

621.396(075)

1780

Міністерство освіти і науки України
Вінницький державний технічний університет

7

І.Д. Прокопов

**ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ
РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИБОРІВ**

Вінниця ВДТУ 2000

3117-22

Міністерство освіти і науки України
Вінницький державний технічний університет

І.Д. Прокопов

ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Затверджено Ученою радою Вінницького державного технічного університету як навчальний посібник для студентів і магістрантів технічних спеціальностей. Протокол №9 від 27 квітня 2000 р.

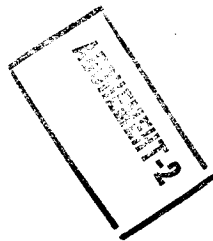
НТБ ВНТУ



3117-22

621.396(075) П 80 2000

Прокопов І.Д. Основи автоматизації проекту



Вінниця ВДТУ 2000

УДК.681.14.

Основи автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв. Навчальний посібник для студентів спеціальності "Радіотехніка" та "Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення" всіх форм навчання./І. Д. Прокопов – Вінниця: ВДТУ, 2000 – 66с./

Бібліограф. 7 найм., 35 іл.

Рецензенти: С. М. Зленко д. техн. н. ВДТУ
Г. Г. Бортник к. техн. н. ВДТУ
Є. О. Паламарчук к. техн. н. ВДСГІ



Передмова

Написання даного навчального посібника зумовлено кількома причинами. Головна з них – це практично відсутність необхідних підручників, а тим більше українською мовою. Інші причини зв'язані з перебудовою навчального процесу у вищій школі. Скорочення лекційних годин віддає пріоритетну роль самостійній підготовці студентів, яка стає одним із головних засобів професійної підготовки. Це потребує відповідного методичного забезпечення, особливо під час виконання домашніх завдань, курсових проектів і робіт.

Запропонований навчальний посібник розроблений відповідно до навчальної програми “Основи автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв” (ОАПРЕП), яка вивчає запровадження інформаційних комп'ютерних технологій для забезпечення автоматизації процесу проектування, роблячи відмінним його від традиційного “ручного проектування”. Показано зв'язок між основними компонентами автоматизованих систем. Такими компонентами є: програмне, математичне, інформаційне, організаційне та методичне забезпечення ОАПРЕП.

Перші два компоненти ОАПРЕП, програмне та математичне забезпечення, є базою, яка багато в чому визначає “зовнішність” та головні риси решти його компонентів. Саме тому студентам необхідні досить широкі та глибокі знання в цій області, які дають можливість впроваджувати знання, що їх студенти отримали у попередніх дисциплінах, зокрема, таких як “Основи обчислювальної техніки” та “Основи програмування”, при роботі з конкретними системами автоматизованого проектування та моделювання. Серед багатьох розповсюджених систем моделювання аналогових та цифрових пристроїв для навчальних цілей була вибрана система Micro-Cap, тому що вона має

багато версій, які можна адаптувати до різноманітних версій середовищ від DOS до Windows і надто точно моделювати аналогові і цифрові пристрої та їх комбінації. За допомогою Мікро-Сар системи можна провести повний схемотехнічний аналіз складних пристроїв, таких, як телевизор, відеомагнітофон, комп'ютер і тому подібне. В цілому система Мікро-Сар дає можливість впроваджувати нові схемні пропозиції в радіоелектронні пристрої і ретельно досліджувати якісні характеристики від цих впроваджень. Лабораторний практикум, який входить в посібник, дає можливість студенту на практиці зрозуміти основні математичні методи, які лежать в основі моделювання радіоелектронних пристроїв, і зв'язок їх з програмним, лінгвістичним та інформаційним забезпеченнями.

Мета посібника – надати студенту пояснення та рекомендації щодо впровадження повного аналізу та синтезу радіоелектронних пристроїв проектувальними системами, а також показати зв'язок між основними компонентами забезпечення, які вивчає дисципліна ОАПРЕП.

1 Основи автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв

1.1 Загальні та історичні відомості автоматизації виробничого процесу.

В практичній діяльності людина ставить за мету збільшення продуктивності своєї праці по задоволенню її матеріальних потреб і розвитку самої себе як складової частини природи.

Історично першим засобом підвищення ефективності праці стала механізація. Проте її застосування має природну межу: роботою механізмів керує людина, а її можливості обмежені швидкістю її ж реакції. Рішення проблеми було знайдено в тому щоб взагалі вилучити людину з конкретного виробничого процесу, примусити машину не тільки виконувати саму роботу, а й керування нею.

Пристрої, які поєднують в собі функції виконання роботи та керування нею, отримали назву “автомати”, а такий спосіб підвищення продуктивності праці людини почали називати “автоматизація”.

Виробничі процеси, в яких участь людей виключалась повністю, стали називати “автоматичними”, в яких тільки частково-автоматизованими або напівавтоматичними.

1.2 Життєвий цикл технічної системи

Технічні системи (ТС), тобто засоби людської діяльності, що створюються для здійснення виробничого процесу та задоволення невиробничих потреб суспільства, мають характерний ряд етапів існування – “життєвий цикл” [1] рис 1.1.

Як бачимо, виробництво стало першим з етапів “життєвого циклу”

