

Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

Підлягає поверненню на кафедру

**БАГАТОКАСКАДНІ
ТРАНЗИСТОРНІ
ПІДСИЛЮВАЧІ**

Чернівці
Чернівецький національний університет
2009

ББК 32.846.2я7
Б – 14
УДК 621.375.4.(07)

Друкується за ухвалою редакційно-видавничої ради
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Б – 14 **Багатокаскадні** транзисторні підсилювачі : навчально-методичний матеріал для конструкторсько-розрахункового проектування / укл. : С. В. Нічий, Є. Д. Громко – Чернівці : Чернівецький національний університет, 2009. – 48 с.

У роботі розглядаються принципи функціонування та характеристики багатокаскадних підсилювачів на транзисторах. Описана методика та порядок розрахунку підсилювача на транзисторах і прийоми моделювання його роботи із використанням комп'ютерної техніки. Матеріал роботи використовується під час проходження студентами конструкторсько-розрахункової практики.

Для студентів, які навчаються за напрямом підготовки „Мікро- та наноелектроніка”.

ББК 32.846.2я7
УДК 621.375.4.(07)

© Чернівецький національний університет, 2009

ВСТУП

Підсилювачі сигналів знаходять широке застосування в багатьох галузях науки і техніки. Вони використовуються в радіомовленні, радіозв'язку, телебаченні, кабельних телекомунікаціях, радіолокації, радіонавігації, вимірювальній, обчислювальній техніці тощо.

Характерною особливістю сучасних електронних підсилювачів є виняткове різноманіття схем, за якими вони можуть бути побудовані. Підсилювачі розрізняються за характером підсилювальних сигналів: підсилювачі гармонійних сигналів, імпульсні підсилювачі, підсилювачі постійного струму. Також вони розрізняються за призначенням, кількістю каскадів, роду електроживлення та іншим показником.

Простий підсилювач містить один підсилюючий елемент. При необхідності отримання більшого підсилення, ніж може забезпечити один елемент, використовується підсилювач, який містить кілька підсилюючих елементів. Підсилюючий елемент і елементи зв'язку, живлення, які належать до нього, утворюють підсилюючий каскад. Таким чином, у загальному випадку багатокаскадний підсилювач містить кілька підсилюючих каскадів. Основою каскаду є сам підсилювальний елемент. Які з елементів будуть елементами зв'язку між каскадами, вибирають виходячи з функціонального призначення багатокаскадного підсилювача.

Перші (вхідні) каскади підсилювача працюють при відносно низькому рівні сигналу і мають назву каскадів попереднього підсилення, або каскади підсилення напруги Їх основним призначенням є підвищення рівня вхідного сигналу. Вихідна потужність, що віддається навантаженню, створюється кінцевим (вихідним) каскадом, який є каскадом підсилення потужності. В роботі розглянуто будову і розрахунок підсилювача потужності другої групи складності.

1. БАГАТОКАСКАДНІ ПІДСИЛЮВАЧІ

1.1. Загальні відомості

Сучасні підсилювачі виконуються переважно на біполярних і польових транзисторах в дискретному або інтегральному виконанні, причому підсилювачі в інтегральному виконанні відрізняються від своїх дискретних аналогів переважно конструктивно-технічними особливостями.

Як джерело вхідного сигналу в підсилювачах низької частоти можуть бути мікрофон, звукознімач, попередній підсилювач. Більшість з джерел вхідного сигналу виробляють дуже малу напругу. Подавати її безпосередньо на каскад підсилення потужності немає сенсу, оскільки при малій керуючій напрузі неможливо отримати значну амплітуду вихідного струму, а отже, і великої вихідної потужності. Тому до складу структурної схеми підсилювача, окрім вихідного каскаду, що віддає необхідну потужність, входять каскади попереднього підсилення. Ці каскади прийнято класифікувати за характером опору навантаження у вихідному колі транзистора. Найбільше застосування отримали резисторні підсилюючі каскади, навантаженням в яких є резистор. Як навантаженням транзистора може бути використаний і трансформатор. Такі каскади називають трансформаторними. Проте внаслідок великої вартості, значних розмірів і маси трансформатора, а також через нерівномірності амплітудно-частотних характеристик трансформаторні каскади попереднього підсилення застосовуються дуже рідко. Умови застосування підсилювачів передбачають діапазон змін температури навколишнього середовища, в якому підсилювач повинен зберігати повну працездатність, вимоги до механічних дій та енергетичних показників.

Електронні підсилювачі змінного струму призначені для підсилення сигналів, частоти яких лежать в інтервалі від низької частоти f_n до високої частоти f_v . Вони використовуються в різноманітних за призначенням технічних пристроях, які розрізняються за смугою робочих частот, за характером навантаження, та за умовами застосування. Особливі вимоги до їх

параметрів багато в чому визначаються характером навантаження підсилювачів і умовами їх застосування. Навантаження в переважній більшості випадків має комплексний характер, будучи електромагнітним або електростатичним пристроєм. Вимоги до підсилювачів з широкою смугою робочих частот пов'язані, в основному, з інтервалом робочих частот, в межах якого корисний сигнал повинен посилюватися з допустимими частотними і нелінійними спотвореннями. Підсилювачі з вузькою або фіксованою робочою частотою призначені, в основному, для роботи в демодуляторах або керування індукційними двигунами. Основні вимоги до таких підсилювачів пов'язані з фазочастотною характеристикою. Проте зазначені особливості підсилювачів не включають загального підходу до проектування.

Підсилювачі характеризуються різними конструктивними і енергетичними показниками. До перших можна віднести вагу і габарити, виділення тепла, стійкість до механічних дій і інше. До енергетичних слід віднести показники, що характеризують режим роботи транзисторів, властивості підсилювачів відносно сигналу змінного струму. Найважливішими з них є коефіцієнт підсилення за напругою (струмом, потужністю) і його стабільність, діапазон робочих частот, коефіцієнт частотних спотворень, кут зсуву фаз між вхідним і вихідним сигналами, вхідний і вихідний опір, коефіцієнт нелінійних спотворень. Про такі показники підсилювачів можна сказати наступне: якщо в підсилювачі не передбачені спеціальні заходи стабілізації, то його коефіцієнт підсилення може змінитися в широких межах через великий технічний розкид параметрів транзистора.

Транзисторні підсилювачі мають порівняно невелику верхню граничну частоту підсилення, якщо в вихідному каскаді використаний потужний транзистор. Разом з реактивними ланцюгами зв'язку це приводить до значних частотних спотворень підсилювального сигналу. Нелінійність вольтамперних характеристик транзистора є джерелом великих нелінійних спотворень на виході підсилювача. Фізичні властивості транзистора як підсилювального елемента визначають низький вхідний і високий (при роботі транзистора в активній області) вихідний опір підсилювального каскаду.

Для оцінювання можливості використання таких транзисторних підсилювачів зіставимо основні параметри з вимогами, які до них висуваються. Підсилювач зв'язаний вхідним колом з джерелом сигналу, який не допускає, як правило, значних навантажень за струмом. Це примушує шукати шляхи збільшення вхідного опору транзистора в десятки, сотні і тисячі разів. Інакше кажучи, одним із практичних завдань при проектуванні підсилювача є збільшення його вхідного опору. Вимоги підвищення точності роботи системи в різних кліматичних пристроях змушують стабілізувати коефіцієнт підсилення. До підсилювачів, які працюють в радіотехнічних системах, завжди пред'являються жорсткі вимоги до частотних спотворень, а в підсилювачах систем автоматики – до зменшення фазового зсуву. Зазвичай без спеціальних заходів, транзисторні підсилювачі не відповідають цим вимоги.

1.2. Класифікація підсилювачів

Поділ підсилювачів на типи здійснюють за призначенням, за характером вхідного сигналу, за смугою і абсолютним значенням підсилювальних частот, за використаними активними елементами.

1. За своїм призначенням підсилювачі умовно поділяються на підсилювачі напруги, підсилювачі струму і підсилювачі потужності. Якщо основна вимога – підсилення вхідної напруги до необхідного значення, то такий підсилювач належить до підсилювачів напруги. Якщо основна вимога – підсилення вхідного струму до потрібного рівня, то такий підсилювач належить до підсилювачів струму. Слід зазначити, що в підсилювачах напруги і підсилювачах струму одночасно відбувається підсилення потужності сигналу (інакше замість підсилювача досить було б застосувати трансформатор). У підсилювачах потужності, на відміну від підсилювачів напруги і струму, потрібно забезпечити в навантаженні заданий або максимально можливий рівень сигналу.

2. Залежно від характеру вхідного сигналу розрізняють підсилювачі гармонійних (безперервних) сигналів і підсилювачі імпульсних сигналів. До першої групи належать пристрої для підсилення безперервних гармонійних сигналів або квазігармонійних сигналів, гармонійні складові яких змінюються повільніше за всі інші нестационарні процеси в ланцюгах підсилювача. До другої групи підсилювачів належать пристрої для підсилення імпульсів різної форми і амплітуди з допустимими спотвореннями їх форм. У цих підсилювачах вхідний сигнал змінюється настільки швидко, що процес встановлення коливань є більш суттєвим ніж збереження форми сигналу.

3. Смуга і абсолютні значення підсилювальних частот дозволяють поділити підсилювачі на такі типи. Підсилювачі постійного струму призначені для підсилення електричних коливань в межах від нижньої частоти, що дорівнює нулю, до верхньої робочої частоти підсилювача. Головним є те, що вони підсилюють постійні та змінні складові вхідного сигналу. Підсилювачі змінного струму призначені для підсилення лише змінних складових вхідного сигналу. Залежно від граничних значень робочого діапазону частот підсилювачі змінного струму можуть бути низької і високої частоти. За шириною смуги підсилювальних частот виділяють вибірккові і широкосмугові підсилювачі.

4. За типом використовуваних активних елементів підсилювачі поділяються на транзисторні, лампові і інтегральні. Як активні елементи в даний час в підсилювачах частіше використовуються польові або біполярні транзистори, або інтегральні схеми. Значно рідше застосовуються активні елементи у вигляді нелінійних ємностей або індуктивностей чи спеціальні типи напівпровідникових діодів.

1.3. Режими роботи підсилювачів

Режим роботи підсилювача визначається початковим положенням робочої точки на амплітудній характеристиці підсилювального елемента, тобто на характеристиці залежності вихідного сигналу підсилювального елемента від вхідного сигналу. Розрізняють три основні режими роботи – режими *A*, *B*, *C*.

У режимі *A* робоча точка вибирається на середині прямолінійної ділянки амплітудної характеристики. Форма вихідного сигналу практично повторює форму вхідного сигналу. Нелінійні спотворення при цьому мінімальні. Струм у вихідному колі існує протягом усього періоду вхідного сигналу. При цьому середнє значення постійної складової вихідного струму велике порівняно з амплітудою його змінної складової. Тому ККД каскаду невисокий – 20-30%.

У режимі *B* робоча точка вибирається так, щоб струм через підсилювальний елемент протікав тільки протягом певної половини періоду вхідного сигналу. Для цього робоча точка повинна знаходитися майже на початку координат (у точці вигину) амплітудної характеристики. Підсилювальний елемент працює з так званою відсічкою. Струм спокою через нижній вигин амплітудної характеристики не дорівнює нулю. Форма вихідного сигналу спотворюється щодо вхідного. Тому з'являються вищі гармоніки, що приводить до збільшення нелінійних спотворень порівняно з режимом *A*. Середнє значення вихідного струму зменшується, внаслідок чого ККД каскаду досягає 60-70%.

