА Ч.1.

Електронні елементи, теорія, розрахунки.
Лабораторний практикум



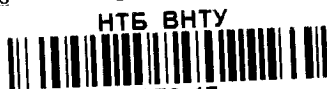
2979-17

Міністерство освіти України

Інститут змісту і методів навчання

Вінницький держ

ISEI



621.38(075) Б 23 1998

Бандак М.І. Електроніка та мікросхемотехніка

М.І.Бандак Ю.В.Шабатура
В.В.Присяжнюк

Електроніка та мікросхемотехніка
Ч.1.

Електронні елементи, теорія, розрахунки.
Лабораторний практикум

Навчальний посібник для студентів спеціальності
7.091401-"Системи управління і автоматики"
вищих навчальних закладів України

Рекомендовано Міністерством освіти України.

Вінниця ВДТУ 1998

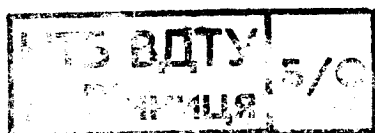
УДК 621.3

Електроніка та мікросхемотехніка. Ч.1. Електронні елементи, теорія, розрахунки. Лабораторний практикум. Навчальний посібник / М.І.Бандак, Ю.В.Шабатура, В.В.Присяжнюк.-В. : ВДТУ, 1998-143 с.-Укр.мовою/

В навчальному посібнику наведені короткі теоретичні відомості і основні розрахункові співвідношення для напівпровідникових приладів, методологія розв'язання практичних задач, задачі для самостійної роботи. Теоретичний матеріал закріплюється відповідним лабораторним практикумом.

Табл.25. Іл.93. Бібліогр. 9 наймен.

Рецензенти :О.А.Волков,	д.т.н.
І.І.Хаймзон,	д.т.н.
А.А.Дрючин,	к.т.н.



Зміст

Розділ 1. Електронні прилади. Теоретичні відомості і основні розрахункові співвідношення	5
1.1. Напівпровідникові діоди.	5
1.2. Біполярні транзистори.	9
1.3. Пільові транзистори.	14
Розділ 2. Електронні підсилювачі	17
2.1. Теоретичні відомості і основні розрахункові співвідношення.	17
2.2. Приклади розв'язку задач.	27
Розділ 3. Контрольна робота №1	34
Розділ 4. Лабораторний практикум	53
4.1. Лабораторне обладнання.	53
4.2. Осцилограф універсальний СІ - 73.	56
4.3. Генератор звуковий ГЗ - 53.	64
4.4. Прилад комбінований цифровий Щ 4300.	67
4.5. Прилад комбінований цифровий 4323А.	69
4.6. Генератор імпульсів Г5 - 54.	72
4.7. Дослідження напівпровідникових діодів.	79
4.8. Дослідження амплітудних обмежувачів на діодах.	93
4.9. Дослідження біполярних транзисторів.	115
4.10. Дослідження польових транзисторів.	129
4.11. Дослідження теристорів.	137
Література	143

Радіoeлектроніка в наш час є динамічною галуззю знань, яка надзвичайно швидко розвивається як в науковому, так і в технічному планах. Електронні пристрої використовуються в автоматичній і телемеханіці, атомній і ракетній техніці, медицині і біології, різних областях виміральної техніки тощо. З'являються нові напрямки, що використовують як нові наукові ідеї і методи, так і нові схемотехнічні рівняння, нову технічну базу. Разом з цим, багато традиційних методів і ідей залишаються вкрай необхідними в арсеналі фахівця з автоматичної та комп'ютерних систем управління.

Незважаючи на те, що реальною основою сучасної електроніки є технологічна інтеграція компонентів, її об'єктами, як і раніше, залишаються діоди, транзистори та електронні схеми на їх основі. Саме тому, у першій частині даного навчального посібника послідовно розглянуті фізичні основи, принципи дії і основні розрахункові співвідношення для напівпровідникових діодів, і біполярних та польових транзисторів, а також підсилювачі електричних сигналів. Вказаний теоретичний матеріал супроводжується прикладами розрахунків і закінчується підбіркою варіантних задач для контрольних робіт. Для кращого засвоєння теоретичного матеріалу посібник закінчується лабораторним практикумом, в який ввійшли лабораторні роботи по обладнанню та електронним елементам. Кожна лабораторна робота має чітку структуру, яка включає в себе назву, мету роботи, теоретичні відомості, методичні вказівки до виконання роботи, порядок виконання роботи і контрольні запитання.

Наявність у посібнику бібліографії допоможе студентам, які бажатимуть поглибити свої знання з розглянутого матеріалу.

РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ
ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ І ОСНОВНІ РОЗРАХУНКОВІ
СПІВВІДНОШЕННЯ

1.1. Напівпровідникові діоди

Основним елементом напівпровідникових приладів є електронно-дірковий перехід (*p-n* - перехід). Він являє собою перехідний шар між двома областями напівпровідника, одна з яких має електронну провідність, а друга - діркову.

Напівпровідниковим діодом називають напівпровідниковий прилад з *p-n* - переходом, який має два омичних виводи.

Диференційний опір діода визначається за формулою:

$$r_{\text{одф}} = \frac{dU}{dI}, \quad (1.1)$$

де dU - приріст напруги на діоді;

dI - викликаний зміною напруги приріст струму.

Випрямні діоди використовують для випрямлення змінних струмів частотою 50 Гц - 100 кГц.

$U_{n.\text{сер}}$ - середня пряма напруга, визначається як середня за період пряма напруга на діоді при протіканні через нього максимально допустимого випрямленого струму.

$I_{\text{звор.сер}}$ - середній зворотний струм, визначається як середній за період зворотний струм при максимальній зворотній напрузі.

$U_{\text{звор.max}}$ - максимально допустима зворотня напруга, визначається як найбільша постійна або імпульсна зворотня напруга, при якій діод може довго і надійно працювати.

$I_{\text{ен.сер.max}}$ - максимально допустимий випрямлений струм,

визначається як середній за період струм через діод (постійна складова), при якому гарантується його надійна і довготривала робота.

f_{max} - максимальна частота, визначається як найбільша частота підведеної напруги, при якій випрямляч на даному діоді працює досить ефективно, а нагрівання діода не перевищує допустимої температури.

Найкраще характеризує діод його вольт-амперна характеристика (ВАХ). Приклад такої характеристики показано на рис. 1.

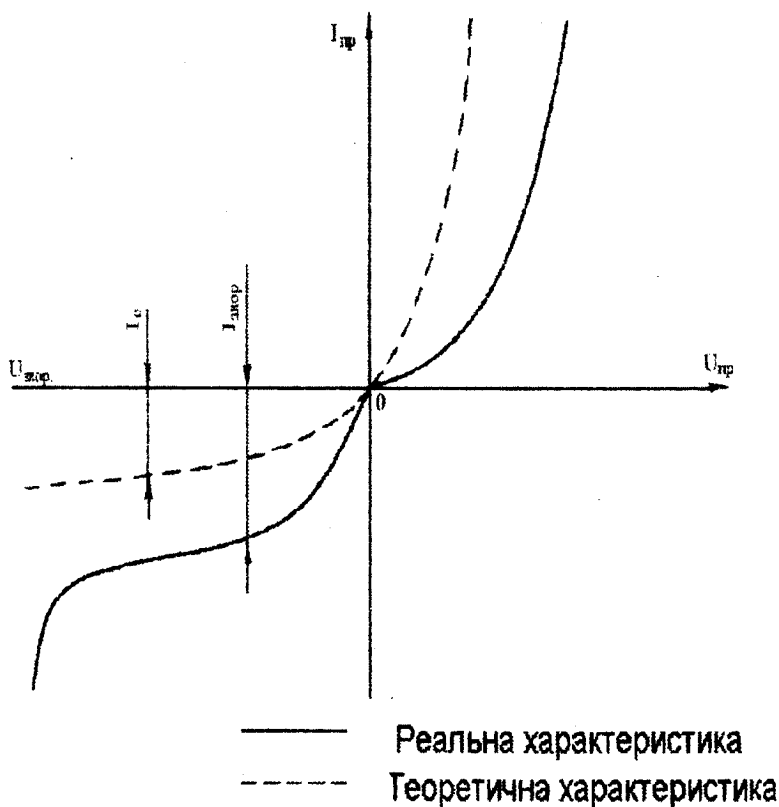


Рис. 1. Характеристика діода

Теоретична ВАХ діода визначається із співвідношення:

$$I = I_0(e^{U/(m\varphi_T)} - 1), \quad (1.2)$$

де I_0 - зворотній струм насичення, він зумовлюється неосновними носіями заряду, його значення, як правило, дуже мале;

U - напруга на $p-n$ - переході;

$\varphi_T = \frac{kT}{e}$ - температурний потенціал (k - постійна Больцмана, T - температура, e - заряд електрона);

m - спеціальний коефіцієнт ($m=1$ для германієвих діодів, $m=2$ для кремнієвих діодів при достатньо малих струмах).

Крім випрямних діодів в електроніці використовуються високочастотні, імпульсні, тунельні діоди а також стабілітрони і варикапи. Високочастотні та імпульсні діоди відзначаються невеликою ємністю діода, а також коротким часом відновлення зворотнього опору.

Тунельні діоди мають ВАХ з ділянкою диференційного опору, що дозволяє використовувати такі діоди в підсилювачах і генераторах електричних коливань.

Досить часто в практичних схемах використовують паралельне з'єднання діодів додатковими резисторами R_0 і послідовне з'єднання діодів з шунтуючими резисторами $R_{ш}$. Опір резисторів визначається за формулами:

$$R_0 \geq \frac{U_{np.cер} (n-1)}{nI_{випр.мах} - 1.1I_m};$$

$$R_{ш} \leq \frac{nU_{se.мах} - 1.1U_m}{(n-1)I_{se.мах}}; \quad (1.3)$$

де n - кількість діодів;

1.1- коефіцієнт, який враховує 10%-ний розкид опорів резисторів, що застосовуються;

$U_{np.cер}$, $I_{випр.cер}$, $U_{se.мах}$, $I_{se.мах}$ - ці параметри визначаються з довідника.

Для стабілізації напруги на навантаженні при зміні напруги живлення або при зміні опору навантаження і для фіксації рівня напруги використовують стабілітрони. Для стабілітронів робочою є ділянка пробою ВАХ в області зворотніх напруг (рис. 2).

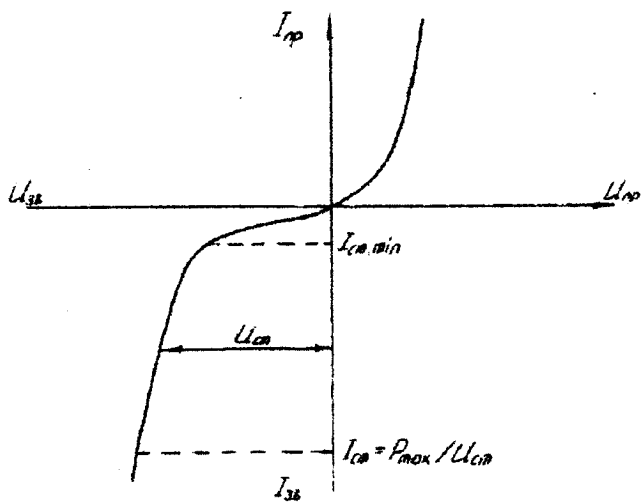


Рис. 2. Характеристика стабилизатора

1.2. Біполярні транзистори

Транзисторами називають напівпровідникові прилади з електронно-дірковими переходами, що служать для підсилення потужності, і які мають три або більше виводи.

Найбільш поширені біполярні і польові транзистори.

Назва біполярних транзисторів виникла з того, що їх робота ґрунтується на використанні носіїв заряду обох знаків. Біполярні транзистори бувають двох типів: $p-n-p$ і $n-p-n$. Структури і умовні позначення даних транзисторів показані на рисунку 3.

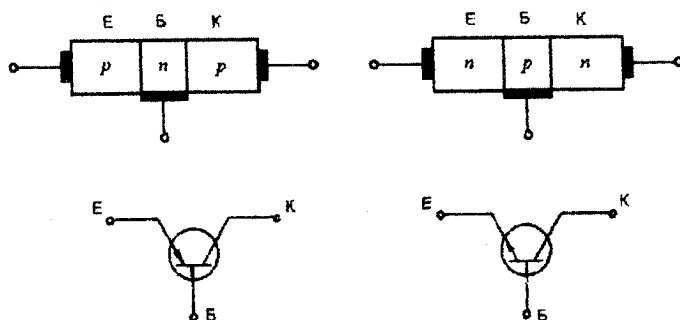


Рис. 3. Біполярні транзистори

В залежності від знаків і значень напруг на $p-n$ - переходах розрізняють такі режими роботи транзистора активний - напруга на емітерному переході пряма, а на колекторному - зворотна; відсічки - на обох переходах зворотні напруги, насичення - на обох переходах прямі напруги.

При аналітичних розрахунках транзисторних каскадів часто користуються малосигнальними схемами транзисторів / МЕС /. Характеристичні параметри транзистора можна досить легко знайти, якщо формально зобразити його у вигляді активного чотириполюсника /рис. 4/.

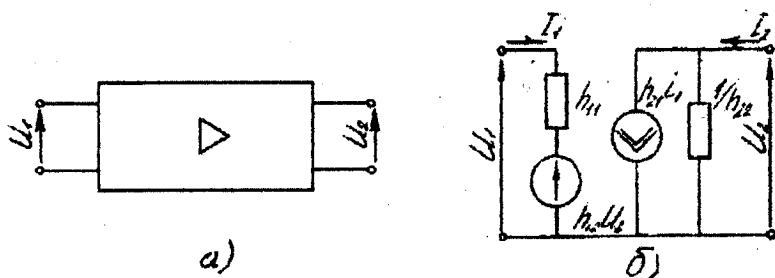


Рис. 4. Схема заміщення

Зв'язок між напругами і струмами на вході і виході чотириполюсника описується системою рівнянь

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 ; \quad (1.4)$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 ; \quad (1.5)$$

де $h_{12} = \frac{U_1}{U_2}$, $h_{21} = \frac{I_2}{I_1}$ - вхідний опір і коефіцієнт підсилення за струмом, визначаються в режимі короткого замикання за змінним струмом на виході транзистора

$h_{11} = \frac{U_1}{I_1}$, $h_{21} = \frac{I_2}{I_1}$ - коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою і вихідна провідність, визначаються в режимі холостого ходу на вході транзистору $I_1 = 0$.

h - параметри можна розраховувати за кінцевими приростами струмів і напруг поблизу робочої точки транзистора. Для схеми з спільним емітером справедливі такі рівняння:

$$\Delta U_{BE} = h_{11}\Delta I_B + h_{12}U_{KE} , \quad (1.6)$$

$$\Delta I_K = h_{21}\Delta I_B + h_{22}\Delta U_{KE} , \quad (1.7)$$

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE}=\text{const}} ; \quad h_{21} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE}=\text{const}} ;$$

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{KE}} \right|_{I_B = \text{const}} ; \quad h_{22} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KE}} \right|_{I_B = \text{const}}$$

Під час роботи транзистора в активному режимі за схемою з спільною базою струм колектора визначається за формулою:

$$I_K = \alpha I_E + I_{KBO} \quad (1.8)$$

де I_{KBO} - зворотний струм колекторного переходу, I_E - емітерний струм, α - статичний коефіцієнт передачі емітерного струму, з попередньої формули отримуємо:

$$\alpha = \frac{I_K - I_{KBO}}{I_E}, \quad (1.9)$$

оскільки $I_K \gg I_{KBO}$, то, як правило, використовують формулу:

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E} \quad (1.10)$$

для схеми з СБ, $\alpha \approx (0.95 + 0.999)$

Для аналізу роботи транзистора на змінному струмі використовують диференціальний коефіцієнт передачі емітерного струму.

$$\alpha_D = \left. \frac{dI_K}{dI_E} \right|_{U_{KE} = \text{const}} \quad (1.11)$$

Для транзистора, ввімкненого по схемі з СБ, струм колектора

$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_E + \frac{I_{KBO}}{1 - \alpha}; \quad (1.12)$$

де I_E - струм бази, остаточно формулу запишемо у вигляді:

$$I_K = B I_E + I_{KBO}, \quad (1.13)$$

де $B = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ - статичний коефіцієнт передачі базового струму.

$I_{KBO} = I_{KBO} / (1 - \alpha) = (1 + B) I_{KBO}$ - зворотний струм колекторного переходу в схемі з СБ при $I_E = 0$.

Таким чином, статичний коефіцієнт передачі струму бази можна визначити за формулою:

$$B = \frac{I_K - I_{КБО}}{I_B + I_{КБО}}; \quad (1.14)$$

враховуючи $I_{КБО} \ll I_K$; $I_{КБО} \ll I_B$,

$$\text{отримаємо: } B \approx \frac{I_K}{I_B}. \quad (1.15)$$

При роботі транзистора на змінному струмі використовують диференціальний коефіцієнт передачі струму бази

$$\beta = \left. \frac{dI_K}{dI_B} \right|_{U_{КБ}=\text{const}} \quad (1.16)$$

Для аналітичного розрахунку електричних кіл з транзисторами використовують схеми заміщення. Основними елементами цих схем є диференціальний опір емітерного переходу r_E і r_K .

$$r_E = \left. \frac{dU_{ЕБ}}{dI_E} \right|_{U_{КБ}=\text{const}} \quad (1.17)$$

Числові значення r_E лежать в межах від одиниць до десятків Ом.

Диференціальний опір колекторного переходу

$$r_K = \left. \frac{dU_{КБ}}{dI_K} \right|_{I_E=\text{const}} \quad (1.18)$$

Значення r_K лежать в межах $0.5 \div 1$ МОм.

Завершуючи розгляд основних розрахункових співвідношень для біполярних транзисторів, зупинимося на еквівалентній схемі ідеалізованого транзистора - схеми Еберса-Молла

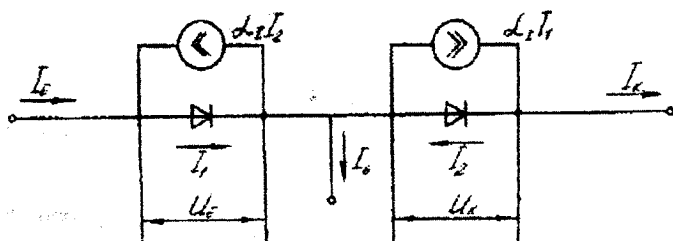


Рис. 5. Схема Еберса-Молла

Струми емітера і колектора визначаються такими співвідношеннями:

$$I_E = I_{EBK}(e^{U_{EB}/\varphi_T} - 1) - \alpha_I I_{KBK}(e^{U_{KB}/\varphi_T} - 1), \quad (1.19)$$

$$I_K = \alpha_I I_{EBK}(e^{U_{EB}/\varphi_T} - 1) - I_{KBK}(e^{U_{KB}/\varphi_T} - 1), \quad (1.20)$$

де $I_{KBK} = I_{KBO} / (1 - \alpha_I)$

$I_{EBK} = I_{KBO} / (1 - \alpha_I)$ - теплові струми емітерного і колекторного переходів при короткому замиканні на вході транзистора, $\varphi_T = kT/e$ - температурний коефіцієнт, $\alpha_I = \frac{I_E - I_{EBO}}{I_K}$ - інверсний коефіцієнт передачі колекторного струму, U_{EB} , U_{KB} - напруги на емітерному і колекторному переходах відповідно.

Крім зазначеного, із схеми очевидно співвідношення

$$I_B = I_E - I_K \quad (1.21)$$

1.3. Пільові транзистори

Пільовими транзисторами називають напівпровідникові прилади, у яких керування струмом, що протікає між двома електродами, здійснюється за допомогою напруги, прикладеної до третього електроду. Робота таких транзисторів ґрунтується на використанні тільки одного типу носіїв заряду.

Пільові транзистори мають три електроди, які називають спік /С/, витік /В/, затвор /З/.

Схематично пільовий транзистор з управляючим *p-n* - переходом і каналом *n* - типу і полярність його ввімкнення зображують, як показано на рисунку 6.

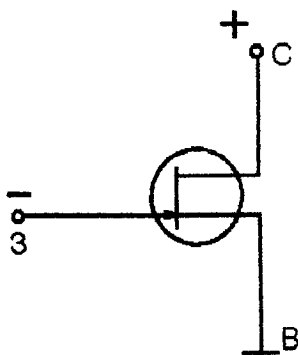


Рис. 6. Пільовий транзистор з *p-n* - переходом

Пільовий транзистор із вмонтованим каналом і полярність його ввімкнення показані на рис. 7а, а пільовий транзистор з індукованим каналом *n* - типу показаний на рис. 7б.

Основним параметром пільового транзистора, який характеризує його підсилювальні властивості, є крутість стокозатворної характеристики:

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{3B}} \right|_{U_{CB} = \text{const}}, \quad (1.22)$$

де I_C - струм стоку, U_{3B} - напруга затвор-витік, U_{CB} - напруга спік-витік.

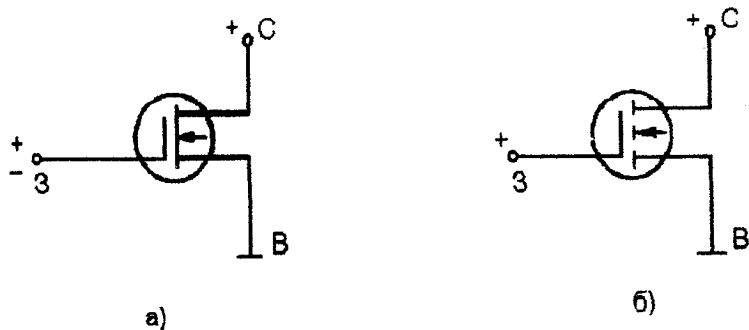


Рис. 7. Пюльвий транзистор з вмонтованим і індукваним каналом

Внутрішній опір транзистора:

$$R_i = \left. \frac{dU_{CB}}{dI_C} \right|_{U_{3B} = \text{const}} \quad (1.23)$$

Коефіцієнт підсилення транзистора:

$$\mu = \left. \frac{dU_{CB}}{dU_{3B}} \right|_{I_C = \text{const}} \quad (1.24)$$

Між вказаними параметрами існує зв'язок $\mu = SR_i$

Як параметр також використовують $U_{3B, \text{відс.}}$ /напруга на затворі, при якій відсікається струм стоку/ напругу відсічки, і струм $I_{c, \text{нас.}}$ о насичення стоку.

Корисним є рівняння, виведене В.Шклі. Це рівняння визначає значення струму стоку I_c при зміні напруги U_{3B} :

$$I_c = I_{c, \text{нас.}} (1 - (U_{3B} / U_{3B, \text{відс.}}))^2 \quad (1.25)$$

З врахуванням (1.25) визначимо крутість стокозатворної характеристики

$$S = -\frac{2I_{c.nac.}}{U_{3\theta.вiдс}} \left(1 - \frac{U_{3\theta}}{U_{3\theta.вiдс}} \right) \quad (1.26)$$

Член $-\frac{2I_{c.nac.}}{U_{3\theta.вiдс}}$ позначимо S_{m_0} , тобто крутість характеристики при $U_{3\theta} = 0$, тоді:

$$S = S_{m_0} \left(1 - \frac{U_{3\theta}}{U_{3\theta.вiдс}} \right) \quad (1.27)$$

РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОННІ ПІДСИЛЮВАЧІ

2.1. Теоретичні відомості і основні розрахункові співвідношення

Підсилювачі електричних сигналів - це електронні пристрої, призначені для підвищення потужності вхідних сигналів за рахунок енергії джерела живлення.

В залежності від співвідношення вхідного $R_{\text{вх}}$ і внутрішнього $R_{\text{вн}}$ опорів підсилювача розрізняють:

підсилювач напруги, якщо $R_{\text{вх}} \gg R_{\text{вн}}$,

підсилювач струму, якщо $R_{\text{вх}} \ll R_{\text{вн}}$,

підсилювач потужності, якщо $R_{\text{вх}} \approx R_{\text{вн}}$.

Оскільки навантаженням підсилювача може бути інший підсилювач і тощо, то в такому випадку весь підсилювальний пристрій розглядають як багатокаскадний підсилювач. В такий підсилювач входять: вхідний або попередній підсилювач, проміжний, передвихідний або передкінцевий і вихідний або кінцевий каскади.

За характером зв'язку між каскадами розрізняють такі різновиди підсилювачів: з конденсаторними /або RC /, трансформаторними, резонансно-трансформаторними або гальванічними зв'язками.

За характером підсилювального сигналу підсилювачі розділяються на підсилювачі постійного і підсилювачі змінного струму. Підсилювачі постійного струму підсилюють сигнали, починаючи з нульової частоти. В свою чергу, підсилювачі змінного струму діляться на підсилювачі низької і високої частоти.

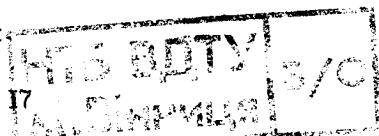
Головними параметрами, які характеризують якісні і кількісні характеристики підсилювачів, є коефіцієнт підсилення, точність відтворення форми підсилюваного сигналу, коефіцієнт корисної дії.

Коефіцієнт підсилення показує, в скільки разів приріст величини напруги, струму чи потужності більше відповідної зміни на вході.

Коефіцієнт підсилення напруги:

$$K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}, \quad (2.1)$$

коефіцієнт підсилення струму:



$$K_I = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}}, \quad (2.2)$$

коефіцієнт підсилення потужності :

$$K_P = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (2.3)$$

Для багатокаскадного підсилювача використовується загальний коефіцієнт підсилення

$$K_{\Sigma} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_n, \quad (2.4)$$

де n - число каскадів.

В розрахунках часто використовуються коефіцієнти підсилення, виражені в логарифмічних одиницях /дБ/:

$$K_U(\text{дБ}) = 20LgK_U; \quad K_I(\text{дБ}) = 20LgK_I; \quad (2.5)$$

$$K_P(\text{дБ}) = 10LgK_P; \quad (2.6)$$

$$K_{\Sigma}(\text{дБ}) = K_1(\text{дБ}) + K_2(\text{дБ}) + \dots + K_n(\text{дБ}). \quad (2.7)$$

В реальних підсилювачах вихідний сигнал по відношенню до вхідного затримується на деякий час Δt :

$$U_{\text{вих}}(t) = kU_{\text{вх}}(t - \Delta t), \quad (2.8)$$

і, крім того, до нього вносяться лінійні та нелінійні спотворення.

Причинами нелінійних спотворень є нелінійність вольт-амперних характеристик елементів підсилювачів.

Лінійні спотворення в підсилювачах пояснюються залежністю коефіцієнта передачі струму і реактивних опорів схеми від частоти підсилюваного сигналу.

Коефіцієнт нелінійних спотворень характеризує рівень нелінійних спотворень сигналу.

$$v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} P_n}{P_1}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}}; \quad (2.9)$$

де - n - порядковий номер відповідної складової гармоніки.

Для багатокаскадного підсилювача використовують загальний коефіцієнт нелінійних спотворень:

$$v_{\Sigma} = v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_n; \quad (2.10)$$

де - n - число каскадів.

Нелінійні спотворення дуже залежать від амплітуди вхідного сигналу $U_{ax}(t)$ і не зв'язані з його частотою, тому в багатокаскадних підсилювачах нелінійні спотворення в основному з'являються в передкінцевих каскадах. Амплітудна характеристика підсилювача $U_{вих.} = f(U_{ax.})$ набуває нелінійності, починаючи з деякої величини $U_{ax. max}$

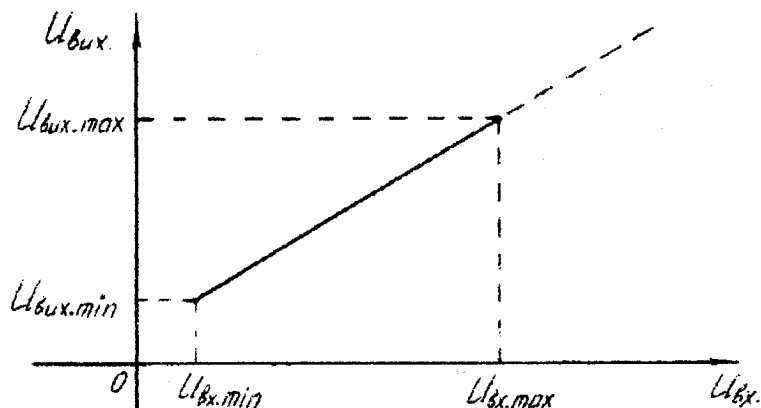


Рис.8. Амплітудна характеристика підсилювача

Величина $D = \frac{U_{ax. max}}{U_{ax. min}}$ характеризує динамічний діапазон

підсилювача.

Лінійні спотворення оцінюють по амплітудно-частотній /АЧХ/ і фазочастотній /ФЧХ/ характеристиках підсилювача. АЧХ показує залежність модуля коефіцієнта підсилення від частоти вхідного сигналу.

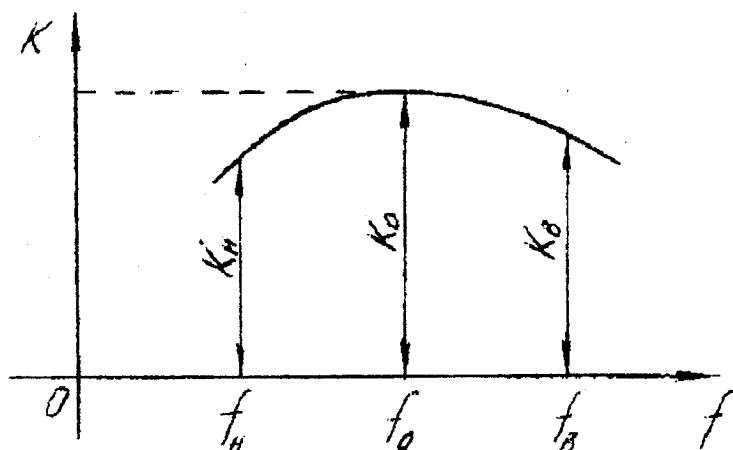


Рис.9. Амплітудно-частотна характеристика підсилювача

Ідеальна АЧХ паралельна осі частоти. Реально гармоніки вхідного сигналу підсилюються по-різному.

Коефіцієнт частотних спотворень визначається за формулою:

$$M = \frac{k_0}{k_f}, \quad (2.11)$$

це - k_0 - модуль коефіцієнта підсилення на середній частоті,

k_f - модуль коефіцієнта підсилення на заданій частоті.

Розрізняють електричний і повний коефіцієнт корисної дії /ккд/.

Електричний ккд:

$$\eta_e = \frac{P}{P_0}, \quad (2.12)$$

де - P_0 - потужність, що споживається колекторним колом від джерела живлення,

P - корисна потужність, виділена на навантаженні.

Повний ккд

$$\eta_n = \frac{P}{P_{\text{заг}}}, \quad (2.13)$$

де $P_{\text{заг}}$ - потужність, що споживається всіма колами підсилювача від джерела живлення.

Крім перелічених, до головних параметрів відносяться вхідні і вихідні опори підсилювача.

Для прикладу розглянемо типову схему підсилювального каскаду на транзисторі з СЕ, що показана на рис. 10.

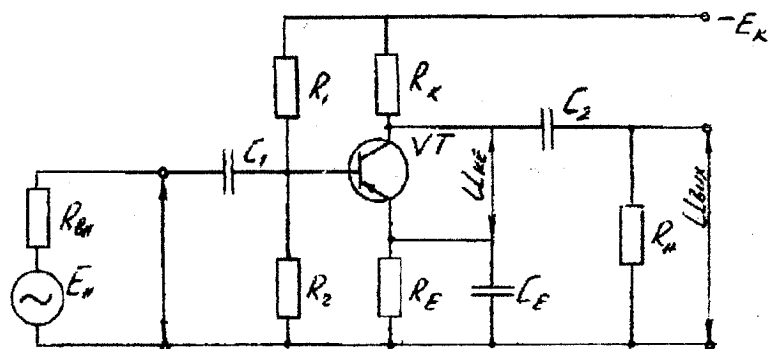


Рис. 10. Підсилювальний каскад

Вхідна змінна напруга $U_{\text{вх}}$ через розділювальний конденсатор C_1 потрапляє на вхід підсилювача. Конденсатор C_1 не допускає подачі постійної складової напруги вхідного сигналу на вхід підсилювача, в протилежному разі може виникнути порушення роботи по постійному струмові транзистора VT . Підсилена змінна напруга з колектора транзистора підводиться до зовнішнього навантаження через розділювальний конденсатор C_2 . Останній служить для розділення вихідного колекторного кола від зовнішнього навантаження по постійній складовій підсиленого сигналу. Характер роботи підсилювального каскаду і його параметри суттєво визначаються режимом роботи активного елемента підсилювача на постійному струмі. Вказаний режим визначається положенням робочої точки на динамічній прохідній характеристиці транзистора.

$$I_K = f(U_{BE}), \quad (2.14)$$

і величиною амплітуди вхідного сигналу. Робочою точкою транзистора називають точку перетину динамічної характеристики /лінії навантаження/ з однією із статичних вольт-амперних характеристик.