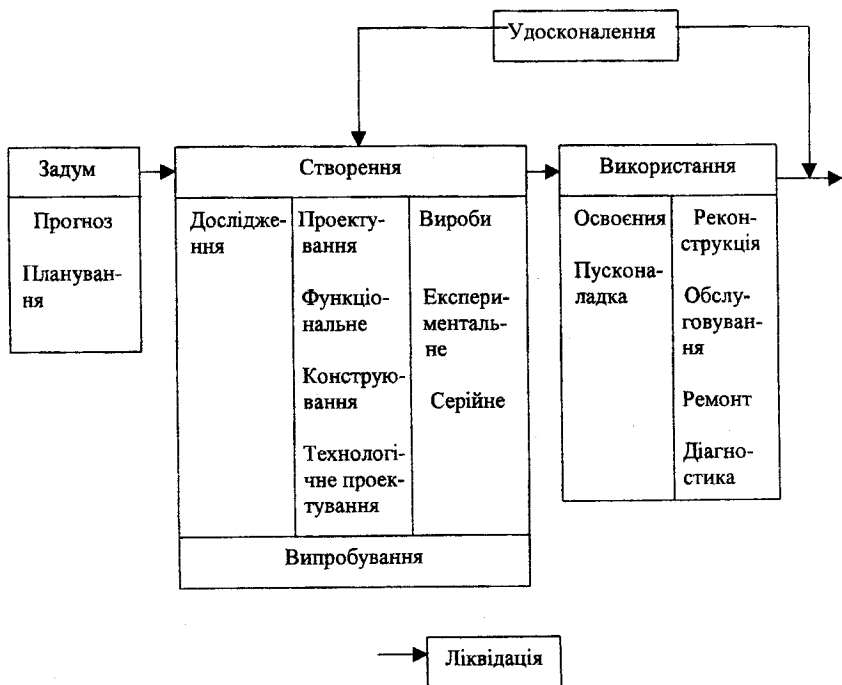


Рисунок 1.1 — “Життєвий цикл” технічної системи

технічних систем, на якому почала впроваджуватись автоматизація праці людини – спочатку фізичної (створення технічних засобів автоматизації), а потім і розумової.

Автоматизація інтелектуальної творчої діяльності людини досягла вражаючих результатів. Власне кажучи, створення сучасних технологічних засобів автоматизації фізичної праці багато в чому зобов'язане саме появі таких систем автоматизації розумової праці, як системи автоматизованого проектування.

Тут корисно також звернути увагу на те, що термін “проектування” часто використовується в двох різних значеннях.

В широкому значенні слова під проектуванням розуміють комплекс

робіт по дослідженню, розрахунках та конструюванню на основі перетворення початку опису об'єкта з метою отримання опису (комплексу конструкторської та технологічної документації), необхідного та достатнього для створення нового виробу або реалізації нового процесу.

1.3 Етапи процесу проектування

Процес проектування будь-якої технічної системи ділиться на етапи:

- функціонального проектування: визначення принципів функціонування, розробка структури ТС;
- конструкторського проектування (конструювання): вибір форм, компоновання, розташування конструкцій, виготовлення конструкторської документації;
- технологічного проектування: проектування технологічних процесів, що включає розробку маршрутної та операційної технологій, вибір оснастки, визначення технологічної бази, розробку програм керування технологічними автоматами тощо.

У вузькому значенні слова під керуванням іноді розуміють тільки етап функціонального проектування, маючи на увазі те, що саме на ньому визначається головна відмінність об'єкта, що створюється заново, - його принцип функціонування. Тоді, на відміну від попереднього використання терміну, проектом називають результат діяльності проектувальника на функціональному етапі.

Відповідно для двох інших етапів, результат діяльності конструктора називають конструкцією, технолога – технологічним процесом.

Синонімом терміну “проект” у вузькому значенні може бути слово “задум”, в широкому значенні – “опис виробу”, “документація для виробу”.

Додамо, що етап функціонального проектування, як правило, може

розбиватися на складові частини в залежності від ступеня деталізації (стану опису) чи абстрагування при розгляданні ТС.

Їх часто називають рівнями проектування. Наприклад, для задач проектування електронних пристроїв виділяють системний (структурний, макро-), функціонально-логічний (схемотехнічний, мета-), компонентний (мікроприладний) рівні.

Система автоматизованого проектування являє собою організаційно-технічний комплекс, призначений для автоматизації проектування об'єктів на всіх етапах: від видачі технічного завдання до одержання технічної документації [2].

В разі часткової автоматизації етапу проектування отримують системи автоматизованого моделювання, системи автоматизованого інженерного аналізу, системи автоматизованої підготовки документації тощо.

Застосування систем автоматизації проектування на різних етапах "життєвого циклу" технічної системи дає інші приклади автоматизації творчої праці людини в інженерній діяльності.

1.4 Приклади застосування систем автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв

Системи автоматизації проектування розумової праці людини можна використовувати на різних стадіях її діяльності.

Так, наприклад, для досягнення високої якості розробок і скорочення часу використовують інтегровані системи автоматизованого проектування, які орієнтовані на міжнародні стандарти (системи CAD - CAM), які в якості периферійного обладнання використовують дільниці друкованих плат та роботи виготовлення функціонально закінчених пристроїв

На Дніпропетровському машинобудівному заводі використання систем автоматизації технологічної документації під назвою “ДНІПРО” та “СИМПАТІЯ” (спеціальне конструкторське бюро “Алмаз”) дало можливість скоротити час розробки та виготовлення цифрової телефонної станції (ЩС-32), яка стала основною складовою частиною “Комплексної програми єдиної національної системи зв’язку України”, в 2-3 рази.[3] Ця система складається з міської (ЕАТС-ЦА) і сільської (ЕНТС-ЦА).

Використання автоматизованої системи дало можливість застосувати виготовлення комірок, касет апаратури з автоматизацією монтажу і контролю якості, що є прикладом повної автоматизації процесу проектування технічної системи.

Починаючи десь з другої половини 80-х років з’явився новий клас систем автоматизованого проектування (САПР), які мають назву – “САПР-ПЛІС” [4]. Ці системи дають можливість розробляти напівзамовні великі інтегральні схеми (ВІС), які складаються з багатьох логічних схем “і”, “або”, “ні”, також тригерів та комірок пам’яті.

Ця автоматизована технологія програмованих логічних матриць дає можливість “згорнути” в мікросхему багато десятків корпусів стандартної логіки. Швидкодія такої замовної мікросхеми досягає сотен МГц.

Розробка подібної мікросхеми проводиться за декілька годин на робочому місці розробника.

Відомі ПЛІС компанії “Altera”, наприклад, мають у своєму складі до ста тисяч логічних елементів. Програмні пакети виконують функції проектування цифрових схем на ПЛІС.

Вітчизняний пакет має назву “ФОРС+”, може працювати на комп’ютері АТ-286 з 640 Кб пам’яті і монітором EGA.

Пакети фірми “Altera” мають назву “Flash logic” та “Max+Plus” і потребують комп’ютер Pentium з ОЗУ 16 Мб та 60 Мб вільного місця на жорсткому диску.