Існує ще проміжний режим *AB*, коли робоча точка вибирається на амплітудній характеристиці нижче, ніж точка *A*, і вище, ніж у режимі *B*. Тому і показники цього режиму мають проміжне значення між режимами *A* і *B* – ККД 40-50% при невисокому рівні нелінійних спотворень.

У режимі *C* робоча точка вибирається так, щоб струм через підсилювальний елемент протікав тільки протягом частини півперіоду вхідного сигналу. Струм спокою дорівнює нулю. Вихідний сигнал має форму коротких імпульсів і з'являється тоді коли, значення вхідного сигналу більше, ніж $U_{вх.пор}$. Форма

вихідного сигналу має великі спотворення щодо вхідного. Тому з'являються вищі гармоніки, що приводить до збільшення нелінійних спотворень порівняно з режимом *A* і режимом *B*. Середнє значення вихідного струму зменшується, внаслідок чого ККД каскаду досягає майже 96-100%.

1.4. Типи зв'язку між окремими підсилювальними каскадами

Можна виділити наступні типи зв'язку між окремими підсилювальними каскадами: гальванічний (безпосередній); ємнісний (за допомогою *RC* – кіл); трансформаторний; за допомогою частотно-залежних кіл; оптронний. Для порівняно низькочастотних підсилювачів найчастіше використовують перший і другий тип зв'язку. Третій застосовують рідше через великі габарити трансформаторів, неможливість їх мініатюризації, високу вартість, складність виготовлення, підвищені нелінійні спотворення. Четвертий тип використовують при створенні вибіркового підсилювачів, а п'ятий застосовується порівняно рідко, тільки в спеціальних випадках, коли при низькій робочій частоті потрібна хороша гальванічна розв'язка між каскадами.

Для покращення характеристик в підсилювачах також використовують зв'язок між кінцевим і попереднім каскадами., який називається зворотнім зв'язком. Зворотний зв'язок називають від'ємним, якщо сигнал зворотного зв'язку віднімається від вхідного сигналу, і додатним, якщо такий сигнал підсумовується з вхідним. При від'ємному зворотному зв'язку коефіцієнт підсилення зменшується: $K_{изв} = K_u / (1 + \beta K_u)$, а при додатному – збільшується: $K_{изв} = K_u / (1 - \beta K_u)$. Величину $F = (1 \pm \beta K_u)$ називають глибиною відповідного зворотного зв'язку. Теоретично одно – і двокаскадні підсилювачі, які охоплені спільним від'ємним зворотним зв'язком, з частотно-незалежним від'ємним зворотним зв'язком стійкі при будь-якій глибині зворотного зв'язку, а трикаскадні - при $F \leq 9$. Однак практично, з врахуванням запасу за стійкістю і можливості додаткових

фазових зсувів, рекомендують брати $F \leq 5$ для однокаскадного, $F \leq 4$ для двокаскадного і $F \leq 3$ для трикаскадного підсилювача.

Через схемну особливість підсилювача в колі можливі варіанти, коли зворотній зв'язок існує тільки для сигналу, що поволі змінюється, або тільки для змінної складової його, або для всього сигналу. У цих випадках говорять, що зворотний зв'язок здійснений за постійним, за змінним, і як за постійним, так і за змінним струмах. Залежно від методу отримання сигналу розрізняють зворотні зв'язки за напругою, коли сигнал зворотного зв'язку, що знімається, пропорційний напрузі вихідного кола; зворотний зв'язок за струмом, коли сигнал зворотного зв'язку, що знімається, пропорційний струму вихідного кола; комбінований зворотній зв'язок, коли сигнал, що знімається, пропорційний як і напрузі, так і струму вихідного ланцюга. За методом подання сигналу зворотного зв'язку у вхідне коло каскаду розрізняють: послідовну схему зворотного зв'язку, коли напруга сигналу, яка подається на вхід каскаду підсумовується з вихідною напругою кола зворотного зв'язку; паралельну схему зворотного зв'язку, коли струм кола зворотного зв'язку сумується із струмом вхідного сигналу.

1.5. Структурна схема багатокаскадного підсилювача

Структурна схема багатокаскадного підсилювача, який може бути реалізований як за допомогою дискретних компонентів, так і в інтегральному виконанні наведена на рис. 1.1. Даний підсилювач можна назвати підсилювачем потужності. У ньому відбувається необхідне підсилення малопотужного сигналу до величини, яка є достатньою, щоб під'єднати до підсилювача низькоомне навантаження (двигун, акустичні динаміки та ін.).

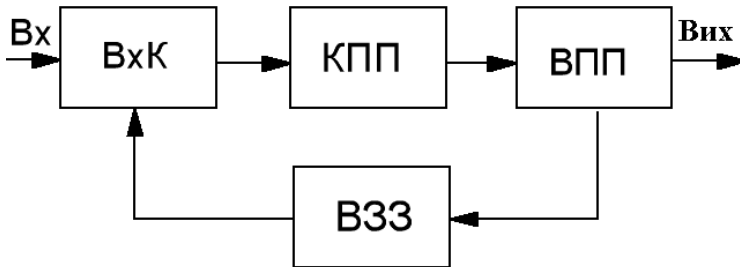


Рис 1.1. Структурна схема багатокаскадного підсилювача.

ВхК – вхідний каскад здійснює передачу вхідного сигналу від джерела у вхідний ланцюг першого і подальшого каскаду. Основною функцією вхідного каскаду є забезпечення необхідного вхідного опору. Відповідно, при виборі вхідного каскаду слід орієнтуватися на наступні дані: схема із загальним емітером має вхідний опір, який дорівнює $10 \div 100$ Ом; схема із загальним колектором – $10^4 \div 10^5$ Ом; диференціальний підсилювач на біполярних транзисторах – $10^3 \div 10^4$ Ом; підсилювальний каскад на польовому транзисторі – $10^5 \div 10^8$ Ом. При цьому слід враховувати зниження або підвищення вхідного опору за рахунок введення зворотних зв'язків.

КПП – каскади попереднього підсилення призначені для підсилення напруги, струму і потужності до значення, необхідного для подачі на вхід підсилювача потужності. Кількість (від одного і більше) каскадів попереднього посилення визначається необхідним коефіцієнтом підсилення.

ВПП – каскад вихідного підсилювача потужності, який забезпечує подання до навантаження заданої потужності сигналу при мінімальних спотвореннях його форми.

ВЗЗ – коло від'ємного зворотного зв'язку призначений для стабілізації режимів роботи підсилювача, завдання стабільності та необхідного коефіцієнта підсилення, а також зниження коефіцієнта нелінійних спотворень. Здійснюється він шляхом передачі сигналу з вихідного кола на вхід підсилювача в протифазі, тобто вихідний сигнал віднімається від вхідного.

Часто вхідний каскад реалізується за допомогою диференційного підсилювача на біполярних або польових транзисторах. Схемна реалізація такого вхідного каскаду на біполярних транзисторах представлена на рис 1.2.

Схема диференціального каскаду вибирається з наступних причин:

- диференціальний каскад забезпечує підвищену температурну стабільність попереднього посилення;
- до диференціального каскаду простіше під'єднати зворотний зв'язок;
- у диференціального каскаду порівняно великий вхідний опір;
- у диференціального каскаду порівняно малий дрейф нуля;
- використання польових транзисторів у вхідному диференційному каскаді виключає необхідність вирівнювання вхідних опорів на затворах транзисторів по яких протікають вхідні струми підсилювача.

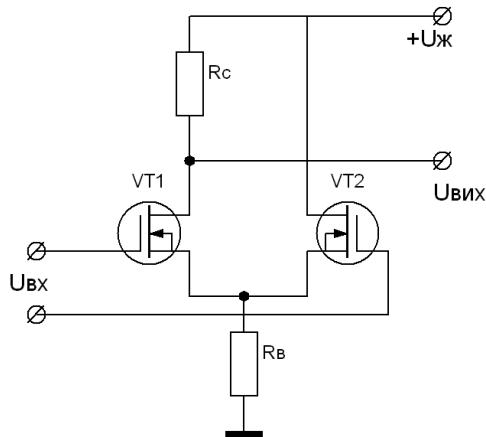


Рис 1.2. Диференційний підсилювач на біполярних транзисторах.

У такому підсилювачі коефіцієнт підсилення за напругою визначається формулою

$$K_u = U_{вих}/U_{вх} = SR_H/2.$$

У каскадах попереднього підсилення на біполярних транзисторах часто використовується схема із загальним емітером, яка володіє високим коефіцієнтом підсилення за напругою і потужністю, порівняно великим входним опором і допускає використання одного загального джерела живлення для кіл емітера і колектора. Для даних каскадів реалізують різні способи термостабілізації режиму роботи транзисторів. Найбільш поширені з них реалізуються за допомогою схем, показаних на рис. 1.3 – 1.5.

У схемі (рис. 1.3) терморезистор з негативним температурним коефіцієнтом опору під'єднаний в базовому колі таким чином, що при підвищенні температури відбувається зменшення негативної напруги на базі за рахунок зменшення опору терморезистора. При цьому відбувається зменшення струму бази, а отже, і струму колектора.

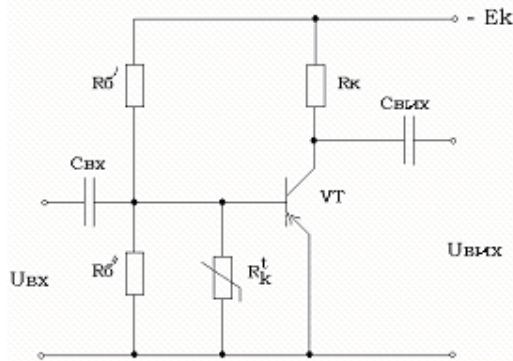


Рис. 1.3. Термостабілізація за допомогою термезистора.

Одна з можливих схем термостабілізації за допомогою напівпровідникового діода показана на рис. 1.4. У цій схемі діод під'єднаний у зворотному напрямі, а температурна характеристика зворотного струму діода має бути аналогічною

температурній характеристиці зворотного струму колектора транзистора. При зміні транзистора стабільність погіршується через розкид величини зворотного струму колектора. Підвищення температури приводить до зменшення напруги на базі і як наслідок – зменшення струму колектора.

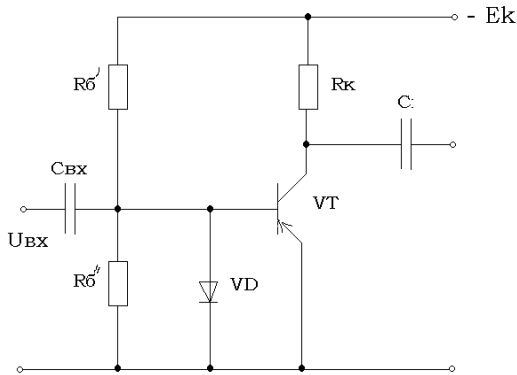


Рис. 1.4. Термостабілізація за допомогою діода.

Найбільшого вжитку набула схема термостабілізації режиму (рис 1.5) за допомогою від’ємного зворотного зв’язку.

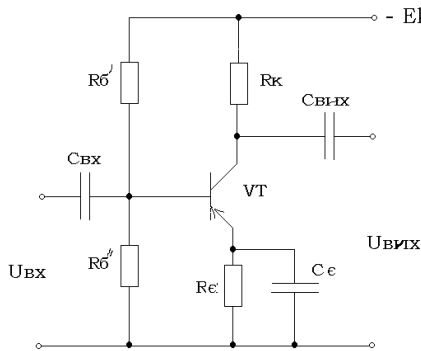


Рис. 1.5. Термостабілізація за допомогою від’ємного зворотного зв’язку.