Розрізняють п'ять основних режимів роботи підсилювального каскаду: класи А, В, АВ, С і Д.

Ці режими зручно характеризувати величиною кута θ , який дорівнює половині періоду сигналу у вихідному колі активного елементу.

В режимі А робоча точка знаходиться посередині лінійної частини динамічної характеристики $I_K = f(U_{BE})$, а амплітуда вхідного сигналу така, що вихідний струм протікає впродовж всього періоду вхідного сигналу, тобто відсічка струму відсутня, а $\theta = \pi$ /рис. 11/

Для режиму А характерні незначні нелінійні спотворення. Від джерела живлення безперервно, незалежно від рівня вхідного сигналу, споживається струм.

$$I_0 \approx I_{0K}. \quad (2.15)$$

При цьому ккд, дорівнює:

$$\eta = \frac{P_{вих.}}{P_{спож.}} = \frac{0.5U_{\kappa \max} I_{\kappa \max}}{U_{ОКБ} I_0} \approx \frac{U_{\kappa \max} I_{\kappa \max}}{2U_{ОКБ} I_{OK}}, \quad (2.16)$$

це $U_{\kappa \max}$, $I_{\kappa \max}$ - амплітудні значення першої гармоніки напруги і струму.

$U_{ОКБ}$ - постійна напруга на колекторі /в робочій точці/;

I_0 - середнє значення колекторного струму.

З останнього виразу видно, що ккд підсилювача в режимі класу А не може перевищувати 50%.

В режимі класу В робоча точка міститься на початку динамічної характеристики $I_K = f(U_{BE})$, тому вихідний струм транзистора протікає впродовж половини періоду вхідного сигналу $\theta = \pi/2$. Ккд в режимі класу В досить високий і досягає 78.5%. Саме тому його застосовують в потужних двотактних підсилювачах.

Проміжним між А і В є режим класу АВ. При малих і середніх сигналах він має властивості класу А, а при великих амплітудах вхідного сигналу - класу В.

Для роботи в режимі класу С початкове положення робочої точки транзистора вибирається таким, щоб кут $\theta < \pi/2$, при цьому струм спокою дорівнює нулю. Даний режим є найекономічнішим /ккд досягає 80%/, оскільки при відсутності вхідного сигналу підсилювач майже не споживає потужності. Такий режим використовується, як правило, в високочастотних одноктактних і двотактних підсилювачах потужності з резонансними контурами.

В режимі класу Д транзистор працює як ключ.

Розглянемо деякі основні розрахункові співвідношення для підсилювального каскаду з СЕ.

Початкове положення робочої точки забезпечується подільником напруги з резисторів R_1 і R_2 . Розрахункові співвідношення для них

$$R_1 = \frac{E_K - U_{БЭР} - U_{РЕ}}{I_0 + I_{БР}} \quad (2.17)$$

$$R_2 = \frac{U_{БЭР} + U_{РЕ}}{I_0} \quad (2.18)$$

де - $I_0 = (2...5)I_{БР}$ - струм в колі подільника.

Для температурної стабілізації положення робочої точки в емітерному колі використовується резистор R_E , на якому утворюється напруга НЗ /негативного зворотного зв'язку/ по постійному струмі. Для усунення НЗ на змінному струмі резистор R_E - шунтують конденсатором C_E , опір якого на частоті підсилюваного сигналу повинен бути незначним.

$$R_E = \frac{(0.05...0.3)E_K}{I_{ОЕ}} \quad (2.19)$$

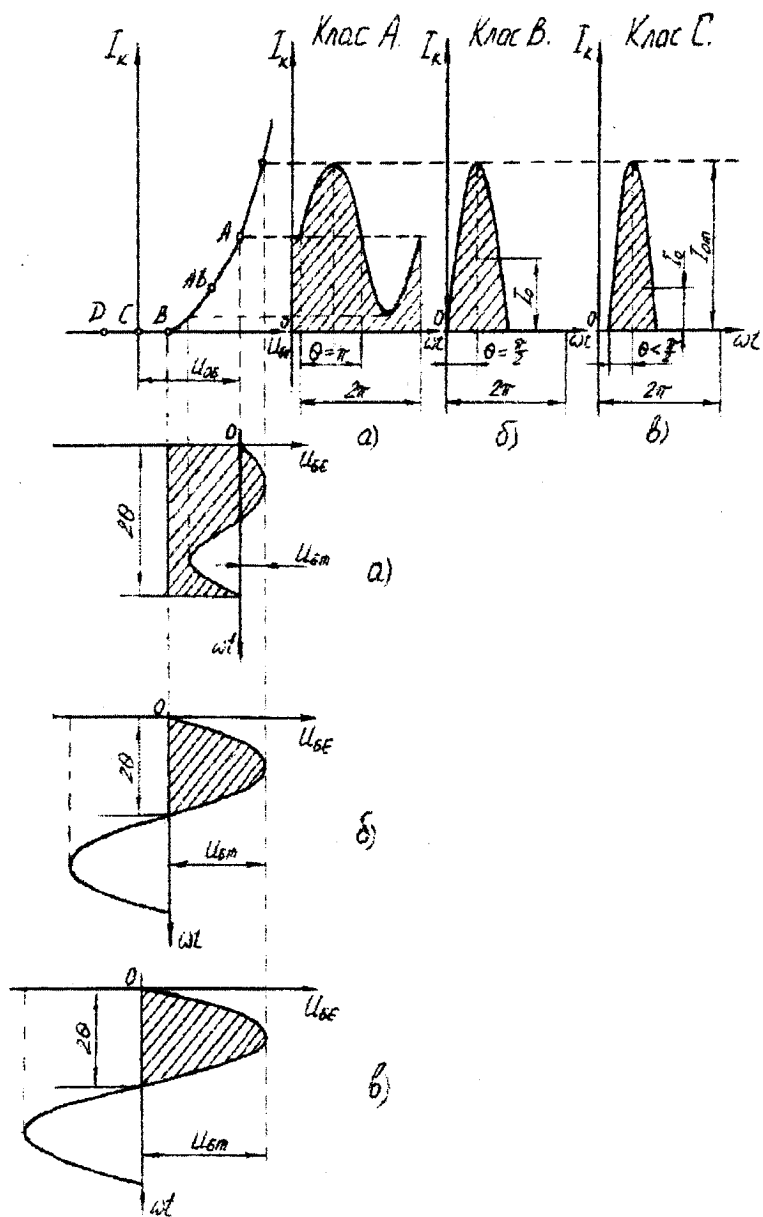


Рис. 11. Динамічні характеристики в режимах А, В, С

Коефіцієнт зворотного зв'язку β визначає, яка частина напруги з виходу підсилювача передається на його вхід.

$$\beta = \frac{U_{ss}}{U_{вх}}, \quad (2.20)$$

Коефіцієнт підсилювача в НЗЗ:

$$K_{n,нзз} = K_n / (1 + \beta K_n), \quad (2.21)$$

Опір резистора R_K визначають із співвідношення:

$$R_K = \frac{E_K - U_{кес} - I_{E_0} R_E}{I_{K_0}}, \quad (2.22)$$

Значення вхідного і вихідного опорів каскаду:

$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} \approx R_{вх, \text{транзистора}} \quad (2.23)$$

$$R_{вих} \approx R_x \quad (2.24)$$

Використовуючи формули для визначення фізичних параметрів транзистора з СЕ через його h - параметри, можна записати такі корисні співвідношення:

$$R_{вх} = h_{11E}; k_n = -\frac{h_{21E} R_K}{h_{11E}}; \quad (2.25)$$

$$k_I = h_{21E}; k_{IH} = h_{21E} \frac{R_K}{R_K + R_H}; \quad (2.26)$$

$$S = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_{КБО}} = \frac{1 + h_{21E}}{1 + h_{21E} R_E / (R_E + R_B)}; \quad (2.27)$$

де $R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$, S - коефіцієнт нестабільності каскаду за

колекторним струмом.

Значення h - параметрів транзистора пов'язані з його фізичними параметрами в схемі з спільною базою такими співвідношеннями:

$$r_E = h_{11B}(1 - h_{21B})h_{12B}/h_{22B};$$

$$r_B = h_{12B}/h_{22B};$$

$$r_K = 1/h_{22B};$$

$$\alpha = |h_{21B}|.$$

2.2. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧ

Задача 1

Побудуйте лінії навантаження для постійного і змінного струму для схеми з спільним емітером /Рис. 12а/ $E_k = 22 \text{ В}$, $R_k = 10 \text{ Ом}$, $R_n = 15 \text{ Ом}$, $R_E = 1 \text{ Ом}$, $I_{км} = 0.8 \text{ А}$. Вважати, що робоча точка транзистора зміщена в середину лінії навантаження за постійним струмом.

Визначте :

- потужність, що розсіюється, постійного і змінного струму на кожному резисторі;
- потужність, що розсіюється на транзисторі в стані спокою і при подачі змінного сигналу;
- враховуючи, що вихідна потужність визначається як потужність на резисторі R_n , визначте КДЛ.

Розв'язок

Робимо припущення, що конденсатор C_c повністю шунтує резистор R_k за змінним струмом.

Будуємо лінію навантаження за постійним струмом. /Рис. 12б/. Для цього визначимо координати точок :

$$I. I_k = 0 \text{ А}; U_{ke} = E_k = 22 \text{ В}$$

$$II. U_{ke} = 0 \text{ В}; I_k = \frac{E_k}{R_k + R_g} = 2.0 \text{ А}$$

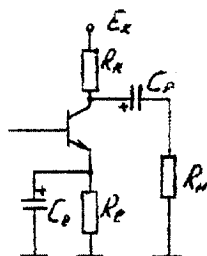


Рис. 12а.

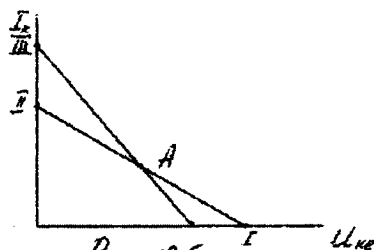


Рис. 12б.

Відмічаємо ці точки у вибраній системі координат і з'єднуємо їх прямою лінією, тобто отримуємо лінію навантаження.

Робочу точку А вибираємо посередині лінії навантаження.

Проектуючи точку А на осі ординат і абсцис, отримуємо її координати

$$I_{ок} = 1 \text{ А}, U_{ок} = 11 \text{ В}$$

Розрахуємо опір вихідного кола транзистора за змінним струмом :

$$R_{вих\sim} = \frac{R_k R_n}{R_k + R_n} = 6 \text{ Ом}$$

Побудуємо лінію навантаження за змінним струмом

$$\text{III. } U_{ке} = 0 \text{ В} \quad I_k = \frac{E_k}{R_{вих\sim}} = 3.66 \text{ А}$$

З'єднаємо точку III з точкою А прямою лінією до її перетину з віссю абсцис.

Враховуючи розмах колекторного струму $I_{км} = 0.8 \text{ А}$, побудуємо трикутники потужності на лінії навантаження за змінним струмом. З трикутників видно, що при амплітуді струму $I_{км} = 0.8 \text{ А}$ розмах напруги становить $U_{км} = 4.8 \text{ В}$.

Визначимо потужності за постійним струмом:

$$P_{R_k} = I_{ок}^2 R_k = 10 \text{ Вт}$$

$$P_{R_e} = I_{ок}^2 R_e = 1 \text{ Вт}$$

Потужність розсіювання на колекторному переході транзистора:

$$P_{к0} = I_{ек} U_{оке} = 11 \text{ Вт}$$

Потужність споживача від джерела живлення:

$$P_{живлен} = I_{ок} E_k = 22 \text{ Вт}$$

Виконані обчислення перевіримо за умовою балансу:

$$P_{живлен} = P_{к0} + P_{R_k} + P_{R_e}$$
$$22 \text{ Вт} = 11 \text{ Вт} + 10 \text{ Вт} + 1 \text{ Вт}$$

Визначимо потужності при подачі змінного сигналу.

$$P_{R_{k\sim}} = P_{R_k} + \frac{U_{km}^2}{2R_k} = 11.152 \text{ Вт}$$

Потужність розсіювання на резисторі R_k

$$P_{R_k} = \frac{U_{km}^2}{2R_k} = 0.768 \text{ Вт}$$

Потужність розсіювання на колекторному переході транзистора:

$$P_k = P_{k_0} - \frac{U_{km} I_{km}}{2} = 9.08 \text{ Вт}$$

Визначимо кдд каскаду:

$$\eta = \frac{P_{R_k}}{P_{живлен}} \cdot 100\% = 3.49\%$$

Задача 2.

Для схеми зображеної на рис. 13 розрахуйте опір резистора R_6 , якщо $E_k = 20 \text{ В}$, $R_e = 1 \text{ кОм}$, $U_e = 9 \text{ В}$, $h_{21k} = 150$.

Розв'язок

Розрахуємо значення струму емітера в робочій точці

$$I_{oe} = \frac{U_e}{R_e} = 9 \text{ мА} \approx I_{ок}$$

Розрахуємо значення струму бази в робочій точці

$$I_{об} = \frac{I_{oe}}{h_{21k}} = 60 \text{ мкА}$$

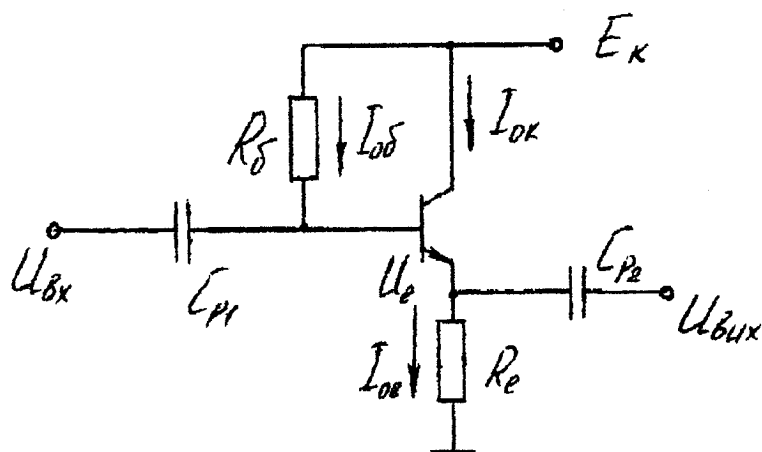


Рис. 13.

Розрахуємо напругу $U_{окб}$, враховуючи, що $U_{обє} = 0.7$ В.

Тоді $U_{окб} = E_x - (U_e + U_{обє}) = 10.3$ В

Тоді $R_б = \frac{U_{окб}}{I_{об}} = 172$ кОм

Скориставшись рядом Е 24, вибираємо $R_б = 180$ кОм

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0/0																									
1	11.1				6.1	6.1					11.1				16.1	16.1					21.1				
2	11.2				6.2	6.2					11.2				16.2	16.2					21.2				
3	11.3				6.3	6.3					11.3				16.3	16.3					21.3				
4	11.4				6.4	6.4					11.4				16.4	16.4					21.4				
5	11.5				6.5	6.5					11.5				16.5	16.5					21.5				
6		7.1					7.1					12.1					17.1					22.1			
7		7.2					7.2					12.2					17.2					22.2			
8		7.3					7.3					12.3					17.3					22.3			
9		7.4					7.4					12.4					17.4					22.4			
10		7.5					7.5					12.5					17.5					22.5			
11			3.1					8.1					13.1				18.1						23.1		
12			3.2					8.2					13.2				18.2						23.2		
13			3.3					8.3					13.3				18.3						23.3		
14			3.4					8.4					13.4				18.4						23.4		
15			3.5					8.5					13.5				18.5						23.5		
16				4.1					9.1					14.1			19.1							24.1	
17				4.2					9.2					14.2			19.2							24.2	
18				4.3					9.3					14.3			19.3							24.3	
19				4.4					9.4					14.4			19.4							24.4	
20				4.5					9.5					14.5			19.5							24.5	
21					5.1					10.1					15.1		20.1								25.1
22					5.2					10.2					15.2		20.2								25.2
23					5.3					10.3					15.3		20.3								25.3
24					5.4					10.4					15.4		20.4								25.4
25					5.5					10.5					15.5		20.5								25.5

Таблица 1

№ п/п	Номери задач												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1.1					6.1					11.1		
2	1.2					6.2					11.2		
3	1.3					6.3					11.3		
4	1.4					6.4					11.4		
5	1.5					6.5					11.5		
6		2.1					7.1					12.1	
7		2.2					7.2					12.2	
8		2.3					7.3					12.3	
9		2.4					7.4					12.4	
10		2.5					7.5					12.5	
11			3.1					8.1					13.1
12			3.2					8.2					13.2
13			3.3					8.3					13.3
14			3.4					8.4					13.4
15			3.5					8.5					13.5
16				4.1					9.1				
17				4.2					9.2				
18				4.3					9.3				
19				4.4					9.4				
20				4.5					9.5				
21					5.1					10.1			
22					5.2					10.2			
23					5.3					10.3			
24					5.4					10.4			
25					5.5					10.5			

Таблица 1 (продовження)

№ п/п	Номери задач											
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1			16.1					21.1				
2			16.2					21.2				
3			16.3					21.3				
4			16.4					21.4				
5			16.5					21.5				
6				17.1					22.1			
7				17.2					22.2			
8				17.3					22.3			
9				17.4					22.4			
10				17.5					22.5			
11					18.1					23.1		
12					18.2					23.2		
13					18.3					23.3		
14					18.4					23.4		
15					18.5					23.5		
16	14.1					19.1					24.1	
17	14.2					19.2					24.2	
18	14.3					19.3					24.3	
19	14.4					19.4					24.4	
20	14.5					19.5					24.5	
21		15.1					20.1					25.1
22		15.2					20.2					25.2
23		15.3					20.3					25.3
24		15.4					20.4					25.4
25		15.5					20.5					25.5

РОЗДІЛ 3. КОНТРОЛЬНА РОБОТА №1

Студент, приступаючи до виконання контрольної роботи №1, повинен ознайомитись з вище наведеними короткими теоретичними відомостями з розділу "Електронні прилади" і переглянути відповідні розділи рекомендованої літератури. В роботі передбачається розв'язання п'яти задач. Варіанти і номери задач визначаються за порядковим номером студента в журналі академічної групи згідно таблиці 1.

Задача 1.

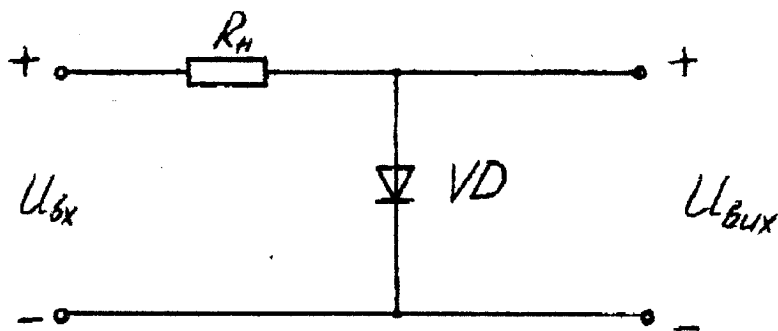


Рис. 14 . Схема принципова

Для зображеної схеми розрахувати вихідну напругу, якщо при температурі T в схемі використовується кремнієвий діод, який має зворотний струм насичення I_0 ; крім того, відомі $U_{вх}$ і R_n .

Таблиця 2

п/п	Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
1	T, K	300	285	295	311	305
2	$I_0, \mu A$	20	25	15	30	23
3	$U_{вх}, V$	30	25	28	32	35
4	$R_n, k\Omega$	30	27	24	27	33

Задача 2

Визначить кількість паралельно з'єднаних діодів і значення опору додаткових резисторів в випрямляючому колі, що дозволяють отримувати випрямлений струм $I_{\text{випр}}$ при використанні діодів, тип яких вказується відповідно до варіанту.

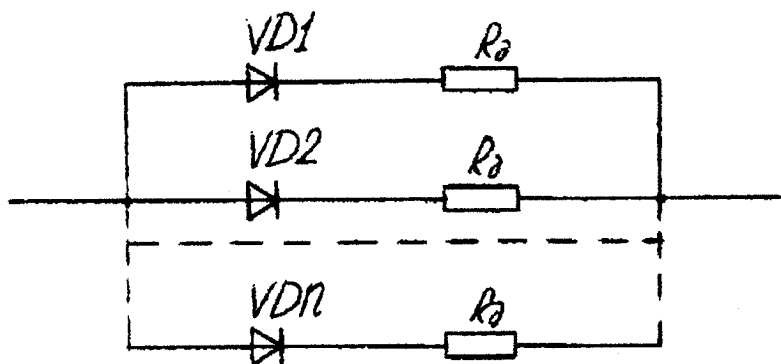


Рис. 15. Схема принципова

Таблиця 3

№ п/п	Параметри	1	2	3	4	5
1	$I_{\text{випр}}, \text{A}$	1	5	0.5	0.7	1.5
2	Тип діода	КД205В	Д7А	Д105	Д210	Д223

Задача 3.

Визначити, на якій частоті ємнісний опір діода зрівняється з його зворотним опором $R_{\text{об}}$, внаслідок чого відбудеться значне збільшення зворотного струму. Тип і параметри діода задані в таблиці 4.

Таблиця 4.

№ п/п	Параметри	Варіант				
		1	2	3	4	5
1	Тип діода	Д18	КД104А	КД203А	КД212А	Д226Б
2	$R_{об}$, МОм	0.4	2.6	0.28	4.0	3.0
3	C , нФ	0.5	25	115	50	15

Задача 4.

Стабілітрон VD ввімкнений в схему стабілізації напруги паралельно з резистором R_H . Знайти опір обмежуючого резистора R , якщо вхідна напруга змінюється в межах $U_{вх. \min} \div U_{вх. \max}$. Визначте, чи буде забезпечуватись стабілізація у всьому діапазоні змін вхідної напруги. Параметри стабілітрону вказані відповідно до варіанту.

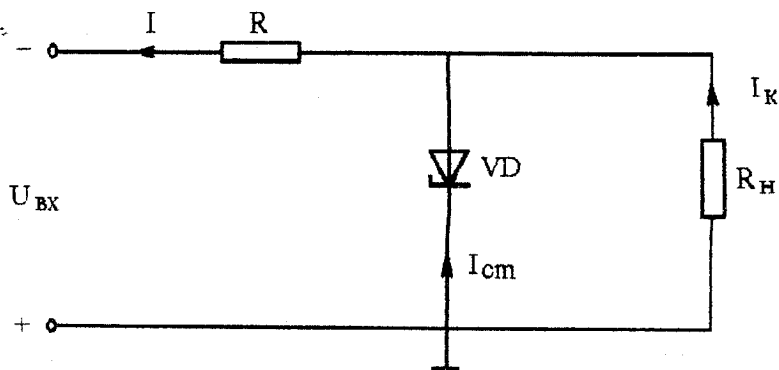


Рис. 16 Схема принципова

Таблиця 5

№ п/п	Параметри	1	2	3	4	5
1	VD	KC510A	KC512A	KC518A	KC522A	KC524A
2	R_H , кОм	2	1.2	1.3	1.8	1.1
3	$U_{ex.min}$, В	15	15	15	15	15
4	$U_{ex.max}$, В	30	30	30	30	30
5	$I_{cm.max}$, мА	79	67	45	37	33
6	$I_{cm.min}$, мА	1	1	1	1	1
7	U_{cm} , В	10	12	18	22	24

Задача 5

Визначити кількість діодів VD і опір шунтуючих резисторів R_H в найпростішому випрямлячі без фільтра при випрямленні синусоїдальної напруги U_{ex} . Тип і параметри діода вказані в таблиці 6.

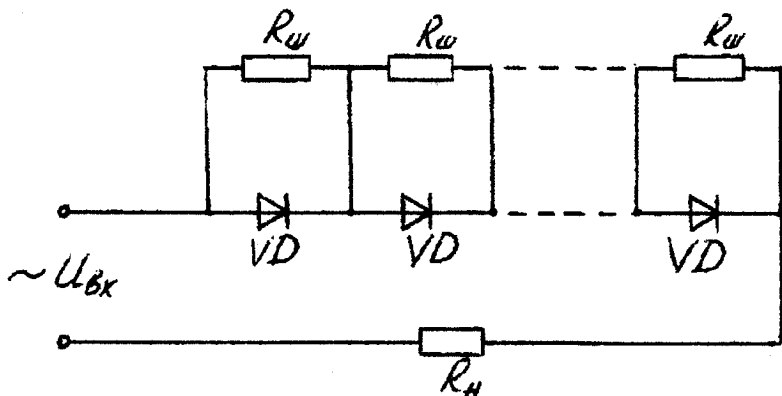


Рис. 17 Схема принципова

Таблиця 6

№ п/п	Параметри	1	2	3	4	5
1	Тип діодів	КД206А	КД207А	КД208А	КД209А	КД210А
2	$U_{зв.мах.}$, В	100	200	300	400	500
3	$I_{зв.мах.}$, мА	50	50	50	50	50
4	$U_{вх.}$, В	420	536	648	1200	2400

Задача 6

Визначте статичні коефіцієнти підсилення струму біполярного транзистора, ввімкненого в схемі з спільною базою, емітером, колектором /СБ, СЕ, СК /, якщо при зміні струму емітера на ΔI_E струм колектора збільшився на ΔI_K .

Таблиця 7

№ п/п	Параметри	1	2	3	4	5
1	ΔI_B , мА	1.6	2.17	2.12	3.03	3.72
2	ΔI_K , мА	1.57	1.98	2.1	3.0	3.7

Задача 7

В зображеній нижче схемі використовується транзистор з коефіцієнтом передачі струму бази β і зворотним струмом колектора $I_{КБО}$. Напруга джерела живлення E_K . Визначте опори R_B і R_H , якщо відомий струм колектора I_K і напруга колектор-емітер. U_{KE}

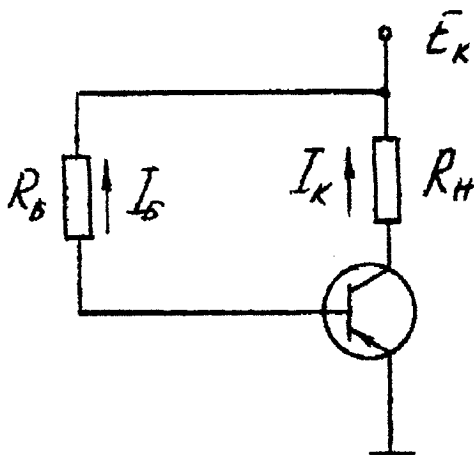


Рис. 18. Схема принципова

Таблиця 8

п/п	Параметри	1	2	3	4	5
1	β	50	40	45	60	55
2	$I_{КВ0}$, мкА	10	15	8	20	12
3	E_K , В	-15	-10	-18	-20	-12
4	I_K , мА	1	0.6	1.1	1.5	1.4
5	$U_{КВ}$, В	-6	-5	-7	-8	-5

Задача 8.

Визначте внутрішні фізичні параметри: r_B , r_E , r_K , і коефіцієнт передачі за струмом α Т - подібної еквівалентної схеми заміщення транзистора, якщо відомі його h - параметри як активного лінійного чотириполюсника, ввімкненого по схемі з СБ. Крім цього, перерахуйте h_B в h_E - параметри транзистора. Початкові дані приведені в таблиці.9

Таблиця 9

№ п/п	Параметри	1	2	3	4	5
1	Тип транзистора	КТ201В	КТ308Б	КТ301А	КТ313Б	КТ312Б
2	h_{11B} , Ом	50	12	30	28	20
3	h_{12B}	$32 \cdot 10^3$	13210^3	$09 \cdot 10^3$	$01 \cdot 10^3$	$03 \cdot 10^3$
4	h_{21B}	0.97	0.98	0.95	0.99	0.96
5	h_{22B} , См	$6 \cdot 10^6$	$5.8 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	19610^6	$2 \cdot 10^6$

Задача 9

Транзистор типу *p-n-p* ввімкнено по схемі з спільним емітером (СЕ). Визначте, в якому режимі працює транзистор (насичення, активному, відсічки) і поясніть чому. Дані приведені в таблиці 10.

Таблиця 10

№ п/п	Параметри	1	2	3	4	5
1	U_{BE} , В	-0.4	-0.4	0.4	-0.7	1
2	U_{CE} , В	-0.3	-10	-10	-0.5	-5

Задача 10

Транзистор типу *p-n-p* ввімкнений по схемі з спільною базою. До емітерного переходу прикладена пряма напруга. Покажіть, що диференційний опір емітера можна приблизно підрахувати по формулі $r_E \approx kT/eI_E$, де k - стала Больцмана, T - температура по Кельвіну, e - заряд електрона, I_E - струм емітера. Розрахуйте r_E . Початкові дані приведені в таблиці 11.

Таблиця 11

№ п/п	Параметри	1	2	3	4	5
1	T , К	300	320	290	325	330
2	I_E , mA	2	3	1.5	3.5	4

Примітка: використайте формулу:

$$I_E = I_{E\beta\alpha} (e^{(eU_{BE}/kT)} - 1),$$

це $I_{E\beta\alpha}$ - зворотний струм.

Задача 11

Відний /базовий/ струм транзистора, ввімкненого за схемою з спільним емітером, становить I_B . Визначте падіння напруги на резисторі R_K , що ввімкнений в колекторне коло, якщо коефіцієнт підсилення транзистора за струмом h_{21E} .

Таблиця 12

п/п	Параметри	1	2	3	4	5
1	I_B , мкА	50	35	40	25	15
2	R_K , Ом	500	1000	450	1200	1600
3	h_{21E}	50	40	120	210	80

Задача 12

Транзистор, ввімкнений за схемою, показано нижче. Відомо, що він працює в активному режимі з коефіцієнтом підсилення струму α . Знайдіть коефіцієнт підсилення напруги K_U , якщо в порівнянні з опором емітерного переходу опір резистора R досить великий, а опір резистора навантаження R_H набагато менший від опору колекторного переходу.

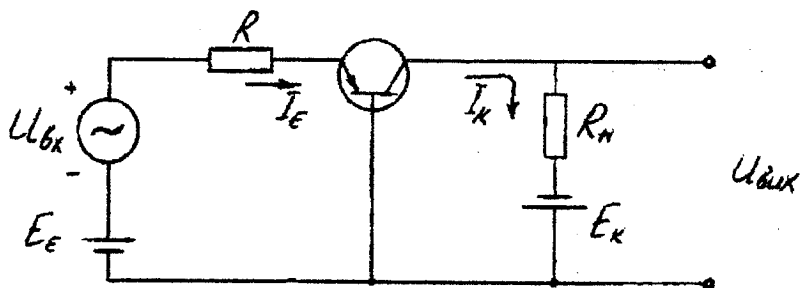


Рис. 19. Схема принципова

Таблиця 13

№ п/п	Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
1	α	0.99	0.95	0.96	0.94	0.95
2	$R_K, \text{кОм}$	2	2.4	2.7	3	2.2
3	$R_H, \text{кОм}$	4	3.6	4	4.2	3.7

Задача 13

Відомі номінали елементів схеми, зображеної нижче. Визначте напругу колектор-база $U_{КВ}$.