Основні етапи розробки ПЛІС-мікросхем:

- 1.Описання задачі на мові програмного пакету.
- 2.Синтез виконуваних функцій на одній чи декількох мікросхемах ПЛІС.
- 3.Моделювання та часовий аналіз роботи.

Схема в системі описується на мові програмного пакету, наприклад, опис двійкового лічильника виглядає як речення: [C4]Q3:Ø, де [C4] – кількість розрядів лічильника, а Q3:Ø - його виходи, до яких можливо під'єднувати інші логічні елементи. В пакеті є графічний редактор, який дає можливість рисувати на екрані електричну схему, використовуючи бібліотеку компонентів 555 та 561 серій.

Процес проектування включає трансляцію, аналіз синтаксичних та схемних помилок, мінімізацію схеми і її документацію.

Результатом такого проектування є комп'ютерний файл прошивки ПЛІС в форматі IEDFL (стандарт сумісності програматорів).

Після проектування проводиться аналіз роботи мікросхеми:

- логічна верифікація (без урахування часових затримок);
- часове імітаційне моделювання (враховує часові затримки);
- часовий аналіз.

Ця технологія іноді має назву – “фабрика на столі”.

1.5 Вибір системи комплексного моделювання схем радіоелектронних пристроїв

Перед розробниками апаратури завжди виникає проблема використання системи комп'ютерного моделювання. Приймаючи рішення по впровадженню такої системи, розмірковують таким чином:

1. Вважаємо, що нам потрібна така система.

2. Витрати після впровадження системи зменшуються приблизно на 20% в рік.

3. Можливо зачекаємо з впровадженням системи.

4. Наші конкуренти вже використовують комп'ютерні системи моделювання.

5. Комп'ютерна система моделювання нам потрібна.

Серед багатьох існуючих систем моделювання слід виділити такі професійні системи, як DesignLab, VieWlogie, Electronics Workbench, P-Spice, Mathematica 3.0, які є комерційними.

Однак для навчального процесу і вирішення навчально-проектних задач в більшості навчальних закладах використовуються версії Micro-Cap, які вільно розповсюджуються в мережі Internet. Іншими словами, використовуючи її в навчальних цілях, не порушуємо нічиїх авторських прав. Тим паче навіть демонстраційна версія цієї програми дозволяє надто точно моделювати аналогові і цифрові пристрої і їх комбінації. Найістотніша її відмінність від комерційної версії – гранична кількість елементів в схемі – їх повинно бути не більше 50. Ця кількість цілком задовольняє навчальні задачі, які дають можливість моделювати електронні пристрої середньої складності в навчальному процесі на операційній платформі Windows. Так версія програми Micro-CapV працює на комп'ютері IBM PC-80486 і вище з об'ємом оперативної пам'яті 16 Мбайт в операційному середовищі Windows 98. Програма займає на диску 12 Мбайт. Дистрибутив знаходиться в мережі Internet (адреса сайту www.spectrum-soft.com).

Дистрибутив версії Micro-CapV займає три з половиною мегабайти і встановлюється з жорсткого диска.

2 Комплексна автоматизація моделювання радіоелектронних приладів

2.1 Комплексний аналіз систем моделювання

Перед початком процесу моделювання потрібно пройти такі етапи:

1. Провести вибір принципової схеми.
2. Розрахувати попередні параметри електронної схеми.
3. Вибрати систему моделювання для аналізу вихідних характеристик вибраної принципової схеми.

Вести опис схеми через інтерфейс користувача в комп'ютер і отримати комплексні вихідні характеристики. Коли вихідні характеристики не задовольняють технічні вимоги, потрібно провести оптимізацію параметрів електронної схеми.

Традиційно задача проектування полягає в тому, щоб розробник на основі власного досвіду та інтуїції синтезує принципову схему, вибирає і розраховує параметри, а потім перевіряє характеристики на її фізичній моделі (макетує). В тому випадку, якщо схема не задовольняє вимоги, розробник відповідним чином змінює її параметри і знову здійснює перевірку характеристик. Цей цикл буде повторюватись до тих пір, доки не будуть отримані потрібні параметри схеми.

Принципова відмінність методики проектування з використанням ЕОМ в тому, що немає потреби проводити трудомістке та високовартісне фізичне моделювання. Всі ці операції виконує ЕОМ на математичній моделі електронної схеми у вигляді розв'язування системи рівнянь. Важливо також те, що моделювання дає можливість розрахувати параметри, які неможливо безпосередньо виміряти на макеті через

недоступність місць вимірів. Крім того, на моделі можна проаналізувати граничні режими, фізична реалізація яких може вивести схему з ладу.

Існує підхід використання ЕОМ не тільки для аналізу, але і для складання математичної моделі (системи рівнянь) принципової схеми. Інший підхід, який ми називаємо комплексним моделюванням, потребує на основі вибраного критерію (характеристик схеми і методів випробування) провести аналіз існуючих систем моделювання і вибрати ту з них, яка найбільш задовольняє всі вимоги аналізу схеми з технічного завдання. Таким чином, вибір системи моделювання дає можливість уникнути складання деяких моделей аналізу схем, які не входять в найбільш розповсюджені системи моделювання, на відповідність системи усім вимогам технічного завдання.

Оцінку вибору системи моделювання можливо отримати з виразу:

$$R = \frac{MAC}{ПТЗ \cdot S},$$

де R – оцінка вибору системи моделювання [1/ціна];

MAC – кількість параметрів технічного завдання, які можна аналізувати модельованою системою;

$ПТЗ$ – кількість параметрів технічного завдання проекту;

S – вартість модельованої системи.

Час, який витрачається на це, дає можливість уникнути роботи по складанню допоміжних алгебро-топологічних рівнянь електронної системи, а також налагодження програм, які забезпечать повний комплекс усіх вимог, що запропоновані в технічному завданні.

2.2 Складання алгебро-топологічних рівнянь електронної схеми

При аналізі електронної схеми використовують перший і другий закони Кірхгофа. Тому при складанні математичної моделі схеми

використовують систему рівнянь, які описують схему за першим і другим законами Кірхгофа. Тоді задачу автоматизації процесу аналізу схеми можна вирішити в два етапа:

1. Складання системи рівнянь за першим і другим законами Кірхгофа.

2. Розв'язання на ЕОМ і аналіз результатів розрахунку.