У даній схемі до напруги сигналу, на базі транзистора, подається зворотна напруга, що виникає на резисторі R_e при проходженні через нього струму емітера. При збільшенні температури постійна складова колекторного струму зростає. Збільшення струму колектора приведе до збільшення струму емітера і

збільшення падіння напруги на резисторі R_e . В результаті напруга між емітером і базою зменшиться, що приведе до зменшення струму бази, а отже, струму колектора. В більшості випадків резистор R_e шунтується конденсатором великої ємності. Це робиться для відведення змінної складової струму емітера від резистора R_e . У інтегральному виконанні даний каскад не містить конденсаторів $C_{вх}$ і C_e .

Схемна реалізація вихідного каскаду представлена на рис. 1.6. Це схема двотактного підсилювача потужності що працює в режимі B . Двотактний підсилювач потужності володіє нижчим коефіцієнтом нелінійних спотворень, ніж однотактний підсилювач потужності. Також важливою перевагою двотактної схеми є її мала чутливість до пульсацій напруги живлення. Недоліком даної схеми є трудність підбору пари транзисторів різної структури з однаковими параметрами.

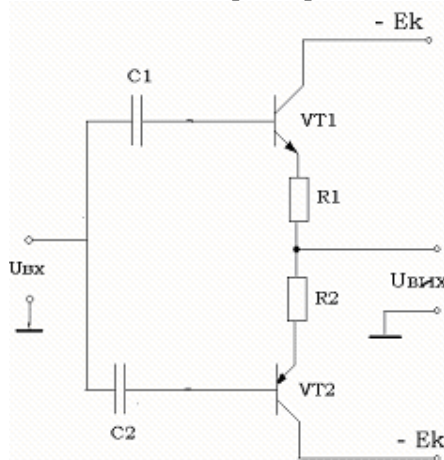


Рис. 1.6. Двотактний підсилювач потужності.

Для зменшення спотворень вихідного сигналу транзистори $VT1$ і $VT2$ повинні працювати в режимі AB . Такий режим досягається подачею напруги зміщення на бази транзисторів, яка задає початковий струм емітера (колектора). Кожен вихідний транзистор працює тільки половину періоду. Транзистор $VT1$ працює в додатному півперіоді, а транзистор $VT2$ – у від'ємному.

2. РОЗРАХУНОК БАГАТОКАСКАДНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

2.1. Електрична схема підсилювача

У даному розділі розглянемо порядок розрахунку багатокаскадного підсилювача потужності схема якого зображена на рис. 2.1. Дана електрична схема відповідає структурній схемі, зображеній на рис. 1.1.

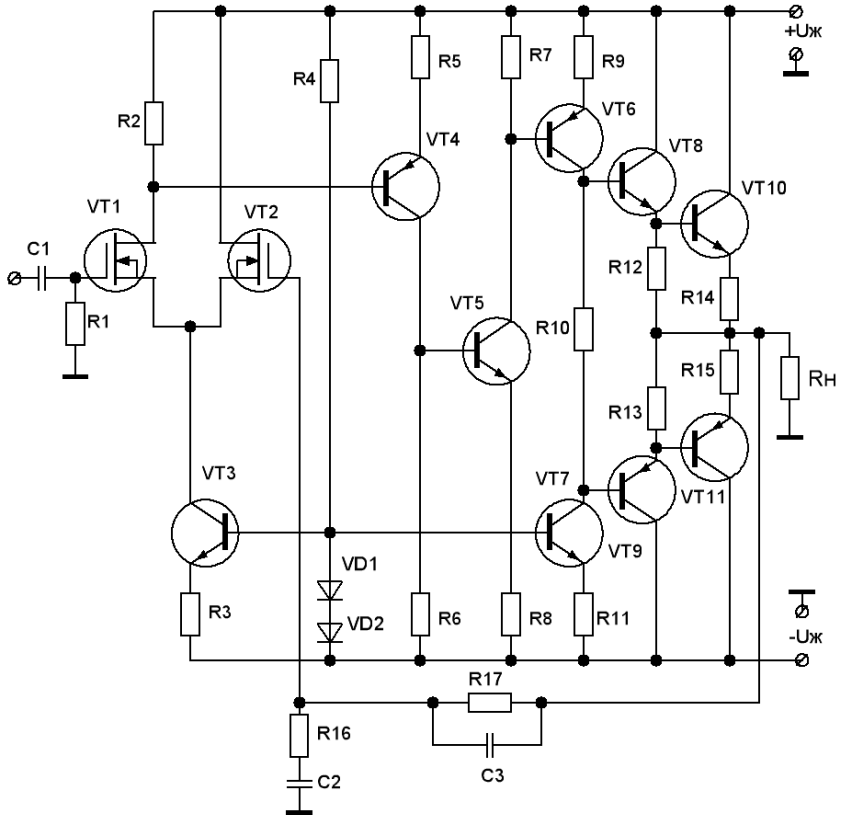


Рис. 2.1. Електрична схема багатокаскадного підсилювача.

Схема даного багатокаскадного підсилювача є типовою схемою операційного підсилювача (без конденсаторів $C1$, $C2$, $C3$ і

резисторів $R1$, $R16$, $R17$), який може бути реалізований як на дискретних елементах, так і в інтегральному виконанні у вигляді мікросхеми.

Розглянемо принцип роботи такого підсилювача. Конденсатори $C1$, $C2$, $C3$ і резистори $R1$, $R16$, $R17$ використовуються для надання необхідних частотних властивостей даному підсилювачу. У колі від'ємного зворотного зв'язку, яке утворено конденсаторами $C2$, $C3$ та резисторами $R16$, $R17$. Пара $C2$ – $R16$, так само як і пара $C1$ – $R1$, визначає хід кривої АЧХ підсилювача в області низьких частот робочого частотного діапазону. Водночас пара $C3$ – $R17$, так само як і пара $C1$ – $R1$, визначає хід кривої АЧХ підсилювача в області низьких частот робочого частотного діапазону. Без використання даних компонентів ми маємо підсилювач постійного струму, сумарний коефіцієнт підсилення якого дорівнює добутку коефіцієнтів підсилення кожного каскаду. Гранична частота підсилення даного підсилювача буде визначатися найменшою граничною частотою одного із транзисторів підсилювача. З використанням транзисторів $VT1$ і $VT2$ побудований диференційний підсилювач. Затвор $VT1$ є неінвертуючим входом підсилювача, а затвор $VT2$ – інвертуючим. Сигнал, який подається на затвор $VT1$ знімається з резистора $R2$. Другий транзистор $VT2$ використовується для подачі сигналу від'ємного зворотного зв'язку. Транзистор $VT3$ працює в режимі джерела струму. Величина струму задається резистором $R3$. Діоди $VD1$ і $VD2$ – джерело постійної напруги з напругою стабілізації $1,2\text{ В}$, оскільки кремнієві діоди під'єднані послідовно в прямому напрямку.

На транзисторах $VT4$, $VT5$ і $VT6$ побудовані підсилювачі на біполярних транзисторах за схемою з загальним емітером. У даних каскадах використаний від'ємний зворотний зв'язок за рахунок під'єднання резисторів в коло емітера. З метою узгодження положень робочих точок при заданні режимів роботи підсилювальних каскадів з постійним струмом використовують транзистори різного типу. Особливістю підсилювального каскаду на транзисторі $VT6$ є використання в колі навантаження джерела струму ($VT7$). Джерело струму використано для "розкачування" вихідних каскадів багатокаскадного підсилювача.

У вихідних каскадах, використані емітерні повторювачі, які забезпечують необхідний коефіцієнт підсилення за струмом. Транзистори $VT8$ і $VT10$ та транзистори $VT9$ і $VT11$ включені за схемою Дарлінгтона, це дає змогу збільшити статичний коефіцієнт підсилення за струмом. У цьому випадку для пари $VT8$ і $VT10$

$$\beta_{VT8VT10} = \beta_{VT8}\beta_{VT10}.$$

У випадку проектування багатокаскадного підсилювача для роботи у звуковій апаратурі, для зменшення спотворень, через вихідні транзистори $VT11$ і $VT10$ подається початковий струм, при $U_{вх} = 0$. Якщо необхідно забезпечити режим $I_{вих} = 0$, при $U_{вх} = 0$ вихідні транзистори $VT11$ і $VT10$ повинні бути закриті, це досягається, коли при відсутності вхідного сигналу $U_{БVT10} = U_{БVT11} = 0,4$ В. Дана напруга подається на резистори $R12$ і $R13$. У цьому випадку транзистори $VT8$ і $VT9$ повинні працювати в режимі AB , тобто бути "привідкритими".

2.2. Приклад розрахунку підсилювача

Для прикладу розглянемо розрахунок підсилювача, згідно схеми зображеної на рисунку 2.1, який має задовольняти наступні технічні умови:

1. Опір навантаження підсилювача..... 6,1 Ом
2. Смуга підсилення частотного діапазону..... 20 Гц – 480 кГц
3. Коефіцієнт підсилення за напругою 490
4. Потужність вихідного сигналу..... 50 Вт
5. Вхідний опір..... > 53 кОм

2.2.1. Попередні розрахунки

1) Розрахунок кількості каскадів попереднього підсилення (КПП) слід проводити, орієнтуючись на гірший випадок, тобто при розрахунку треба використовувати найменший коефіцієнт підсилення за напругою та струмом, які забезпечується відповідними схемами. Враховуючи, що $R_{ex} \geq R_2$, кількість каскадів КПП n обчислюється за формулою:

$$n \approx \lg \frac{\sum K_u}{2} = 2,59.$$

Враховуючи, що для завдання від'ємного зворотного зв'язку різниця фаз між вхідним і вихідним сигналом має бути кратною величиною, то ціле число n , округляється до найближчого цілого непарного числа (у більшу сторону). Отже $n = 3$.

Даний підсилювач має від'ємний зворотній зв'язок, який охоплює три інвертуючі каскади ($VT4$, $VT5$, $VT6$), тому необхідно розрахувати власний коефіцієнт підсилення підсилювача без ВЗЗ. З умови стійкості випливає:

$$F = (1 + \beta \cdot K_U) \leq 3$$

Маючи значення, згідно із завданням, $K_{UB33} = 490$, і взявши $F = 2,5$ та використовуючи ще одну формулу

$$K_{UB33} = (\sum K_U) / (1 + \beta \cdot \sum K_U),$$

отримуємо сумарний коефіцієнт підсилення за напругою для багатокаскадного підсилювача $\sum K_U = 1225$ при $\beta = 0,0012$.

Попередньо визначимо коефіцієнти підсилення для кожного каскаду. В цьому випадку необхідно враховувати, що найбільше на нестабільність вихідного сигналу впливає нестабільність вхідних каскадів підсилювача, тому що флуктуації напруги у вхідних каскадах, підсилюються наступними, що і приводить до значних завад, які накладаються корисний сигнал на виході. Тому кінцеві каскади мають володіти більшими K_U , ніж попередні. Підсилювачі на транзисторах $VT8$ і $VT10$ мають $K_U = 0,9$, аналогічно $VT9$ і $VT11$. Диференційний підсилювач на

транзисторах VT1 і VT2 має достатньо мале значення $K_U = 1 \div 5$ для типових значень крутизни характеристики польового транзистора S. Виходячи із найгіршого випадку, оберемо значення $K_U = 1$, для даного каскаду.