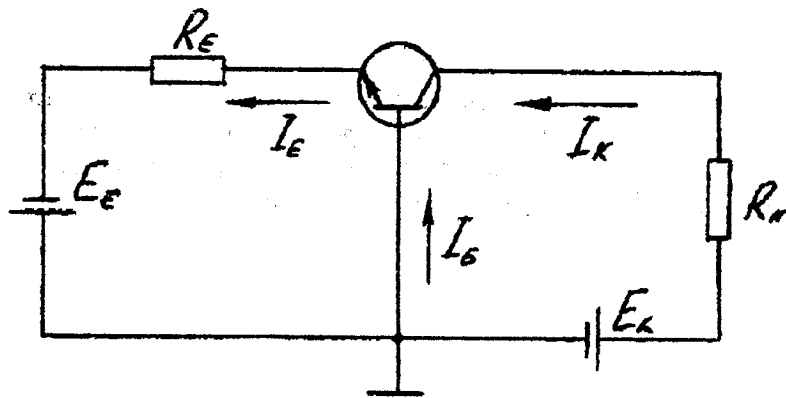


Рис. 20. Схема принципова

Таблиця 14

№ п/п	Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
1	R_E , кОм	5	0.15	0.30	0.56	0.62
2	R_H , кОм	10	2.7	4.7	8.2	5.6
3	E_E , В	10	0.4	0.6	1.2	2.4
4	E_K , В	30	12	15	20	24
5	α	0.99	0.95	0.94	0.96	0.9

Задача 14

Транзистор ввімкнений за схемою з спільною базою. Відомі параметри транзистора α , I_{KBO} , і параметри схеми E_E , R_E , R_B , E_B , R_H , E_K . Визначте струм колектора

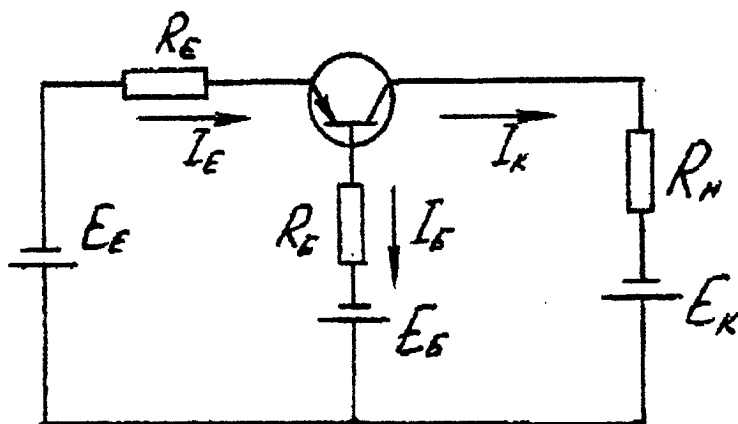


Рис. 21. Схема принципова

Таблица 15

№ п/п	Параметри	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
1	$R_E, \text{кОм}$	2	2.2	3	2	2.7
2	$R_H, \text{кОм}$	4	4.6	4.2	3.6	4.2
3	$E_E, \text{В}$	2	2.1	4	1.8	2.2
4	$E_K, \text{В}$	16	17	15	15	16.5
5	α	0.98	0.99	0.94	0.96	0.99
6	$I_{к60}, \text{мкА}$	10	15	8	9	12
7	$R_6, \text{кОм}$	15	14	15.7	13	14.6
8	$E_6, \text{В}$	3	2.8	3.8	2.7	3

Задача 15

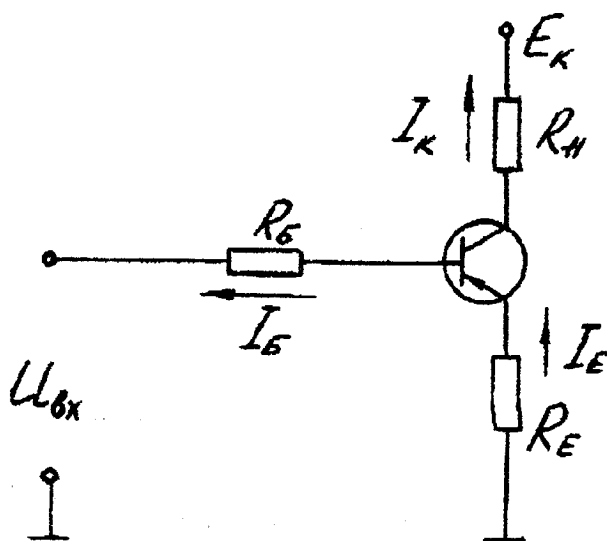


Рис. 22. Схема принципиовая

В зображеній схемі відомі номінали таких елементів: E_K , R_B , R_E , R_H . Визначіть, при якій мінімальній вхідній напрузі транзистор буде працювати в режимі насичення β . Прийняти, що на границі режиму насичення відома величина β .

Таблиця 16

№ п/п	Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
1	R_E , кОм	1	1.2	1.7	1.2	1
2	R_H , кОм	2	2.2	1.8	2	2.1
3	R_B , В	15	14	12	17	12
4	E_K , В	-18	-30	-25	-32	-24
5	β	9	10	8	7	9

Задача 16

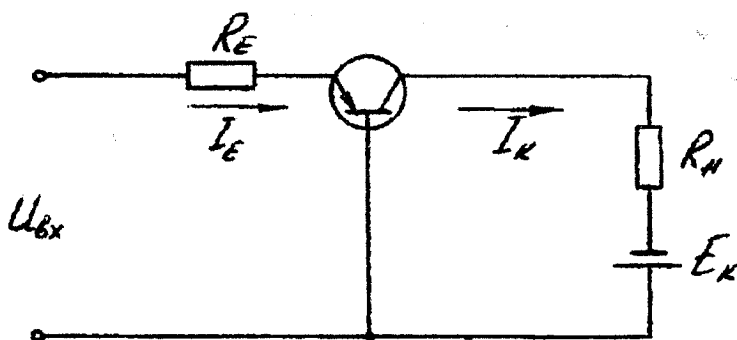


Рис. 23. Схема принципова

В показаній схемі використовується транзистор з коефіцієнтом передачі струму емітера α і зворотним струмом колектору $I_{кбо}$. Дані схеми R_B , R_K , E_K . Визначіть, при якому мінімальному значенні вхідної напруги транзистор буде працювати в режимі насичення.

Таблиця 17

№	Параметри	Варіант	Варіант	Варіант	Варіант	Варіант

п/п		1	2	3	4	5
1	$R_E, \text{кОм}$	3	5	4.7	2.7	3.2
2	$R_H, \text{кОм}$	2	3	3	1.8	2.3
3	$I_{кбо}, \text{мА}$	10	15	20	25	8
4	$E_K, \text{В}$	20	25	30	20	24
5	α	0.99	0.92	0.95	0.9	0.97

Задача 17

Польовий транзистор з опрацюючим p - n - переходом, який має I_c і S_{max} , ввімкнений в підсилювальний каскад схемою з спільним витокком. Опір резистора стоку - R_c . Визначити коефіцієнт підсилення напруги, якщо відома напруга U_{se} , а також напруги U_{ce} .

Таблиця 18

№ п/п	Параметри	Варіант	Варіант	Варіант	Варіант	Варіант
		1	2	3	4	5
1	$I_c, \text{мА}$	2	2	2.5	1.5	2
2	$S_{max}, \text{мА/В}$	2	2	1.5	3	1.5
3	$R_c, \text{кОм}$	10	12	15	14	10
4	$U_{se}, \text{В}$	-1	-0.5	0	-2	-1.5
5	$U_{se \text{ відс}}, \text{В}$	-5	-5.5	-6	-7	-4

Задача 18

Для схеми обистувача на діоді намалюйте форму вихідної напруги, якщо на вхід схеми подається синусоїдальний сигнал. Дайте повну характеристику схеми і розрахуйте максимальне значення вихідної напруги для позитивної і негативної півхвиль вхідного сигналу. Дані для розрахунку приведені в таблиці 19.

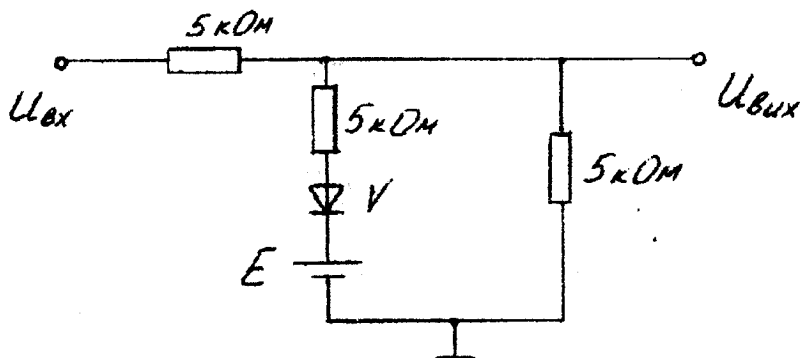


Рис. 23а. Схема принципова

Таблиця 19

№ п/п	Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
1	$U_{вх\ m}$, В	50	70	80	90	100
2	E , В	10	15	20	25	30

Задача 19

Польовий транзистор з управляючим $p-n$ переходом і каналом n -типу використовується в підсилювальному каскаді з параметрами, які приведені в таблиці. Розрахуйте:

- напругу зміщення;
- крутість стокосатворної характеристики в робочій точці;
- номінал резистора R_B ;

Таблиця 20

№ п/п	Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
1	$U_{зв.відс.}$, В	-5	-5.5	-5.2	-6	-6.2
2	$I_{с.нас.}$, мА	1.8	1.4	1.9	1.8	1.7
3	$E_{св.}$, В	8	9	12	14	15
4	I_c , мА	0.7	0.6	0.5	0.9	0.7

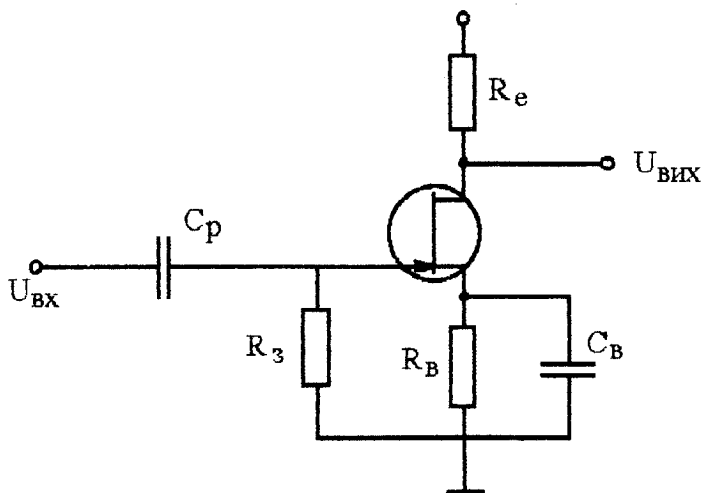


Рис. 24. Схема принципова

Задача 20

Для схеми транзисторного підсилювача визначте в статичному режимі потужність споживачу від джерела живлення, потужності, що розсіюються на резисторах і на транзисторі. В схемі $R_x = 20 \text{ Ом}$, $R_e = 2 \text{ Ом}$.

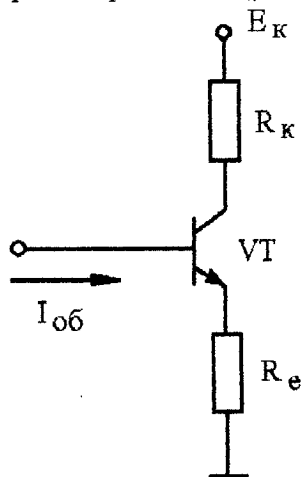


Рис. 25. Схема принципова

Таблиця 21

№ п/п	Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
1	$\beta_{сер}$	100	120	90	110	130
2	$I_{об}$, мА	10	6	9	8	7
3	E_k , В	40	28	35	30	25

Задача 21

Побудуйте лінії навантаження для постійного і змінного струмів. Вважати, що робоча точка знаходиться посередині лінії навантаження для постійного струму, а конденсатор C_e повністю шунтує R_e за змінним струмом. Визначте:

- потужність постійного і змінного струмів, що розсіюються на резисторах;
- потужність, що розсіюється на транзисторі в стані спокою і при подачі на вхід змінного сигналу;
- якщо вихідна потужність визначається як потужність розсіювача на R_H , визначте ккд.

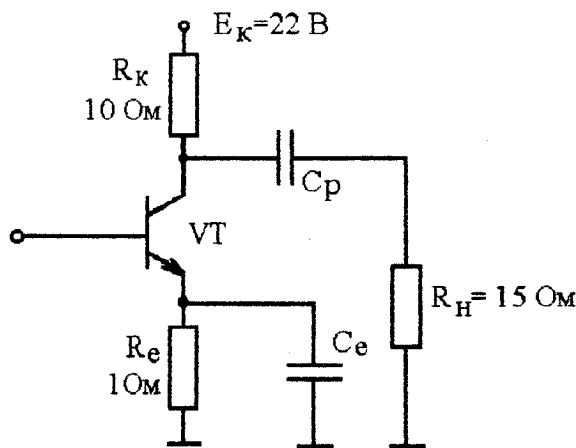


Рис.26. Схема принципова

№ п/п	Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
1	$I_{км}, А$	0.8	0.9	0.7	0.6	0.5

Задача 22

Розв'язати задачу 21, якщо емітерний резистор не зашунтований конденсатором C_e .

Задача 23

Підсилювальний каскад на польовому транзисторі охолощений ВЗЗ. Визначте коефіцієнт підсилення схеми з ВЗЗ і напругу на затворі. Початкові дані для розрахунку приведені в таблиці 23.

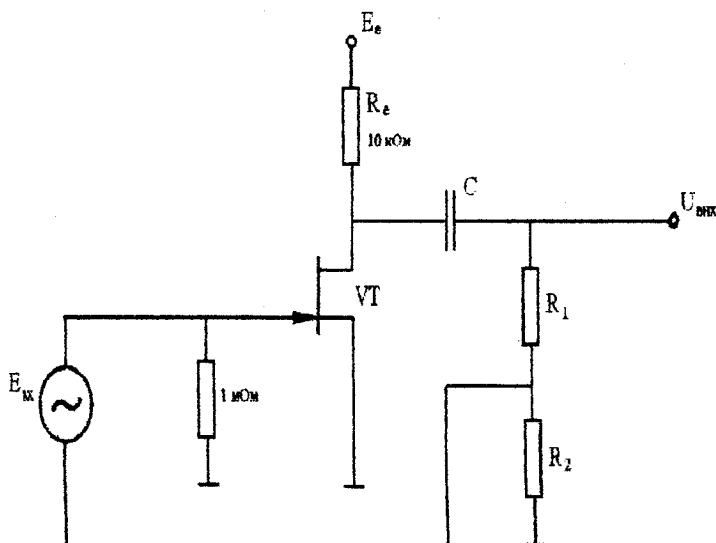


Рис. 27. Схема принципова

Таблиця 23

№ п/п	Параметри	Варіант	Варіант	Варіант	Варіант	Варіант
		1	2	3	4	5
1	$E_{вх}, В$	1	1.2	1.5	1.8	2
2	$R_1, кОм$	6	6	6	4	5
3	$R_2, кОм$	4	2	1	1.5	3
4	$S, мА/В$	1	2	3	0.5	1.5

Задача 24

Для схеми рис. 28, визначте U_K . Початкові дані приведені в таблиці 24.

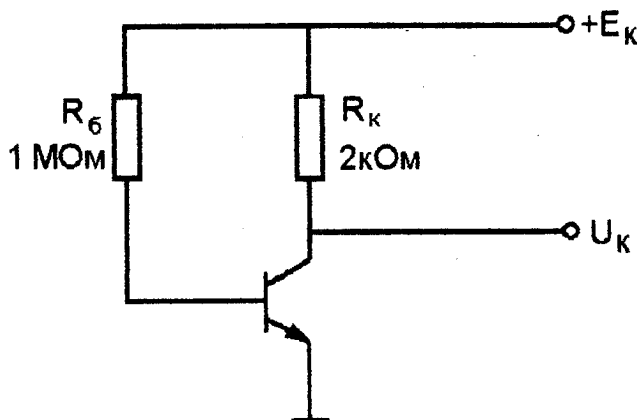


Рис. 28. Схема принципова

Таблиця 24

№ п/п	Параметри	Варіант	Варіант	Варіант	Варіант	Варіант
		1	2	3	4	5
1	β	50	100	150	200	250
2	$E_K, В$	20	15	10	25	30

Задача 25

25. Розрахуйте елементи схеми з СЕ. Початкові дані приведені в таблиці

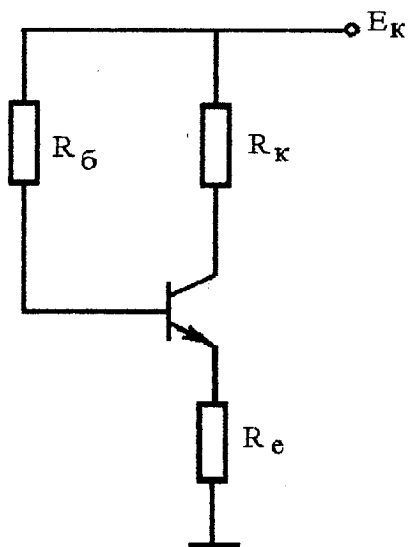


Рис. 29. Схема принципова

Таблиця 25

№ п/п	Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
1	$E_K, \text{В}$	10	15	20	25	30
2	$R_к, \text{кОм}$	1	1.5	1.8	2.2	2.7
3	h_{21E}	80	100	120	150	180

Розділ 4. Лабораторний практикум


4.1. ЛАБОРАТОРНЕ ОБЛАДНАННЯ


Фронтальні лабораторні роботи по курсу "Елементи автоматички" (частина перша) проводяться у спеціальній лабораторії, яка забезпечена відповідним обладнанням та лабораторними стендами. Лабораторне обладнання вміщує в себе: електронний осцилограф, генератор прямокутних імпульсів, звуковий генератор та комбіновані цифрові прилади ЦЦ4300 та 4323А. Зовнішній вигляд лабораторного стенда показан на рис. 30.


На лиці панелі лабораторного стенду розташовані:

- тумблер "Мережа" 220 В 50 Гц;
- калькулятор;
- магнітна панель;

сім вертикально розташованих клавiшних перемикачів виду роботи функціонального генератора.

При натисканні клавiши  на виході внутрішнього генератора формується трикутна напруга;

При натисканні клавiши  на виході формуються, і полярні прямокутні імпульси з співвідношенням $Q = 2$.

При натисканні клавiши  на виході формуються гармонічні коливання.

Вертикально розташовані клавiши 1, 2, 3, 4 призначені для грубого регулювання частоти коливань.

- плавний регулятор амплітуди генерованих імпульсів S1;
- плавний регулятор частоти імпульсів S2;
- клемні джерела живлення (рис.31):
- клемма 1 (+5 В) - відносно клемми 4;
- клемма 2 (-15 В);
- клемма 3 (+15 В);
- клемма 4 - заземлення;
- клемма 5 (+15 В);
- клемма 6 (-15 В);
- клемма "Вихід" функціонального внутрішнього генератора

Якщо лабораторні дослідження різних схем виконуються з внутрішнім генератором, то параметри вхідного сигналу оцінюються осцилографом та комбінованими приладами.

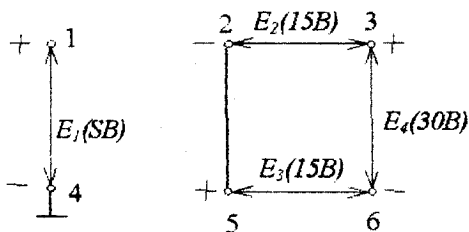


Рис. 31 Схема джерел живлення стенду

Звернемо увагу, що якщо потрібна напруга + 5 В, то потрібно користуватися клемою 1 по відношенню до клемі 4. Клема 2 (-15В) одного джерела живлення з'єднана внутрішньо з клемою 5 (+ 15 В) другого джерела, таким чином для одержання біполярного джерела, по відношенню до земляної шини необхідно спочатку з'єднати клемі "2" чи "5" з клемою "4", а знімати напругу з клемі 3 (+15 В) або "6" (-15 В).

Якщо необхідна робоча напруга 30 В, то заземляється точка "6" і знімається напруга 30 В з клемі "3".

Попередження: Якщо Ви заземлите клему "6" з клемою "4", то заземлення клем "2" чи "5" заборонено, інакше Ви замкнете джерело напруги 15 В.

У кожній лабораторній роботі необхідно складати конкретні принципові схеми, які треба досліджувати.

Ці схеми збираються на магнітній панелі за допомогою пасивних з'єднувальних модулів, з'єднувальних провідників та необхідних елементів електричних кіл - пасивних та активних (резисторів, ємностей, транзисторів тощо).

Примітка: Зібрані схеми перед ввімкненням необхідно показати викладачеві або лаборанту.

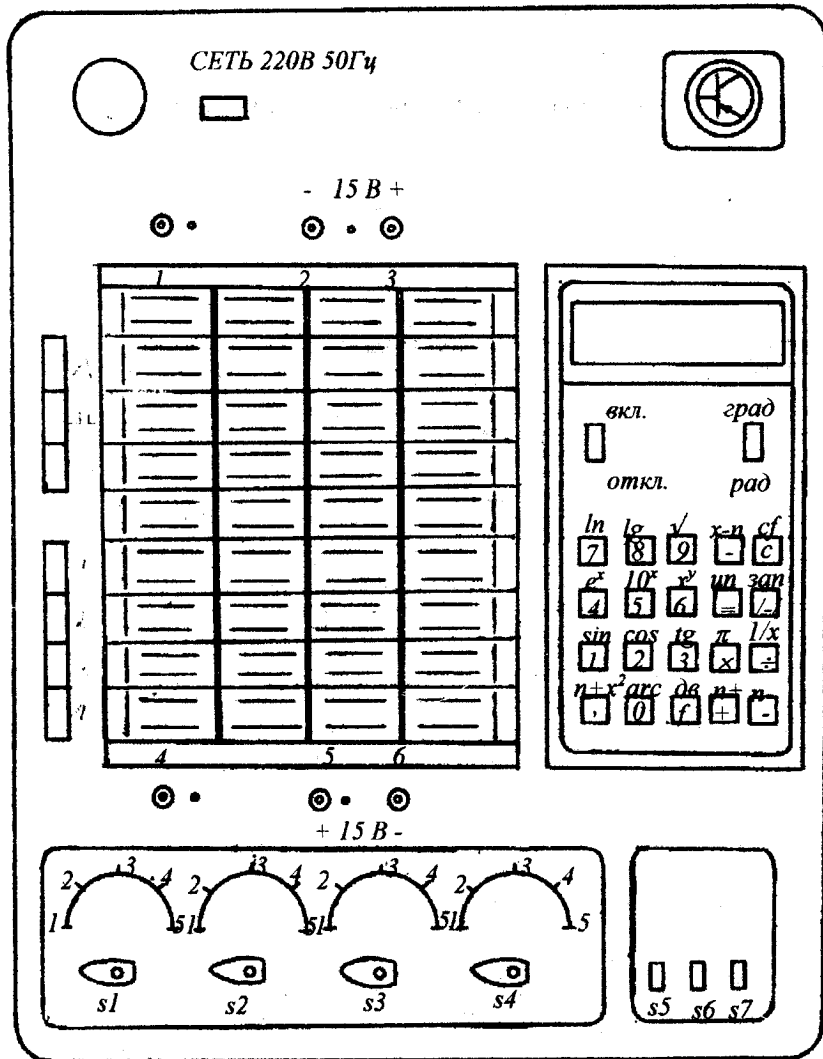


Рис.31. Зовнішній вигляд лабораторного стенда.

4.2. ОСЦИЛОГРАФ УНІВЕРСАЛЬНИЙ С1-73

Призначення приладу

Осцилограф малогабаритний, універсальний С1-73 (далі осцилограф). Розрахований для дослідження форми електричних сигналів в діапазоні від 0 до 5 МГц шляхом візуального спостереження і вимірювання їх амплітуд в діапазоні від 0,02 до 120 В з виносним дільником 1:10 до 350 В та часових інтервалів від $0,4 \cdot 10^{-6}$ до 0,5 хв.

Принцип дії осцилографа

На рисунку 32 зображена спрощена функціональна схема осцилографа. Досліджуваний сигнал подається на вхід підсилювача вертикального відхилення променя.

З допомогою вхідного аттенюатора встановлюється сигнал, зручний для спостереження на екрані електронно-променевої трубки (ЕПТ). Досліджуваний сигнал підсилюється попереднім підсилювачем, після чого, затримується лінійно затримки на деякий час, компенсуючи затримку сигналу в схемах синхронізації і розгортки, що дозволяє спостерігати перші фронти імпульсів.

Вихідний підсилювач Y підсилює затриманий сигнал до необхідної величини, після чого підсилений сигнал подається на вертикально відхилюючі пластини ЕПТ.

Генератор розгортки виробляє пилкоподібну напругу для здійснення часової розгортки променя ЕПТ і може працювати як в автоколивальному, так і в чекаючому режимах. Пилкоподібна напруга підсилюється підсилювачем X і подається на горизонтально відхилюючі пластини.

Схема синхронізації служить для отримання нерухомого зображення сигналу на екрані ЕПТ. Пуск системи синхронізації можливий як від внутрішнього, так і від зовнішнього сигналу. Внутрішній сигнал подається з попереднього підсилювача, а зовнішній - через гнізда Гн 3 і Гн 4 від зовнішнього джерела.

В осцилографі передбачена можливість подачі зовнішнього сигналу на горизонтально відхилюючі пластини через вихідний підсилювач X при подачі сигналу на гніздо Гн 6 "X".

Для перевірки калібровки каналу, вертикального відхилення і тривалості розгортки служить калібратор амплітуди і тривалості. Схема керування променем служить для відпирання ЕПТ при прямому ході розгортки та запирання її при зворотному.

РОЗТАШУВАННЯ І ПРИЗНАЧЕННЯ ОРГАНІВ УПРАВЛІННЯ

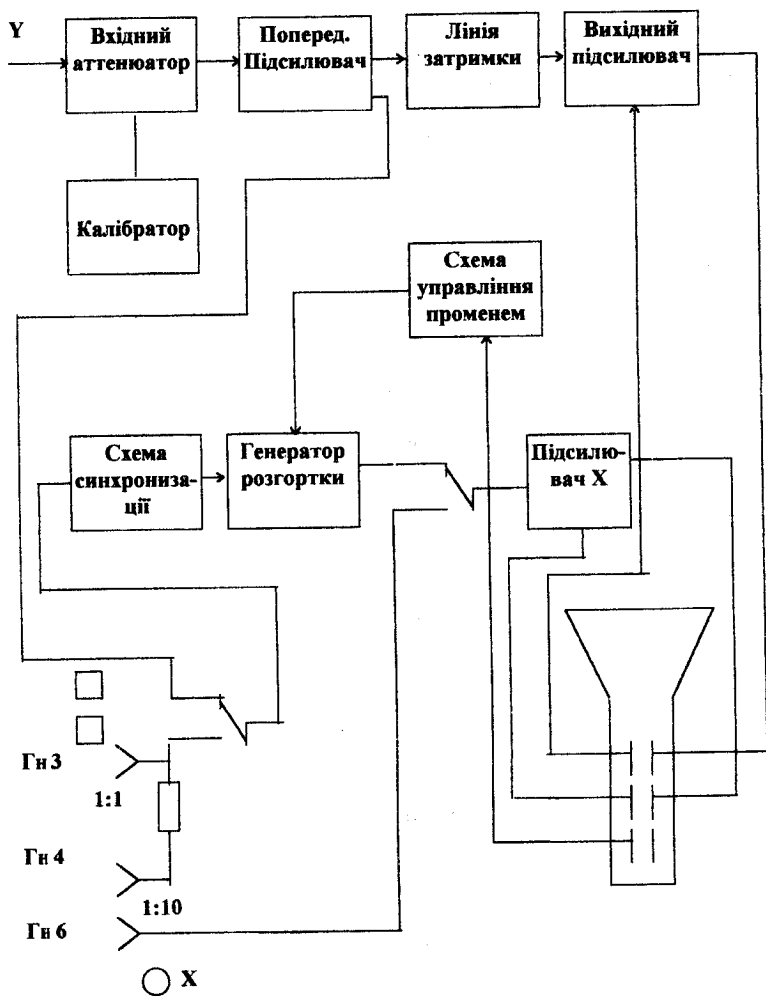


Рис.32

Літцова панель рис.33.

- 1 - тумблер ввімкнення живлення осцилографа;
- 2 - ручка потенціометра переміщення променя по вертикалі;
- 3 - ручка потенціометра переміщення променя по горизонталі;
- 4 - ручка потенціометра плавного підсилення по вертикалі;
- 5 - ручка потенціометра плавної зміни тривалості розгортки;
- 6 - ручка перемикача "V/ ділен" - ступінчаста установка необхідного коефіцієнта відхилення;
- 7 - ручка перемикача " μ s/ ділен" і "ms/ ділен" ступінчасте перемикання тривалості розгортки;
- 8,9,10,11 - ручка потенціометрів "фокус","яскравість","стабільність" і "рівень";
- 12 - перемикач входу. Має три положення:
 - " ~ " - відкритий вхід (подається сигнал безпосередньо на схему);
 - " ~ " - закритий вхід (подається сигнал через розподільний конденсатор);
 - " ⊥ " - вхідне колю підсилювача приєднується до корпусу;
- 13 - перемикач синхронізації;
- 14 - індикатор ЕПТ.

Права боковина рис. 34.

- 1 - гніздо входу зовнішньої синхронізації 1:1;
- 2 - гніздо входу зовнішньої синхронізації 1:10;
- 3 - тумблер "синхр" - перемикач синхронізації:
 - верхнє положення " □ " - внутрішня синхронізація;
 - здійснюється сигналом, що надійшов з підсилювача;
 - нижнє положення " □ " - зовнішня синхронізація;
 - здійснюється сигналом, що надійшов від зовнішнього джерела на гніздо 1:1 або 1:10;
- 4 - потенціометр " трив." служить для калібровки тривалості (коефіцієнта підсилення підсилювача X);
- 5 - тумблер "розгорт." підключає в верхньому положенні генератор розгортки підсилювача X, а в нижньому положенні гніздо " X " до підсилювача X;
- 6,7 - гнізда, з'єднані з корпусом.

Ліва боковина рис. 35

- 1 - клемма корпусу осцилографа;
- 2 - клемма виходу прямокутних імпульсів від вбудованого калібровача з Е.Р.С. один вольт і частотою повторення 1 кГц, здійснюється сигналом, що надійшов від зовнішнього джерела на гніздо 1:1 або 1:10;

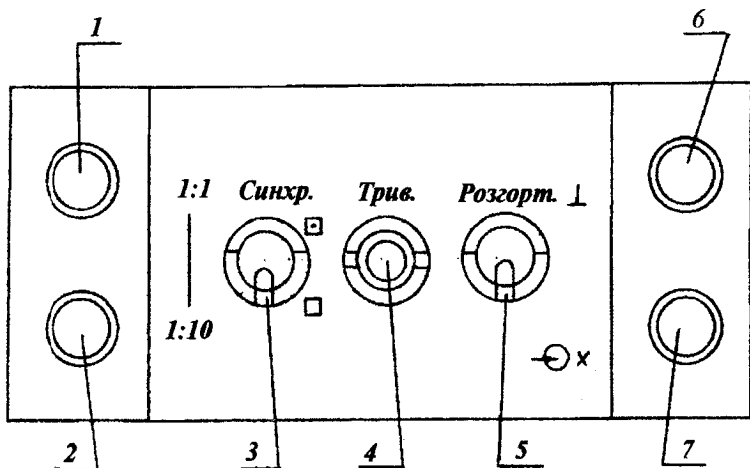


рис.34

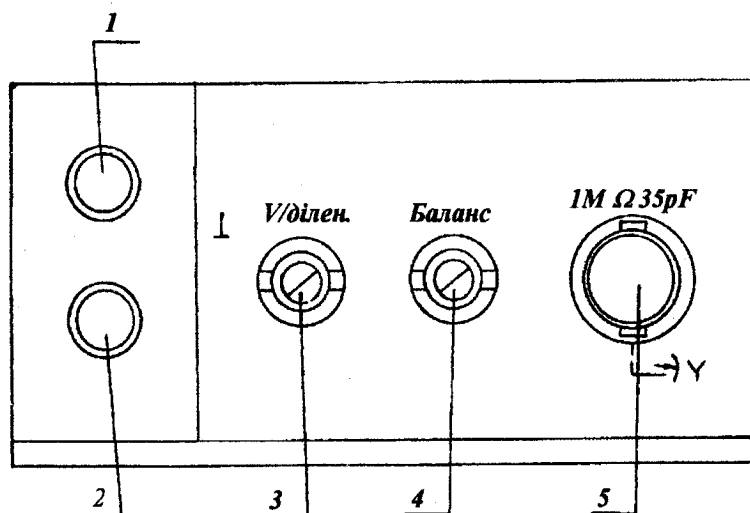


рис.35

- 3 - потенціометр плавної підстройки напруги калібратора;
- 4 - потенціометр балансування променя ЕПТ;
- 5 - вхід ϕ осцилографа.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ РОБИТИ

Підготовка до проведення вимірів

1. Встановити ручки органів керування на передній панелі в наступні положення:
 - "яскравість" - в крайнє ліве;
 - "фокус" - в крайнє ліве;
 - "V/длєн." - 0,05;
 - "підсилення" - в крайнє праве;
 - " " - в середнє;
 - " 1 " - "~";
 - "рівень" - в крайнє праве;
 - "синхр" - "+";
 - "ms/длєн. μ s/длєн." - "1ms / длєн.";
 - "плавнo" - в крайнє праве;
 - "стабільність" - в крайнє праве;
 - " " - середнє.
2. Встановити ручки органів керування на правій боковій панелі в такі положення:
 - "розгортка" - в верхнє положення;
 - "синхр" - "~";
3. Ввімкніть тумблер "живлення" на передній панелі осцилографа. Дайте йому прогрітиса 2-3 хвилини.
4. Ручками "яскравість" та "фокус" встановити яскравість і фокус променя зручними для спостереження.
5. Ручкою " " сумістіть лінію розгортки з центром екрану ЕПТ.
6. Встановіть ручку перемикача "V/длєння." в положення " 5 длєн."
7. **ЗАПАМ'ЯТАЙТЕ!** для отримання стійкого зображення на екрані ЕПТ необхідно повернути ручку "рівень" вліво до упору, потім повільно повертати ручку "стабільність" до початку зриву розгортки (режим очікування). Повертаючи ручку "рівень" вправо до появи розгортки, встановіть сталє зображення.
8. Поворотом ручки " " сумістіть початок періоду сигналу з першою вертикальною лінією екрану ЕПТ. На всій довжині екрану (10 поділок) повинно розміститиса 10 періодів, інакше треба проводити підрегулювання.

Вимірювання часових інтервалів

Необхідні вимірювання і спостереження проводять на екрані ЕПТ, який має прозору шкалу. Шкала розділена на 6 поділок по горизонталі. Кожна поділка розділена на 5 малих поділок, отже, одна мала поділка дорівнює 0,2 великої поділки.