Другий етап проводиться з використанням відомих математичних методів (чисельні методи розв'язання систем лінійних, диференціальних, нелінійних рівнянь і т. п.) [5].

Перший етап автоматизації складання рівнянь Кірхгофа реалізується за допомогою теорії графів. Дійсно, граф електронної схеми описує її конфігурацію (топологію) і вказує зв'язок гілок і вузлів схеми. Це необхідно знати, щоб скласти систему рівнянь електронного ланцюга за першим і другим законом Кірхгофа.

Для того, щоб побудувати граф електронної схеми необхідно за її принциповою схемою побудувати еквівалентну (всі її принципові елементи замінити моделями, позначити вузли схеми і вибрати напрямки гілок). В цьому випадку вузли схеми будуть відповідати вузлам графа, а гілки – гілкам графа.

В загальному випадку електронна схема може містити джерела напруги (E) і струму (I), керувальні джерела напруги (E_k) і струму (I_k) (наприклад, при наявності в схемі активних елементів типу транзистор, операційний підсилювач і т. п.), опори R , індуктивності L і ємності C . При нумерації гілок графа необхідно в першу чергу нумерувати гілки, які мають E_k , потім гілки які мають E , і далі послідовно гілки з C, R, L, I , і I_k .

Граф електронного ланцюга відображає схемну конфігурацію (топологію) і характеризується такими поняттями: контур, дерево, доповнення дерева, перетин, головний перетин. Будувати дерево графа потрібно так. Необхідно побудувати вузли графа і послідовно в порядку

збільшення номерів додавати до них гілки. Коли додавана гілка не утворює з тими гілками, які додані раніше, замкнений контур, вона відноситься до дерева графа (до ребер). В іншому випадку вона відноситься до доповнення дерева (хордам).

Необхідно чітко уяснити зв'язок між матрицями головних перетинів контурів. Ці матриці головних перетинів і контурів в своєму складі мають матрицю головних перетинів хорд F . В свою чергу матриця F використовується для запису загального алгебро-топологічного рівняння електронної схеми

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{u}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\bar{F}\bar{0} \\ -\bar{0}F^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_x \\ \bar{u}_p \end{bmatrix},$$

де $\bar{i}_p, \bar{u}_p, \bar{i}_x, \bar{u}_x$ - струми і напруги в ребрах і хордах графа відповідно;

$\bar{0}$ - матриця нульових елементів.

Алгебро-топологічне рівняння описує схему за першим і другим законами Кірхгофа. Враховуючи, що матрицю F можливо отримати за формальним процесом, то можна формалізувати алгоритм складання системи рівнянь схеми за першим і другим законами Кірхгофа, що дає можливість автоматизувати процес аналізу електронної схеми на ЕОМ.

2.3 Розрахунки частотних характеристик

Для розрахунків частотних характеристик схеми, наприклад, амплітудно-частотних (АЧХ) чи фазочастотних (ФЧХ) можна використати вираз передаточної функції кола гілки, яке можливо перетворити в вираз комплексного коефіцієнта передачі.

Модуль комплексного коефіцієнта передачі є вираз для АЧХ, а його фаза - ФЧХ. Вирішення задачі зводиться до отримання виразів і складання програм розрахунків характеристик.

В тих випадках, коли схема складна, отримати вираз також складно. Тоді використовують автоматизацію процесу розрахунку виразів до АЧХ і ФЧХ.

Сутність алгоритму автоматизованих розрахунків частотних характеристик складається з того, що потрібно сформулювати загальне алгебро-топологічне рівняння (попередньо перетворене з урахуванням того, що на схему впливає джерело гармонічної напруги).

Розв'язання системи рівнянь схеми дає можливість знайти струми усіх гілок на деякій частоті ω_i . Знаючи, з якої гілки знімається напруга, струм в цій гілці і комплексний опір гілки на частоті ω_i , можна обчислити значення АЧХ і ФЧХ схеми на цій частоті.

Виконавши обчислення за описаним алгоритмом при інших значеннях частоти, можна отримати ФЧХ і АЧХ схеми.

2.4 Розрахунки часових характеристик електронної схеми

Під часовою характеристикою лінійної гілки розуміють перехідну і імпульсну характеристики. Ці дві характеристики є відгук на виході гілки на певну дію на її вході. Перехідна характеристика є відгук на поодинокий стрибок, імпульсна характеристика – відгук на дельта-функцію. В обох випадках початковий стан схеми приймається нульовим.

Розрахунки часових характеристик основані на використанні передаточної функції гілки чи рівняння її стану. Наприклад, коли передаточна функція схеми $K(p)$, то зображення її перехідної

характеристики $g(p) = \frac{1}{p} K(p)$,

де $\frac{1}{p}$ - зображення поодинокого стрибка.

Використовуючи зворотне перетворення Лапласа чи теорему вичитів, за наведеною формулою можна знайти вираз перехідної характеристики схеми і скласти програми до її розрахунку.

Використання рівнянь стану гілки приводить в загальному випадку до необхідності розв'язання системи диференціальних рівнянь.

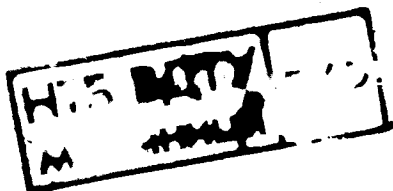
Відомі різні методи розв'язання таких систем, які відрізняються точністю, кількістю обчислювальних операцій (методи Ейлера, Ейлера-Коші, Рунге-Кутта). Найбільш ефективним методом, який враховує компроміс між точністю і кількістю операцій, є метод Рунге-Кутта.

2.5 Розрахунки статичних режимів електронних схем

Всі дії на модельовану схему можна розділити на два типи: дія джерел вхідних сигналів і джерел постійних напруг. Під статичним режимом схеми слід розуміти режим, при якому відсутні вхідні сигнали і на схему діють тільки джерела постійних напруг.

Розрахунки статичного режиму зводяться до розрахунків струмів (напруг), що виникають в схемі під впливом джерел постійного живлення. При цьому в статичному режимі струми (напруги) в елементах схеми є постійні величини.