Враховуючи, що $\sum K_U = 1225$, тоді сумарний K_U для каскадів на транзисторах VT4, VT5, VT7 розраховується за наступною формулою:

$$K_U(VT4, VT5, VT7) = (\sum K_U) / [K_U(VT8) \cdot K_U(VT10) \cdot K_U(VT1, VT2)]$$

$$K_U(VT4, VT5, VT7) = 1225 / (0,9 \cdot 0,9 \cdot 1) = 1531$$

Виходячи із цієї формули

$$K_U(VT4, VT5, VT7) = K_U(VT4) \cdot K_U(VT5) \cdot K_U(VT7)$$

Припускаємо, що коефіцієнти підсилення каскадів на відповідних транзисторах мають наступні попередні значення

$$K_u(VT4) = 8$$

$$K_u(VT5) = 13$$

$$K_u(VT7) = 15$$

Дані значення можуть бути відкориговані в процесі розрахунку.

2) Розрахуємо параметри вихідного сигналу. У двотактному підсилювачі потужність, яка виділяється на R_H , відповідає потужності, що виділяється на резисторі при гармонійному сигналі співвідношення:

$$P_{вих} = I_{діюче} \cdot U_{діюче} = (I_{ам\ вих} / \sqrt{2}) \cdot (U_{ам\ вих} / \sqrt{2}).$$

Тому

$$I_{ам\ вих} = (2P_{вих} / R_H)^{1/2} = (2 \cdot 50 / 6,1)^{1/2} = 4,048 \text{ A},$$

$$U_{ам\ вих} = R_H \cdot I_{ам\ вих} = 24,69 \text{ B}.$$

Визначимо значення двополярної напруги живлення, виходячи із того, що:

$$U_{\text{жс}} = U_{R_H} + U_{R14} + U_{BE VT10} + U_{BE VT8} + U_{BE VT6} + U_{R9}$$

$$U_{R_H} = U_{\text{ам вих}} ; U_{BE VT10} = U_{BE VT8} = U_{R9} = 0,6 \text{ В.}$$

Для більшості транзисторів, що працюють у лінійному режимі, $U_{KE} = 2\text{В}$. Для виключення впливу $R14$ на $I_{\text{вих}}$ опір даного резистора береться у 20 раз менше ніж R_H . Отже,

$$R14 = 0,05 \cdot R_H = 0,05 \cdot 6,1 = 0,305 \text{ Ом.}$$

Вибираємо з номінального ряду опорів $E24$ (див. додаток) значення $0,3 \text{ Ом}$. Тому

$$U_{R14} = I_{\text{ам вих}} \cdot R14 = 4,048 \cdot 0,305 = 1,235 \text{ В.}$$

Отже,

$$U_{\text{жс}} \geq 24,69 + 1,24 + 3 \cdot 0,6 + 2 = 29,73.$$

Найменше значення напруги живлення з стандартного ряду (див. додаток), що відповідає заданій умові $U_{\text{ж}} = \pm 30\text{В}$.

2.2.2. Розрахунок компонентів схеми багатокаскадного підсилювача

1) Розрахунок вихідного каскаду здійснюють із метою забезпечення нормального функціонування вихідних транзисторів. Для цього необхідно, щоб виконувалися наступні умови:

$$0,8 \cdot I_{K \text{ max}} = I_{\text{ам вих}}$$

$$U_{KE \text{ MAX}} = 1,2 \cdot (2 \cdot U_{\text{жс}}).$$

Тому

$$I_{K \text{ MAX}} \geq 1,25 \cdot 4,098 \text{ А} = 5,1225 \text{ А}$$

$$U_{KE \text{ MAX}} \geq 1,2 \cdot (2 \cdot 30) = 72 \text{ В}$$

Виходячи з даних умов вибираємо наступну пару транзисторів: $VT10 - KT819B$ і $VT11 - KT818B$ в яких $\beta=20$.

Розрахунок виконуємо для однієї півхвилі (для одного транзистора). Для другого транзистора розрахунки аналогічні. Струм бази $VT10$ є струмом емітера для $VT8$. Визначимо параметри $VT8$ і $VT9$. Оскільки при відкритому одного транзистора з комплементарної пари, до іншого прикладена напруга $2 \cdot U_{ж}$. Тому як і для попередньої пари гранична напруга між колектором та емітером визначається з умови

$$U_{KE \max} = 1,2 \cdot 60 \text{ В} = 72 \text{ В};$$

$$I_{K \max} = I_{B \text{ VT10}} = (I_{AM \text{ ВИХ}}) / (\beta + 1) = 4,048 / 21 = 0,19 = 0,2 \text{ А.}$$

Тому $I_{ВИХ \max} = 1,2 \cdot 0,2 = 0,24 \text{ А}$. Використовуючи розрахунки вибираємо комплементарну пару $VT8 - KT815Г$ і $VT9 - 814Г$, в яких $\beta=40$.

Для надійного закриття транзисторів $VT10$ і $VT11$ на їх базах повинна бути напруга не більше $0,4 \text{ В}$, тобто $U_{R12} = 0,4 \text{ В}$. Задано струм спокою транзистора $VT8$ як 5% від $I_{B \text{ VT10}}$.

$$I_{VT8 \text{ Е ПОЧ}} = 0,05 \cdot I_{B \text{ VT10}} = 0,05 \cdot 0,2 \text{ А} = 10 \text{ мА.}$$

Тому

$$R14 = (U_{R12}) / (I_{VT8 \text{ Е ПОЧ}}) = 0,4 / 0,01 = 40 \text{ Ом.}$$

Вибираємо з номінального ряду $R14 = R15 = 39 \text{ Ом}$. Визначасмо струм бази транзистора $VT8$ при $I_{AM \text{ ВИХ}}$

$$I_{B \text{ VT8}} = (I_{B \text{ VT10}} + I_{\text{поч VT8 Е}}) / (\beta + 1) = (200 \text{ мА} + 10 \text{ мА}) / 41 = 5,12 \text{ мА.}$$

2) Розрахунок каскаду на транзисторах $VT6$ і $VT7$. Напруга на базі транзистора $VT7 = 0,6 + 0,6 = 1,2 \text{ В}$. Через резистори $R9$ і $R11$ проходять однакові струми, які визначаються з:

$$I_{R9} = I_{B \text{ VT8}} + I_{R10} + I_{B \text{ VT6}} = I_{B \text{ VT9}} + I_{R10} + I_{B \text{ VT6}}.$$

Струм колекторів $VT6$ і $VT7$ для максимальних $I_{AM \text{ вих}}$

$$I_{K VT6} = I_{R10} + I_{B VT8} = I_{K VT7} = I_{R10} + I_{B VT9}.$$

Для запасу потужності під час «розкачування» вихідного каскаду нехай початковий струм через $R10$:

$$I_{R10} = 0,4 \cdot I_{B VT8} = 0,4 \cdot 5,12 = 2,048 \text{ мА}.$$

Тоді найбільший струм колектора $VT6$ при $I_{ам вих}$:

$$I_{K VT6} = 5,12 + 2 = 7,12 \text{ мА}$$

$$I_{K VT6 MAX} = I_{K VT7 MAX} = 1,2 \cdot 7,12 = 8,544 \text{ мА}$$

Виходячи з даних розрахунків вибираємо транзистори $VT6$ – 502Д і $VT7$ – 503Д, в яких у найгіршому випадку $\beta = 40$. Розраховуємо $R9$ і $R11$, за умови:

$$U_{R9} = U_{R11} = 0,6 \text{ В},$$

$$I_{R9} = I_{K VT6} + I_{B VT6} = I_{K VT6}(1 + 1/\beta).$$

Отже,

$$R9 = (U_{R9} \cdot \beta) / (I_{K VT6} \cdot (1 + \beta)) = (0,6 \cdot 40) / (7,12 \cdot 41) = 82,2 \text{ Ом}.$$

Вибираємо $R9 = 82 \text{ Ом}$. Розраховуємо $R10$, виходячи із умови:

$$U_{R10} = U_{B VT10} + U_{BE VT8} + U_{B VT11} + U_{BE VT9} = 0,4 + 0,6 + 0,4 + 0,6 = 2 \text{ В}.$$

При відсутності вхідного сигналу

$$U_{B VT8 \text{ поч}} = U_{E VT8 \text{ поч}} / (\beta + 1) = 10 \text{ мА} / 41 = 0,24 \text{ мА}.$$

Отже,

$$R10 = U_{R10} / I_{R10} = 2 \text{ В} / 6,88 \text{ мА} = 290 \text{ Ом}.$$

Вибираємо з номінального ряду $R10 = 300 \text{ Ом}$.

3) Розрахунок K_U каскаду на $VT6$. Транзистор $VT7$ – джерело струму, тому його вихідний опір визначається за формулою

$$R_{\text{ВИХ ДЖЕР.}} = R_{KE} [1 + \beta \cdot R11 / ((R4 R_{VD1 VD2}) + r_{BE} + R11)].$$

З достатньою вірогідністю ми можемо прийняти такі величини:

$$R_{KE} (n - p - n) = 140[B] / I_K[A];$$

$$R_{KE} (p - n - p) = 95[B] / I_K[A];$$

$$I_{KVT7} = I_{KVT6} = 7,12 \text{ мА}.$$

Тому для $VT7$

$$R_{KE} = 140B / 7,12 \text{ мА} = 19662 \text{ Ом}.$$

Струм через $VD1$ і $VD2$ має бути не менше п'ятикратної величини базових струмів транзисторів $VT7$ і $VT3$.

$$I_{VD1 VD2} = 10 \cdot I_{BVT7} \text{ (вибираємо із запасом)}.$$

$$I_{BVT7} = I_{KVT7} / 40 = 7,12 / 40 = 0,18 \text{ мА}.$$

Тому

$$I_{VD1 VD2} = 10 \cdot 0,18 \text{ мА} = 1,8 \text{ мА}.$$

Якщо взяти величину струму із запасом $I_{VD1 VD2} = 2 \text{ мА}$, то

$$R_{VD1VD2} = 1,2B / 2\text{мА} = 600 \text{ Ом}.$$

З умови $I_{VD \text{ MAX}} = 1,2 \cdot 2 = 0,24 \text{ мА}$ і $U_{\text{ОБЕР MAX}} = 60 \text{ В}$. Вибираємо діоди ДЗ12.

Розраховуємо $R4$

$$R4 = (U_{\text{жс}} - 1,2) / (I_{VD1VD2} + I_{BVT7}) = (30 - 1,2) / (2 + 0,18) = 13211 \text{ Ом}$$

Вибираємо із ряду E24 $R4=13 \text{ кОм}$.

Для визначення вхідного опору транзистора використовуємо формулу

$$R_{be}=(\beta \cdot U_T)/I_K=(40 \cdot 25,5 \text{ мВ})/7,12 \text{ мА}=143 \text{ Ом}.$$

Тому вихідний опір джерела струму на транзисторі VT7

$$R_{вих.джер} = 19662(1+(40 \cdot 82)/\{(13 \cdot 600 \cdot 10^3)/(600+13 \cdot 10^3)+14+82\}) = \\ 100424 \approx 100 \text{ кОм}$$

Коефіцієнт підсилення даного каскаду

$$K_{U \text{ VT6}} = (R_{ВИХ.ДЖЕР} || r_H)/R9,$$

де, r_H – вхідний опір вихідних каскадів підсилювача. Оскільки він побудований на емітерних повторювачах, то:

$$r_H = \beta_{VT9} \cdot \beta_{VTнар} \cdot R_H = 40 \cdot 20 \cdot 6,1 = 4800 \text{ Ом}$$

$$K_{U \text{ VT6}} = ((100 \cdot 10^3 \cdot 4,8 \cdot 10^3)/(100 \cdot 10^3 + 4,8 \cdot 10^3))/82 = 56$$

Дана величина не менша за попередньо розраховану і тому є прийнятною.