Вимірюваний часовий інтервал знаходять множенням двох величин: довжини вимірюваного інтервалу часу на екрані по горизонталі в поділках і значення величин часу на ділення в даному положенні перемикача "час/діл".

Приклад. Перемикач "час/діл" встановлено в положення 10 μ s, вимірюваний інтервал дорівнює 1,4 поділки: тоді $\tau_0 = 10 \mu s * 1,4 = 14 \mu s$.

Вимірювання часових параметрів імпульсу

Тривалість імпульсу τ_u вимірюється на рівні 0,1 U_m . Зручніше опустити імпульс рукою " " донизу на 0,1 U_m від центральної горизонтальної лінії шкали і виміряти по шкалі його тривалість, як показано на рисунку.

$$\tau_u = 2,4 * \text{"час/діл."}$$

Тривалість вершини імпульса визначається на рівні 0,9 U_m . Тому можна опустити імпульс на 0,9 U_m і заміряти по шкалі його тривалість. спад (задній фронт) імпульсу визначається від 0,1 U_m до 0,9 U_m . Додільно час спаду визначати таким способом: опустити імпульс на 0,1 U_m від центральної горизонтальної лінії шкали. Умовно провести горизонтальну лінію на рівні 0,9 U_m до перетину з заднім фронтом. Точку перетину сумістити рукою " " з вертикальною лінією шкали. Виміряти тривалість як показано на рисунку.

Вимірювання частоти проходження імпульсів

Частоту проходження імпульсів можна визначити, якщо виміряти період повторення T:

$$F = 1 / T$$

Для вимірювання періоду необхідно, щоб на екрані було не менше двох імпульсів. Якщо період дуже малий, то можна виміряти тривалість кількох періодів, а результат розділити на число виміряних періодів; наприклад, перемикач "час/діл" в положенні "5".

$$T = \frac{5 \mu\text{s} * 3,6}{3} = 6 \mu\text{s}$$

$$F = 1 / T = 1/6 * 10^6 = 0,16 * 10^6 = 160 \text{ кГц}$$

Другий метод визначення частоти - порівняння невідомої частоти з еталонною частотою по фігурах Лісажу. В цьому випадку на вхід ІМΩ 35pF підсилювача Y подається сигнал, частоту якого необхідно виміряти, а на вхід X і 1. подається сигнал від генератора зразкової частоти, перемикач "розгортка." ставиться в нижнє положення. Перемикач "час/діл." встановлюється в положення, яке забезпечує зручне спостереження зображення на екрані ЕПТ. Ручка "стабільність" встановлюється в крайнє правеположення.

При зближенні частот на екрані з'являється еліпс, який обертається, зупинка якого показує на повне співпадання частот. При кратному співвідношенні частот на екрані отримуємо більш складну фігуру, частота по вертикалі так відноситься до частоти по горизонталі, як число точок дотику дотичної по горизонталі відноситься до числа точок дотику по вертикалі.

Вимірювання повного розмаху змінної напруги

Для вимірювання повного розмаху напруги вимірюють розмах зображення по вертикалі в поділках і множать його на цифрове значення відмітки показу перемикача "V/ділєн."

Наприклад. Величина зображення по вертикалі $H=4,8$ поділки. Перемикач "V/ділєн." знаходиться в положенні "0,5".

Повний розмах U дорівнює

$$U = 4,8 * 0,5 = 2,4 \text{ В}$$

а амплітуда сигналу дорівнює

$$U_m = U / 2 = 1,2 \text{ В}$$

4.3. ГЕНЕРАТОР ЗВУКОВИЙ ГЗ-53

Призначення приладу

Генератор ГЗ-53 розрахований для радіотехнічних та акустичних вимірювань, які потребують джерела синусоїдальної напруги звукових частот.

Будова та принцип роботи

Генератор складається з таких функціональних вузлів: гетеродина фіксованої частоти, гетеродина змінної частоти, зміщувача частот, підсилювача низької частоти, аттенюатора, фільтра нижніх частот, вольтметра, схеми живлення.

Розташування та призначення органів керування

На передній панелі рис.36 розміщені органи керування та сигналізації генератора:

- 1 - вмикач напруги мережі;
- 2 - сигнальна лампа вмикання приладу, розміщена над вмикачем "мережа";
- 3 - ручка установки частоти "частота";
- 4,5 - шкали відліку частоти (кГц та Гц) під прозорим ковпаком з рискою;
- 6 - перемикач піддіапазонів кГц;
- 7 - ручка "установка нуля";
- 8 - вимірювач вихідної напруги з шкалою 0...3,16В;
- 9 - перемикач мережі шкал - послаблення, ДБ;
- 10 - ручка потенціометра "регулювання виходу"; 11 - роз'єми вихідної напруги "вихід", які підключені до єдиного виходу генератора.

ПОРЯДОК РОБОТИ

Встановлення частоти

Частоту встановлюють по великій та малій шкалах. На більшій шкалі нанесене градуювання чотирьох піддіапазонів, кГц: 0...5, 5...10, 10...15, 15...20.

Градуювання кожного піддіапазона має 50 поділок. Ціна кожної поділки 100 Гц. Для зручності відліку кожна п'ята поділка має оцифровку.

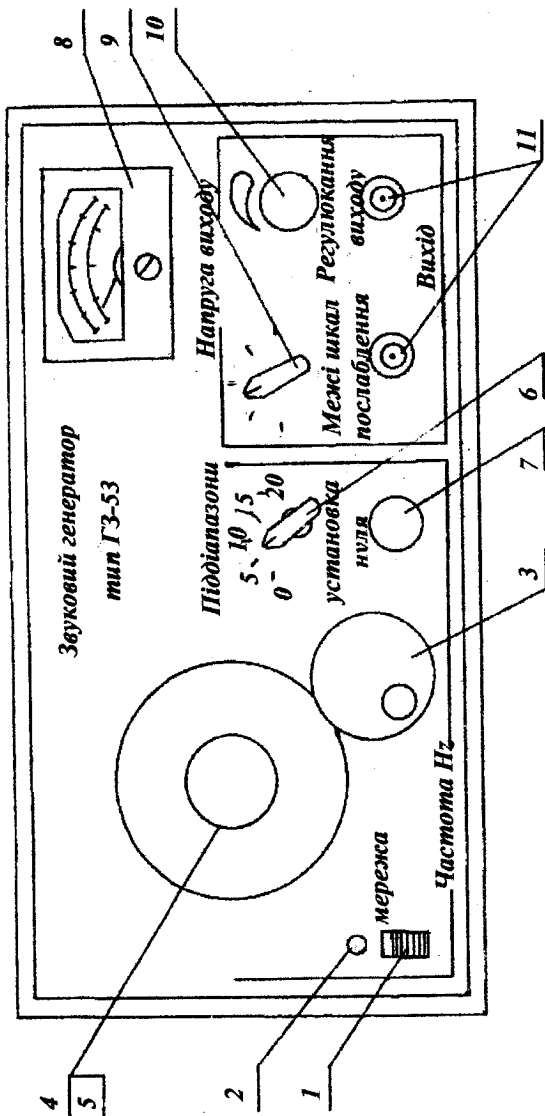


рис.36

Мала шкала має 100 поділок, ціна кожної поділки 1 кГц. Кожна п'ята поділка має подовжню риску, а кожна десята ще й оцифровку.

По великій шкалі відраховують сотні і тисячі герц, по малій шкалі - одиниці та десятки герц.

Необхідний діапазон вибирається за допомогою перемикача "піддіапазони кГц".

Регулювання і відлік вихідної напруги.

Вихідну напругу генератора можна вимірювати частинами через 10 дБ за допомогою перемикача-аттенюатора "межі шкал - послаблення", дБ до 50 дБ і повільно-ручкою "регулювання виходу".

УВАГА! Відлік вихідної напруги відповідає дійсності тільки в тому разі, якщо величина опору навантаження дорівнює 600 Ом.

Вимкнення генератора

Перед вимкненням генератора необхідно ручкою "регулювання виходу" зменшити вихідну напругу до нуля, перемикачем "мережа" вимкнути генератор.

4.4. ПРИБІД КОМБІНОВАНИЙ ЦИФРОВИЙ ЦД300.

Призначення приладу

Прилад комбінований цифровий ЦД300 призначений для вимірювання сили і напруги постійного струму, сили і напруги змінного струму кривої синусоїдальної форми, опору постійного струму.

При вимірах змінної напруги та струму, прилад показує середньовипрямлені значення, а градування зроблено в середньоквадратичних значеннях.

Технічні характеристики

Швидкість роботи приладу 2,5 вимір/хв.

Прилад індиксує:

1. Результат виміру - 3,5 десяткових розрядів. Максимальний показ 1999.
2. Знак " - " при від'ємній полярності вимірюваної величини.
3. Місцезнаходження десяткової коми.
4. Сигнал перевантаження приладу на вході не більш як 10хв. Час робочого режиму приладу - не менш як 24 год. на добу.

Будова та принцип роботи

За конструкцією прилад зроблено в пластиковому корпусі. На його передній панелі розміщені:

- кнопка МЕРЕЖА перемикача постачання мережі;
- кнопки " U ", " I ", " R " перемикачів вимірюваної величини;
- кнопки перемикача діапазонів вимірів;
- кнопка " " перемикача входних кіл,
- шлиць резистора " " для встановлення приладу на нуль;

Вхідні гнізда " U ", " I ", " R ";

На задній панелі розміщені:

- роз'єм "220 В, 50 Гц" для підключення кабеля постачання мережі;
- роз'єм " " для підключення шупа - індикатора;
- утримувач запобіжника мережі 0,25 А;
- зажим для підключення приладу до захисного тиску.

В приладі здійснюється перетворення вимірюваних величин в пропорційну їм напругу постійного струму. Ця напруга вимірюється за методом двократного інтегрування.

Порядок роботи

Встановіть кнопку " " в потрібний стан:

1) ненаписаний - при вимірюванні напруги та сили струму, а також опору постійного струму;

2) написаний - при вимірюванні напруги і сили змінного струму.

Натисніть потрібну кнопку перемикача роду вимірюваної величини.

Натисніть кнопку діапазону вимірювань, відповідного значення вимірюваної величини, а якщо він невідомий - кнопку старшого діапазону вимірів.

Примітка: при вимірюванні опору в діапазоні 20 МОм всі кнопки діапазонів вимірювань повинні бути ненаписані.

Підключіть з'єднувальні дроти до входу приладу.

-до гнізд « » і « U, R » - при вимірюванні напруги та опору (в режимі вимірювань опорів на гнізда «U,R» розвивається додатний потенціал відносно гнізда <>);

-до гнізд < > і «I» - при вимірюванні струму;

Підключіть об'єкт вимірів до входу приладу за допомогою з'єднувальних дротів.

4.5. ПРИБІД КОМБІНОВАНИЙ ЦИФРОВИЙ 4323А

Призначення приладу

Прилад комбінований цифровий 4323А призначений для вимірювання сили струму і напруги постійного струму, діючого значення сили і напруги струму синусоїдальної форми, опору за постійним струмом.

Технічні характеристики

1. Діапазон вимірювань:
 - напруга постійного струму 5 mV -500В;
 - сила постійного струму 5 mA -500 mA;
 - опір за постійним струмом 50 Ом-500кОм.
2. Визначення полярності вимірюваної величини здійснюється автоматично, вибір діапазонів вимірювань і роду робіт - вручну.
3. Запуск приладу здійснюється автоматично. Швидкість дії - не менше як 25 перетворень в хвилину.
4. Цифрова частина індикатора забезпечує індикацію чотирьох розрядів вимірюваної величини, десятичної крапки і полярності вхідного сигналу.

Будова та принцип дії

Будова приладу.

Прилад виготовлений в переносному варіанті.

На лицьовій панелі розміщені:

- перемикач МЕРЕЖА для вмикання приладу;
- перемикач " ", що забезпечує вимірювання при постійному струмі в ненаписаному стані і вимірювання при змінному струмі в натиснутому стані;
- перемикач U, I, r, для вибору виду робіт;
- перемикач вибору діапазонів вимірювань;
- індикаційне табло;
- вхідні гнізда «I», «U,r», « »;

На задній панелі розміщені:

- роз'єм "220 V", 50 Гц для підключення шнура мережі;
- записувач захисного заземлення ⊥.

Принцип дії приладу

В основі приладу лежить вольтметр постійного струму.

Вимірювана напруга надходить на вхідний подільник, потім на вхід аналого-цифрового перетворювача часо- імпульсного типу.

Збереження лічильника від рециркуляції забезпечується його зупинкою при доходженні до показника "6000". При цьому індикуються сигнал перевантаження.

Семисегментний дешифратор забезпечує управління цифровою частиною індикатора.

Для управління дискретно-аналоговою частиною індикатора використовується дешифратор, який формує команди засвічування елементів дискретно-аналогової частини індикатора від нульового до співпадаючого значення вимірюваної величини.

Для вимірювання напруги змінного струму використовується перетворювач змінної напруги в постійну. Це забезпечується вмиканням лінійного детектора на виході операційного підсилювача.

Вимірювання сили постійного і змінного струму забезпечується універсальним шунтом, номінальна напруга якого складає 500 mV.

Для вимірювання опору за постійним струмом використовується перетворювач опору в напругу постійного струму. Вимірюваний опір вмикається в коло зворотного зв'язку операційного підсилювача. Розширення меж вимірювання омметра здійснюється комутацією резисторів при вході операційного підсилювача.

Блок живлення забезпечує потрібні напруги живлення постійного і змінного струму. Для отримання напруги +9 V і -9 V використані стабілізатори напруги.

Підготовка приладу до роботи

Підключіть шнур живлення мережі до приладу і включіть його в мережу 220 В, 50 Гц.

Ввімкніть прилад натисканням кнопки МЕРЕЖА. Вмикання повинно супроводжуватись появою індикації. Прогріти прилад протягом 15 хв.

ПОРЯДОК РОБОТИ З ПРИЛАДОМ

Натисніть кнопку перемикача роду робіт, відповідно до роду вимірюваної величини, а також кнопку необхідного діапазону вимірювань, якщо відомий порядок вимірюваної величини або кнопку старшого діапазону вимірювань, якщо порядок вимірюваної величини невідомий.

За допомогою з'єднувальних дротів підключіть вимірюваний об'єкт до входу приладу.

1. До гнізд " * " і " U, r_x " - при вимірюванні напруги і опору;
2. До гнізд " * " і " I " - при вимірюванні струму.

УВАГА! При вимірюваннях слід пам'ятати, що гніздо "*" має внутрішнє з'єднання з корпусом приладу.

Провести відлік показів по індикаторному пристрою приладу.

Не залипати вхід приладу роз'єднаним на довгий час в режимі вимірювання напруги постійного та змінного струму на проміжку вимірювань 50, 500 mV і на всіх проміжках вимірювання опору постійного струму, оскільки це приводить до перевантаження приладу.

4.6. ГЕНЕРАТОР ІМПУЛЬСІВ Г5-54

Призначення приладу

Генератор - лабораторний прилад, котрий видає відеоімпульси заданої полярності прямокутної форми в діапазоні довжини основних імпульсів 0,5.....1000 мксв. Максимальна амплітуда основних імпульсів на зовнішньому навантаженні 500 Ом не менше 50В. Частота повторення імпульсів при внутрішньому запуску регулюється від 0,01 до 100кГц.

Принцип дії генератора

Принцип дії приладу пояснюється схемою рис.37. Задаючий генератор 1 видає тактові імпульси, які надходять на схему зовнішнього і разового запуску 2. Працюючи в автоколебальному режимі, задаючий генератор 1 забезпечує плавно-ступінчате регулювання частоти повторення імпульсів. В режимі зовнішнього запуску і одноразового пуску приладу задаючий генератор 1 відключається від схеми зовнішнього запуску 2. Зформований по тривалості та амплітуді сигнал схеми зовнішнього запуску 2 надходить на схему затримки основного імпульсу 3 і на схему формування імпульсів синхронізації 4.

Схема формування імпульсів синхронізації 4 видає синхроімпульси обох полярностей. Через комутуючий елемент синхроімпульси надходять на вихідне гніздо приладу.

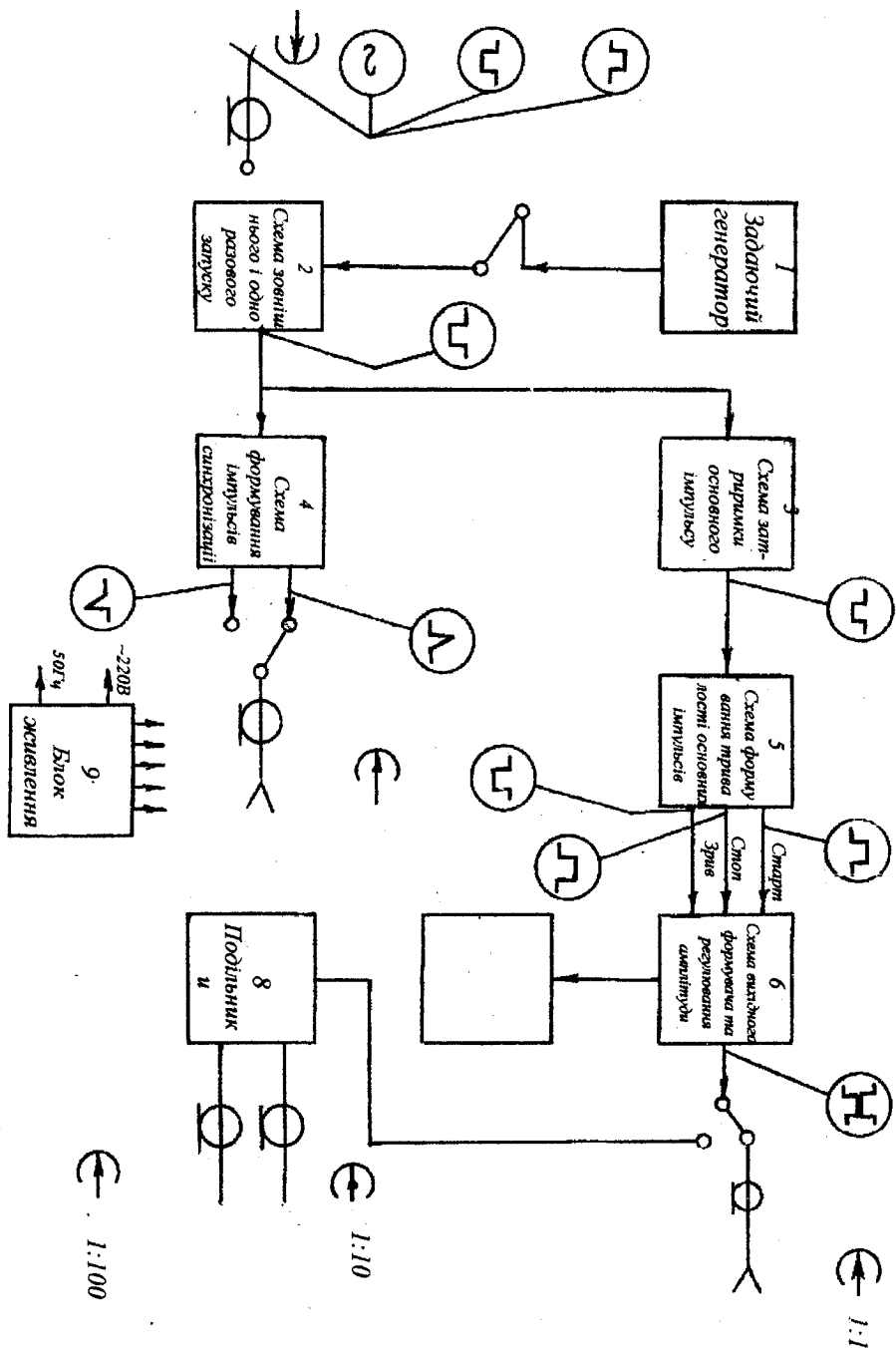
Схема затримки основного імпульсу 3 видає імпульс з регульованим часовим зсувом, а також забезпечує режим нульового часового зсуву основного імпульсу відносно імпульсу синхронізації приладу.

Імпульс з виходу системи затримки основного імпульсу 3 запускає схему формування тривалості основних імпульсів 5, яка видає стартовий імпульс і стоповий імпульс з регульованим зсувом між ними.

Находячи на схему вихідного формувача та регулювання амплітуди 6, стартовий імпульс визначає початок (фронт) вихідного основного імпульсу, а стоповий - його кінець (зріз).

З схеми формування тривалості основних імпульсів 5 на схему вихідного формувача 6 надходять також імпульс зриву, співпадаючий за часом з стоповим імпульсом і забезпечуючий швидке відновлення схеми вихідного формувача в початковий стан.

Схема вихідного формувача і регулювання амплітуди забезпечує формування прямокутних імпульсів з вказаними параметрами і плавно-ступінчатим регулюванням їх амплітуди в проміжках від 1 до 100 % максимального значення.




Через комутуючий елемент вихідний імпульс з схеми вихідного формувача 6 надходить або на вихідне гніздо 1:1 або на подільники 8, які забезпечують додаткове послаблення амплітуди імпульсів в 10 і 100 раз. Амплітуда вихідних імпульсів в межах плавного регулювання вимірюється за допомогою схеми вимірювача амплітуди основних імпульсів 7, індикатором в якому використовується вольтметр типу М42101.


Схема живлення 9 забезпечує прилад постійними стабілізованими напругами 3; 6; 15 В і регульованою напругою від 0 до 75 В.

Розташування і призначення органів управління

На лицьовій панелі генератора Г5-54 рис.38 розташовані кнопки управління, приєднання та контролю:

- а) тумблер МЕРЕЖА та індикаторна лампа ввімкнення;
- б) група кнопок ЗАПУСК:

при натиснутій кнопці  відбувається запуск зовнішнім від'ємним імпульсом;

при натиснутій кнопці  - запуск зовнішнім додатковим імпульсом або синусоїдальним сигналом;

при натиснутій кнопці працює разовий (одноразовий) запуск;

при натиснутій верхній кнопці прилад працює в режимі внутрішнього запуску;

в) група ЧАСТОТА ПОВТОРЕННЯ містить в собі шкальний пристрій плавного регулювання частоти повторення і перемикач діапазонів частоти повторення (колір кнопки відповідає кольору шкали плавного регулювання, по якій потрібно вести відлік);

г) група СИНХРОІМПУЛЬСИ - вихідне гніздо синхроімпульсів, перемикач полярності синхроімпульсів та регулятор амплітуди АМПЛ;

д) група ЧАСОВИЙ ЗСУВ містить в собі шкальний пристрій плавного регулювання часового зсуву основного імпульсу відносно синхроімпульсу і перемикач піддіапазонів часового зсуву (колір кнопки відповідає кольору шкали плавного регулювання, по якій треба вести відлік);

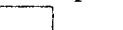
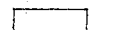
е) група ТРИВАЛІСТЬ містить шкальний пристрій плавного регулювання тривалості основного імпульсу і перемикач піддіапазону тривалості основних імпульсів (колір кнопки відповідає кольору шкали плавного регулювання, по якій необхідно вести відлік);

ж) група виходу основних імпульсів має вихідне гніздо 1:100, 1:10, 1:1, ручку плавного регулювання амплітуди, перемикач дільника амплітуди основного імпульсу, вольтметр, що показує амплітуду основного імпульсу (відлік по шкалі вимірювального приладу відбувається в вольтах з врахуванням включеного дільника амплітуди і коефіцієнта ділення вихідного гнізда) і перемикач полярності основних імпульсів.

На лицьовій панелі також розміщена клемма заземлення, з'єднана з корпусом приладу.

Робота з генератором

При підготовці приладу до роботи необхідно:

- 1) підключити зовнішнє навантаження 500 Ом до вихідного тракту 1:1;
- 2) підключити прилад через навантаження до осцилографа кабелями, які знаходяться в комплекті;
- 3) натиснути верхню кнопку перемикача ЗАПУСК;
- 4) натиснути чорну кнопку " $\times 10^2$ " групи ЧАСТОТА ПОВТОРЕННЯ і встановити по чорній шкалі частоту 1000 Гц;
- 5) натиснути кнопку "0" перемикача ЧАСОВИЙ ЗСУВ;
- 6) натиснути білу кнопку " $\times 0,1$ " перемикача ТРИВАЛІСТЬ і встановити по білій шкалі тривалість 0,1 мксв;
- 7) натиснути кнопку "0,1" перемикача амплітуди основного імпульсу;
- 8) натиснути кнопку  або ;
- 9) ввімкнути прилад (тумблер МЕРЕЖА ввєрх) і програти на протязі 15 хвилин.



Порядок роботи

Прилад допускає по роду роботи запуску три режими роботи: внутрішній запуск, зовнішній і разовий.

Внутрішній запуск. Натиснути верхню кнопку перемикача ЗАПУСК. Встановити кнопками і шкальним пристроєм ЧАСТОТА ПОВТОРЕННЯ необхідну частоту повторення імпульсів.

Кнопками і шкальним пристроєм ЧАСОВИЙ ЗСУВ встановити необхідний часовий зсув основного імпульсу приладу відносно синхроімпульсу. Якщо часовий зсув не потрібен, обов'язково натисніть кнопку "0" перемикача часовий зсув.

Кнопками і шкальним пристроєм ТРИВАЛІСТЬ встановити необхідну тривалість основних імпульсів приладу. ПРИ ЦЬОМУ МІНІМАЛЬНА ШПАРУВАТІСТЬ ПОВИНА БУТИ НЕ МЕНШЕ ДВОХ

Кнопками ,  встановити необхідну полярність. Кнопками дільника амплітуди ($\times 1$; $\times 0,3$; $\times 0,1$; $\times 0,03$) і ручкою АМПЛ плавного регулювання амплітуди основних імпульсів встановити по шкалі вольтметра необхідну амплітуду імпульсів. Якщо амплітуди повинні встановлюватися не менше 0,5В, то зовнішнє навантаження повинно підключатися до гнізд 1:1. Якщо необхідна амплітуда менша 0,5В, то зовнішнє навантаження повинно бути підключено до гнізда 1:10 або 1:100. В

цьому випадку необхідно натиснути нижню кнопку дільника амплітуди "x0,03".

Якщо необхідно засинхронізувати, апаратуру, що працює спільно з генератором, треба з'єднати вихідне гніздо групи СИНХРОІМПУЛЬСИ кабелем, який знаходиться в комплекті приладу, з входом апаратури, встановити тумблером необхідну полярність синхроімпульсів і ручкою АМПЛ групи СИНХРОІМПУЛЬСИ, необхідну амплітуду синхроімпульсів.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1) Вивчити призначення, технічні характеристики, пристрій та принцип роботи, підготовку і порядок проведення роботи всіх вище названих пристроїв.

2) Ввімкнути і підготувати до роботи по черзі такі вимірювальні прилади: генератор звуковий ГЗ-53, осцилограф С1-73, прилади ЦЦ300 і 4323А.

3) Встановити по одному значенню частоти і амплітуди на кожному піддіапазоні звукового генератора ГЗ-53 (за вашим вибором). Встановити частоту і значення напруги, використовуючи відліковуочі пристрої звукового генератора.

4) Визначити ці ж параметри за допомогою осцилографа С1-73.

5) Виміряти значення напруги для кожного піддіапазону за допомогою комбінованих приладів ЦЦ300 і 4323А.

6) Дані п.п. 3-5 занести в таблицю 1.

7) Проаналізуйте результати проведених досліджень.

8) Виміряйте на лабораторному стенді за допомогою осцилографа постійне значення напруги в точці 1 по відношенню до точки 4, і в точках 3 і 6 по відношенню до точок 2 і 5. Запам'ятайте на майбутнє ці напруги.

9) Складіть схему, приведену на рис. 8.

Номинал резистора R^x задається в процесі роботи викладачем. Методом амперметра і вольтметра визначити значення резистора R^x . Порівняти отримані значення з маркіровкою.

10) На лабораторному стенді є вмонтований функціональний генератор, який генерує імпульси трикутної, прямокутної і синусоїдальної форм. Підключіть осцилограф до виходу функціонального генератора і поспостерігайте форму генерованих сигналів. Визначте нижнє і верхнє значення генерованих частот.

11) Ввімкніть генератор імпульсів ГЗ-54. Встановіть за вашим бажанням імпульси додатніх і від'ємних полярностей з параметрами в діапазонах амплітуди (2-4)В, тривалості (300-1000) μs і частоти повторювання (100-300) Гц. Використовуючи внутрішню синхронізацію

осцилографа, визначте амплітуду, період та тривалість імпульсів, що досліджуються.

12) Використовуючи зовнішню синхронізацію додатніми синхроімпульсами від генератора Г5-54 (часовий зсув $0,3-1,0 \mu s$) виміряйте τ_f , τ_c , τ_n і U_m додатнього і від'ємного імпульсу, встановивши за допомогою ручок управління генератора будь-які параметри імпульсів у діапазоні: тривалості $(0,5; 1,0) \mu s$; частоти повторення $(5-10) \cdot 10^4$ Гц.

На закінчення відзначимо, що контрольні питання при здачі даної лабораторної роботи будуть торкатися пристрою, принципу дії, підготовки до роботи та експлуатації всіх вище розглянутих приладів.

4.7. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ

Мета роботи: вивчення принципів дії та основних властивостей напівпровідникових діодів, високочастотних (універсальних), імпульсних, стабілітронів, тунельних, варикапів; дослідження їх вольтамперних характеристик, ознайомлення з основними параметрами та використанням.

Теоретичні відомості та методичні вказівки

Напівпровідниковим діодом НД називають електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з дірконо-електронним р-п-переходом, який має два виводи.

НД класифікуються по ряду принципів, найважливішими з яких є призначення, конструктивно-технологічні особливості, вид початкового напівпровідникового матеріалу. По призначенню НД діляться на випрямляючі, високочастотні та надвисокочастотні (ВЧ та НВЧ-діоди), тунельні, варикапи та інші; по конструктивно-технологічним особливостям - на площинні та точкові; по типу вихідного матеріалу - на германієві, кремнієві, селенові, арсенідо-галієві, карбідно-кремнієві, антимонідо-індієві та інші.

Умовні графічні позначення діодів показані на рис.39.

Умовні позначення (маркування) діодів складаються з елементів:

перший елемент (цифра або літера) визначає початковий матеріал напівпровідника: 1 або Г-германій, 2 або К-кремній, 3 або А-арсенід галію та т.д.;

другий (літера) - характеризує клас або групу діодів; Д-випрямляючі універсальні (високочастотні) та імпульсні; А-надвисокочастотні; С-стабілітрони, В-варикапи, І-тунельні; Ц-випрямляючі стовби та блоки,

третій (трьохзначний номер по сотнях) - говорить про групу використання (вказується у довіднику);

четвертий елемент - великі літери російського алфавіту А, Б, В, і тощо (для всіх діодів) - вказує на різноманітність діоду цього типу. Наприклад, КС147А - кремнієвий стабілітрон малої потужності, різновид типу А.

Випрямляючі діоди. Випрямляючий діод (ВД) - це напівпровідниковий діод, призначений для перетворення змінного струму в постійний у граничному діапазоні частот (50Гц...100кГц). Крім того, ВД широко використовуються в схемах управління та комутації для обмеження паразитних викидів напруги як елемент електричної розв'язки кілі т.д.

В наш час в якості ВД широко використовуються кремнієві площинні діоди, які мають набагато менші зворотні струми та більші допустимі зворотні напруги, ніж германієві. Недоліком кремнієвих діодів є більше пряме падіння напруги, ніж у германієвих.

ВД виконується на основі р-п-переходу і має дві області. Одна з яких є більш низькоомною (містить більшу концентрацію домішок, як правило, область з провідністю типу р) і називається емітером. Друга область, база - більш високоомна (містить меншу концентрацію домішок - частіше всього область з провідністю п). До емітера та бази підводяться металеві контакти, названі відповідно анодом та катодом (рис.39а).

В основі роботи ВД лежить властивість односторонньої провідності р-п-переходу, яка полягає в тому, що останній добре проводить струм (має малий опір) при прямому вимкненні і практично не проводить струм (має дуже великий опір) при зворотньому. Сказане відображають вольт-амперні характеристики ВАХ ВД: ідеального (рис.40а) та реального (рис.40б). Пряма гілка ВАХ описується рівнянням:

$$I_{np} = I_0 \left[e^{\frac{U_{np} - I_{np} \cdot r_{\delta}}{\varphi_T}} - 1 \right]$$

де I_{np} , U_{np} - відповідно прямий струм та пряма напруга,
 r_{δ} - опір базової області (складає одиниці - десятки Ом);

φ_T - тепловий потенціал $\varphi_T = \frac{kT}{q}$

k - постійна Больцмана;

q - заряд електрона;

T - абсолютна температура;

I_0 - зворотній струм р-п переходу.

Робочою ділянкою ВАХ ВД є лінійна (опірня) ділянка характеристики при прямому вклученні (ділянка 2-3, рис.40б). Нахил характеристики на цій ділянці визначається опором базової області r_{δ} . На практиці пряму гілку ВАХ реального ВД апроксимують ламаною лінією (ділянки 0-1, 1-3, рис.40б). З рисунка бачимо, що

$I_{np} = (U_{np} - E_{np}) / r_{\delta}$ при $U_{np} > E_{np}$ (ділянка 1-3);

$I_{np} = 0$ при $U_{np} < E_{np}$ (ділянка 0-1),

де $E_{np} = (0,5 \dots 0,7) \Delta \phi_{ж_0}$, $\Delta \phi_{ж_0}$ - напруга потенціального бар'єру р-п переходу (приблизно 0,3...0,9В); $r_{\delta} = ctg \phi$.