Для аналізу статичного режиму необхідно на основі графа схеми отримати матричне рівняння стану схеми і вирішити його. При цьому слід мати на увазі, що рівняння статичного режиму система нелінійних рівнянь. Найбільш відомі методи рішення нелінійних рівнянь є метод ітерацій, хорд і Ньютона-Рафсона.



2.6 Аналіз впливу розбіжностей параметрів схеми на її характеристики

Під розбіжністю параметрів слід розуміти відхилення їх (значень опорів, ємностей і т.п.) від номінальних значень, отриманих в результаті розрахунку схеми. Такі відхилення приводять до зміни параметрів пристроїв (вихідних напруг, коефіцієнтів підсилення, частотних характеристик і т.п.). Ці зміни можуть привести до того, що вихідні параметри опиняться за межами допустимих значень і прилад стане недієздатним.

Задача аналізу впливу розбіжності параметрів на схему визначає вірогідність таких ситуацій, за яких порушується робота пристрою. Для рішення цієї задачі використовується статистичний метод Монте-Карло.

Для аналізу впливу розбіжностей параметрів елементів на схему за методом Монте-Карло проводиться N іспитів схеми. Для кожного елемента зі змінними параметрами формується послідовність випадкових чисел, що мають те ж розподілення і кореляційні зв'язки з іншими параметрами. Кожному параметру надається відповідне значення з послідовності випадкових чисел. Таким чином параметри схеми отримують набір випадкових значень. Проводиться аналіз схеми з визначенням параметрів схеми за технічним завданням. Далі параметрам елементів надаються нові значення і проводиться новий цикл аналізу на ЕОМ.

При певному наборі циклічних випробувань моделі схеми одні вихідні характеристики будуть відповідати технічному завданню, а інші - ні.

Виконавши такий аналіз на моделі, розробник схеми визначає характеристики, які задовольняють вимоги технічного завдання і, відповідно, якийсь відсоток схем задовольняє технічне завдання. Для

оцінки кількості іспитів потрібно використовувати граничні значення, за межами яких похибка з певним ступенем вірогідності близька до одиниці.

3 Методичні вказівки до вивчення основних розділів курсу основи автоматизації проектування [6]

3.1 Вказівки до вивчення розділу 1

3.1.1 При вивченні цього розділу слід уявити собі, що головні задачі проектування – це розрахунки, аналіз, оптимізація. До способів проектування слід відносити неавтоматизовані розрахунки, фізичне моделювання, натурне макетування. Проектування приладу складається з різних видів складності: системного, структурного, функціонального, схемотехнічного, компонентного. Воно проводиться від функціонального пристрою /ФП/, функціонального вузла /ФВ/, функціонального елемента /ФЕ/. Математичний апарат включає теоретичні методи /теорія електронних кіл, системний аналіз, спектральний аналіз і т. п./ Кожний з теоретичних методів можна реалізувати на основі аналітичних перетворень та чисельними методами. Об'єктами проектування є цифрові, аналогові та аналого-цифрові пристрої. Процес проектування може проводитись від ФП до ФЕ і від ФЕ до ФП. Потрібно чітко уявляти, що таке математична модель і її головні характеристики. Коли послідовність подій в моделі і пристрої зберігаються, то таке моделювання носить назву імітаційного. Під технологічністю проектування слід розуміти зручність виготовлення.

Контрольні запитання

1. Назвіть головні задачі проектування.
2. Приведіть алгоритм структурного і параметричного аналізу.
3. Який математичний апарат використовується в процесі математичного проектування?
4. Привести математичну модель плівкової РС-структури, яка використовується на різних рівнях проектування.

5. Приведіть чотири типи часу проходження подій при імітаційному моделюванні.

6. Що таке технологічність процесу моделювання?

3.1.2 Система автоматизованого проектування /САПР/ - це складна програмно-інформаційно-апаратурна людино-машинна система, розроблена за ієрархічним принципом. Існує три категорії користувачів: користувачі-розробники, користувачі-супровідники і користувачі-розробники пристроїв. Системи проектування працюють в режимі пакетної обробки, прямого доступу і з використанням автоматизованих робочих місць /АРМ/. САПР – це складний комплекс математичних, лінгвістичних, програмних, інформаційних, організаційних та методичних забезпечень.

Перший етап проектування – це проектування структури. Роботу кожного блоку можна описати за допомогою аналітичних виразів. Коли послідовність подій в реальному пристрої і моделі збігаються, то таке моделювання носить назву імітаційного. Суть функціонального моделювання в розподілі пристрою на окремі блоки, кожен з яких виконує функціональне перетворення сигналів. Базовими елементами при функціональному моделюванні є генератор сигналів, неінерційний чи нелінійний елемент, інерційний лінійний та нелінійний елемент. Інерційний нелінійний елемент описується системою диференціальних рівнянь

$$\frac{\Delta y_i(t)}{\Delta t} + g_i(y(t)) = \frac{\Delta x_i(t)}{\Delta t} + f_i(x(t)),$$

$$i = \bar{1}, \bar{n},$$

$x(t)$, $y(t)$ – вхідні і вихідні сигнали елемента, n – порядок системи.

Програми функціонального моделювання складаються на мові високого рівня для кожного елемента у вигляді підпрограм-функцій. Загальна програма використовує ці підпрограми елементів.

Контрольні запитання

1. Як проводиться процес проектування ?
2. Що таке структурне проектування ?
3. Як проводиться функціональне моделювання ?
4. Що таке імітаційне моделювання ?
5. Навести математичні вирази функціонування базових елементів.
6. Як розробляються програми функціонального моделювання ?

3.2 Методичні вказівки до вивчення розділу 2

3.2.1 Більшість програм схмотехнічного моделювання використовує метод вузлових потенціалів. Аналізувати схеми можна за допомогою табличних методів. Активні елементи схем також можна описати в базисі вузлових потенціалів. Алгоритм складання рівнянь є запис неозначеної матриці вузлових потенціалів, до якої підсумовують відповідні провідності активних елементів. Рішення системи вузлових рівнянь можна представити в загальному вигляді $U = Y^{-1} \cdot I$, де U – вузлові потенціали, I – струми вузлів, Y – матриця вузлових провідностей. Це рівняння вирішують методом виключення, а також його різновидністю, наприклад, LU – перетворення. Чисельним методом рішення нелінійних рівнянь $f(x)=0$ є ітераційний метод Ньютона:

$$X_n = X_{n-1} - \frac{f(X_{n-1})}{f'(X_{n-1})}$$

Системи нелінійних рівнянь вирішуються методом Ньютона-Рафсона. Аналіз перехідних процесів проводиться методом рішення диференціальних рівнянь. Явна і неявна форми представлення моделі схеми для розрахунків. Найпростіші чисельні методи рішення диференціальних рівнянь – явний метод Ейлера, метод трапецій і неявний

метод Ейлера. Моделювання частотних характеристик засновано на трьох підходах: символічному, чисельному, чисельно-символьному.