4) Розраховуємо каскад на VT5. Зважаючи на умову симетричної роботи вихідного двотактного підсилювача:

$$R9=R11, I_{K \text{ VT6}}=I_{K \text{ VT7}}, I_{B \text{ VT6}}=I_{B \text{ VT7}}=0,18 \text{ мА}.$$

Задаємо початковий струм

$$I_{K \text{ VT5}}=5 \cdot I_{B \text{ VT6}}=5 \cdot 0,18=0,9=1 \text{ мА}.$$

Враховуючи граничні електричні параметри, вибираємо транзистор 2T215B9. У цього транзистора $\beta=40$, $I_{K \text{ MAX}}=150 \text{ мА}$.

Струм бази даного транзистора

$$I_{BVT5} = I_{MA} / 40 = 0,025 \text{ мА.}$$

Розраховуємо $R7$

$$R7 = (U_{R9} + U_{BE6}) / (I_{KVT5} - I_{BVT6}) = (0,6 + 0,6) / (1 - 0,12) = 1363 \text{ Ом.}$$

Вибираємо $R7 = 1,3 \text{ кОм}$.

Враховуючи попередні розрахунки для даного каскаду $K_U = 13$, можемо розрахувати $R8$, використовуючи наступну формулу:

$$K_U = (R7 \parallel r_H) / R8,$$

де r_H - вхідний опір $VT6$, який розраховується за формулою

$$r_H = \beta \cdot R9 = 40 \cdot 82 = 3200 \text{ Ом,}$$

$$R8 = \{(1300 \cdot 3280) / (1300 + 3280)\} / 13 = 71 \text{ Ом.}$$

Вибираємо $R8 = 68 \text{ Ом}$.

5) Розрахуємо каскад на $VT4$. Нехай струм спокою $I_K = 1 \text{ мА}$. Виходячи з електричних параметрів вибираємо транзистор $2T214B9$, в якого $\beta = 30$, $I_{Kmax} = 50 \text{ мА}$. У цьому випадку

$$I_{BVT4} = I_{MA} / 30 = 0,033 \text{ мА.}$$

Розраховуємо $R6$ з використанням наступного співвідношення:

$$U_{R6} = U_{BE5} + U_{R8} = I_{KV4} \cdot R6$$

$$U_{R8} = (I_{KV5} + I_{BVT5}) \cdot R8 = (1 + 0,025) \cdot 68 = 0,069 \text{ В}$$

$$R6 = (0,6 + 0,069) / 1 = 669 \text{ Ом}$$

Вибираємо з номінального ряду $R6=680 \text{ Ом}$. Розраховуємо $R5$ за умови, що для даного каскаду $K_U = 8$.

$$R5=(R6 \parallel r_H)/K_U$$

де r_H - вхідний опір підсилювального каскаду на $VT5$, який дорівнює

$$r_H = \beta \cdot R8 = 40 \cdot 68 = 2720 \text{ Ом}.$$

Тому

$$R5=((680 \cdot 2720)/(2720+680))/8=68 \text{ Ом}.$$

6) Розрахунки для диференційного підсилювача на польових транзисторах $VT1$ і $VT2$, який визначає вхідні характеристики підсилювача в цілому. Виходячи із умови, що $U_{CB \text{ MAX}}=1,2 \cdot 2 \cdot U_{Ж}$ вибираємо транзистори $VT1$ і $VT2$ $ANQ110NA$. У даних транзисторах крутизна характеристики $S > 8$ при $I_C=10 \text{ мА}$.

Для високовольтних польових транзисторів в яких $U_{CB \text{ MAX}} > 50 \text{ В}$ при струмі стоку $I_C=1 \div 2 \text{ мА}$, типове значення крутизни характеристики становить 2 мА/В . Задаємо значення початкового струму стоку $I_C=1 \text{ мА}$ за умови, що $S=2 \text{ мА/В}$.

Розрахуємо $R2$, враховуючи, що в стані спокою $U_{R2}=U_{BE4}+U_{R5}$

$$U_{R5}=(I_{KVT4}+I_{BVT4}) \cdot R5=(1+0,033) \cdot 68=70,2 \text{ мВ}=0,07 \text{ В}$$

$$R2=U_{R2}/I_C=(0,6+0,07)/1=670 \text{ Ом}$$

Вибираємо $R2=680 \text{ Ом}$.

Визначаємо K_U даного каскаду за формулою:

$$K_U = \frac{1}{2} S (R2 \parallel r_H),$$

де, r_H - вхідний опір підсилювального каскаду на транзисторі $VT4$.

Якщо

$$r_H = \beta \cdot R_5 = 30 \cdot 68 = 2040 \text{ Ом},$$

тоді

$$K_U = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot ((2040 \cdot 680) / (2040 + 680)) = 0,51.$$

7) Розраховуємо джерело струму на транзисторі VT_3 . З умов граничних параметрів ($I_{K_{\max}}, U_{K_{\max}}$) вибираємо транзистор 2Т215В9. Тоді $I_{KV_{T3}} = 2 \cdot I_C = 2 \text{ мА}$, $I_{BV_{T3}} = 2 \text{ мА} / 40 = 0,05 \text{ мА}$. Розрахуємо R_3 використовуючи наступні співвідношення:

$$I_{EV_{T3}} = I_{KV_{T3}} + I_{BV_{T3}} = 2 + 0,05 = 2,05 \text{ мА},$$

$$U_{VD1VD2} = U_{BE_{V_{T3}}} + U_{R_3}, \quad U_{R_3} = 0,6.$$

Тому

$$R_3 = 0,6 / I_{EV_{T3}} = 0,6 / 2,05 = 292 \text{ Ом}.$$

Для забезпечення запасу за струм необхідно вибрати менше значення опору з ряду номінальних значень опорів. Тоді вибираємо $R_3 = 270 \text{ Ом}$.

8) Опір R_1 і ємність C_1 розраховуємо з умови $R_{\text{вх}} = 53 \text{ кОм}$, тому $R_{\text{вх}} = R_1$. Вибираємо $R_1 = 56 \text{ кОм}$. Кола $C_1 - R_1$, $R_1 - C_2$ визначають значення f_H . Вони утворюють фільтр низьких частот другого порядку ($n=2$), тому значення f_H^{\downarrow} для розрахунку частоти зрізу даних фільтрів:

$$f_H^{\downarrow} = \frac{f_H}{\sqrt{n}} = \frac{20}{\sqrt{2}} = 14,4 \text{ Гц}.$$

Виходячи з того, що $f_H^{\downarrow} = 1 / (2\pi \cdot R_1 \cdot C_1)$ розраховуємо C_1 .

$$C_1 = 1 / (2\pi \cdot f_H^{\downarrow} \cdot R_1) = 1 / (2 \cdot 314 \cdot 14,4 \cdot 56 \cdot 10^3) = 0,2 \text{ мкФ}.$$

Вибираємо значення стандартний номінал із ряду $E12$ ємність $0,22 \text{ мкФ}$.

9) При розрахунку кола зворотного зв'язку необхідно врахувати отриманий сумарний коефіцієнт підсилення за напругою розрахованого підсилювача постійного струму

$$\sum K_U = K(VT1 \cdot VT2) \cdot K(VT4) \cdot K(VT5) \cdot K(VT6) \cdot K(VT8) \cdot K(VT10),$$

$$\sum K_U = 0,51 \cdot 8 \cdot 13 \cdot 56 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 2376.$$

Розраховуємо β_{33} для середніх частот смуги підсилення (в даному випадку розраховується тільки $R16$ і $R17$)

$$K_{33} = \sum K_U / (1 + \beta_{33} \sum K_U)$$

Тому

$$\beta_{33} = (\sum K_U - K_{33}) / (\sum K_U \cdot K_{33}) =$$

$$= (2376 - 490) / (2376 \cdot 490) = 0,00161 = 0,0016.$$

Оскільки

$$\beta_{33} = U_{33} / U_{вих} = R16 / (R17 + R16),$$

розрахуємо величини опорів $R16$ і $R17$. Сума $R16$ і $R17$ впливає на струм I_{33} , який повинен бути якнайменший, щоб додатково не навантажувати підсилювач. Мале значення опору $R16$ не потребує використання великого значення $C2$. З іншого боку, велике значення $R16$ змушує використовувати $R17$ із значним номінальним значенням опору (>10 мОм). Це слід врахувати тому, що високоомні резистори мають високий рівень власних шумів. Візьмемо $C2 = 22$ мкФ ($K73-16$). Тоді

$$R16 = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 14,4 \cdot 22 \cdot 10^{-6}) = 511 \text{ Ом}.$$

Вибираємо $R16 = 510$ Ом. Наступним кроком є розрахунок опору $R17$

$$R17 = ((R16(1-\beta)) / \beta) = (510 \cdot 0,0984) / 0,0016 = 318240 \text{ Ом}.$$

Вибираємо $R17 = 300$ кОм.

Розрахуємо величину $C3$, яка визначає спад АЧХ в області високих частот смуги підсилення, використовуючи формулу

$$f_{\omega} = 1/(2\pi \cdot C3 \cdot R17)$$

Тоді

$$C3 = 1/(2 \cdot 3,14 \cdot 480 \cdot 10^3 \cdot 300 \cdot 10^3) = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ нФ}$$

Вибираємо із ряду номінальних значень $C3 = 1,2 \text{ нФ}$.

10) Примітки:

а) При розрахунку підсилювача необхідно розрахувати потужність, яка виділяється на резисторі, відповідно до одного з виразу:

$$P = U \cdot I = I^2 R = U^2 / R$$

і вибрати ближнє більше ціле значення з ряду розсіювання потужностей резисторів. Для резисторів $R14$ і $R15$, які працюють півперіоду сигналу, використовують формулу:

$$P = \frac{1}{2} \cdot I_{\text{ДЮЧЕ ВИХ.}}^2 \cdot R.$$

б) При даних розрахунках можна було б зменшити Ku_{VT6} . Для цього необхідно збільшити $R9$. Інший шлях отримання попередньо розрахункових значень сумарного коефіцієнта підсилення $\sum K_U$ – зменшення Ku_{VT4} і Ku_{VT5} .

3. ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ В СЕРЕДОВИЩІ *ELECTRONIC WORKBENCH*

Розробка будь-якого радіоелектронного пристрою супроводжується, як правило, фізичним або математичним моделюванням. Фізичне моделювання пов'язане з великими матеріальними витратами, оскільки потрібне виготовлення макетів і їх дослідження, яке може бути досить трудомістким. Тому часто застосовують математичне моделювання з використанням засобів і методів обчислювальної техніки. Однією з таких програм є електронна система моделювання Electronics Workbench (EWB), що відрізняється простим і легко освоюваним призначенням для користувача інтерфейсом. Широкого поширення EWB набула в середніх і вищих навчальних закладах, де вона використовується з навчальною метою як лабораторний практикум з цілого ряду предметів (фізика, основи електротехніки та електроніки, основи обчислювальної техніки і автоматики і ін.).

Електронна система моделювання EWB імітує реальне робоче місце дослідника – лабораторію, обладнану вимірювальними приладами. З її допомогою можна створювати, моделювати як прості, так і складні аналогові і цифрові радіофізичні пристрої.

3.1. Основні принципи створення схеми.

Робота з електронною системою моделювання *EWB* включає три основні етапи: створення схеми, вибір і під'єднання вимірювальних приладів, і, нарешті, активація схеми – розрахунок процесів, які відбуваються в досліджуваному пристрої. У загальному випадку процес створення схеми починається з розміщення на робочому полі *EWB* (рис. 3.1) компонентів з бібліотеки програми.