ВАХ ВД залежить від температури навколишнього середовища. З її збільшенням збільшується прямий та зворотний струми діода. Особливо сильно змінюється зворотний струм, оскільки його створюють неосновні носії заряду, число яких в напівпровідниках збільшується із зростанням температури. Значення прямого струму залежить від концентрації домішок в напівпровідникові.

Якщо вхідна напруга більша $U_{пр\max}$ діода, то ВД підключають послідовно (рис.41а), а якщо прямий струм більший $I_{пр\max}$ діода, то ВД підключають паралельно (рис.41б).

Для усунення нерівномірності розподілення зворотної напруги між послідовно з'єднаними діодами останні шунтуються опорами $R_{ш}$, а для вирівнювання прямих струмів паралельно ввімкнених діодів, послідовно з кожним діодом підключають додаткові опори R_g . Значення $R_{ш}$ - десятки-сотні кОм, а R_g сотні Ом. Їх значення повинні задовольняти співвідношенням:

$$R_{ш} \ll \tau_{зв\text{ вд}}$$

$$R_g \gg \tau_{пр\text{ вд}}$$

Високочастотні та надвисокочастотні діоди (ВЧ та НВЧ діоди). ВЧ діоди (рис 39а) є більш універсальні, ніж випрямні діоди, тому їх називають універсальними діодами. Вони можуть працювати у випрямлячах змінного струму, а також в модуляторах детекторах, різних перетворювачах електричних сигналів у широкому діапазоні частот (до сотень МГц). Їх недоліком у порівнянні з ВД є більш низька навантажна здатність. ВЧ діоди попередніх розробок містить точковий р-п перехід і називається точковими.

Зараз знаходять застосування мікросплавні високочастотні напівпровідникові діоди з площинними р-п-переходами дуже малих розмірів. Пряма гілка ВАХ таких діодів по формі не відрізняється від ВАХ випрямляючих діодів. Зворотний струм має менше значення ніж у ВД, через малу площу р-п переходу, але на ВАХ практично відсутня ділянка насичення і за рахунок струмів термогенерації та витікання зворотного струму рівномірно збільшується (рис 40б). Значення постійних прямих струмів точкових діодів не більше 50мА, значення допустимих зворотних напруг 150В. У мікросплавних діодів ці параметри трохи вищі. Головним параметром ВЧ діодів є бар'єрна ємність C_d . Чим менше C_d , тим ширший частотний діапазон діоду. Як правило $C_d \leq I_{пр}$. На надвисоких частотах ($f_{\max} > 1000$ МГц) на роботу діоду впливає його інерційність, що разом з наявністю C_d обмежує застосування діодів. Інші параметри ВЧ та НВЧ діодів ті ж, що і ВД.

Імпульсні діоди (ід). ІД (рис.39а) є різновидністю високочастотних діодів та призначені для використання у якості ключових елементів в

швидкодіючих імпульсних схемах. Їх конструкція, ВАХ, статичні та динамічні параметри такі ж, як і ВЧ та НВЧ діодів. ІД працюють при дії на них короткочасних імпульсів і повинні добре передавати їх форму. Якщо подавати на ІД різнополярні прямокутні імпульси (рис. 42а), то в моменти зміни полярності форма вихідних сигналів відрізнятиметься від прямокутної (мають місце перехідні процеси, див. рис. 42б).

При різкій зміні вхідної напруги з від'ємної в додатно у момент часу $t=t_1$, на імпульсному діоді з'явиться перепад напруги. При постійності прямого струму, сила якого в основному визначається значення $R_{\text{н}} \gg r_{\text{пр.ід}}$, цей перепад викликаний збільшенням в перехідному процесі прямого опору:

$$I_{\text{Д}} - I_{\text{пр.ід}} (U_{\text{пр.ід}} = I_{\text{пр.ід}} r_{\text{пр.ід}})$$

Збільшення $r_{\text{пр.ід}}$ пов'язано з введенням з емітера в базу ІД (процес інжекції) великого числа неосновних носіїв (для бази-дірок), які мають кінцевий час життя та уповільнюють наростання прямого струму. Протягом деякого часу, який називається часом встановлення прямого опору $\tau_{\text{вст}} = t_2 - t_1$, дірки в базі частково рекомбінують з електронами, а частково зміщуються в глибину бази і прямий опір знижується до свого встановленого малого значення.

При зміні вхідного сигналу з додатного на від'ємний в момент часу $t=t_3$ має місце перепад встановленого значення. Це відбувається при виведенні дірок з бази зворотно в емітер (процес екстракції), що у перехідному процесі створює доповнюючий зворотний струм діоду та відповідно зменшує його зворотний опір $\Gamma_{\text{зв.ід}}$. В цьому випадку перехідний процес одніється часом відновлення зворотного опору $\tau_{\text{від}} = t_4 - t_3$, по закінченню якого зворотний опір, приймає своє встановлене значення.

Для зменшення протяжності перехідних процесів в ІД зменшують його дифузійну $S_{\text{диф}}$ та бар'єрну $S_{\text{бар}}$ ємність. Для цього: зменшують товщину бази, збільшують її питому провідність, зменшують площу р-п переходу, зменшують час життя неосновних носіїв у базі.

Напівпровідникові стабілітрони НС (опорні діоди)

Напівпровідниковим стабілітроном (рис. 396) називають напівпровідниковий діод, напруга на якому в області електричного пробію слабо залежить від струму. Робочою ділянкою ВАХ НС є область пробію р-п переходу при його зворотному включенні (рис. 43). При обмеженні зворотного струму стан пробію в стабілітроні може підтримуватись та відтворюватись на протязі десятків-сотень годин. Значення напруги стабілізації залежить від початкового напівпровідникового матеріалу та технології його обробки. При виготовленні стабілітронів використовується кремній, оскільки зворотний струм р-п-переходів на його основі невеликий і мало залежить від температури, тому в них менша ймовірність теплового пробію при протіканні зворотного струму та саморозігрівання р-п-переходу. Замість стабілітронів з $U_{\text{ст}}$ порядку 3...5В використовують діоди з низькоомного

матеріалу. В цьому випадку виникає вузький площинний перехід з чіткими границями, в якому, у порівнянні з низькими зворотніми напругами, виникає тунельний електричний пробій.

У стабілітронів з $U_{ст} > 7В$ (виготовляються з більш високоомних матеріалів) виникає лавинний електричний пробій. У діапазоні $U_{ст} = 5...7В$ пробій виникає під дією взаємодії тунельного та лавинного механізмів.

Стабілітрони використовуються для стабілізації напруг джерел живлення, а також для фіксації рівня напруг в різних схемах /звідси виникла друга назва стабілітрона - опорні діоди/. Стабілізацію низьковольтної напруги в границях $0,3...1В$ можна отримати при використанні прямої гілки ВАХ кремнієвих діодів, які називаються стабісторами. Використовуються також двосторонні /симетричні/ стабілітрони, які мають симетричну ВАХ відносно початку координат /рис.39в/. В цьому випадку напруга стабілізації при прямому зміщенні дорівнює напрузі стабілізації при зворотньому зміщенні.

Тунельні діоди /ТД/. Тунельним називається напівпровідниковий діод /рис.39г/, в якому використовується тунельний механізм переносу носіїв заряду через р-п перехід та у ВАХ якого є участок від'ємного диференціального опору. ТД виготовляються з германію або арсеніду галія з високою концентрацією домішок (вироджений напівпровідник). Це дозволяє одержати дуже вузький р-п перехід. На відміну від розглянутих раніше діодів, у таких переходах виникають умови для відносно вільного тунельного проходження електронів через потенціальний бар'єр (тунельний ефект). Тунельний ефект приводить до появи на прямій гілці ВАХ діодів падаючої ділянки з від'ємним опором (рис.44а, ділянка 1-2). Оскільки тунельний струм не зв'язаний з порівняно повільними процесами дифузії та дрейфу електронів, ТД є практично безінерційними приладами.

До переваг ТД необхідно віднести широкий інтервал робочих температур та частот, малу використовувану потужність, високий допустимий рівень радіації, використання для підсилення електричних сигналів. Їх недоліками є низький діапазон робочих напруг та струмів, а також несумісність технологій виготовлення ТД з технологією виготовлення інтегральних схем, що перешкоджає їх широкому використанню в сучасній апаратурі. Крім того, ТД -двохполюсники і при використанні їх, наприклад, в підсилювачах необхідні ланцюжки розв'язки між входом та виходом пристрою, що також обмежує їх використання. Робоче для ТД - пряме включення. ТД використовуються в перемикачах, підсилювальних та генераторних схемах. Внаслідок того, що вони працюють при низьких робочих напругах для ТД потрібні високостабільні джерела живлення. Різновидність ТД - повернутий діод (рис.39д). Це ТД, у якому максимум струму на прямій гілці ВАХ або незначний, або повністю відсутній (рис.44б). Провідність зворотніх діодів в області малих напруг при зворотній напрузі вища, ніж при прямій.

Варикапи. Варикапами називаються напівпровідникові діоди (рис.39е), робота яких ґрунтується на використанні залежності бар'єрної ємності р-п-переходу від прикладеної зворотної напруги. Ємністю варикапів можна керувати дистанційно, мняючи зворотно напругу на р-п-переході. Варикапи мають низьку інерційність, високу добротність, низький рівень шумів на високих частотах, малі габарити, високу температурну стабільність та надійність. Вольт-фарадна характеристика приведена на рис.45. Мінімальна ємність C_{\min} визначається максимально допустимою зворотною напругою.

Звичайно до варикапу прикладається невелика змінна напруга U , та постійна напруга зміщення $U_{зм} \gg U$. Значення ємності для змінної складової напруги змінюється від C_{\min} до C_{\max} . Значення $U_{зм}$ -одинадц-десятки вольт; C_{\max} -десятки пікофарад; коефіцієнт перекриття ємності $K_c = C_{\max}/C_{\min}$ - декілька одиниць.

Варикапи широко використовуються в різних схемах для автоматичного налагодження частоти.

Методичні вказівки до виконання роботи

В цій роботі досліджуються ВАХ кремнієвого та германієвого діодів, а також стабілітронів та тунельного діоду.

1.Для дослідження прямої гілки ВАХ кремнієвого, германієвого діодів та стабілітронів необхідно зібрати схему, зображену на рис.46.

В цій схемі $R_1=62 \text{ Ом}$, $R_2=220 \text{ Ом}$, $R_3=200 \text{ Ом}$. До точок а та б підключається досліджуваний діод VD.

Для дослідження зворотної ВАХ кремнієвого та германієвого діодів необхідно зібрати схему, зображену на рис.47.

2.Для дослідження зворотної гілки ВАХ стабілітронів необхідно обмежувати величину струму діоду в режимі пробую. Для цієї цілі необхідно зібрати схему, зображену на рис.48. У цій схемі $R_1=200 \text{ Ом}$, $R_2=4,7 \text{ кОм}$, $R_3=1 \text{ кОм}$.

3.За допомогою простої схеми, зображеної на рис.49, можна візуально розглянути ВАХ діодів на екрані осцилографа.

Джерело Евх - це звуковий генератор,що працює з частотою повторення $f_{\text{повт}}=500 \text{ Гц}$. Напруга встановлюється на максимальний рівень.

Спочатку необхідно для досліджуваних діодів виписати з довідника їх електричні параметри та експлуатаційні величини. При проведенні досліджень перевищення максимальних експлуатаційних величин не допускається.

Порядок виконання роботи

1. Зняти прямі ВАХ кремнієвого, германієвого діодів та стабілітрону. Для спрощення графічної побудови рекомендуємо задаватись одними і тими ж значеннями фіксованих струмів /8-10значень/. Результати оформити у вигляді таблиці.

2. Зняти зворотні ВАХ кремнієвого, германієвого діодів та стабілітрону.

3. Зібрати схему для спостереження ВАХ /рис.49/, використовуючи ступінчате регулювання коефіцієнту підсилення на вході У. Встановить найбільш зручну для спостережень форму АЧХ діоду та змалюйте її з екрану осцилографа.

4. По знятим ВАХ діодів визначити диференційні опори, використовуючи пряму гілку. Необхідно запам'ятати, що $r_{диф} = U_{пр}/I_{пр}$. Для стабілітронів необхідно також визначити диференційний опір в режимі пробую: $r_{ст} = U_{ст}/I_{ст}$.

Контрольні запитання

1. Приведіть класифікацію напівпровідникових діодів по призначенню.
2. Опишіть процеси в р-п-переходах при відсутності зовнішньої напруги, при його прямому та зворотному включенні.
3. Охарактеризуйте температурні та частотні характеристики р-п переходів.
4. Як позначаються на схемах та маркуються напівпровідникові діоди?
5. Як можна визначити головні параметри НД по їх характеристиках?

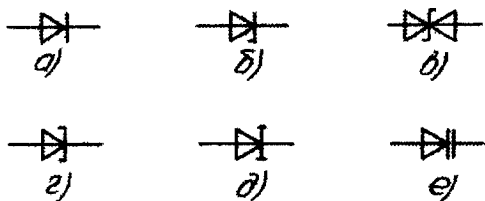


рис.39

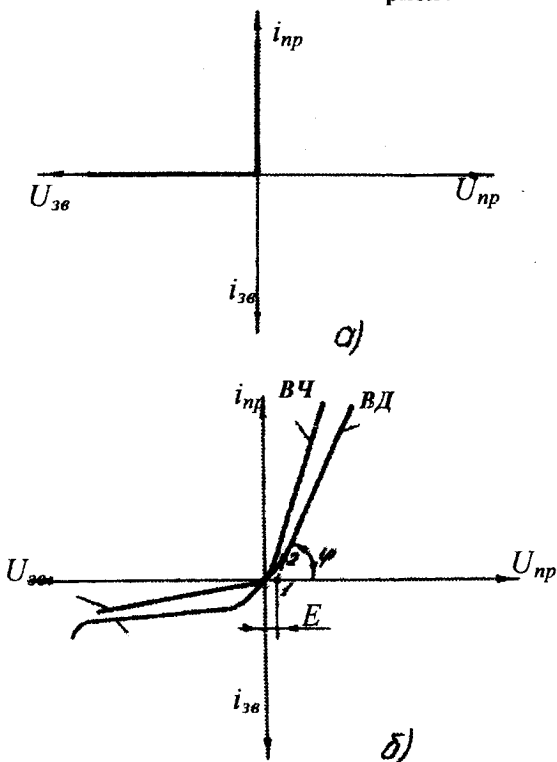
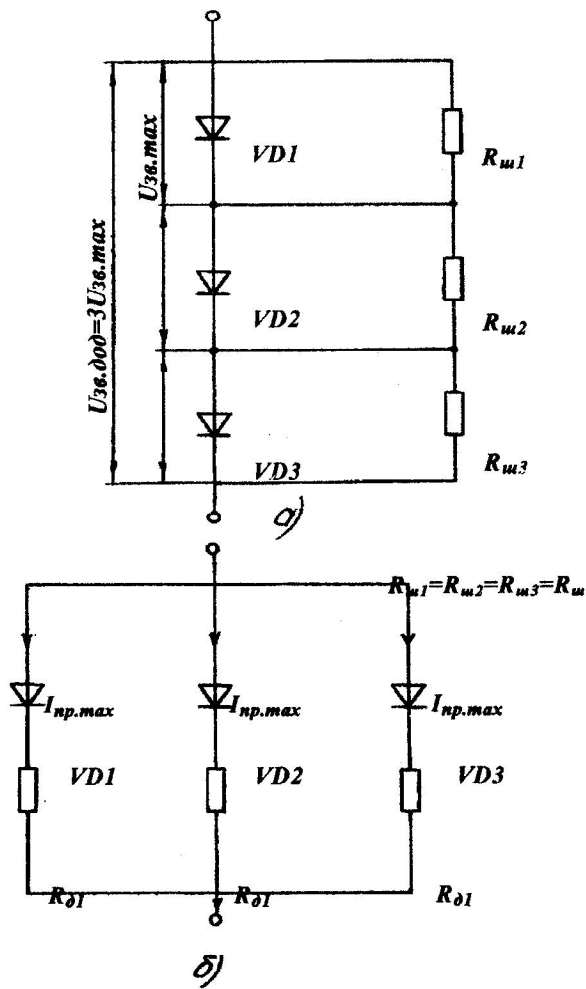


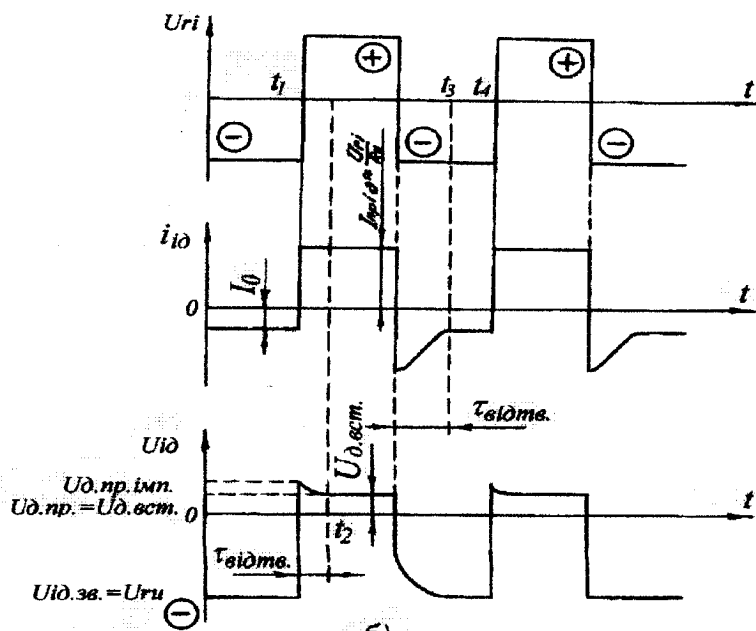
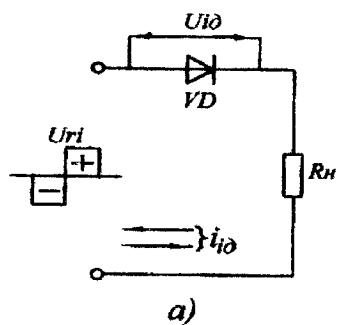
рис.40



$$3I_{пр.мах} = I_{пр.дод}$$

$$R_{д1} = R_{д2} = R_{д3} = R_{д}$$

рис.41



б)
рис. 42

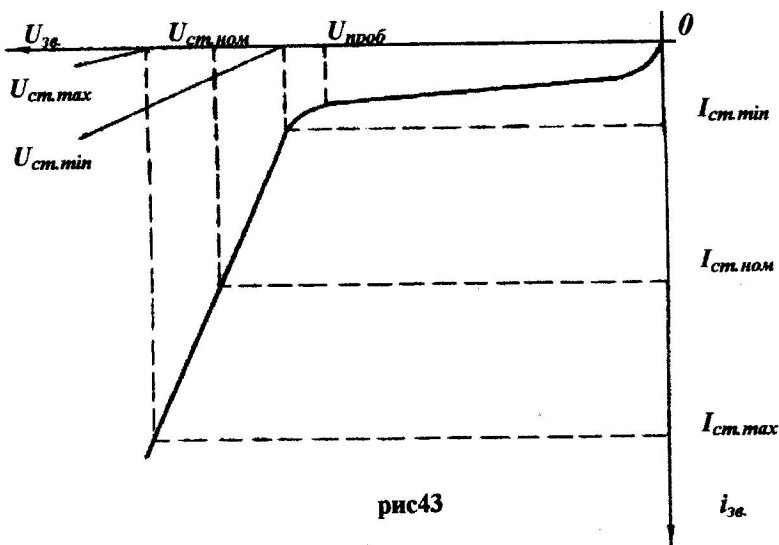
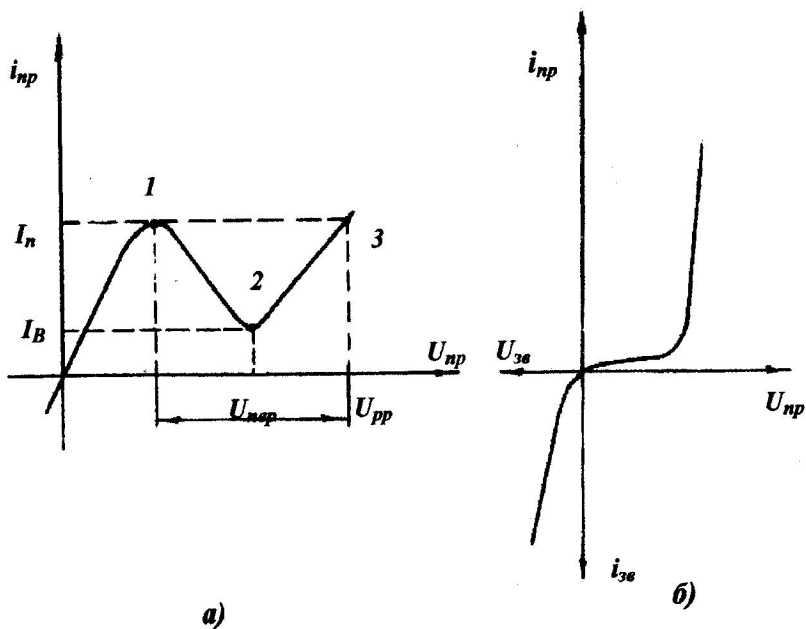


рис43



а)

б)

рис44

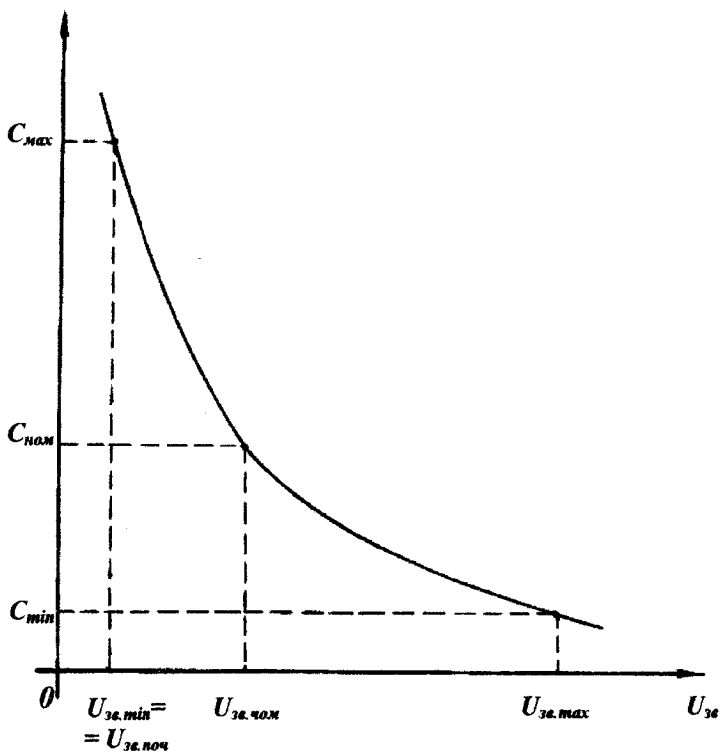


рис.45

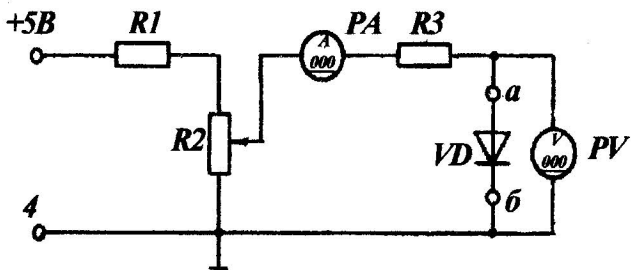


рис.46

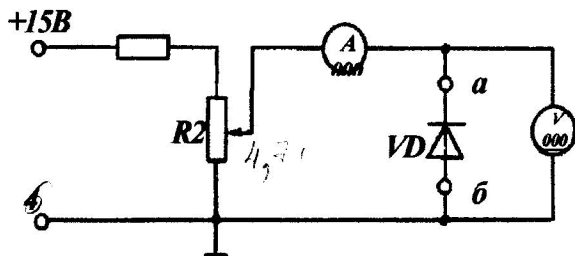


рис.47

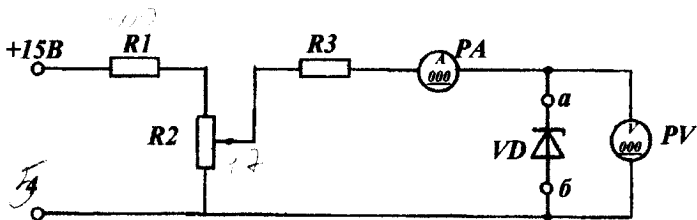


рис.48

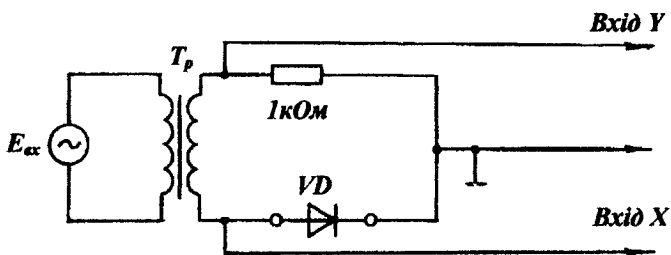


рис.49

4.8. ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНИХ ОБМЕЖУВАЧІВ НА ДІОДАХ

Мета роботи: вивчення принципу дії діодних обмежувачів, ознайомлення із схемними рішеннями та з областями їх застосування.

Теоретичні відомості

Обмежувачем або, більш точно, амплітудним обмежувачем називають пристрій, пристосований для обмежування амплітуди або зміни форми сигналу. Розрізняють обмежувачі по максимуму, або обмежувачі "зверху", обмежувачі по мінімуму, або обмежувачі "знизу", і двосторонні обмежувачі.

Для обмежувача по максимуму зводиться до наступного. Нехай змінна напруга $U_{вх}(t)$ змінюється в діапазоні від $U_{вх \text{ min}}$ до $U_{вх \text{ max}}$. Задано рівень напруги E_0 , який відповідає порогу обмеження. Тоді

$$U_{вх \text{ min}} < E_0 < U_{вх \text{ max}}$$

Для ідеального обмежувача по максимуму вихідний сигнал описується виразами:

$$U_{вих} = E_0 = \text{const при } U_{вх}(t) > E_0;$$

$$U_{вих} = k * U_{вх}(t) \text{ при } U_{вх}(t) < E_0,$$

де k - коефіцієнт пропорційності.

Таким чином, при $U_{вх}(t) > E_0$ форма вихідного сигналу не змінюється і дорівнює порогу обмеження при E_0 . Якщо $U_{вх}(t) < E_0$, то вихідний сигнал співпадає з вхідним сигналом по формі та пропорційний йому по рівню.

Аналогічно, для обмежувачів по мінімуму:

$$U_{вих} = k * U_{вх}(t) \text{ при } U_{вх}(t) > E_0,$$

$$U_{вих} = E_0 = \text{const при } U_{вх}(t) < E_0.$$

Двосторонній обмежувач має два пороги обмеження E_{01} та E_{02} .

$$E_{01} > U_{вх \text{ min}}, E_{02} < U_{вх \text{ max}}, E_{01} < E_{02}.$$

Вихідний сигнал визначається співвідношеннями

$$U_{вих} = E_{01} = \text{const при } U_{вх}(t) < E_{01};$$

$$U_{вих} = E_{02} = \text{const при } U_{вх}(t) > E_{02};$$

$$U_{вих} = k * U_{вх}(t) \text{ при } E_{01} < U_{вх}(t) < E_{02}.$$

Всі різновиди обмежувачів можна розглядати як двосторонні, якщо вважати, що один з порогів обмежувача не входить в діапазон можливих значень вхідного сигналу.

Коефіцієнт пропорційності k залежить від типу використовуваних в обмежувачі нелінійних елементів. В діодних обмежувачах $k < 1$. При побудові обмежувачів на транзисторах можна отримати $k > 1$. В цьому випадку обмежувач називають підсилювачем - обмежувачем.

Обмежувачі використовують для формування імпульсів з постійною амплітудою, вирівнювання верхівок імпульсів, отримання напруги, близької до прямокутної із синусоїдальної. Обмежувачі можуть входити в якості складової частини в більш складні пристрої, такі як, наприклад, селектори імпульсів. Селектори (від англ. select - вибирати) здійснюють вибір імпульсів з заданими параметрами з тією або іншою послідовністю. Обмежувач по мінімуму дозволяє здійснювати селекцію імпульсів з амплітудою, що перевищує деяке задане значення. В цьому випадку поріг обмеження роблять рівним заданому граничному значенню амплітуди. Сигнал на виході обмежувача роблять тільки ті імпульси, амплітуди яких перевищують поріг обмеження, тобто граничне значення амплітуди.

Розглянемо простіші схеми обмежувачів напруги.

Послідовний діодний обмежувач

В даному обмежувачі діод ввімкнено між джерелом вхідних сигналів $U_{вх}(t)$ і напругою R_H , таким чином з'єднан послідовно з навантаженням. Як було вказано, перемикання діода із стану з низьким опором в стан з високим опором відповідає граничній напрузі $U_{ак} = 0$. На цьому заснований принцип дії послідовного діодного обмежувача: якщо напруга на аноді більше напруги на катоді, то діод є провідним, ділянка між його анодом і катодом близька до короткозамкненого кола і вхідний сигнал передається на навантаження R_H . Якщо напруга на аноді діода менше напруги на катоді, то діод закривається і відмикає джерело вхідного сигналу від навантаження. Принципова схема послідовного діодного обмежувача приведена на рис. 50 де E_0 - джерело постійної опорної напруги, яке задає поріг обмеження.

Для пояснення роботи обмежувача в якості вхідного сигналу використовуємо спочатку найпростішу змінну напругу - гармонійний сигнал виду $U_{вх}(t) = U_m \sin(\Omega * t)$. При $U_{вх}(t) < E_0$ діод D закривається і відмикає джерело $U_{вх}(t)$ від навантаження R_H . Напруга на виході визначається напругою джерела E_0 . Не звертаючи уваги на зворотний струм закритого діода D можна вважати, що в розглянутому стані обмежувача напруга E_0 через R_H передається на верхню вихідну клему пристрою і рівень напруги $U_{ак}$ між анодом та катодом близький до нуля. Тому вихідна напруга у $U_{вих}(t) = U_{вх}(t) - U_{ак}$ практично співпадає з вхідним сигналом $U_{вх}(t)$. Отриманий графік вихідної напруги показаний на рис.51. Вихідний сигнал

обмежено "знизу", таким чином даний обмежувач можна віднести до обмежувачів по мінімуму.

Таким чином можна обмежувати як синусоїдальну, так і імпульсну напругу. Уточнимо особливості роботи діодного обмежувача, викликані кінцевими значеннями r_{np} , e_0 , I_s і паразитної ємності навантаження, на прикладі обмеження імпульсної меандрової напруги.

Розглянемо випадок коли сигнал $U_{вх}(t)$ має вигляд меандрової напруги. Тривалість кожної з півхвиль значно перевищує тривалість перехідних процесів при формуванні вихідних імпульсів обмежувача. Напругу E_0 візьмем рівною нулю.

Визначимо статистичні рівні вихідного сигналу при обмеженні біполярної меандрової напруги. При дії додаткової півхвилі напруги еквівалентна схема кола приймає вигляд, показаний на рис.52. На рисунку відкритий діод Д замінений еквівалентною схемою для прямої гілки його ВАХ. Рівень вихідної напруги, що відповідає дії додатної півхвилі вихідного сигналу, позначимо $U_{вих}^+$ = відповідно рис.52.

$$U_{вих}^+ = (E - e_{0Д}) \frac{R_H}{R_H + r_{np}}$$

Оскільки $r_{np} \ll R_H$, то $U_{вих}^+ = (E - e_{0Д}) \approx +E$.

Еквівалентна схема обмежувача при дії від'ємної півхвилі вхідного сигналу зображена на рис.53. Тут діод Д замінений еквівалентною схемою для зворотної гілки його ВАХ. Рівень вихідної напруги під час дії від'ємної півхвилі вхідного сигналу позначимо $U_{вих}^-$. Згідно рис. 4, $U_{вих}^- = -I_s * R_H$.