Мова описання складається з трьох частин: опису об'єкта, опису задачі, опису директив проектування. Програма схемотехнічного моделювання побудована за модульним принципом і враховує особливості чисельної реалізації теоретичних алгоритмів.

Контрольні запитання

1. Як представити схему в базисі вузлових потенціалів?
2. Представлення активних елементів схем в базисі вузлових потенціалів.
3. Методи рішення систем вузлових рівнянь.
4. Чисельний метод рішення вузлових рівнянь.
5. Чисельний метод рішення диференціальних рівнянь.
6. Вхідна мова схемотехнічного моделювання.

3.2.2 Треба виділяти три методи моделювання цифрових пристроїв: потрійне, дельта-потрійне і подвійне. Вхідні сигнали і логічні елементи описуються за допомогою моделей. Існує синхронний метод без урахування затримок і асинхронний, який враховує час розповсюдження сигналів від входу до виходу.

Контрольні запитання

1. Які моделі сигналів використовують в системах проектування?
2. Як представлені моделі елементів?
3. Що таке синхронне моделювання?
4. Особливість асинхронного моделювання.
5. Як проводяться розрахунки сигнатур?

3.2.3 Існує два класи алгоритмів конструкторського проектування:

1. Конструктивний.
2. Ітераційний.

Головними етапами конструкторського проектування є компонування, розміщення, трасування.

Контрольні запитання

1. Як формується проектне рішення при використанні конструктивного алгоритму?
2. Особливості ітераційних алгоритмів.
3. Як проводиться етап компонування елементів?
4. Як проводиться етап розміщення елементів?
5. Як проводиться етап трасування?

3.2.4 Задачі оптимізації при моделюванні електронних схем враховують велику кількість змінних. Цільові функції складні для обчислень і пошуку екстремуму. Параметри можна змінювати в означених межах. В самому найпростішому випадку критерієм оптимальності $F(x)$ вибирається один з вихідних параметрів схеми $f_j(x), j = 1, 2, 3, \dots$, який потрібно оптимізувати. Цей критерій має назву часткового критерію оптимальності. Пошук екстремуму можна проводити шляхом послідовної зміни кожного з параметрів, залишаючи всі інші постійними.

Контрольні запитання

1. Наведіть особливості виконання задач оптимізації радіоелектронних пристроїв.
2. Що таке критерій цільова функція?
3. Як проводиться пошук екстремальних значень функції?

4 Порядок роботи в системі Micro-Cap

4.1 Встановлюємо Micro-Cap

Дистрибутив версії Micro-Cap V займає три з половиною мегабайти і встановлюється з жорсткого диска.

Для інсталяції програми виконуємо дії:

1. Всі файли інсталяції переписуються в один каталог з назвою MC5INST. З нього запускають на виконання файл Setup.exe (встановити програму на диск C:\ каталог MC5).

2. Після інсталяції програми з каталогу MC5INST запускаємо на виконання файл Mc5crack.exe. Вибираємо пункт меню "Unzip".

Версія програми Micro-Cap V працює на комп'ютері IBM PC 80486 і вище, об'ємом оперативної пам'яті 16 Мбайт з операційною системою Windows 95. Програма займає на диску 12 Мбайт. Дистрибутив можна взяти в мережі Internet (адреса сайту www.spectrum-soft.com).

4.2 Запуск програми Micro-Cap V

Для запуску програми необхідно знаходитись в Windows 95. Вибрати пункт меню “Пуск” – “Програми” – “Micro-Cap V” .

Відразу після запуску програми Micro-Cap відкривається вікно схемного редактора з панеллю інструментів Рис. 4.1.

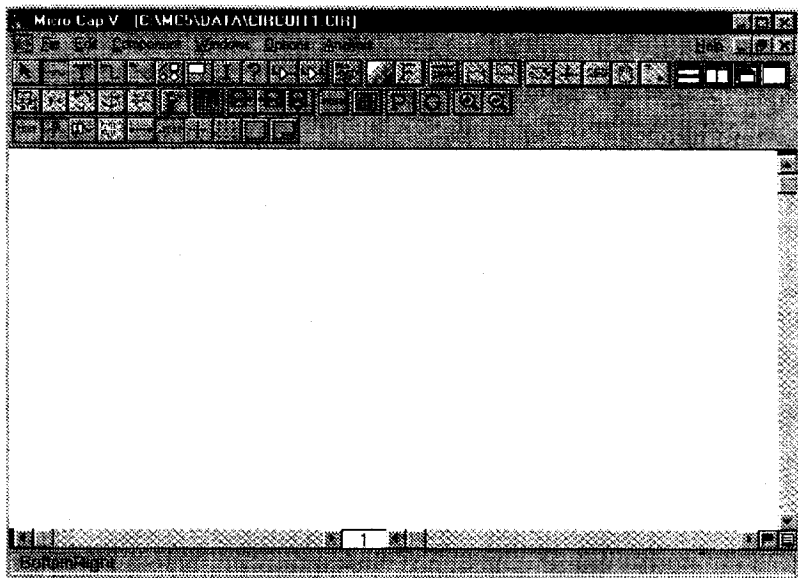












Рисунок 4.1— Схемний редактор з панеллю інструментів

Насамперед необхідно звернути увагу на стрілку-курсор миші: за нею мов би прикріплений певний символ. Зараз він має вигляд  .

В верхній лівій частині панелі інструментів знаходиться група кнопок, серед яких зустрічається подібний символ. Цими кнопками в програмі Micro-Cap вибирають групу операцій, які виконуються при роботі з мишою. А прикріплений до стрілки символ – зручний індикатор, який завжди знаходиться в полі зору оператора.