Чотирнадцять розділів бібліотеки програми *EBW* по черзі можуть бути викликані за допомогою іконок, розташованих на панелі інструментів (рис. 3.2). Каталог вибраного розділу

бібліотеки розташовується у вертикальному вікні справа або зліва від робочого поля (встановлюється в будь-яке місце перетяганням стандартним способом). Для відкриття каталогу потрібного розділу бібліотеки необхідно підвести курсор миші до

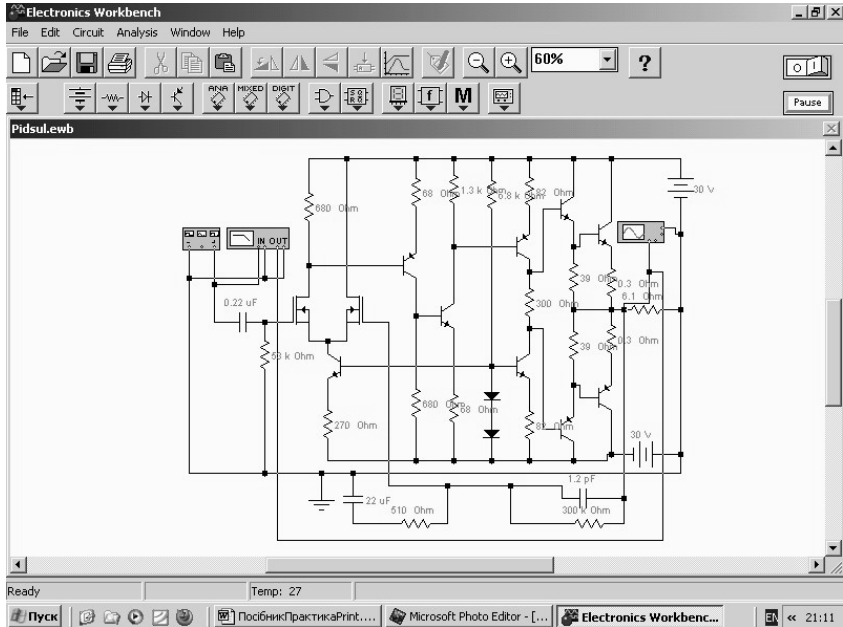


Рис. 3.1. Вигляд робочого поля середовища проектування електронних схем *EBW*.

відповідної іконки і натиснути один раз її ліву кнопку, після чого сірий фон іконки змінюється на світло-сірий. Необхідний для створення схеми значок (символ) компонента переноситься з каталога на робоче поле програми рухом миші при натиснутій лівій кнопці, після чого кнопка відпускається (для фіксації символу). При розміщенні компонентів схеми на робочому полі програми можна також скористатися контекстним меню, що з'являються при натисненні на праву клавішу миші на вільному місці робочого поля. На цьому етапі необхідно передбачити місце для розміщення контрольних точок та іконок контрольно-вимірювальних приладів.



Рис. 3.2. Каталог бібліотеки компонентів EWB.

Виділений компонент схеми (відображається червоним кольором) можна повернути (за допомогою поєднання клавіш Ctrl+R, контекстного меню, кнопок на панелі інструментів або пункту меню Circuit>Rotate) або дзеркально відобразити щодо вертикальної (горизонтальною) осі (команда меню Circuit>Flip Vertical (Horizontal), контекстне меню, кнопки на панелі інструментів). При повороті більшість компонентів повертаються на 90^0 проти годинникової стрілки при кожному виконанні команди, для вимірювальних приладів (амперметр, вольтметр і ін.) міняються місцями клеми під'єднання.

За допомогою подвійного клацання по значку компонента можна змінити його властивості. У діалоговому вікні, що розкривається, встановлюються необхідні параметри (колір провідника, опір резистора, тип транзистора і тощо) і вибір підтверджується натисненням кнопки «Ok» або клавіші «Enter» на клавіатурі. Для великої кількості компонентів можна вибрати параметри, які відповідають реальним елементам (діодам, транзисторам і т. Ін.) різних виробників.

Якщо у схемі використовуються компоненти однакового номіналу (наприклад резистори з однаковим опором), то номінал такого компонента рекомендується задати безпосередньо в каталозі бібліотеки, і потім переносити компоненти в потрібній кількості на робоче поле. Для зміни номіналу компонента необхідно двічі клацнути мишею по символу його графічного зображення і у вікні, що розкривається після цього, внести зміни.

При створенні схем зручно також користуватися динамічним меню, яке викликається натисненням правої кнопки

миші. Меню містить команди Help (допомога), Paste (вставити), Zoom In (збільшити), Zoom Out (зменшити), Schematic Options (параметри схеми), а також команди Add <Назва компонента. Ця команда дозволяє додати на робоче поле компоненти, не звертаючись до каталогів бібліотеки. Кількість команд Add <Назва компонента в списку меню визначається кількістю типів компонент (резисторів, знака заземлення тощо), що вже є на робочому полі.

Після розміщення компонентів здійснюється з'єднання їх виводів провідниками. При цьому необхідно зважати на те, що до виведення компонента можна під'єднати тільки один провідник. Для виконання під'єднання курсор миші підводиться до виведення компонента і після появи майданчика натискається ліва кнопка і провідник, що з'являється при цьому, протягується до виведення іншого компоненту до появи на ньому такого ж майданчика, після чого кнопка миші відпускається, з'єднання готове. При необхідності під'єднання до цих виводів інших провідників в бібліотеці Basic вибирається крапка (символ з'єднання) і переноситься на раніше вибраний провідник. Щоб точка почорніла (спочатку вона має червоний колір), необхідно клацнути мишею по вільному місцю робочого поля. Якщо ця крапка дійсно має електричне з'єднання з провідником, то вона повністю забарвлюється чорним кольором. Якщо на ній видно слід від перетинаючого провідника, то електричного з'єднання немає, тому точку необхідно встановити наново. До точки з'єднання можна підключити ще два провідники. Якщо з'єднання потрібно розірвати, курсор підводиться до одного з виводів компонентів або до точки з'єднання і при появі майданчика натискається ліва кнопка, провідник відводиться на вільне місце робочого поля, після чого кнопка відпускається.

Якщо необхідно під'єднати вивід до провідника, що є на схемі, то провідник від виведення компонента курсором підводиться до вказаного провідника і після появи точки з'єднання кнопка миші відпускається. Слід зазначити, що прокладка з'єднувальних здійснюється автоматично, причому перешкоди – компоненти і інші провідники – огинаються по ортогональних напрямках (по горизонталі або вертикалі).

Точка з'єднання може бути використана не тільки для під'єднання провідників, але і для введення написів (наприклад вказівки величини струму в провіднику, його функціонального призначення і тощо). Для цього необхідно двічі клацнути по точці і у вікні, що розкрилося, ввести необхідний запис. При позначенні компонентів необхідно дотримуватися рекомендацій і правил, передбачених ЄСКД (єдиною системою конструкторської документації). Під'єднання до схеми контрольно-вимірювальних приладів здійснюється аналогічно.

Кожен елемент може бути пересунутий на нове місце. Для цього він повинен бути виділений і перетягнутий за допомогою миші. При цьому розташування з'єднувальних проводів зміниться автоматично. Можна також перемістити цілу групу елементів: для цього їх потрібно послідовно виділяти мишкою при натиснутій клавіші Ctrl, а потім перетягнути їх у нове місце. Якщо необхідно перемістити окремих сегмент провідника, до нього підводиться курсор, натискається ліва кнопка і, після появи у вертикальній або горизонтальній площині подвійного курсору, проводяться потрібні переміщення. Після підготовки схеми рекомендується скласти її опис (відповідне вікно викликається з меню Window > Description або за допомогою поєднання клавіш Ctrl+D).

3.2. Опис основних електронних елементів

Як вже зазначалось, електронна система Electronic Workbench містить чотирнадцять розділів в бібліотеці компонентів, які можуть бути використані при моделюванні. Нижче наводиться коротка довідка основних компонентів. Після назви в дужках наведені параметри компонента, які можуть бути змінені користувачем.

3.1. Favorites – у цьому розділі бібліотеки розміщуються підсхеми, якщо вони є в даній схемі (у початковому стані розділ порожній). В EWB ділянка великої схеми може бути перетворена в підсхему, яка позначається як невеликий прямокутник з виводами. Для створення підсхеми потрібно

виділити ділянку схеми, причому лінії виділення повинні перетинати ті провідники, які надалі стануть виводами підсхеми. Провідники, що не належатимуть до майбутньої підсхеми, і компоненти не повинні потрапляти у виділену область. Після цього викликається діалогове вікно створення підсхеми (Circuit > Create Subcircuit або клавіатурне скорочення Ctrl+B), в якому в рядку Name вводиться ім'я підсхеми, після чого можливі наступні варіанти:

- Copy from Circuit – підсхема копіюється з вказаною назвою в розділ бібліотеки Favorites без внесення змін до початкової схеми;
- Move from Circuit – виділена частина вирізується із загальної схеми і у вигляді підсхеми з привласненим нею ім'ям копіюється в розділ бібліотеки Favorites;
- Replace in Circuit – виділена частина замінюється в початковій схемі підсхемою з привласненим нею ім'ям з одночасним копіюванням її в розділ бібліотеки Favorites.

Для перегляду або редагування підсхеми потрібно двічі клацнути мишею по її значку. Редагування підсхеми здійснюється за загальними правилами редагування схем. При створенні додаткового виведення підсхеми необхідно з відповідної точки підсхеми курсором миші протягнути провідник до краю вікна підсхеми до появи контактного майданчика, після чого відпустити ліву кнопку миші. Для видалення виводу необхідно курсором миші торкнутися за його контактний майданчик у краю вікна підсхеми і винести її за межі вікна. Після цього в розділі бібліотеки Favorites з'являється зображення створеної підсхеми, яка потім може бути використана так само як і будь-які інші елементи, що містяться в розділах бібліотеки EWB. Використання підсхем дозволяє отримати компактну схему складного пристрою.

3.2. Sources – джерела сигналів. Слід зазначити, що під джерелами сигналів маються на увазі не тільки джерела живлення, але і керовані джерела.

3.3. Basic – бібліотека, в якій зібрані всі пасивні компоненти, а також комунікаційні пристрої.

3.4. Diodes - бібліотека, в якій зібрані всі діоди.

3.5. Transistors - бібліотека, в якій зібрані транзистори.

3.6. Analog ICs - бібліотека, в якій зібрані аналогові мікросхеми.

3.7. Mixed ICs - бібліотека, в якій зібрані мікросхеми змішаного типу.

3.8. Digital ICs – бібліотека, в якій зібрані цифрові мікросхеми.

3.9. Logic Gates – бібліотека, в якій зібрані логічні цифрові мікросхеми.

3.10. Digital – бібліотека, в якій зібрані цифрові функціональні пристрої.

3.11. Indicators – бібліотека індикаторних пристроїв.

3.12. Controls – бібліотека аналогових обчислювальних пристроїв.

3.13. Miscellaneous – бібліотека змішаного типу.

3.14. Instruments – бібліотека контрольно-вимірювальних приладів.

3.3. Опис контрольно-вимірювальних приладів

Панель контрольно-вимірювальних приладів містить цифровий мультиметр, функціональний генератор, двоканальний осцилограф, вимірник амплітудно-частотних і частотних характеристик, генератор слів (кодовий генератор), 8-канальний логічний аналізатор і логічний перетворювач. Загальний порядок роботи з приладами такий: іконка приладу

курсором миші переноситься на робоче поле і під'єднується провідниками до досліджуваної схеми. Для переведення приладу в робочий (розгорнутий) стан необхідно двічі клацнути курсором по його іконці.