Для випадку ідеального ключа ($r_{np}=0$, $e_{0Д}=0$, $I_s=0$) вихідні статичні рівні напруги мають такі значення:

$$U_{вих}^+ = E; U_{вих}^- = 0.$$

Внаслідок кінцевих значень r_{np} , $e_{0Д}$, I_s обидва рівня зникаються: рівень $U_{вих}^+$ зсувається на $e_{0Д}$ і приймає значення $U_{вих}^+ = E - e_{0Д}$; рівень $U_{вих}^-$ зсувається на $I_s * R_H$ і приймає значення $-I_s * R_H$. Крім того, значення тривалості фронту і зрізу вихідного імпульсу стають кінцевими. Для оцінки тривалості фронту і зрізу імпульсу будемо враховувати ємність $C_{ак}$ і паразитну ємність навантаження C_H (рис.54). Вважаємо, що при вході діє від'ємна півхвиля меандрової напруги. На виході обмежувача встановився рівень напруги $U_{вих}^- = -I_s * R_H$, близький до нуля. Ємність C_H заряджена до цієї малої напруги. Діод Д закритий напругою $-(E - I_s * R_H)$, тобто практично напругою $-E$. Його ємність $C_{ак}$ заряджена до цієї напруги. Напруга на вході

стрибком змінює полярність і стає рівною $+E$. Діод D має кінцевий час встановлення прямого опору і в перший момент не проводить струму. В цих умовах нове значення напруги вхідного сигналу $+E$ діє на ємнісний подільник $C_{ак}-C_H$. Розпочинається швидкий перерозподіл напруг на цих ємностях, який призводить до початкового стрибка вихідної напруги (рис. 55).

$$\Delta_H = E_{ак} \cdot \frac{C_{ак}}{C_H + C}$$

По другому закону Кірхгофа, вхідна напруга дорівнює сумі напруг на ємностях $C_{ак}$ і C_H :

$$+E = U_{C_{ак}} + U_{C_H}$$

де $U_{C_H} = \Delta_H$; $U_{C_{ак}} = E - \Delta_H$.

Додатня напруга $U_{C_{ак}}$ швидко відкриває діод, його опір приймає мале значення $r_{пр}$. Паразитна ємність обмежувача $C_{п} = C_{ак} + C_H$ починає заряджуватись і напруга на виході зростає від $-I_s * R_H + \Delta_H \approx \Delta_H$ до $U_{вих}^+$.

Стала часу встановлення вихідної напруги:

$$\theta_1 = C_{п} \frac{r_{пр} * R_H}{r_{пр} + R_H} \approx (C_{ак} + C_H) * r_{пр}$$

Через інтервал часу, близький до $3 * \theta_1$, формування фронту вихідного імпульсу закінчується, напруга на виході приймає встановлений рівень $U_{вих}^+$. Тривалість фронту вихідного імпульсу $t_{ф} = 3 * \theta_1 = 3 * r_{пр} * (C_{ак} + C_H)$.

Після завершення формування фронту імпульсу напруга на діоді D і його ємності $C_{ак}$ $U_{пр} \approx e_{од}$. Напруга на навантаженні, а відповідно і ємності C_H $U_{вих}^+ = E - e_{од} \approx E$. Напруга на вході стрибком змінюється від $+E$ до $-E$. Процес формування зрізу вихідного імпульсу починається з стрибка напруги Δ_H , викликаного діленням стрибка вихідної напруги на ємнісному подільнику $C_{ак}-C_H$. Від'ємна напруга, що виникає при формуванні цього стрибка, закриває діод. Після цього починається розрядка ємності C_H через навантаження R_H . Ємність діода $C_{ак}$ по змінній складовій ввіключена паралельно ємності C_H ; вона підвищує постійну часу кола $\theta_2 = (C_{ак} + C_H) * R_H$. Тривалість зрізу імпульсу $t_c = 3 * \theta_2 = 3R_H * (C_{ак} + C_H)$. Отже, $t_{ф} < t_c$.

Паралельний діодний обмежувач

В цьому різновиді обмежувачів діод D влючається в коло паралельно навантаженню R_H . Принцип дії складається з того, що діод закорочує на напругу, перевищуючу заданий рівень обмеження, фіксуючи напругу на навантаженні. Принципова схема паралельного діодного обмежувача показана на рис. 56, де R_0 - баластний опір обмежувача. Без R_0 обмеження не можливе, тому що при відкритому діоді вся напруга джерела $U_{вх}(t)$ при достатній його потужності виділяється на опорі діода і передається на вихід. Введений опір R_0 входить в склад дільника напруги. При дії від'ємної півхвилі вхідного сигналу (діод закрито) напруга ділиться між R_0 і R_H , тому що $R_0 \ll R_H$, то вихідна напруга мало відрізняється від вхідної. При дії додатньої півхвилі (діод відкрито) напруга ділиться між R_0 і r_{np} . При цьому майже вся напруга гаситься на R_0 і на виході встановлюється рівень вихідного сигналу, що задається джерелом E_0 .

Обмеження синусоїдальної напруги, що виникає при цьому показано на рис. 57. При $U_{вх}(t) \geq E_0$ діод відкрито і напруга $U_{ак} = U_{np} \approx 0$. Тоді $U_{вих} = E_0 + U_{np} \approx E_0$. Якщо $U_{вх}(t) < E_0$, то діод закрито, тому що напруга $U_{ак} < 0$. Як було відмічено при $U_{вх}(t) < 0$ вхідна напруга ділиться між R_0 і R_H і

$$U_{вих}(t) = U_{вх}(t) * R_H / (R_0 + R_H).$$

тому амплітуда від'ємної півхвилі

$$U_{m \text{ вих}} = U_m * R_H / (R_H + R_0).$$

Оскільки $R_0 \ll R_H$, то $U_{m \text{ вих}} \approx U_m$.

Слід прийняти до уваги кінцеві значення r_{np} , e_0 , I_s і напівпровідникового діоду D . Для виявлення особливості роботи реального діоду в схемі паралельного діодного обмежувача використовуємо вхідний сигнал меандрову напругу з амплітудою від'ємної і додатньої півхвилі $U_m = E$, напруга опорного джерела $E_0 = E$.

При дії додаткової півхвилі напругу такого обмежувача можна привести до вигляду, показаному на рис. 58а. Замінивши відкритий діод статичною схемою заміщення, а дільник $R_0 - R_H$ еквівалентним джерелом напруги $E_{ек} = E * R_H / (R_0 + R_H)$ з вихідним опором:

$$R_{ек} = R_0 * R_H / (R_0 + R_H),$$

те ж коло приведемо до вигляду, зображеного на рис. 58 б. Напруга на виході дорівнює спаду напруги на відкритому діоді D :

$$U_{вих}^+ = U_{np} = e_0 + \frac{E_{ек} - e_0}{R_{ек} + r_{np}} * r_{np}.$$

Тоді $r_{пр} \ll R_0$, $U_{пр} \approx e_0$.

При дії від'ємної півхвилі вхідної меандрової напруги діод Д закрито. Еквівалентна схема обмежувача, в якій закритий діод замінено генератором струму I_s , зображена на рис. 59 а. Використовуючи теорему про еквівалентний генератор, те ж коло приведемо до вигляду, показаного на рис. 59 б. З останньої схеми видно, що напруга на виході

$$U_{вих}^- = E_{ек} + I_s * R_{ек} = -E * \frac{R_H}{R_H + R_0} + I_s * \frac{R_H * R_0}{R_H + R_0} = -(E - I_s * R_0) * \frac{R_H}{R_H + R_0}$$

У порівнянні з ідеальним обмежувачем рівні вихідної напруги зсунулись: верхній - на $U_{пр}$, нижній - на $I_s * R_{ек}$. Ця зміна рівнів буде незначною, якщо

$$r_{пр} \ll R_0 \ll R_H ; \\ R_0 \ll E/I_s.$$

Крім змін статичних рівней вихідної напруги необхідно враховувати також вплив паразитних ємностей - бар'єрної ємності р-п-переходу діода C_d і ємності навантаження C_H . В впаданій схемі ці ємності ввімкнені паралельно і утворюють загальну сумарну паразитну ємність $C_d = C_H + C_d$.

Розглянемо роботу обмежувача з врахуванням цієї паразитної ємності при передачі додатнього стрибка вихідного сигналу, коли напруга $U_{вх}(t)$ змінюється від $-E$ до $+E$. Як було показано, при дії від'ємної півхвилі вхідного сигналу на виході встановлюється рівень напруги

$$U_{вх}^- = -E * \frac{R_H}{R_H + R_0} \approx -E.$$

Напруга на виході приймає значення $+E$. Напруга на ємності C_H стрибком змінитися не може. В перший момент після зміни знаку вхідного сигналу напруга на ній, а таким чином, і на виході обмежувача залишається рівною $-E$. Однак під дією вхідного сигналу $+E$ ємність C_H починає перезаряджуватися. Коло перезарядки ємності C_H показано на рис. 60 а. Ця ємність утворює від'ємну напругу між анодом та катодом діода Д, тому діод Д закрито. За допомогою теореми про еквівалентний генератор коло на рис. 60 а приводиться до послідовного R-C-кола (рис. 60 б), стала часу якого $\theta = R_{ек} * C_H$. Тут, як раніше $R_{ек} = R_0 * R_H / (R_0 + R_H) \approx R_0$.

При сталій часу θ напруга емності C_{π} зростає, прямуючи до додаткового рівня $+E_{\text{ек}} = E * R_H / (R_H + R_0)$, близького до $+E$. Коли напруга на емності перевищує нульовий рівень, діод D відпирає і фіксує вихідну напругу на рівні, близькому до $+e_0$. Формування фронту вихідного імпульсу закінчується. Вважаючи, що $E_{\text{ек}} \approx E$ і $e_0 \ll E$, отримуємо $t_{\phi} = \theta * \ln 2 \approx 0,7 * C_{\pi} * R_0$, як це показано на графіку вихідного сигналу рис.61.

Розглянемо формування зрізу вихідного імпульсу. Будемо вважати, що закінчується додаткова півхвиля вхідного сигналу. На виході обмежувача встановлюється рівень напруги $+e_0$. Емність C_{π} заряджена до цієї малої напруги, тобто фактично не заряджена. Напруга на виході стрибком змінюється від $+E$ до $-E$. Від'ємна напруга на вході викликає швидке закриття діоду і відновлення його великого зворотного опору. Емність починає заряджатися, напруга на ній прямує до статичного рівня.

$$U_{\text{ак}}^- = -(E - I_s * R_0) * \frac{R_H}{R + R} \approx -E$$

Через $3 * \theta$ формування зрізу імпульсу закінчиться, на виході встановиться статичний рівень напруги. Звідси $t_c = 3 * \theta = 3 * C_{\pi} * R_0$. Як і в випадку послідовного діодного обмежувача, $t_c > t_{\phi}$.

ДВОСТОРОННІЙ ДІОДНИЙ ОБМЕЖУВАЧ

Такі обмежувачі отримують шляхом сполучення двох односторонніх обмежувачів - послідовних і паралельних. При використанні паралельних діодних обмежувачів баластний резистор R_0 є однаковим як для обмежувача напруги "зверху", так і для обмежувача напруги "знизу". Схема обмежувача показана на рис.62, де напруги джерел E_{01} і E_{02} задають рівні обмежування і мають різну полярність.

При додатній полярності вхідного сигналу і виконанні нерівності $U_{\text{вх}}(t) > E_{01}$ діод D_2 закрито, а діод D_1 відкрито. Напруга на виході:

$$U_{\text{вих}}(t) = U_{\text{ак}} + E_{01},$$

де $U_{\text{ак}}$ - напруга на відкритому діоді D_1 .

Оскільки $U_{\text{ак}} \ll E_{01}$, то $U_{\text{вих}} \approx E_{01}$.

При від'ємній полярності вхідного сигналу і виконанні нерівності $U_{\text{вх}} < E_{02}$ діод D_1 закрито, тому що напруга на його аноді менша напруги на катоді. При цьому діод D_2 відкритий і напруга на виході зафіксована на рівні $U_{\text{вих}}(t) = -E_{02} - U_{\text{ак}} \approx -E_{02}$. При $-E_{02} < U_{\text{вих}}(t) < E_{01}$ закрито обидва діоди і вхідний сигнал передається на навантаження R_H . Графік вихідної напруги у

випадку обмеження синусоїдального вхідного сигналу показаний на рис. 63а. Графік $U_{вх}(t)$ відповідає напрузі джерела вхідного сигналу $U_{вх}(t) = U_m \sin(\Omega t)$, пунктирний графік $U_{ек}(t)$ враховує вплив навантаження. Відносно обмежувальних діодів подільник $R_0 R_H$ замінено еквівалентним генератором з амплітудою напруги

$$U_{ек} = U_m * R_H / (R_0 + R_H).$$

При обмеженні біполярних напруг з малою тривалістю фронту і зрізу вхідного сигналу тривалість фронту і зрізу вихідного сигналу обчислюють так само як і для одностороннього обмежувача. Однак якщо сигнал на вході має невелику швидкість зростання (рис. 63 а, б.), то тривалість фронту і зрізу визначається в основному вже швидкістю зміни вхідного сигналу в інтервалі між порогамі обмежувача, а не паразитними ємностями навантаження і діодів. Цей випадок і будемо розглядати далі, вважаючи $E_{01} = E_{02} = E_0$, а $R_H \gg R_0$. Останнє допущення дає можливість вважати, що $U_{ек}(t) = U_{вх}(t)$ і $U_{ек} \approx U_m$ (рис. 63 б). Тоді за час від 0 до $t_{\phi}/2$ вихідна напруга встигає зрости від 0 до $E_{01} = E_0$. При $t_{\phi} = t/2$ напруга $U_{вх}(t) = E_0$. Враховуючи синусоїдальний закон зміни напруги, отримаємо $U_m * \sin(\Omega t_{\phi}/2) = E_0$. Тому як в розглянутому випадку $E_0 \ll U_m$, тобто обмеження проходить при малих значеннях синусоїдальної напруги, то раніше визначено, що $t_{\phi} \ll T$, де $T = 2\pi/\Omega$ - період синусоїдальної напруги. Вираз $U_m * \sin(\Omega t_{\phi}/2) = U_m * \sin(\pi * t_{\phi}/T)$ має аргумент синусу, значно менший одиниці. Для малих значень x відоме приближене співвідношення $\sin(x) \approx x$. При його використанні $U_m * \sin(\pi * t_{\phi}/T) \approx U_m * \pi * t_{\phi}/T$.

Дорівнявши отриманий вираз до E_0 , з співвідношення $U_m * \pi * t_{\phi}/T = E_0$ знайдемо, що

$$t_{\phi} = \frac{E_0 * T}{\pi * U_m}.$$

Використання двох окремих різнополярних джерел E_0 і E_0 , що задають рівні обмеження, представляє відому незручність. Тому часто в обмежувачах використовують елементи, що задають вказані рівні автоматично за рахунок енергії вхідного сигналу, наприклад, кола з стабілітронами. Одна з можливих схем двобічного обмежувача з стабілітроном показана на рис. 64, де D_3 - стабілітрон, який має напругу стабілізації $U_{ст}$ ($U_{ст} < U_m$); D_1 - D_4 - напівпровідникові діоди. Будемо вважати, що діє додатня напівхвиля вхідної напруги $U_{вх}(t)$. При визначеній вхідній напрузі стабілітрон D_3 вмикає струм, який підтримує стабілітрон у ввімкненому стані, тече через баластний резистор R_0 , діод D_1 , сам стабілітрон D_3 і діод D_4 . На аноді діоду D_1 підтримується напруга $E_{01} = U_{ст} + e_{од1} + e_{од4}$ де $e_{од1}$ та $e_{од4}$ - напруга відсічки діодів D_1 і D_4 . При

цьому діоди D_2 і D_3 закриті; діод D_2 закритий напругою $U_{ст} + e_{од4}$. Під час дії від'ємної напівхвилі вхідного сигналу, коли миттєві значення вхідної напруги перевищують напругу стабілізації $U_{ст}$, стабілітрон D_5 також вмикється, струм, який підтримує стабілітрон у ввімкненому стані, тече через діод D_3 , стабілітрон D_5 , діод D_2 і баластний резистор R_0 . Діоди D_1 і D_4 при цьому закриті. На аноді діода D_1 підтримується напруга $-E_{02}$, де $E_{02} = U_{ст} + e_{од2} + e_{од3}$. Тому як верхній, так і нижній рівні обмеження задаються за допомогою одного і того ж стабілітрону D_5 , то амплітуди від'ємної та додатної напівхвилі напруги на аноді діода D_1 однакові і дорівнюють E_0 , де $E_0 \approx E_{01} \approx E_{02}$. Вважаючи $e_{од1} \approx e_{од2} \approx e_{од3} \approx e_{од4} \approx e_{од}$, отримаємо, що $E_0 = U_{ст} + 2 * e_{од}$. Тому що температурні зміни напруги $U_{ст}$ та складової $2 * e_{од}$, утвореної напругою відсічки двох прямозміщених діодів, близькі за значенням і зворотні за знаком, то значення E_0 підтримуються з високим ступенем стабільності в широкому діапазоні температур.

Двосторонні обмежувачі застосовують для отримання із синусоїдальної напруги імпульсів з формою, близькою до прямокутної.

Застосування обмежувачів

Обмежувачі являються основними елементами багатьох імпульсних пристроїв; вони застосовуються для:

- формування імпульсів стандартної амплітуди шляхом обмеження вхідної послідовності імпульсів деяким заданим рівнем;
- відновлення форми імпульсу, верхівка якого спотворена перешкодою;
- фіксування рівня імпульсу, для скорочення тривалості фронтів;
- селекції імпульсів по амплітуді і полярності;
- фіксації рівня перешкоди на виході різних швидкодіючих пристроїв (наприклад, діодна фіксація колекторної напруги в ключах, тригерах, мультивібраторах і т. д.);
- відновлення постійної складової і фіксації різних рівней сигналів;
- формування імпульсів з синусоїдальної напруги, якщо подати синусоїдальну напругу $U_{вх} = U_m \cdot \sin(\omega t)$ на вхід двостороннього обмежувача з рівнем обмеження $+E$ і $-E$, то на виході отримаємо напругу трапецієдальної форми з тривалістю фронту t_ϕ . Якщо $t_\phi \ll 2 \cdot \pi / \omega$, можна покласти $\sin(\omega \cdot t_\phi / 2) \approx \omega \cdot t_\phi / 2$ і $E \approx U_m \cdot \omega \cdot t_\phi / 2$, звідки

$$t_\phi \approx 2 \cdot \frac{E}{U_m \cdot \omega} = \frac{T \cdot E}{\pi \cdot U_m}$$

Відповідно, тривалість фронту вихідної напруги тим менше, чим менше відношення E/U_m . Шляхом багаторазового обмеження і наступного підсилення можна отримати напругу з дуже крутими фронтами.

Якщо вхідна синусоїдальна напруга генерується високостабільним генератором, то період слідування і часове положення фронтів вихідної напруги також високостабільні. Тому зазначений метод формування прямокутної напруги широко застосовується для отримання (шляхом наступного диференціювання цієї напруги) масштабних маркерних міток часу в різних індикаторних пристроях.

Методичні вказівки

1. При виконанні лабораторної роботи на вхід складеної схеми слід подавати сигнал від звукового генератора з частотою 1кГц.
2. Вихідний сигнал треба контролювати осцилографом.
3. Номінальні значення елементів схем приведені на рисунках.
4. Амплітуду сигналу треба підбирати експериментально.
5. В якості джерел опорної напруги в лабораторній роботі використовується падіння напруги на відкритому діоді, яке дорівнює 0,6-0,7 В.

Порядок виконання роботи

1. Скласти схеми, зображені на рис. 65 та 66, які являють собою послідовні діодні амплітудні обмежувачі по мінімуму та по максимуму з порогом обмеження 0 В. Подати на вхід схеми сигнал від звукового генератора. Намалювати в масштабі осцилограми вихідної напруги.

2. Скласти схеми послідовних діодних обмежувачів по мінімуму та максимуму, які зображені на рис. 67 та 68. В якості джерела постійної напруги, яке визначає поріг обмеження, в цих схемах використовується напруга на відкритому діоді, яка дорівнює 0,6-0,7 В. Подати на вхід схеми сигнал від звукового генератора та намалювати в масштабі осцилограми вихідної напруги.

3. Скласти схеми, зображені на рис. 69 та 70, які являють собою паралельні діодні амплітудні обмежувачі по мінімуму та по максимуму. Подати на вхід схеми сигнал від звукового генератора та намалювати в масштабі осцилограми вихідної напруги.

4. Скласти схему паралельного діодного обмежувача, зображену на рис. 71. Подати на вхід схеми сигнал від звукового генератора і накреслити в масштабі осцилограми вихідної напруги.

5. Скласти схеми односторонніх паралельних діодних обмежувачів, які зображені на рис. 72 та 73. Поріг обмеження у цих схемах задається падінням напруги на відкритих діодах. Подати на вхід схеми сигнал від звукового генератора і накреслити в масштабі осцилограми вихідної напруги.

6. Скласти схему двостороннього паралельного діодного обмежувача, зображену на рис. 74. Подати на вхід схеми сигнал від звукового генератора і накреслити в масштабі осцилограми вихідної напруги.

Контрольні запитання

1. Що таке амплітудний обмежувач і де вони використовуються?
2. Які типи амплітудних обмежувачів вам відомі?
3. Напишіть вираз, який визначає вихідний сигнал:
 - а) обмежувача по максимуму,
 - б) обмежувача по мінімуму,
 - в) двостороннього обмежувача
4. Покажіть на рис. 65-74 схеми обмежувачів по мінімуму, обмежувачів по максимуму, двосторонніх обмежувачів.

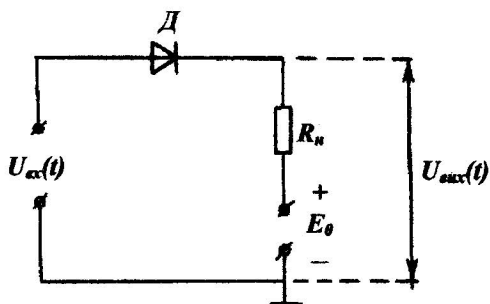


рис.50

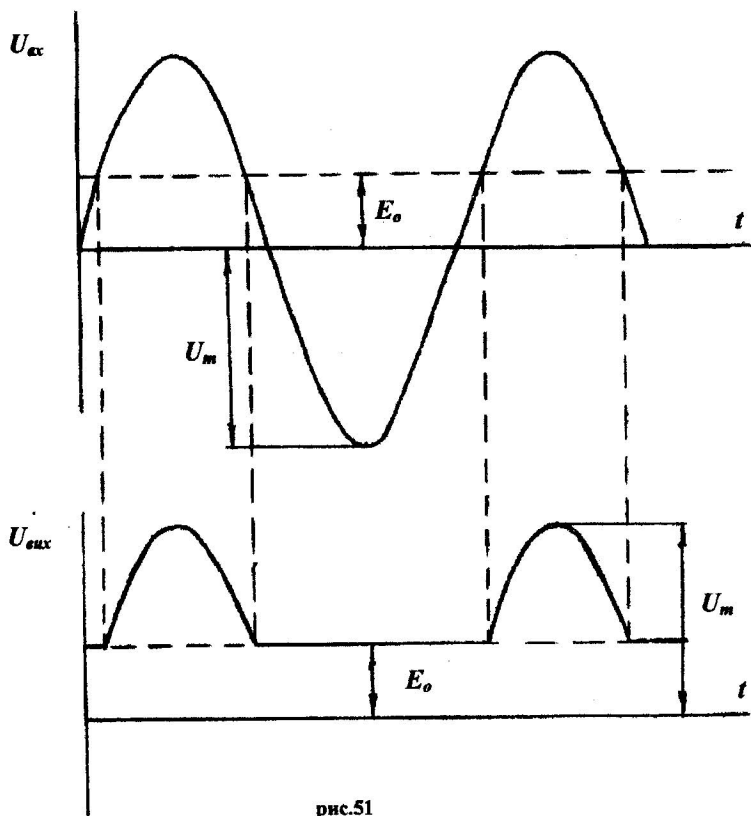


рис.51

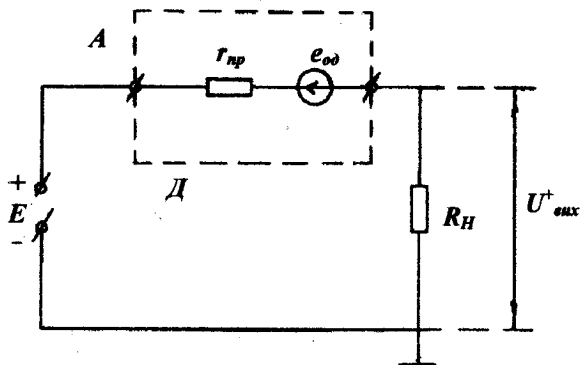


рис.52

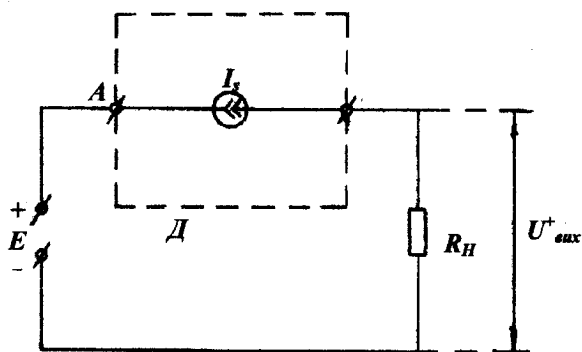


рис.53

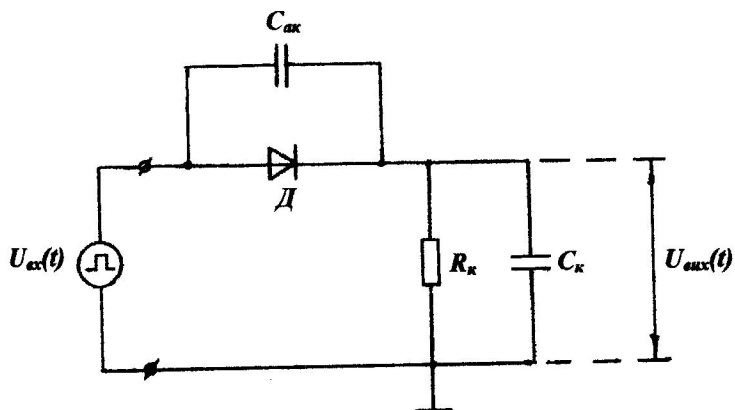


рис.54

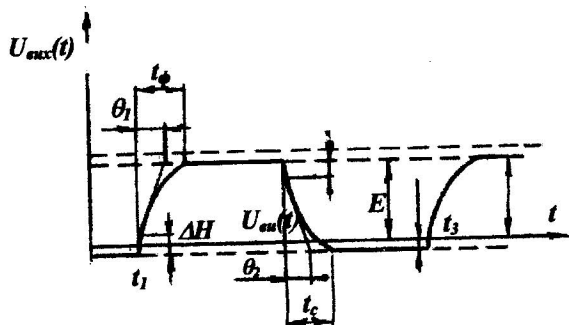
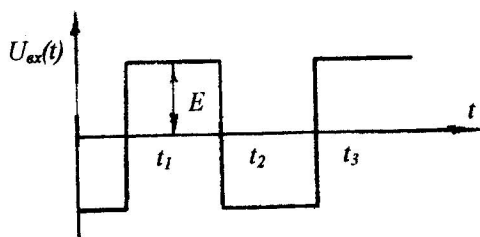


рис.55

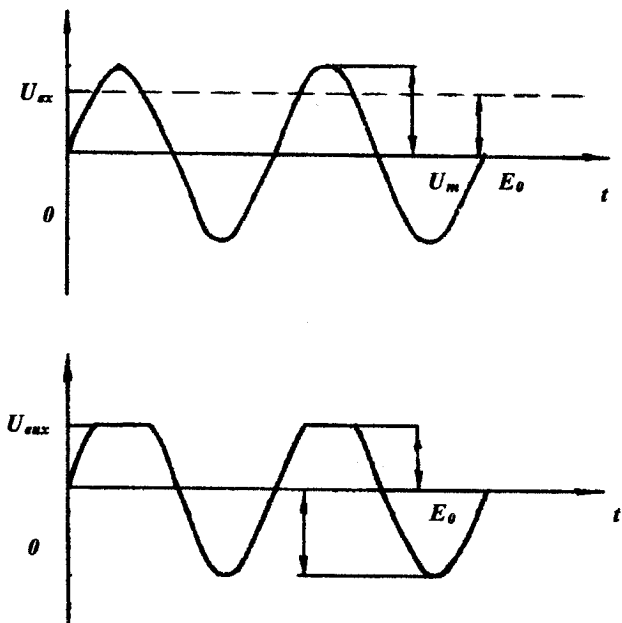
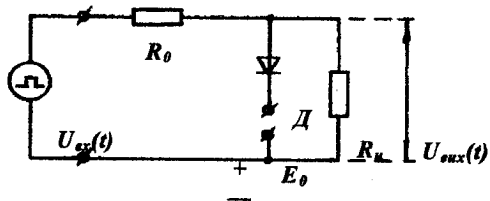


рис.57

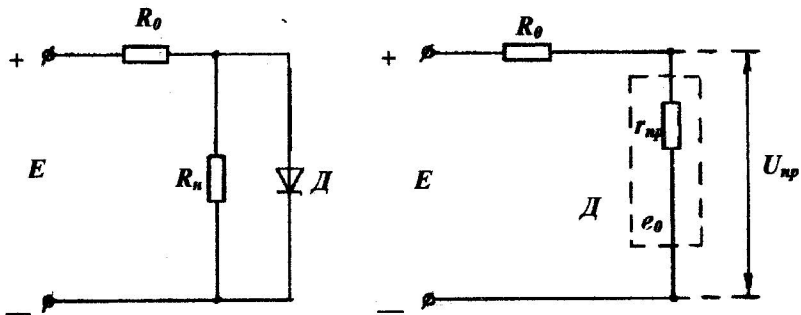


рис.58

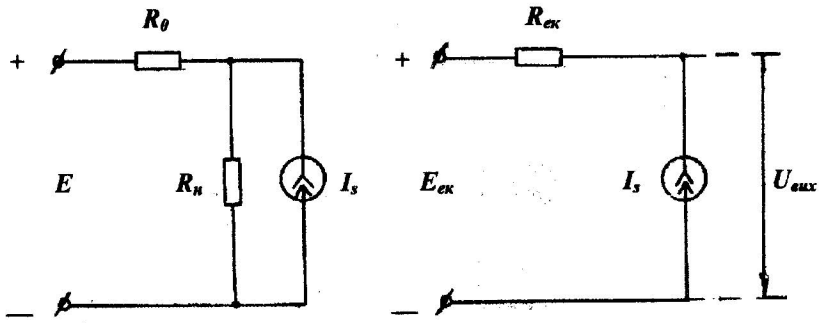


рис.59

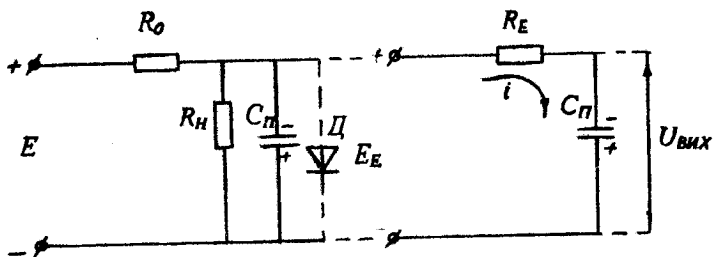


Рис.60

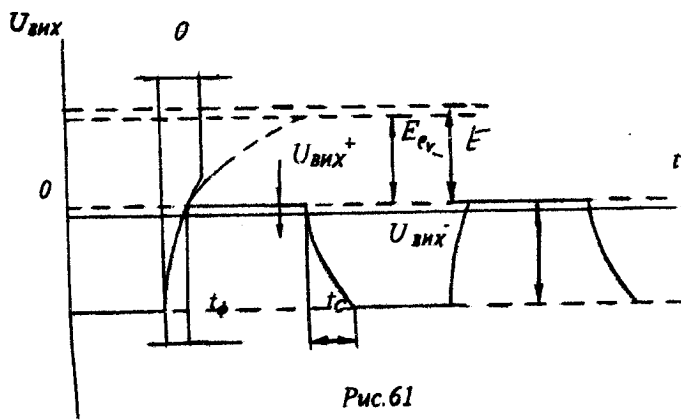
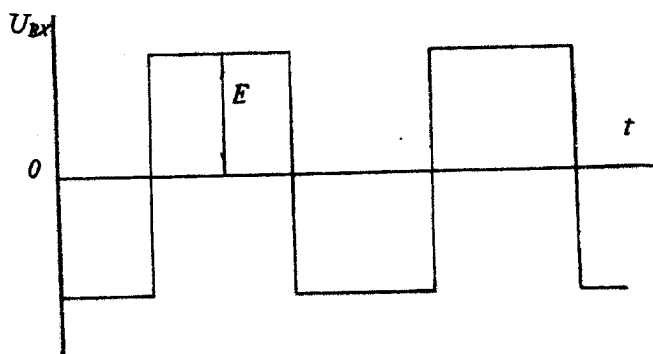