Перелічимо основні групи операцій:

-  - виділення і переміщення;
-  - встановлення компонента;
-  - встановлення мітки та тексту;
-  - з'єднання виводів компонентів з допустимим вигином тільки під кутом 90 градусів;
-  - з'єднання виводів компонентів з довільним кутом;
-  - встановлення графічного об'єкта;
-  - перехід до крапки на кресленні позначеної прапорцем;
-  - отримання інформації про компонент;
-  - отримання довідки.

Щоб зобразити електронний компонент треба зайти в меню “Component” – “Analog primitives” – “Passive components” (резистори, конденсатори, індуктивності) чи “Active components” (транзистори).

Режим установлення компонентів:

- виберемо в меню компонент – резистор;
- підведемо курсор миші на те місце на екрані, на якому потрібно встановити резистор, і натиснемо кнопку миші. З'явиться таблиця (Рис. 4.2), в якій необхідно вказати параметри цього резистора. Перелічимо їх :

PART – позиційне позначення елемента. Присвоюємо йому значення – R1;

VALUE – опір резистора. Присвоюємо йому значення 1K , що означає – 1кОм.

Для надання значення потрібно спочатку натиснути ліву кнопку миші на назві параметра в таблиці, а потім набрати значення. Визначившись з позиційним позначенням і номіналом резистора, натиснути ліву кнопку миші на “OK”. На кресленні з'явиться резистор R1, опір якого 1 кОм. Резистор R1 буде зеленого кольору. Це означає, що він є виділеним для операції видалення, копіювання і т. ін.

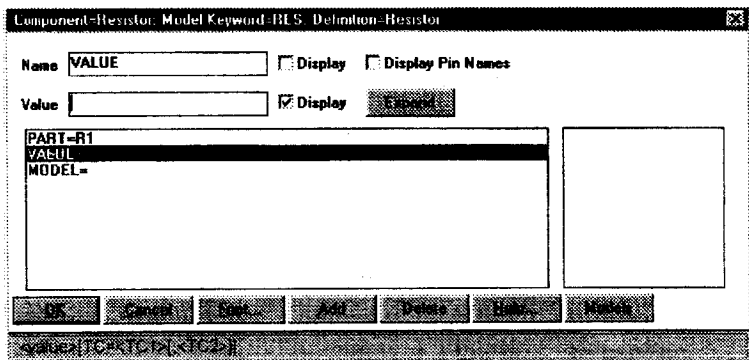


Рисунок 4.2 — Таблиця введення параметрів елементів

Щоб зняти виділення виберемо режим “виділення і переміщення” і натиснемо ліву кнопку миші на будь-який вільній частині екрана. Колір резистора зміниться на синій. Щоб повернути чи перемістити резистор, сумістимо стрілку курсора миші з зображенням резистора, а потім, натиснувши на ліву кнопку і не відпускаючи її, натиснемо декілька разів праву кнопку миші, резистор буде обертатися. Щоб перемістити резистор, потрібно натиснути на ліву кнопку і, не відпускаючи її, перемістити резистор на нове місце.

Встановимо тепер на креслення транзистор структури p-p-n. Для цього заходимо в меню “Components” – “Analog primitives” – “Active components” – “NPN”. В таблиці властивостей компонента крім позиційного номера потрібно вибрати модель транзистора – MODEL. З переліку доступних моделей виберемо модель 2N2222 - аналог транзистора КТ3117А вітчизняного виробництва.

Індуктивність і конденсатор встановлюються таким же чином. В таблиці параметрів визначаємо значення індуктивності – 10u, тобто 10 мкФ, а значення ємності – 100p, тобто 100 пФ.

Потрібно звернути увагу на те, як вводяться значення параметрів. Саму одиницю вимірювання можна не вказувати, оскільки в системі Мікро-Сар автоматично враховано, що ємність вимірюється в Фарадах, а індуктивність – в Генрі. Після чисельного значення допустимо (де це необхідно) вказувати лише приставку. В таблиці 4.1 приведено співвідношення приставок і позначень, прийнятих в програмі Мікро-Сар. При цьому треба пам'ятати, що пропуск між числом і приставкою недопустимі.


Таблиця 4.1

Співвідношення приставок і позначень

Приставка	Піко	Нано	Мікро	Міллі	Кіло	Мега	Гіга
Позначення в програмі	P	N	U	M	k	meg	G

4.3 Зображення схеми

Для прикладу накреслимо схему транзисторного автогенератора (Рис.4.3). Живлення схеми 12 В. З'єднання елементів найкраще проводити в режимі, який допускає перегини під кутом 90 градусів.

Для цього потрібно натиснути ліву кнопку миші на ярлику  а потім, сумістивши стрілку миші з виводом першого компонента, знов натиснути на кнопку миші і, не відпускаючи, довести її до виводу другого компонента. З'єднання, як і компоненти, можна переносити з місця на місце а також виділяти і видаляти натисненням на кнопку з зображенням ножиць.

В колі, яке з'єднує емітер транзистора Q1 з елементами R3, C1 і C2, поставлена мітка "out". В цій точці будемо спостерігати вихідний сигнал

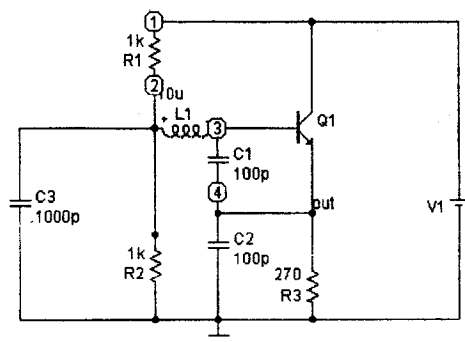


Рисунок 4.3— Схема автогенератора

автогенератора. Для встановлення мітки необхідно перейти в режим її встановлення, набрати в вікні, яке з'явилося, текст і натиснути лівою кнопкою миші спочатку по кнопці "ОК", а потім по з'єднанню, яке потрібно відмітити.

4.4 Дослідження схеми за допомогою програми Micro-Cap

Переконаємось, що автогенератор працює. Для цього скористаємось низхідним меню, вибираючи послідовно пункти: "Analysis" – "Transient Analysis". З'явиться вікно моделювання і на його фоні – вікно для задання початкових параметрів при моделюванні. Заповнемо таблицю так, як вказано на Рис. 4.4.