Мультиметр (рис. 3.3). На лицьовій панелі мультиметра розташований дисплей для відображення результатів вимірювання, клеми для під'єднання до схеми, та кнопки управління:

- вибір режиму вимірювання струму, напруги, опору й ослаблення (згасання);
- вибір режиму вимірювання змінного або постійного струму;
- режим установок параметрів мультиметра.



Рис. 3.3. Мультиметр

Після натиснення на кнопку установки параметрів мультиметра відкривається діалогове вікно, в якому можна виставити наступні параметри:

- Ammeter resistance — внутрішній опір амперметра;
- Voltmeter resistance — вхідний опір вольтметра;
- Ohmmeter current — струм через контрольований об'єкт;

- Decibel standard — встановлення еталонної напруги V_1 при вимірюванні ослаблення або посилення в децибелах (за замовчуванням $V_1=1B$). При цьому для коефіцієнта передачі використовується формула: $K=20 \log(V_2/V_1)$, де V_2 – напруга в контрольованій крапці, K вимірюється в децибелах .

Функціональний генератор (рис.3.4). Управління генератором здійснюється наступними органами управління:

- вибір форми вихідного сигналу: синусоїдальна (встановлена за замовчуванням), трикутна і прямокутна;
- встановлення частоти вихідного сигналу;
- встановлення коефіцієнта заповнення у %: для імпульсних сигналів – це відношення тривалості імпульсу до періоду повторення – величина, зворотна шпаруватості, для трикутних сигналів – співвідношення між тривалістю переднього і заднього фронтів;
- встановлення амплітуди вихідного сигналу;
- встановлення зсуву (постійною складовою) вихідного сигналу;
- вихідні затискачі; при заземленні клеми COMMON (загальний) клеммах "-" і "+" виходить парафазний сигнал.

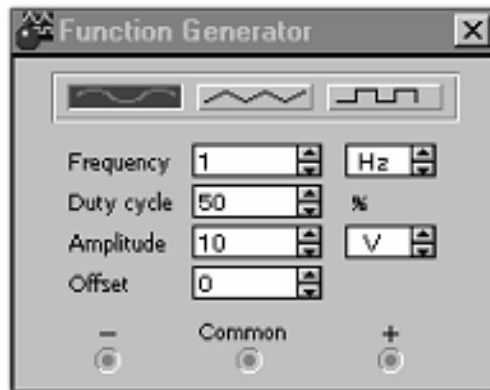


Рис. 3.4. Функціональний генератор

Осцилограф (рис. 3.5). Осцилограф має два канали (CHANNEL) А і В з роздільним регулюванням чутливості в

діапазоні від 10 мкВ/дел (mV/Div) до 5 кВ/дел (kV/Div) і регулюванням зсуву по вертикалі (Y POS). Вибір режиму по входу здійснюється натисненням кнопок AC, 0, DC. Режим AC призначений для спостереження тільки за сигналами змінного струму (його ще називають режимом «закритого входу», оскільки в цьому режимі на вході осцилографа включається розділовий конденсатор, який не пропускає постійну складову вхідного сигналу). У режимі 0 вхід замикається на землю. У режимі DC (під'єднаний за замовчуванням) можна здійснювати осцилографічні вимірювання як постійного, так і змінного струму. Цей режим ще називають режимом «відкритого входу», оскільки вхідний сигнал надходить на вхід вертикального підсилювача безпосередньо. З правого боку від кнопки DC розташований вхідний затискач.

Режим розгортки вибирається кнопками Y/T, V/A, A/V. У режимі Y/T (звичайний режим, встановлений за замовчуванням) реалізуються наступні режими розгортки: по вертикалі – напруга сигналу, по горизонталі – час; у режимі V/A: по вертикалі – сигнал каналу В, по горизонталі – сигнал каналу А; у режимі A/V: по вертикалі – сигнал каналу А, по горизонталі – сигнал каналу В.

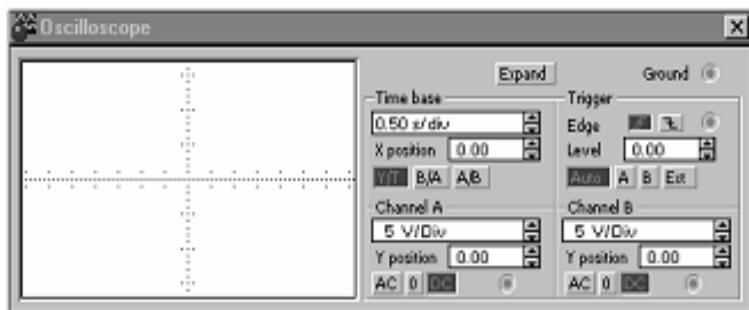


Рис. 3.5. Осцилограф

У режимі розгортки Y/T тривалість розгортки (TIME BASE) може бути задана в діапазоні від 0,1 нс/под (ns/div) до 1 с/под (s/div) з можливістю встановлення зсуву в тих же одиницях по горизонталі, тобто по осі X (X POS). Заземлення осцилографа

здійснюється за допомогою клеми GROUND в правому верхньому кутку приладу.

У режимі Y/T передбачений режим тригера (TRIGGER), який затримує момент запуску розгортки (EDGE) по передньому або задньому фронту запускаючого сигналу (вибирається натисненням відповідних кнопок) при певному регульованому рівні (LEVEL) запуску. При цьому вибирають режим AUTO, сигнал від каналу А чи від каналу В або від зовнішнього джерела (EXT), що підключається до затиску в блоці управління TRIGGER. Названі режими запуску розгортки вибираються кнопками AUTO, A, B, EXT.

При натисненні на кнопку ZOOM лицьова панель осцилографа істотно змінюється – збільшується розмір екрану, з'являється можливість прокрутки зображення по горизонталі і його сканування за допомогою вертикальних візирних ліній (синього і червоного кольорів), які за трикутні вушка (вони позначені також цифрами 1 і 2) можуть бути курсором встановлені в будь-яке місце екрана. При цьому в індикаторних віконцях під екраном наводяться результати вимірювання напруги, тимчасових інтервалів і їх приростів (між візирними лініями). Зображення можна інвертувати натисненням кнопки REVERSE, а також можна записати дані в текстовий файл за допомогою кнопки SAVE. Повернення до початкового стану осцилографа здійснюється за допомогою кнопки REDUCE.

Вимірник АЧХ і ФЧХ (рис. 3.6) призначений для аналізу амплітудно-частотних (при натиснутій кнопці MAGNITUDE, включена за замовчуванням) і фазочастотних (при натиснутій кнопці PHASE) характеристик. Можна задати логарифмічну (кнопка LOG, включена за умовчанням) або лінійну (кнопка LIN) шкалу по осях Y (VERTICAL) і X (HORIZONTAL). Налаштування вимірника полягає у виборі меж вимірювання коефіцієнта передачі і варіації частоти за допомогою кнопок у віконцях F – максимальне і I – мінімальне значення. Значення частоти і відповідне нею значення коефіцієнта передачі або фази відображаються у віконцях в правому нижньому кутку вимірника. Значення цих величин в окремих точках АЧХ або ФЧХ можна отримати за допомогою вертикальної візирної лінії, що знаходиться в початковому стані на початку

координат, і переміщуваною по графіку мишею або кнопками <, >. Результати вимірювання можна записати також в текстовий файл. Для цього необхідно натиснути кнопку SAVE і в діалоговому вікні вказати ім'я файлу (за умовчанням пропонується ім'я схемного файлу). В отриманому таким способом текстовому файлі «*.bod» АЧХ і ФЧХ подаються в табличному вигляді.

Підключення приладу до досліджуваної схеми здійснюється за допомогою затисків IN (вхід) і OUT (вихід). Ліві клєми затисків підключаються відповідно до входу і виходу досліджуваного пристрою, а праві – до загальної шини. До входу пристрою необхідно підключити функціональний генератор або інше джерело змінної напруги, при цьому яких-небудь налаштувань в цих пристроях не вимагається.



Рис. 3.6. Вимірник АЧХ і ФЧХ

Генератор слова (рис. 3.7). Кодові комбінації необхідно задавати в шістнадцятковому коді, кожна кодова комбінація заноситься за допомогою клавіатури, номер редагованої комірки фіксується у віконці EDIT блоку ADDRESS. Всього таких комірок і, отже, комбінацій – 2048. В процесі роботи генератора у відсіку ADDRESS відображається номер поточної комірки (CURRENT), комірки початку роботи (INITIAL) та кінцевої комірки (FINAL). Подані на 16 виходів (у нижній частині генератора) кодові комбінації відображаються в текстовому (ASCII) і двійковому коді (BINARY).

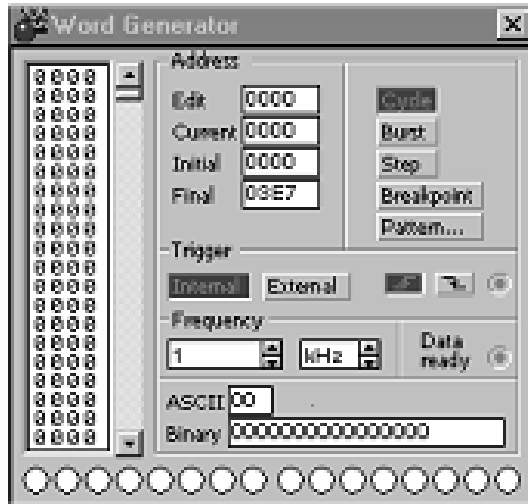


Рис. 3.7. Генератор слова

3.3. Аналіз схем

Концепція електронної лабораторії з віртуальними вимірювальними приладами закладена в систему моделювання EWB, істотно полегшує виконання найскладнішого етапу – розрахунку процесів, які відбуваються в радіоелектронному пристрої. Після складання схеми і підключення до схеми вимірювальних приладів для початку аналізу ланцюга досить натиснути кнопку **ACTIVATE/STOP**, що знаходиться в лівому кутку панелі інструментів. Розраховані значення струмів, напруги або опорів відображаються на екранах вимірювальних приладів. Аналогічний порядок роботи має місце в реальній лабораторії з реальними вимірювальними приладами. Процес моделювання можна тимчасово припинити, натиснувши кнопку **PAUSE**. Для запуску, припинення або тимчасового припинення процесу моделювання можна також скористатися відповідними командами пункту меню **ANALYSIS > (ACTIVATE, STOP,**

PAUSE) або «гарячими» клавішами Ctrl+G, F9, Ctrl+T відповідно.

На другому етапі моделювання можна змінити параметри елементів, видалити або додати радіоеlementи, підключити прилади до інших контрольних точок схеми і тому подібне. Після таких змін, як правило, потрібно знову активізувати ланцюг, натискаючи кнопку ACTIVATE/STOP. При використанні змінних резисторів, конденсаторів або котушок зміну процесів у ланцюзі можна спостерігати, як правило, не припиняючи моделювання. Проте при цьому збільшується похибка отримуваних результатів. Тому для отримання надійних результатів розрахунок рекомендується повторити при фіксованих параметрах.