Рис.61

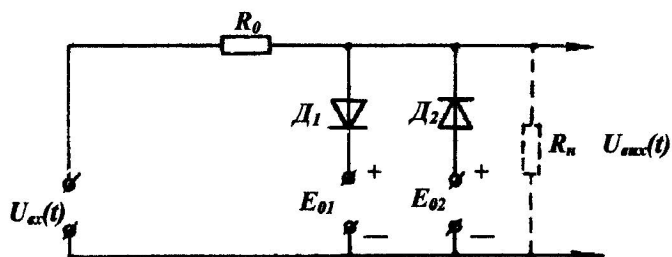


рис.62

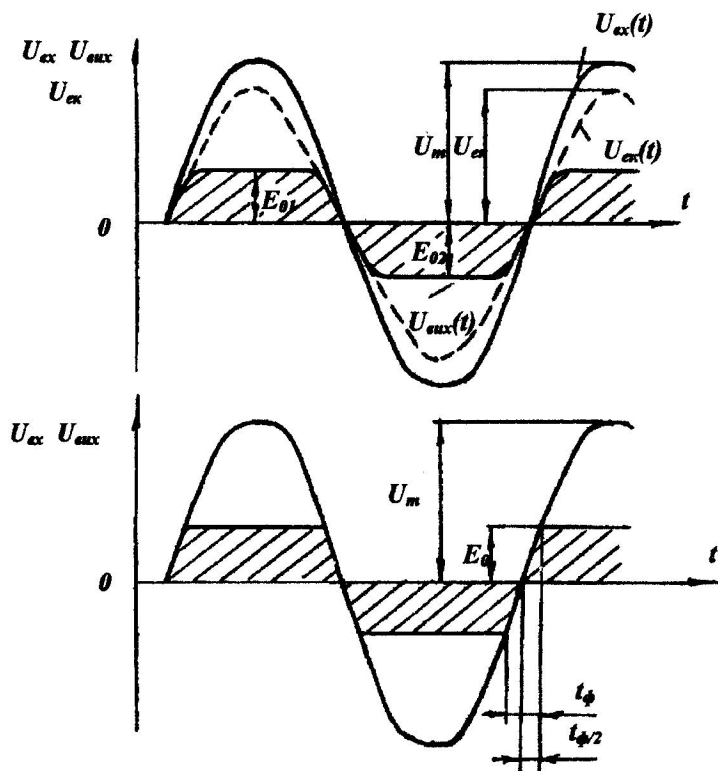


рис.63

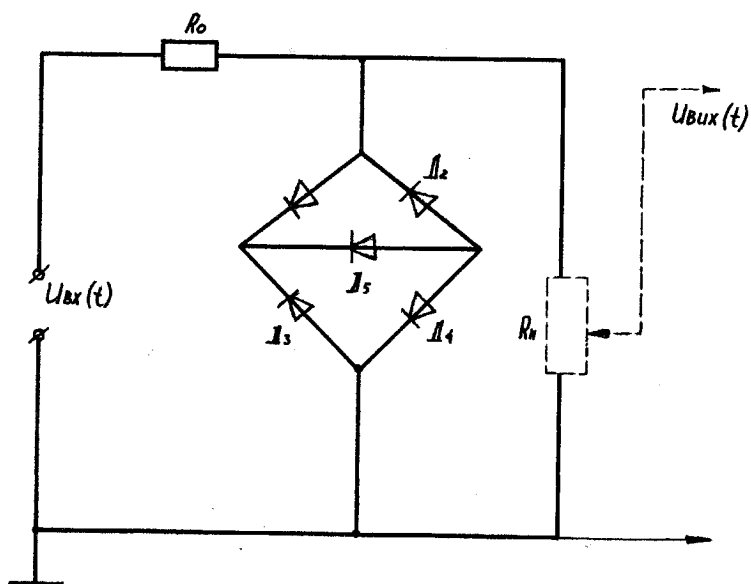


рис. 64

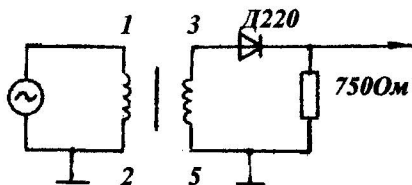


рис.65

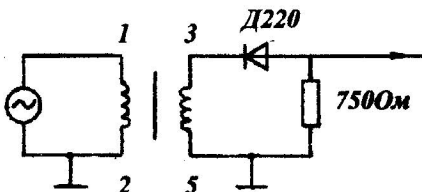


рис.66

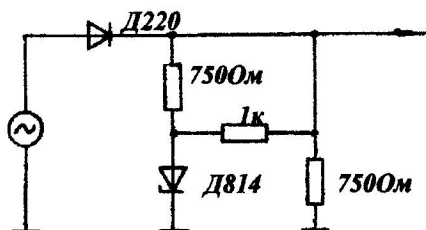


рис.67

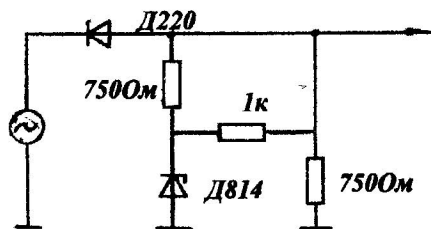


рис.68

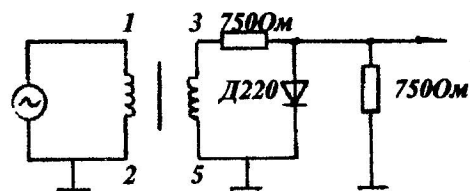


рис.69

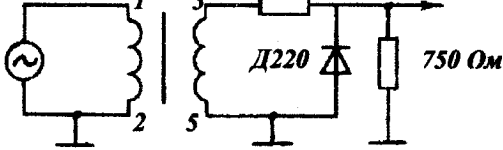


рис.70

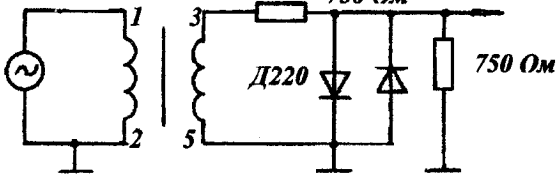


рис.71

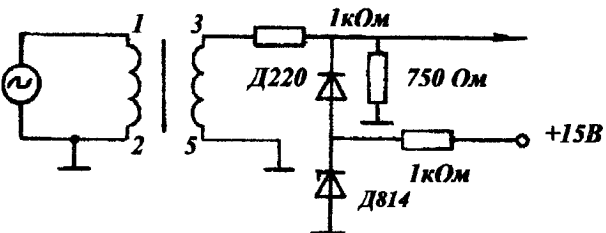


рис.72

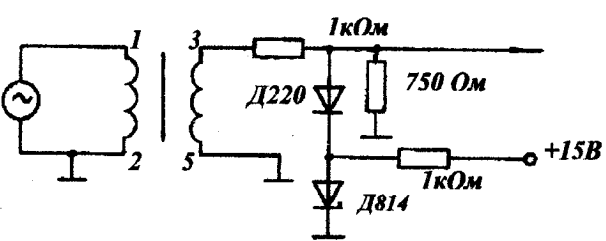


рис.73

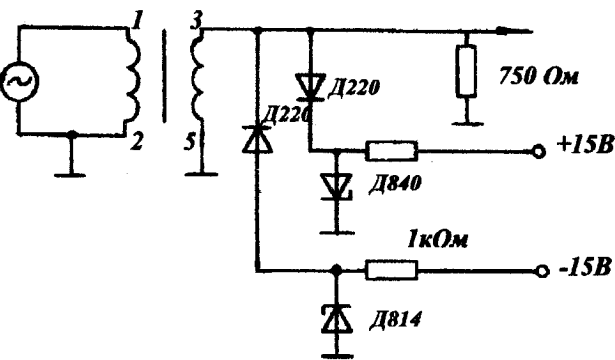


рис.74

4.9 ДОСЛІДЖЕННЯ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Мета роботи: вивчення принципу дії та основних властивостей, дослідження характеристик, ознайомлення з основними параметрами та використанням транзистора.

Теоретичні відомості та методичні вказівки

Транзистором називається електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з дірочно-електронними переходами, який використовується для підсилення потужності. Найбільш розповсюджені - це біполярні та польові транзистори.

На рис.75 приведені умовні графічні позначення транзисторів. Відмінності в маркуванні транзисторів та напівпровідникових діодів у тому, що другий елемент містить літеру Т для біполярних та П-для польових транзисторів.

Біполярні транзистори /БТ/. БТ з'явилися першими у сім'ї транзисторів, тому їх часто називають просто транзисторами. Термін 'біполярний' характеризує участь в роботі транзистора носіїв заряду двох полярностей: електронів та дірок. Умовні позначення р-п-р та п-р-п БТ приведені на рис. 75, а і б.

БТ являє собою структуру р-п-р або п-р-п типу, одержану в одному монокристалі напівпровідника /рис.76,а та в/. Внутрішня частина, яка розділяє р-п переходи, називається базою. Зовнішній шар, призначений для інжектування носіїв у базу, називається емітером, а р-п-перехід ПІ, що прилягає до емітера, -емітерним. Другий зовнішній шар, екстракуючий /витягуючий/ носії з бази, -колектор, а р-п перехід ПІІ-колекторним. Для виготовлення біполярних транзисторів у якості вихідних матеріалів в основному використовують кремній або германій, а р-п-перехід одержують при сплавної, дифузійній, епітаксильній, планарній або інших технологіях. Перші транзистори були точковими, але вони працювали нестабільно, тому в наш час використовують переважно площинні транзистори. Основними їх особливостями являється те, що товщина бази повинна бути менша дифузійної довжини пробігу неосновних носіїв, інжекттованих з емітера в базу / декілька мікрметрів /, емітер повинен містити значно більшу концентрацію домішок, ніж база, а площа колекторного переходу повинна буде більшою, ніж емітерного.

Транзистор - активний що елемент, підсилюючий потужність електричного сигналу. Підсилення відбувається при споживанні енергії від зовнішніх джерел живлення. Змінюючи струм у входному ланцюзі по визначеному закону, можна одержати підсилений сигнал на вході тієї ж форми.

В електричне коло транзистор включають так, що один з його виводів /електродів/ являється вхідним, другий - вихідним, а третій- загальний для вхідного і вихідного ланцюгів. В залежності від того, який електрод вважають загальним, розрізняють три схеми включення транзисторів: з загальною базою ЗБ, з загальним емітером ЗЕ та загальним колектором ЗК. Ці схеми для транзистора типу р-п-р зображені на рис. 77.

Для транзистора п-р-п у схемах включення змінюються лише полярність напруг та напрямок струмів.

Необхідно пам'ятати, що в підсилювальному режимі роботи транзистора, його емітерний перехід зміщений у прямому напрямку, а колекторний - у зворотному, незалежно від схеми вмикання.

Найбільш розповсюдженою є схема з ЗЕ /рис. 77,б/, яка має найбільше підсилення потужності. Кожна схема включення, в загальному випадку, характеризується чотирма сім'ями статичних ВАХ: а- вхідними; б- вихідними; в- характеристиками зворотного зв'язку по напрузі; г- характеристиками передачі за струмом. Перші дві з них є основними. На рис. 78 приведені: а- вхідні; б- вихідні характеристики схеми з ЗЕ.

Статистичні ВАХ /рис. 4/ знімають при відсутності опору /рис. 79,а/ говорять про динамічний режим роботи транзистора. У такому режимі зміна колекторного струму при $E_k = \text{const}$ та $R_k = \text{const}$ залежить не лише від змін базового струму, але й від зміни напруги на колекторі

$$|U_{ke}| = |E_k| - |I_k R_k|, \quad (1)$$

яка в свою чергу, визначається змінами як базового, так і колекторного струмів, таким чином у динаміці одночасно змінюються усі струми та напруги в транзисторі / I_b , I_k , U_{ke} , I_k /.

Характеристики, які визначають зв'язок між струмами і напругами транзистора при наявності опору навантаження, називаються динамічними, вони будуються на сім'ї ВАХ при заданих значеннях E_k та R_k . Для побудови динамічної вихідної характеристики схеми з ЗЕ /рис. 79,б/ використовується рівняння динамічного режиму /1/. Точка перетину динамічної характеристики /навантажувальної прямої/ з однією із статичних ВАХ називається робочою точкою транзистора /точка Р/. Змінюючи I_b , можна переміщувати її по навантажувальній прямій. Початкове положення цієї точки при відсутності вхідного змінного сигналу називають точкою спокою- P_0 . Існують три основних режими роботи транзистора: активний /лінійний, підсилювальний/, насичення та відсічки. Поняття режиму пов'язано з наявністю трьох областей у транзистора: активної, насичення та відсічки. На рис. 79, б вони позначені відповідно I, II, III. Область відсічки обмежена зверху ВАХ відповідної $I_b = -I_{k0}$ /обидва п-н переходи транзистора закриті/. Область насичення обмежена справа прямою лінією, з якої виходять статичні ВАХ (обидва п-н переходи відкриті). Активна область лежить між

областями відсічки та насичення (емітерний перехід відкритий, а колекторний закритий). В активному режимі точка спокою транзистора P_0 знаходиться приблизно на середині ділянки прямої навантаження MN . (рис.79,б), робоча точка не виходить за межі ділянки MN . У режимі насичення робоча точка знаходиться в області насичення, а в режимі відсічки - відповідно в області відсічки. Активний режим є основним. Він використовується в більшості підсилювачів, генераторів тощо.

Режими відсічки та насичення характерні для імпульсної роботи транзистора, вони використовуються в імпульсних пристроях.

Характеристичні параметри транзистора можна знайти, якщо формально зобразити його у вигляді активного лінійного чотирьохполосника (рис.80 а,б), а зв'язок між напругами та струмами на його вході та виході зобразити у вигляді системи рівнянь :

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2,$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2,$$

де $h_{11} = U_1/I_1$; і $h_{21} = I_2/I_1$; - вхідний опір та коефіцієнт передачі (підсилення) за струмом, вони визначається у режимі короткого замикання за змінним струмом на виході транзистора, $U_2 = 0$; $h_{12} = U_1/U_2$; і $h_{22} = I_2/U_2$; - коефіцієнт зворотного зв'язку по напрузі та вихідна провідність, які визначаються в режимі холостого ходу XX на вході транзистора ($I_1 = 0$). Для реалізації режиму XX на вході та к.з. на виході достатньо влючити більшу індуктивність на вході транзистора та більшу ємність на виході, не змінюючи при цьому вибраного режиму роботи за постійним струмом.

Приблизно значення h -параметрів можна визначити графоаналітичним методом на лінійних ділянках вхідних та вихідних статичних характеристик транзистора. Для визначення всіх h -параметрів необхідно мати не менше двох характеристик кожної сім'ї (вхідних та вихідних). Параметри розраховуються за кінцевими приростами струмів та напруг біля робочої точки транзистора. В цьому випадку для схеми з загальним емітером справедливі такі рівняння:

$$\Delta U_{6e} = h_{11}\Delta I_6 + h_{12}\Delta U_{ке},$$

$$\Delta I_к = h_{21}\Delta I_6 + h_{22}\Delta U_{ке}, \quad (3)$$

де $h_{11} = |\Delta U_{6e} / \Delta I_6|$; $\Delta U_{ке} = \text{const}$; $h_{21} = |\Delta I_к / \Delta I_6|$; $\Delta U_{ке} = \text{const}$
 $h_{12} = |\Delta U_{6e} / \Delta U_{ке}|$; $\Delta I_к = \text{const}$; $h_{22} = |\Delta I_к / \Delta U_{ке}|$; $\Delta I_6 = \text{const}$.

Наприклад, для визначення параметрів h_{11} та h_{12} схеми з ЗЕ на сім'ї вхідних характеристик у робочій точці А будують трикутник АВС (із А проводять прямі, паралельні осі абсис та осі ординат до перетину з другою характеристикою в точках В та С), рис.80,в. З одержаного

характеристичного трикутника знаходять всі значення, необхідні для визначення h_{11} та h_{12} :

$$\begin{aligned} h_{11} &= \left| \frac{\Delta U_{6e}}{\Delta I_6} \right| = AB/AC; \\ h_{12} &= \left| \frac{\Delta U_{6e}}{\Delta U_{кe2}} \right| = AB/[U_{кe2} - U_{кe1}], \end{aligned} \quad (4)$$

У робочій точці A' на вихідних характеристиках (рис. 80,г) визначають параметри h_{22} та h_{21} :

$$h_{21} = \left| \frac{\Delta I_k}{\Delta I_6} \right| = \frac{AD}{I_{62} - I_{61}}; h_{22} = \frac{\Delta I_k}{\Delta U_{кe}} = \frac{BC}{AB} \quad (5)$$

Аналогічно можна визначити h - параметри для схеми з ЗБ.

Частотні властивості БТ. Фізична Т- подібна еквівалентна схема БТ на високих частотах містить ємності C_x та C_e , які шунтують колекторний та емітерний переходи. Тому властивості транзисторів залежать від частоти підсилювальних сигналів. Особливо сильно на роботу БТ в області високих частот впливає ємність C_x . Оскільки її ємнісний опір $X_{cx} = 1/\omega b C_x$ виявляється значно меншим, ніж опір зворотно зміщеного колекторного переходу r . Це приводить до зменшення струму, що віддається на навантаження і до зменшення коефіцієнта передачі струму h_{216} у схемі з ЗБ та коефіцієнта підсилення струму h_{21e} в схемі з ЗЕ граничною вважається частота, при якій модуль коефіцієнта передачі (підсилення) струму зменшується на 3дБ у порівнянні з значенням на середніх частотах. Вона позначається $f_{h_{216}}$ для схеми з ЗБ та $f_{h_{21e}}$ для схеми з ЗЕ /рис.80,д/. Параметри h_{21e3} та h_{2163} відповідають значенням коефіцієнтів підсилення струму на середніх частотах. При збільшенні частоти коефіцієнт h_{21e} зменшується значно сильніше, ніж h_{216} , тому схема з ЗЕ має значно гірші частотні властивості у порівнянні зі схемою з ЗБ:

$$f_{h_{21e}} = f_{h_{216}} / h_{21e}. \quad (6)$$

Властивості транзисторів сильно залежать від температури

Збільшення температури, в першу чергу, збільшує зворотний струм насичення колекторного переходу /початковий струм колектора /. Це приводить до змін характеристик транзистора. Тому часто у схемах на транзисторах використовують елементи температурної стабілізації.

При конструктивному виконанні транзисторних схем /особливо потужних/ необхідно передбачати дії по підведенні тепла від транзистора.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Підготовка до роботи

1. У лабораторній роботі досліджується сім'я вхідних та вихідних характеристик кремнієвого транзистора типу КТ312.

2. Спочатку необхідно виписати з довідника електричні параметри досліджуваного транзистора.

3. Дослідження проводяться при включенні транзистора по схемі з ЗЕ та ЗБ.

Для схеми з ЗЕ

4. Вхідні статичні характеристики $I_b = f(U_{be})$ при $U_{ce} = \text{const}$ знімають по схемі, зображеній на рис 81, де $R_1 = 4,7 \text{ кОм}$, $R_2 = 10 \text{ кОм}$

Примітка: крапки у кружках на рис.81, наприклад 1+5 відповідають позначенням на лабораторному стенді.

Дослідження проводять при: $E_{ce} = 0$ /для цього колектор транзистора та емітер заземляються/; і $E_{ce} = 15$ /для цього колектор з'єднують з точкою 3/.

5. Вхідні статичні характеристики $I_c = f(U_{ce})$ при $I_b = \text{const}$ знімають по схемі, зображеній на рис 82.

У цій схемі $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $R_3 = 4,7 \text{ кОм}$.

Резистор R_2 повинен приймати конкретне фіксоване значення в діапазоні $30 \text{ кОм} : 1,5 \text{ МОм}$.

Число значень не менше 5.

Величина бази струму може бути визначена за формулою

$$I_b = E_{b\beta} / (R_1 + R_2), \quad (7)$$

або виміряна експериментально шляхом послідовного включення в базове коло амперметра.

Для схеми з ЗБ

6. Вхідні статичні характеристики $I_e = f(U_{e\beta})$ при $U_{ce} = \text{const}$ знімають по схемі, зображеній на рис 83.

У вказаній схемі $R_1 = 1 \text{ кОм}$, значення резистора R_2 вказує викладач, причому, число значень не менше п'яти, межі зміни номіналу від 2,4 до 30 кОм .

7. Вихідні статичні характеристики $I_c = f(U_{ce})$ при $I_e = \text{const}$ знімають по схемі, зображеній на рис.84.

У вказаній схемі $R1 = 1 \text{ кОм}$, $R3 = 4,7 \text{ кОм}$, $R2$ приймає ті ж дискретні значення, що і в попередній схемі.

Виконання роботи

1. Зібрати схему (рис.81) і зняти вхідні статичні характеристики транзистора, підключеного по схемі з ЗЕ для $E_{кe} = 0 \text{ В}$ та 15 В . Точку 2 або 5 на стилі не забудьте з'єднати з точкою 4.

Для проведення досліджень при $E_{кe} = 0 \text{ В}$ необхідно колектор транзистора заземлити.

2. Зібрати схему (рис.82) і зняти вихідні статичні характеристики транзистора при різних значеннях струму бази фіксовані значення базового струму I_b взяти з попереднього досліджу.

3. Зібрати схему (рис.83) і зняти вхідні статичні характеристики транзистора, включеного по схемі з ЗБ для $E_{к6} = 0 \text{ В}$ та 15 В .

4. Зібрати схему (рис.84) та зняти вихідні статичні характеристики. Струм емітера задається резистором $R2$. Його значення визначте з попередніх досліджень.

5. По сім'ях вхідних статичних характеристик транзистора, ввімкненого по схемах з ЗЕ та ЗБ визначте відповідно параметри: h_{11e} , h_{12e} та h_{11b} , h_{12b} .

6. По сім'ях вихідних статичних характеристик транзистора, підключеного по схемах з ЗЕ та ЗБ, визначте відповідно параметри: h_{21e} , h_{22e} , h_{21b} , h_{22b} .

7. Взявши за основу експериментальні значення h -параметрів розрахувати h -параметри транзистора по схемі з ЗК. Для виконання цих розрахунків необхідно використати формули (8)-(11).

Контрольні запитання

1. Опишіть принцип дії БТ, приведіть його схеми включення та статичні ВАХ.

2. Які три області (режими) роботи має БТ.

3. Як визначити h -параметри БТ по його ВАХ.

4. Як визначити фізичні параметри БТ через його h -параметри.

5. Чим визначаються частотні властивості БТ.

$$h_{11k} = (1 + h_{21e}) h_{11b} \quad (8)$$

$$h_{12k} = \frac{1}{1 + h_{12e}} \quad (9)$$

$$h_{21k} = -(1 + h_{21e}) \quad (10)$$

$$h_{22k} = h_{21e} * h_{22e} \quad (11)$$

Примітка: результати проведених досліджень необхідно оформити в табличному та графічному варіантах.

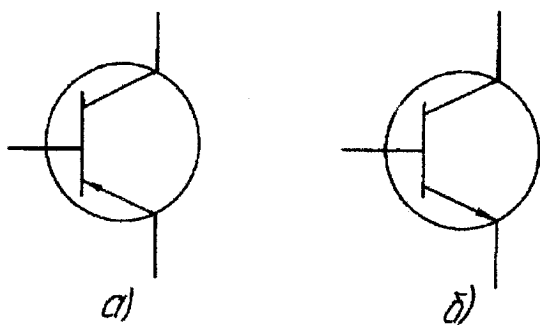


рис.75

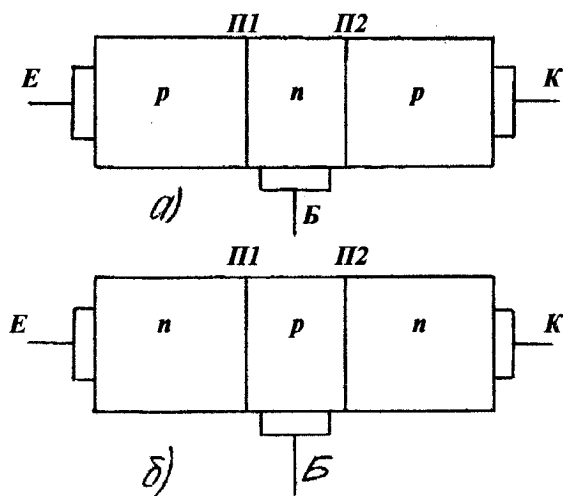
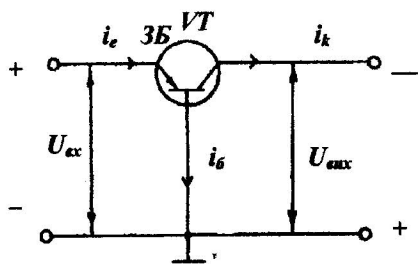
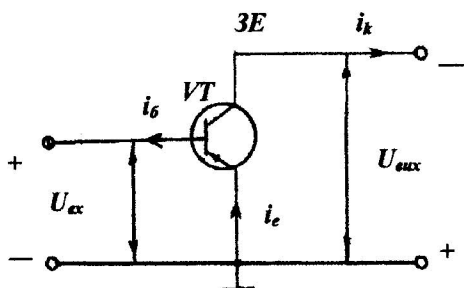


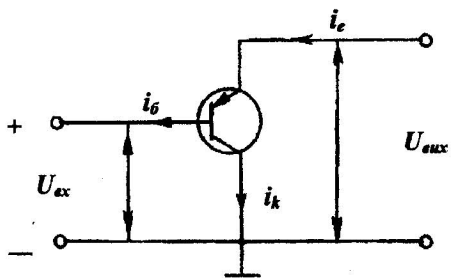
рис.76



a)

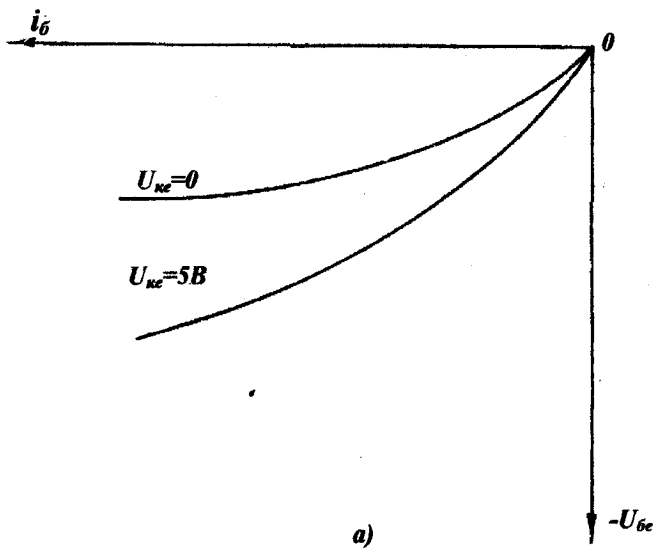


б)

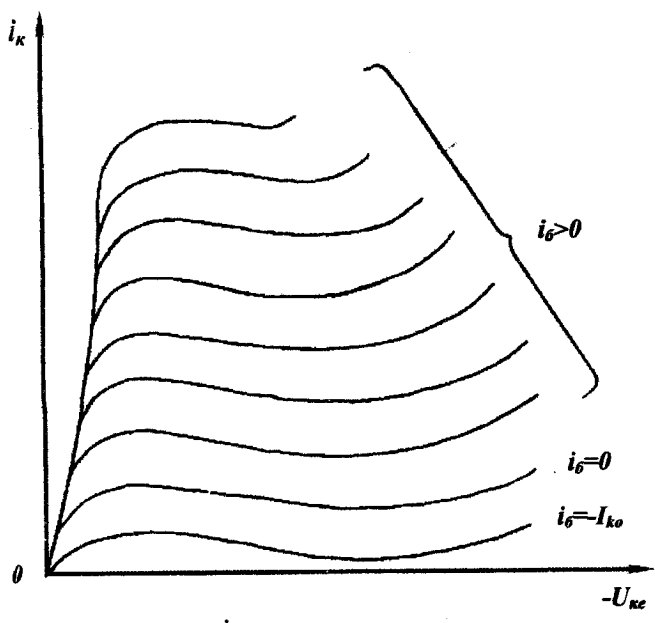


в)

рис.77

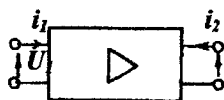


a)

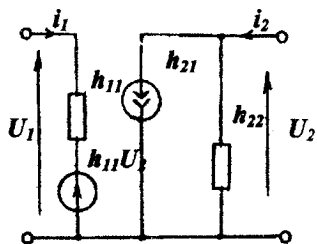


б)

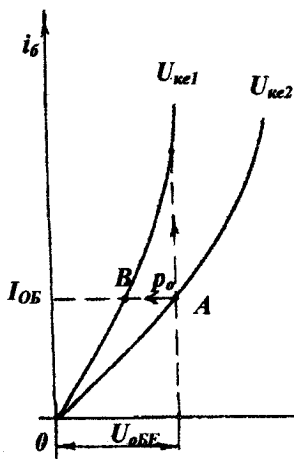
рис. 78



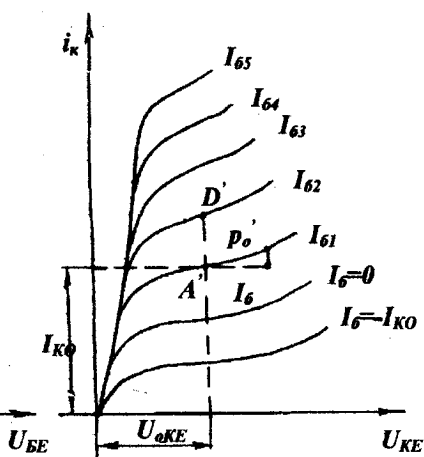
а)



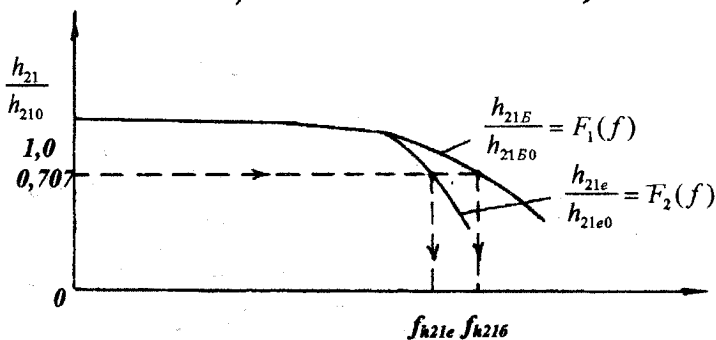
б)



в)



г)



д)

рис.80

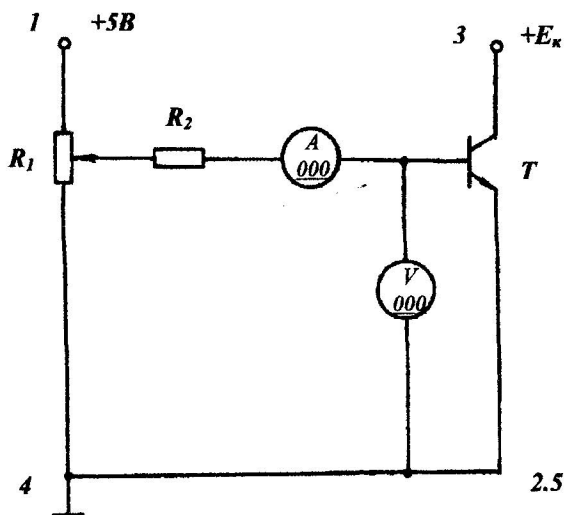


рис.81

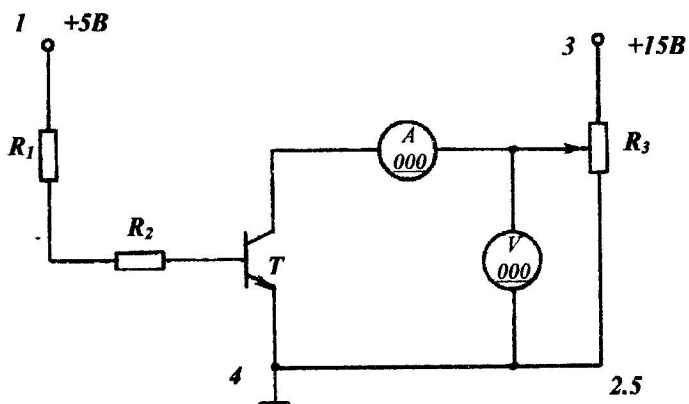


рис.82

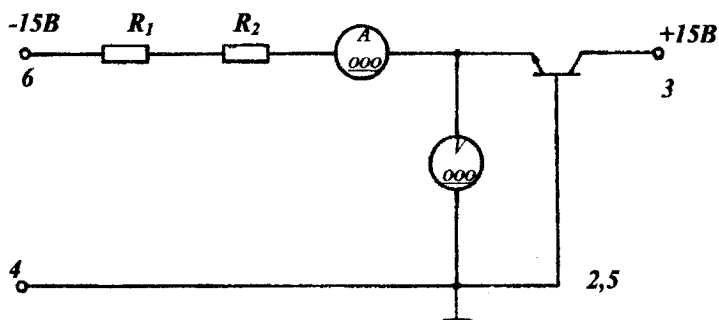


рис.83

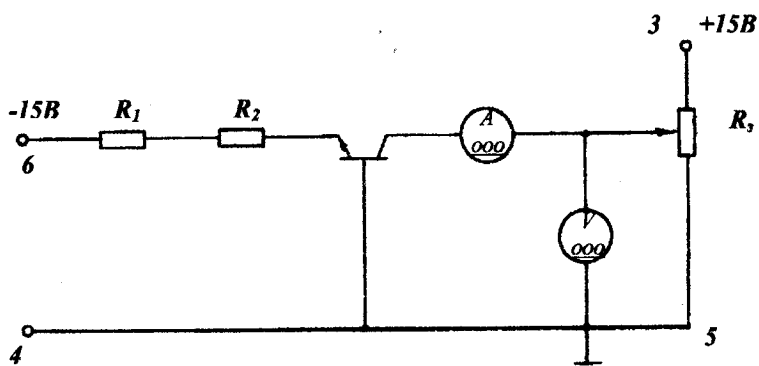


рис.84

4.10. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Мета роботи: вивчення принципу дії та основних властивостей, дослідження характеристик, ознайомлення з основними параметрами та використанням польових транзисторів.

Теоретичні відомості

Польовий транзистор (ПТ) (рис. 85 а, б, в, г, д, е) - це транзистор, в якому струм створюють основні носії заряду під дією поперечної електричного поля, а управління струмом виконується поперечним полем і створюється напругою на управляючому електроді, який називається затвором. ПТ-уніполярні напівпровідникові пристрої, оскільки їх робота базується на дрейфі носіїв заряду одного знаку в поперечному електричному полі через керований канал n або p-типу. Електрод польового транзистора, через який з каналу виходять носії заряду, називають стоком, а через який входять - виток. Для виготовлення ПТ в основному використовується кремній, який має значно менший зворотний струм насичення, ніж германій. В електронних приладах використовуються дві різновидності ПТ:

- з затвором у вигляді р-п переходу,
- з ізольованим затвором / МДН або МОН - транзистори/.

В залежності від провідності каналу польові транзистори розділяються на:

- ПТ з каналом р-типу,
- ПТ з каналом n-типу.

Канал р-типу має діркову провідність, n-типу - електронну. На рис. 86 а, б як приклад зображена структура та схема включення ПТ з затвором у вигляді р-п переходу та каналом n-типу.

На затвір подається напруга зворотної полярності відносно витку. Ширина р-п-переходів і відповідно, ефективна площа перерізу каналу визначає його опір та струм в каналі. Ці процеси характеризує стокозатвірна характеристика /характеристика передачі/ ПТ. При напрузі відсічки між затвором та витком $U_{зв} = U_{зв.від}$. Канал практично закривається, ефективна площа його поперечного перерізу прямує до нуля, опір каналу - до нескінченності, а струм стока - до нуля /рис. 86, в/. Необхідно звернути увагу, що ПТ з затвором у вигляді р-п переходу працює при напрузі управління на затворі лише однієї полярності /для каналу типу n - від'ємної, а типу р - додатньої/.

На рис. 86 приведені стоківі /вихідні/ характеристики ПТ, який розглядається. Стокові характеристики мають сильно виражений участок насичення. Це пояснюється тим, що в процесі протікання струму в каналі,

який на початку зростає при збільшенні $U_{св}$, збільшується падіння напруги в каналі. Це падіння в області стоку має знак "+" і зміщує р-п-переходи в зворотному напрямку. Через це переріз каналу починає зменшуватись. Відбувається перекриття каналу (спочатку в області стоку, а потім поширюється у глибину до витоку, рис. 86, а). Це приводить до того, що величина струму стоку практично постійна при збільшенні $U_{св}$.

У робочому режимі використовуються плавні (лінійні) участки вхідних характеристик ПТ. При великих напругах на стокові може виникнути пробій структури ПТ. Тому в робочому режимі перевищення максимальної напруги $U_{св.проб.}$ недопустимо. Границями області насичення є (рис. 86, г) $U_{св.нас.}$ та $U_{св.проб.}$.

У ПТ з ізолюваним затвором, які називають також МДН (метал-діелектрик-напівпровідник) або МОН (метал-оксид-напівпровідник) між металевим затвором та областю напівпровідника знаходиться шар діелектрика, у якості якого часто використовують двооксид кремнію SiO_2 . Існують дві різновидності МДН(МОН) ПТ:

- з вбудованим каналом (рис. 86, д, а);
- з індукованим каналом (рис. 85, ж, з).

Спрощена структура МДНПТ з вбудованим каналом п-типу показана на рис. 87, а. Наявність шару діелектрика дозволяє подавати на затвір напругу управління обох полярностей. При подачі на затвір додатньої напруги, електричним полем, яке при цьому створюється, дірки з каналу будуть виштовхуватись у підкладинки, а електрони витягуватись з підкладинки у канал. Канал збагачується основними носіями заряду - електронами, його провідність збільшується. Цей режим називається режимом збагачення (рис. 87, б). При подачі на затвір від'ємної напруги електрони з каналу виштовхуються у підкладинку, а дірки втягуються з підкладинки в канал. Канал збіднюється основними носіями заряду і його провідність зменшується. Такий режим називається режимом збіднення. На рис. 87, в приведені вихідні (стокові) ВАХ такого транзистора.

У МОН ПТ з індукованим каналом, на відмінінсть від ПТ з вбудованим каналом, канал між областями витоку та стоку, при виготовленні транзистора технологічно не створюється, а індукується в результаті явища інверсії, яке виникає у системі метал-діелектрик-напівпровідник або метал-оксид-напівпровідник. У ПТ з індукованим каналом управління відбувається напругою затвору лише одного знаку. На рис. 87, г, д, е приведені відповідно структура МОН ПТ з індукованим каналом п-типу, який управляється додатньою напругою на затворі, його стоко-затвірна та вихідна характеристики.

Подібно біполярним транзисторам ПТ можна підключати в електричний ланцюг по одній з трьох схем:

- ЗВ - загальним витоком,
- ЗЗ - загальним затвором,

ЗС - загальним стоком.

Основною являється схема включення ПП з загальним витоком (рис. 86, б).

Польові транзистори мають наступні основні властивості: низький рівень власних шумів (відсутній комбінаційний флукуаційний шум, характерний для біполярних транзисторів), високий вхідний опір (у МОН ПП складає тисячі МОм), висока економічність (управляється не струмом, як БТ, а напругою (полем)), висока стійкість до дії іонізуючого випромінювання, можливість використання МОН ПП для побудови високоекономічних інтегральних схем з великим ступенем інтеграції, менша, ніж у БТ залежність параметрів від температури, низький рівень нелінійності характеристик.

Недоліком МОН ПП являється те, що вони можуть вийти з ладу при випадковому виникненні на затворі статичних електричних зарядів.

ПП використовуються для роботи у вхідних підсилювальних каскадах з великим вхідним опором, в запам'ятовуючих пристроях, при виготовленні інтегральних схем з високим ступенем інтеграції та інше.

Методичні вказівки до виконання роботи

При дослідженні та зніманні множини вихідних (стокових) ВАХ та стоко-затвірної характеристики польового транзистора 2ГВ03Г (з затвором на основі р-п переходу та каналу n-типу) використовувати схему, зображену на рис. 88.

При цьому використовувати змінні резистори СП4-2М 220 Ом (R1 на рис.88) та СП4-2М 4,7 кОм (R2 на рис.88).

Для забезпечення необхідного живлення досліджуваної схеми точки 1 і 2 лабораторного стенду необхідно з'єднати (точка 6 не використовується).

Виводи ПП 2ГВ03Г позначаються такими кольорами:

- білий - затвір,
- червоний - стік,
- синій - витік.

При зніманні характеристик використовувати комбіновані цифрові прилади.

Для знімання сім'ї стокових характеристик використовувати амперметр А та вольтметр V2 (при зніманні стоко-затвірної характеристики - амперметр А та вольтметр V1).

Порядок виконання роботи

1. При допомозі довідника визначити основні та максимально допустимі параметри досліджуваного транзистора.

2. Використовуючи одержані елементи, зібрати схему (рис. 88) для дослідження характеристик ПТ.

3. Зняти стоко-затвірну характеристику ПТ $I_c = f(U_{зв})$ при постійній напрузі $U_{св} = 15В$ (R_2 в крайньому положенні). По знятій характеристиці визначити напругу відсічки $U_{зв.відс.}$

4. Зняти сім'ю вихідних (стокових) характеристик ПТ $I_c = f(U_{св})$ при $U_{зв} = 0В, -1В, -2В, -3В, -4В$.

5. Використовуючи одержану стоко-затвірну характеристику ПТ, визначити крутизну характеристики за формулі $S = \Delta I_c / \Delta U_{зв}$ при $U_{св} = const$, а $U_{зв} = 0.5 U_{зв.відс.}$

6. Визначити вихідний опір $R_{вих}$ (визначити на початку режиму насичення): $R_{вих} = \Delta U_{св} / \Delta I_c$, при $U_{зв} = const$.

Контрольні запитання

1. Назвіть типи польових транзисторів і опишіть особливості їх структури.

2. Перелічіть основні параметри ПТ і особливості їх використання.

3. Поясніть присутність ділянки насичення струму стоку I_c на вихідних ВАХ польових транзисторів.

4. Приведіть ВАХ ПТ з р-п переходами і МДН ПТ, дайте порівняльну характеристику.

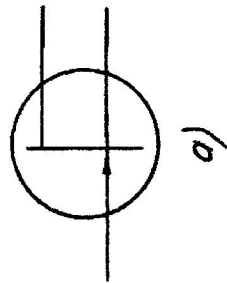
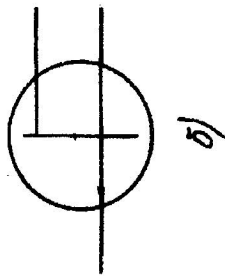
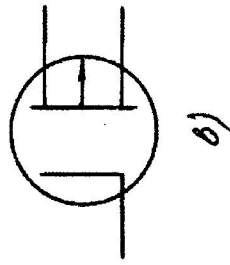
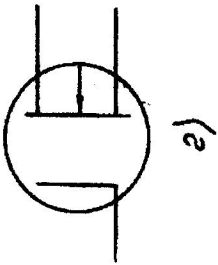
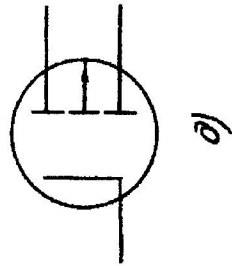
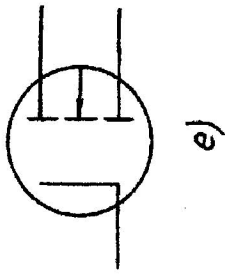


рис. 85

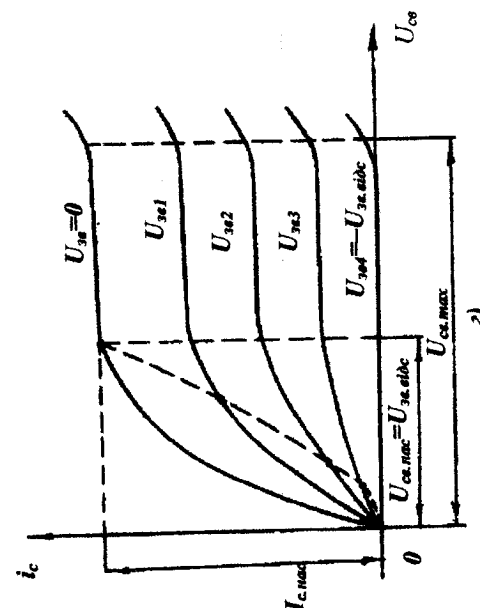
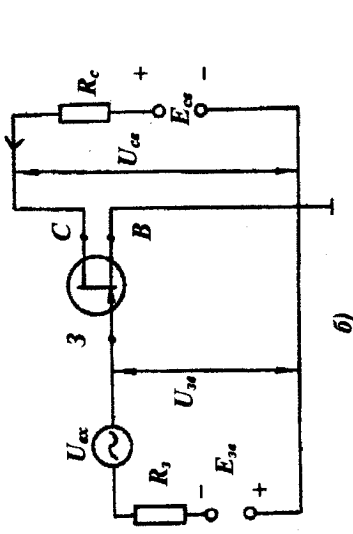
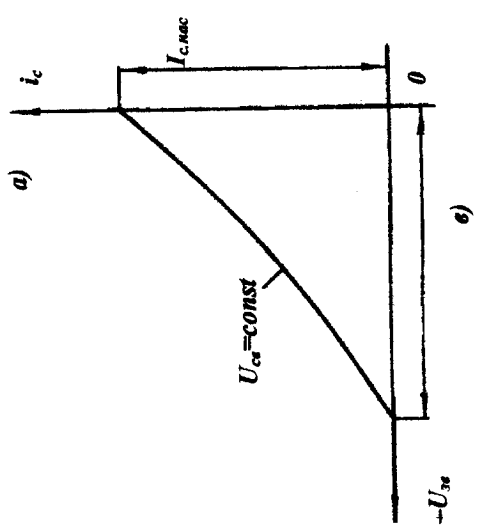
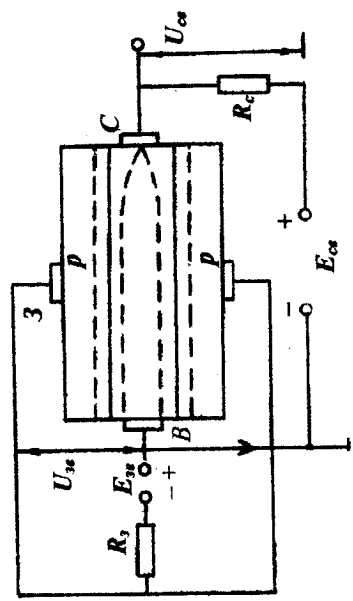


рис.86

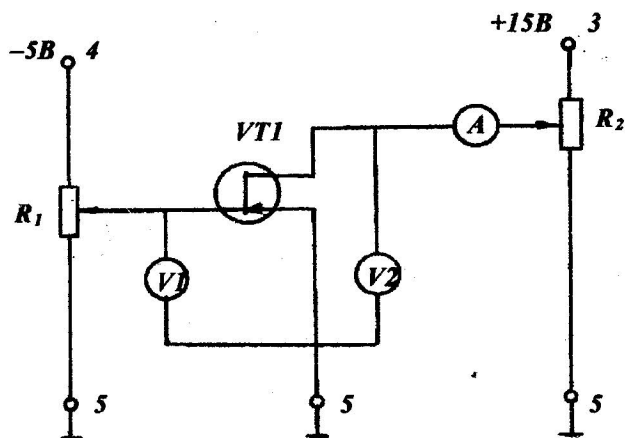
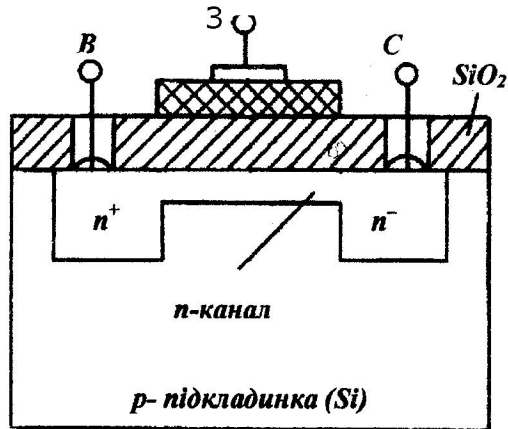
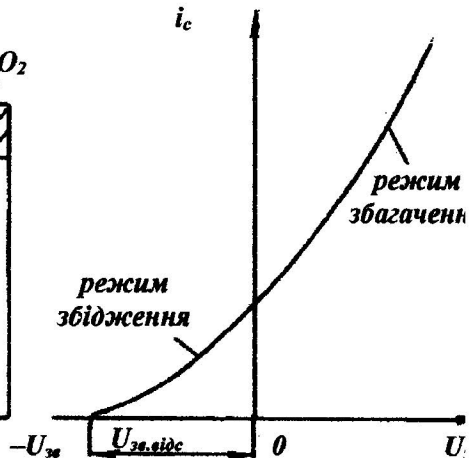


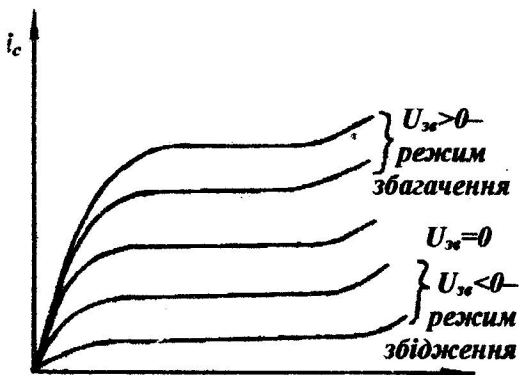
рис.87



а)

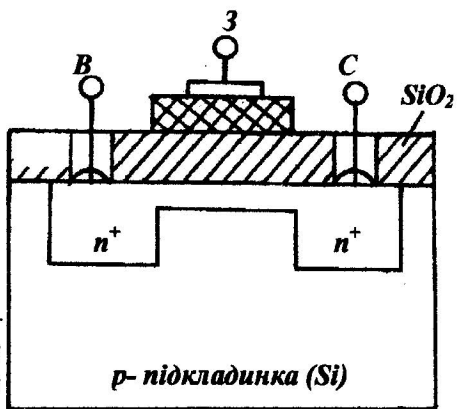


б)

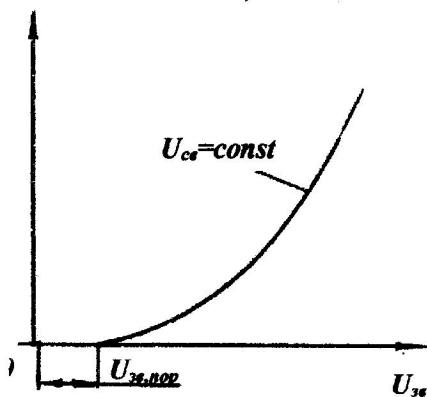


в)

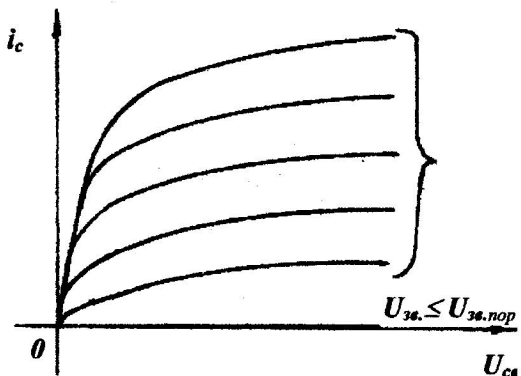
U_{ce}



г)



д)



е)

4.11 ДОСЛІДЖЕННЯ ТИРИСТОРІВ

Мета роботи: дослідження принципу дії, основних властивостей, характеристик і параметрів тиристорів.

Теоретичні відомості і методичні вказівки

Тиристором називають напівпровідниковий прилад, який містить у собі три і більше р-п переходів, ВАХ якого має ділянку негатиного диференціального опору (рис.89). По суті тиристор являє собою монокристал (рис:90 а). Крайні області р1 і п2 називаються емітерами, середні п1 і р2 - базами. Переходи П1 і П2 називаються емітерними, а перехід П2 - колекторним. До областей р1, п2, р2 під'єднуються металеві контакти, які відповідно називають анодом (А), катодом (К), управляючим електродом (УЕ).

Принцип дії тиристорів можна пояснити за допомогою їх транзисторної моделі (рис.90, б, в). Відповідно до цієї моделі тиристор являє собою таке з'єднання транзисторів VT1 та VT2 (р-п-р і п-р-п), при якому колекторний струм VT1 є базовим струмом VT2, а колекторний струм VT2, є базовим струмом VT1. Отже між базовим і колекторним струмами транзисторів існує позитивний зворотний зв'язок, який забезпечує переключення структури з одного стійкого стану (ввімкнено) в інший стійкий стан (вимкнено), за умови, що коефіцієнт зворотного зв'язку більше одиниці.

У вимкненому стані тиристора його центральний перехід П2 має зворотне зміщення, а переходи П1 та П3 - пряме. Струм центрального переходу П2 має три складових: зворотний струм, струм дірок, що інжектуються переходом П1 дійшли до П2, де вони можуть стрибкоподібно розмножуватися, струм електронів, які інжектуються переходом П3 і також можуть стрибкоподібно розмножуватися в П2.

У ввімкненому стані тиристорної структури р-п-р-п повинна виконуватись нерівність

$$\alpha_p + \alpha_n \geq 1, \quad (1)$$

де α_p - коефіцієнт передачі струму транзистора р-п-р (VT1),

α_n - коефіцієнт передачі струму транзистора п-р-п VT2.

Струм через тиристор, враховуючи $\alpha_p \ll \alpha_n$ можна визначити за формулою:

$$I = I_y \alpha_n / (1 - \alpha_n) \quad (2)$$

Де I_y - струм управляючого електроду.

З формули (2) видно, що коефіцієнт підсилення управляючого струму дорівнює

$$K_U = \alpha n / (1 - \alpha n) \quad (3)$$

При $I_y = 0$, ВАХ тиристора описується рівнянням

$$I = I_{ko} / \alpha - \alpha p - \alpha n \quad (4)$$

На ВАХ тиристора (рис. 91) можна виділити чотири основних ділянки:
1-закритий стан, струм через тиристор визначається струмом обернено зміщеного центрального переходу,

2-від'ємного опору,

3-відкритого стану, струм через тиристор визначається величиною опору зовнішнього навантаження,

4-зворотної напруги.

При розрахунку схем з тиристорами найбільш важливими є такі параметри: струм ввімкнення $I_{вв}$, струм вимкнення $I_{вимкн.}$, напруга переключення $U_{пер.}$, визначається при $I_y = 0$ і залишкова напруга $U_{заль.}$ вона визначається при максимально допустимому прямому струмі $I_{a.max}$. Як правило величина максимально допустимої зворотної напруги дорівнює: $U_{зв.max} = U_{пер.}$. Для деяких типів тиристорів, які працюють в колах постійного струму $U_{зв} = 0$.

Тиристор також характеризується параметрами вхідного (управляючого) кола. Напруга на УЕ відносно катода тиристора зв'язана з управляючим струмом співвідношенням:

$$U_y = I_y R_6 + (I_y + I) R_{n3} \quad (5)$$

де R_6 - опір внутрішньої базової області;

R_{n3} - опір переходу ПВ.

Використовуючи рівняння (2) можна записати

$$U_y = I_y (R_6 + R_{n3} / (1 - \alpha n)), \quad (6)$$

отже зв'язок між струмом і напругою такий же, як і в транзистора ввімкненого за схемою з спільним емітером.

В паспортних даних на тиристор вказується величина керуючого струму $I_{y.випр.}$ яку називають керуючим струмом виправлення, це струм при якому зникає ділянка від'ємного опору на ВАХ тиристора. Напруга, яка гарантує ввімкнення тиристора визначається за формулою

$$U_{y.випр.} = I_{y.випр.} (R_6 + R_{n3} / (1 - \alpha n)).$$

Головною перевагою тиристора порівняно з транзистором є те, що він має властивість запам'ятовувати свій попередній стан. Достатньо короткочасного сигналу, щоб переключити його в відкритий стан і він залишиться в цьому стані до тих пір, поки не зруйнується умова $K_{п.зв} > 1$, тобто струм через нього не стане меншим за струм вимкнення. Завдяки стрибкоподібному механізму переключення тиристора форма вихідного сигналу майже не залежить від форми вхідного сигналу. Це дозволяє отримати в тиристорних схемах дуже великі коефіцієнти підсилення за потужністю, великий к.к.д. і круті фронти імпульсних сигналів.

На базі розглянутої структури існує цілий ряд приладів: діодний тиристор, триодний з управлінням по аноду, триодний тиристор з управлінням по катоду, симетричний тиристор та ін.

Маркіровка тиристорів аналогічна маркіровці діодів і транзисторів. Відмінність у тому, що другий елемент позначення буква У, а далі ідуть цифри, які вказують на тип тиристора.

Позначення основних типів тиристорів приведені на рис. 92.

Діодні тиристори (рис. 92, а) мають тільки два електроди: анод і катод. ВАХ діодного тиристора відповідає характеристиці (рис. 91) при $I_g = 0$.

Триодні відкриті тиристори (рис. 92, б) утворюють найбільш широкий клас тиристорів. В залежності від того, з якої області зроблено вивід управляючого електроду тиристори цього класу ділять на тиристори, які керуються відносно катоду і аноду. Для перших на УЕ необхідно подати позитивний сигнал, для других - негативний.

Триодні тиристори з закриванням (рис. 92, в) розроблені спеціально для кіл постійного струму. Якщо відкриті тиристори вимикаються по силовому колу перериванням анодного струму на час виключення, то ці тиристори можуть вимикатися імпульсом по управляючому ланцюгу, для управління по аноду - імпульс позитивний, для управління по катоду - імпульс негативний.

Симетричні тиристори (сімістори рис. 92, г) призначені для роботи в колі змінного струму. По своїх ВАХ вони еквівалентні двом ввімкненим зустрічно-паралельно триодним тиристорам. ВАХ сімістора симетрична відносно початку координат (рис. 91).

Проведення досліджень

1. Зберіть схему (рис.93). Анод - червоний, катод - синій, управляючий електрод - білий.

2. Встановіть R2 в крайнє ліве положення. Якщо при цьому при зміні $U_{вх}$ від 0 до максимального значення падіння напруги на тиристорі U не більше 1В, то це означає, що тиристор відкритий і потрібно встановити R2 в інше крайнє положення (струм управління мінімальний).

3. Встановіть $U_{вх}$ максимальним (починаючи з 0 В), певно мінняйте R2 до тих пір, поки U не впаде стрибкоподібно до 0,7-0,8 В.

4. Змінюючи $U_{вх}$ від 0 до максимального (R2 при цьому const), впевнитись, що U спочатку росте, а потім стрибкоподібно падає до 0,7-0,8 В, якщо це не виконується, то перейти до п. 7.

5. Якщо $U < 1$ В при зміні $U_{вх}$ від 0 до максимального, то необхідно трохи зменшити I_y і знову повторити п. 4.

6. Якщо стрибка у немає, а U збільшується до 30 В при $U_{вх}$ - максимальне, то необхідно трохи збільшити I_y за допомогою R2 і повторити п.4.

7. Знімають ВАХ тиристора при зміні $U_{вх}$ від 0 до max і знову до 0 В ($I_y = \text{const}$).

8. Виміряйте I_y при якому знімались дані. Попередньо $U_{вх}$ необхідно встановити рівним 0 В.

9. Зніміть ВАХ при двох значеннях I_y , при яких спостерігається стрибок.

10. Зніміть дві ВАХ

а) при таких I_y , при яких для будь-яких $U_{вх}$ тиристор відкритий.

б) при такому I_y , при якому тиристор завжди закритий.

11. Зрівняйте отримані дані з очікуваними (рис.91), зробіть висновки.

Контрольні запитання

1. Тиристор, будова, принцип дії.
2. ВАХ тиристора.
3. Типи тиристорів, їх особливості.
4. Характеристичні параметри тиристорів.

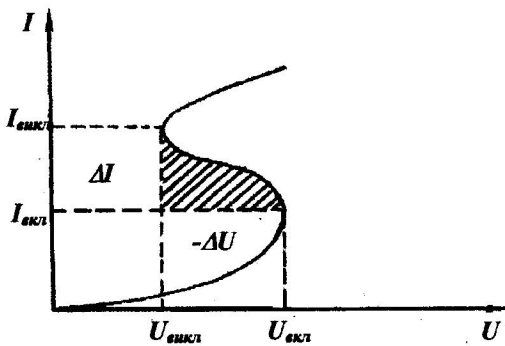


рис.89

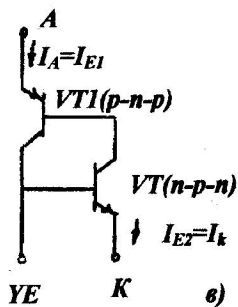
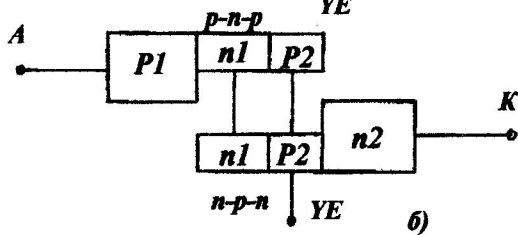
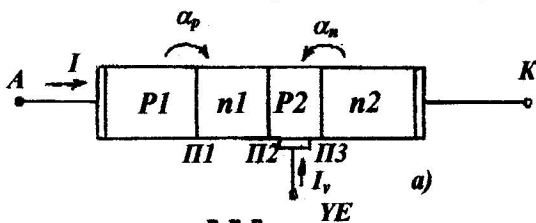


рис.90

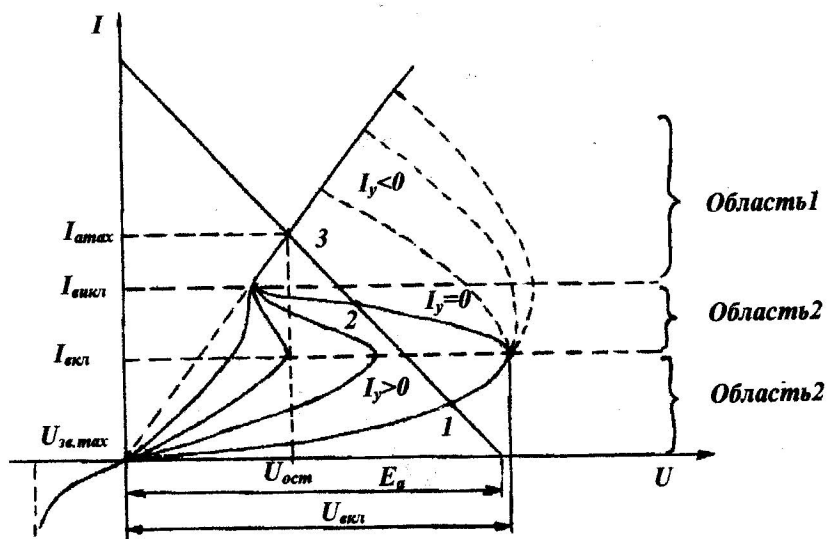


рис.91

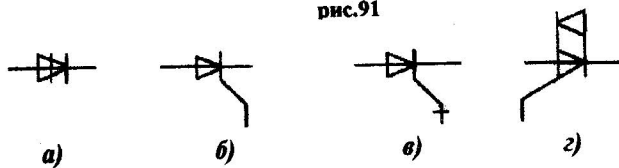


рис.92

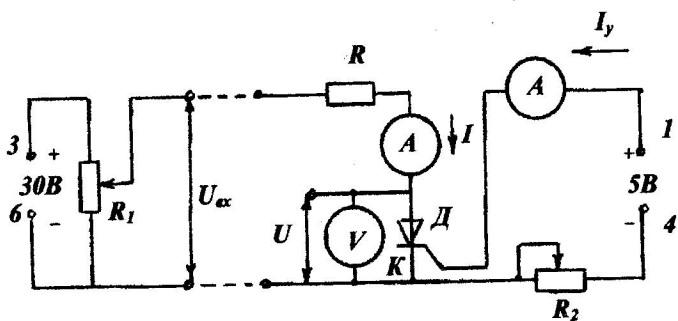


рис.93

Література

1. Скаржега В.А., Луценко А.Н. Электроника и схемотехника. Ч.1. Электронные устройства информационной автоматики. Под ред. А.А. Краснопрошиной. -К: Вища школа, 1989. -431с
2. Захаров В.К., Липарь Ю.И. Электронные устройства автоматики и телемеханики. -Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1984. -432с.
3. Скаржега В.А., Новацкий А.А., Сенько В.И. Электроника и микросхемотехника: Лабораторный практикум. -К: Вища школа, 1989. -279с.
4. Гринфилд Дж. Транзисторы и линейные ИС. Руководство по анализу и расчету. Пер с англ. -М: Мир, 1992. - 560с.
5. Гальперин М.В. Практическая схемотехника в промышленной автоматике. - М: Энергоатомиздат, 1987. - 320 с.
6. Скаржега В.А., Сенько В.И. Электроника и микросхемотехника: Сборник задач / Под редакцией А.А. Краснопрошиной. - К: Вища школа, 1989. -232с.
7. Краснопрошина А.А., Скаржега В.А., Кравец П.И. Электроника и микросхемотехника. Ч.2. Электронные устройства промышленной автоматики / Под ред. А.А. Краснопрошиной. -К: Вища школа, 1989. -303с.
8. Методичні вказівки до виконання контрольних робіт з курсу "Електронні пристрої автоматики". Ч.1. / Уклад. М.І. Бандак, Ю.В.Шабатура, М.М.Данильчук. - Вінниця: ВПІ, 1993. -40с.
9. Методичні вказівки до виконання розрахункових завдань з курсів "Електронні пристрої автоматики" та "Елементи автоматики". / Уклад. М.І.Бандак, Ю.В.Шабатура. - Вінниця: ВПІ, 1993. -60с.

Міністерство освіти України
Вінницький державний технічний університет

Навчальне видання

Мірча Іванович Бандак, Юрій Васильович Шабатура,
Василь Васильович Присяжнюк

Електроніка та мікросхемотехніка

Ч. 1.

Електронні елементи, теорія, розрахунки.
Лабораторний практикум

Навчальний посібник

Вінниця ВДТУ 1998

Редактор Т.А.Ягельська

Тир. 50 прим.

ВДТУ, 286021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95