Залежно від типу підключеного приладу програма EWB автоматично настраюється на виконання наступних основних видів аналізу:

- DC OPERATING POINT – розрахунок режиму за постійним струмом при включенні мультиметра, амперметра і вольтметра для вимірювання постійних струмів і напруги;
- AC FREQUENCY – розрахунок частотних характеристик, при включенні вимірника АЧХ і ФЧХ, а також мультиметра, амперметра і вольтметра для вимірювання гармонійних струмів і напруги;
- TRANSIENT – розрахунок перехідних процесів, при використанні осцилографа. У програмі EWB передбачений також інший порядок аналізу схеми – вибір режимів аналізу за допомогою меню ANALYSIS. Вказані вище режими аналізу електричного ланцюга можна отримати, вибираючи відповідні команди пункту меню ANALYSIS. Окрім цього, за допомогою команди ANALYSIS > ANALYSIS OPTIONS (клавіатурне скорочення Ctrl+Y) можна встановити параметри моделювання. Після вибору даної команди з'являється діалогове вікно, що містить п'ять закладок:

Закладка «Global» – настройки загального характеру, задаються за допомогою наступних параметрів:

- ABSTOL – абсолютна помилка розрахунку струмів;

- GMIN – мінімальна провідність ділянки провідника (провідність яка менша від GMIN, вважається токою, що рівна нулю);

- PIVREL, PIVTOL – відносна і абсолютна величини елемента рядка матриці вузлової провідності (наприклад, при розрахунку по методу вузлових потенціалів), необхідні для його виділення як провідного елемента;

- RELTOL – допустима відносна помилка розрахунку напруги і струму;

- TEMP – температура, при якій здійснюється моделювання;

- VNTOL – допустима помилка розрахунку напруги в режимі Transient (аналіз несхожих процесів);

- CHGTOL – допустима помилка розрахунку зарядів;

- RAMPTIME – початкова точка відліку часу при аналізі перехідних процесів

- CONVSTEP – відносний розмір кроку ітерації при розрахунку режиму за постійним струмом;

- CONVABSSTEP – абсолютний розмір кроку ітерації при розрахунку режиму за постійним струмом;

- CONVLIMIT – включення або виключення додаткових засобів для забезпечення збіжності ітераційного процесу;

- RSHUNT – допустимий опір витоку для всіх вузлів щодо загальної шини (заземлення).

- Temporary... – об'єм дискової пам'яті для зберігання тимчасових файлів (у Мбайт).

Закладка «DC» – настройка для розрахунку режиму за постійним струмом (статичний режим):

- ITL1 – максимальна кількість ітерацій наближених розрахунків;

- GMINSTEPS – розмір приросту провідності у відсотках від GMIN (використовується при слабкій збіжності ітераційного процесу);

- SRCSTEPS – розмір приросту напруги живлення у відсотках від його номінального значення при варіації напруги живлення (використовується при слабкій збіжності ітераційного процесу).

Кнопка Reset Defaults призначена для встановлення за замовчуванням параметрів і використовується в тому випадку, якщо після редагування необхідно повернутися до початкових даних.

Закладка «Transient» – настройка параметрів режиму аналізу перехідних процесів:

- ITL4 – максимальна кількість ітерацій за час аналізу перехідних процесів;
- MAXORD – максимальний порядок (від 2 до 6) методу інтеграції диференціального рівняння;
- TRTOL – допуск на похибку при обчислення змінної;
- METHOD – метод наближеної інтеграції диференціального рівняння: TRAPEZOIDAL – метод трапецій, GEAR – метод Гіра;
- ACCT – дозвіл на виведення статистичних повідомлень про процес моделювання.

Закладка «Device» – вибір параметрів МОП-ТРАНЗИСТОРІВ:

- DEFAD – площа дифузійної області стоку, m^2 ;
- DEFAS – площа дифузійної області витоку, m^2 ;
- DEFL – довжина каналу польового транзистора, м;
- DEFW – ширина каналу, м;
- TNOM – номінальна температура компонента;
- BYPASS – включення або виключення нелінійної частини моделі компонента;
- TRYTOCOMPACT – включення або виключення лінійної частини моделі компонента.

Закладка «Instruments» – настройка параметрів контрольно-вимірювальних приладів.

- PAUSE AFTER EACH SCREEN – пауза (тимчасова зупинка моделювання) після заповнення екрана осцилографа по горизонталі (OSCILLOSCOPE);
- GENERATE TIME STEPS AUTOMATICALLY – автоматичне встановлення тимчасового кроку (інтервалу) виведення інформації на екран;
- MINIMUM NUMBER OF TIME POINTS – мінімальна кількість точок, що відображаються, за період спостереження (реєстрації);

- TMAX – проміжок часу від початку до кінця моделювання;
- SET TO ZERO – встановлення в нульовий (початковий) стан контрольно-вимірювальних приладів перед початком моделювання;
- USER-DEFINED – управління процесом моделювання здійснюється користувачем (ручний пуск і зупинка);
- CALCULATE DC OPERATING POINT – виконання розрахунку режиму за постійним струмом;
- POINTS PER CYCLE – кількість крапок, що відображаються, при виведенні амплітудно-частотних і фазочастотних характеристик (BODE PLOTTER);
- USE ENGINEERING NOTATION – використання інженерної системи позначень одиниць вимірювання (наприклад, напруга виводитиметься в мілівольтах (*mB*), мікрвольтах (*μB*), нановольтах (*nB*) і тощо.

Окрім зазначених трьох основних видів аналізу, за допомогою пункту меню ANALYSIS можна додатково виконати інші види аналізу: спектральний аналіз (FOURIER), розрахунок чутливості і розкиду характеристик схеми при зміні параметрів компонентів (MONTE CARLO). У професійній версії системи моделювання (PROFESSIONAL EDITION) доступні також такі види аналізу, як аналіз спектра внутрішніх шумів (NOISE), розрахунок нелінійних спотворень (DISTORTION), аналіз впливу варіацій параметра елемента схеми (PARAMETER SWEEP), аналіз впливу зміни температури на характеристики пристрою (TEMPERATURE SWEEP), розрахунок нулів і полюсів передавальної характеристики модельованого ланцюга (POLE-ZERO), розрахунок передавальної функції (TRANSFER FUNCTION) і розрахунок чутливості і розкиду характеристик схеми при зміні параметрів компонентів (SENSITIVITY, WORST CASE).

Розрахунок чутливості і розкиду характеристик схеми при зміні параметрів компонентів може бути важливий через те, що всі радіоелементи виготовляються на підприємствах з деяким розкидом параметрів. У побутовій апаратурі розкид параметрів елементів досягає 20%. В апаратурі спеціального призначення, у відповідальних вузлах радіоелектронних

пристроїв розкид параметрів, як правило, не повинен перевищувати 10%. Окремі радіокомпоненти виготовляються з розкидом параметрів, рівним 5%, 2%, 1% і менше. Наприклад, в джерелах живлення ЕОМ для отримання високостабільної напруги можуть використовуватися резистори з розкидом параметрів, рівним 0,5%. Для розрахунку нестабільності характеристик пристрою і їх чутливості до змін параметрів компонентів при заданому розкиді параметрів елементів використовується пункт меню ANALYSIS > MONTE CARLO. При аналізі нестабільності характеристик, як правило, задається гаусів розподіл випадкового розкиду параметрів радіоелементів. Аналіз чутливості і розкиду характеристик схеми при зміні параметрів компонентів потрібний для оцінювання працездатності пристроїв при модернізації, ремонті та серійному виробництві.

4. ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

4.1. Дані для самостійного розрахунку підсилювача

Розраховувати багатокаскадний підсилювач згідно зі схемою на рис.2.1, із наступними параметри для розрахунку:

- 1) Опір навантаження $(3 + ДД/10)$ [Ом].
- 2) Смуга підсилення в інтервалі зазначених частот $(\sqrt{ДД+ММ} * 10)$ [Гц] ÷ $(\sqrt{ДД + NC - ММ}) * 10$ [кГц].
- 3) Коефіцієнт підсилення каскаду за напругою $(2,5 + NC/5) * 70$.
- 4) Потужність вихідного сигналу $(ММ + 1)$ [Вт].
- 5) Вхідний опір підсилювача $(52 + NC)$ [кОм].

Позначення:

ДД – день народження виконавця.

ММ – місяць народження.

NC – номер у списку групи в журналі академічної групи.

4.2. Вимоги до оформлення курсового проекту:

Конструкторсько-розрахункова робота повинна бути оформлена згідно з вимогами вищої школи. Рисунок схем, графіків, на кожній сторінці звіту повинні відповідати вимогам ЕСКД. Робота повинна включати:

- 1) Титульну сторінку.
- 2) Зміст.
- 2) Опис постановки задачі відповідно до свого варіанта.
- 3) Опис принципу роботи схеми та призначення всіх компонентів схеми відповідно до принципової електричної схеми підсилювача.
- 6) Розрахунок номіналів компонентів електричної схеми підсилювача. Номінали розрахованих компонентів повинні бути вказані на окремій (робочій) електричній схемі та в переліку елементів згідно з вимогами ЕСКД.
- 7) Монтажну схему підсилювача.

Наступні пункти виконуються під час моделювання схеми підсилювача в середовищі *Electronic Workbench*.

- 8) Емпіри вихідних напруг роботи каскаду з під'єднаним та від'єднаним R_n , які відтворені на міліметрівці, при $U_{вх} = 10 \div 100$ мВ.
- 9) Визначення значення статичного та динамічного вихідних опорів підсилювача.
- 10) Визначення вхідного і вихідного динамічного діапазону.
- 11) Графік амплітудної характеристики.
- 12) Графік АЧХ.
- 13) На основі графіка АЧХ визначити f_n і f_v та частоту одиничного підсилення.
- 14) Графік ФЧХ.
- 15) Визначити ККД підсилювача.
- 16) Висновки, в яких вказані параметри розрахованого багатокаскадного підсилювача та аналіз особливостей його роботи.

Номинальні ряди компонентів і напруг живлення

Номинальні опори резисторів і ємності конденсаторів, які виробляються промисловістю стандартизовані. Для постійних резисторів встановлено шість рядів *E6*, *E12*, *E24*, *E48*, *E96*, *E192*. Для змінних резисторів встановлений ряд *E6*. Цифра після букви *E* вказує кількість номинальних значень у кожному десятичному інтервалі. Номинальний опір у кожній декаді відповідає вказаному в таблиці числу, помноженому на 10^n , де n – ціле додатне або від'ємне ціле число. Для конденсаторів встановлено чотири ряди *E3*, *E6*, *E12*, *E24*. Ємності електролітичних конденсаторів відповідають номинальним рядам *E3* (для $C \geq 100$ мкФ) та *E6* для менших номиналів.

Номинальний ряд *E24* для резисторів: 1; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2; 2,2; 2,4; 2,7; 3; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1.

Для резисторів необхідно враховувати встановлений номинальний ряд розсіювання потужності у *Вт*, які позначаються умовним позначенням на електричній схемі пристрою: 0,05; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 3.

Номинальний ряд *E12* для конденсаторів: 1; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2. Для конденсаторів необхідно враховувати встановлений номинальний ряд допустимих напруг, поданих до конденсатора, при яких він може зберігати роботоздатність і зберігає вказані електричні параметри: 1,6 В; 6,3 В; 10 В; 16 В; 25 В; 50 В; 63 В; 100 В.

При заданні джерела живлення електронного пристрою необхідно використовувати номинальний ряд напруг живлення електронної апаратури: 1,5 В; 3 В; 6 В; 9 В; 12 В; 15 В; 18 В; 24 В; 27 В; 30 В; 32 В; 36 В; 42 В.

Навчальне видання

БАГАТОКАСКАДНІ
ТРАНЗИСТОРНІ
ПІДСИЛЮВАЧІ

Укладачі: Нічий Сергій Васильович
Громко Євген Дмитрович

Відповідальний за випуск Савчук А.Й.

Літературний редактор Макарова О.П.