Натиснемо ліву кнопку миші на "Run". І через деякий час, в залежності від швидкодії вашого комп'ютера, з'явиться картинка, на якій зображений процес запуску автогенератора. Рис. 4.5.

Підключимо до виходу автогенератора через малу розділову ємність навантаження. Рис. 4.6. Так вчиняють, коли потрібно найбільш простим способом відділити частотозавальні кола автогенератора від нестабільного

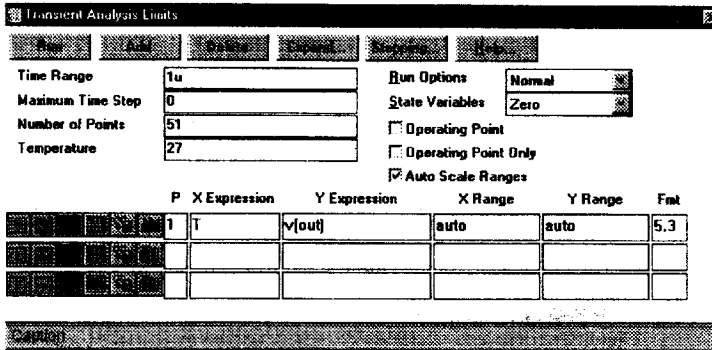


Рисунок 4.4 — Таблиця початкових параметрів

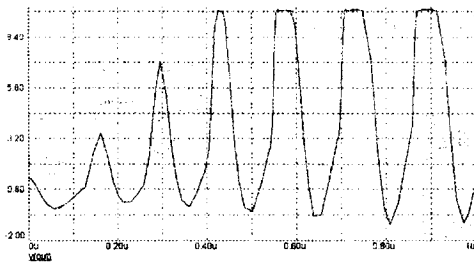


Рисунок 4.5 — Процес запуску автогенератора

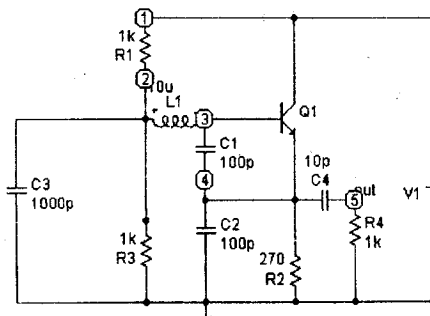


Рисунок 4.6 — Схема автогенератора з навантаженням

навантаження і підвищити стабільність частоти.

Здійснимо моделювання (Analysis – Transient Analysis), задаючи креслення графіків напруг у двох найцікавіших колах: на правому за схемою виводу котушки L1(позначка 3) і на навантажувальному опорі R4 (мітка Out). В вікні завдання на моделювання (Рис. 4.7.) необхідно заповнити два рядки таблиці.

Кількість цих рядків визначає число графіків, які будуються при моделюванні.

Призначення стовпців таблиці:

P – номер графіку. Якщо задати в обох рядках однакову цифру, наприклад, 1, отримаємо накладення двох графіків на одному полі. Якщо

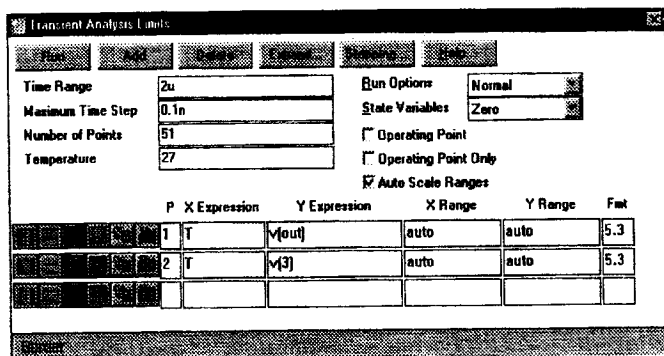


Рисунок 4.7 — Вікно введення початкових значень

дві різні цифри, то - два різні графіки.

X Expression – фізичний параметр, значення якого на графіку відкладаються по осі X. В нашому випадку це – час, який має позначку T.

Y Expression – фізичний параметр, значення якого на графіку відкладаються по осі Y. Щоб побудувати залежність від напруги в точці з міткою “out”, запишемо V(out).

X Range – інтервал значень по осі X. Напишемо “auto”: програма

встановить його автоматично.

Y Range - інтервал значень по осі Y. Теж напишемо “auto”.

Fmt – формат запису чисел при побудові таблиць. В усіх прикладах він буде таким: п’ять знаків до десяткової крапки і три – після.

По ліву сторону є ряд кнопок. Маніпулюючи цими кнопками, встановлюють лінійний або логарифмічний масштаб графіків, змінюють їх колір і записують результати моделювання на диск. Число рядків в таблиці може бути різним. Додавати і видаляти їх можна кнопками Add та Delete, які містяться в верхній частині вікна. Нижче цих кнопок вводять ще декілька параметрів:

Time Range – часовий інтервал. Вказуючи тут 2u (2 мкс), ми задаємо інтервал часу моделювання від 0 до 2 мкс.

Maximum Time Step – крок моделювання. Від нього залежить “плавність” графіку. За замовчуванням встановлюється “0”. Це означає, що графік складається з 50 точок. Встановимо це значення рівним 0.1 (0,1 нс). При цьому графік буде складатися з 2000 точок.

Number of Points – число точок, які записуються в таблиці результатів на диск.

Temperature – значення температури, °C.

Встановивши, крім цього, мітку навпроти Auto Scale Range (автоматичне визначення масштабів) і задаючи режими моделювання (Run Options = Normal і State Variables = Zero), натиснувши на кнопку Run, отримаємо на екрані результати нашої роботи. Вони показані рис.4.8. Моделювання показало нам: якщо форму напруги на виводі котушки L1 можна назвати синусоїдною, причому сильно обмежену зверху, то на навантажувальному опорі вона на синусоїду вже зовсім несхожа. З цього зробимо висновок, що розв’язка автогенератора від навантаження через конденсатор невеликої ємності збільшує спотворення форми вихідного сигналу.

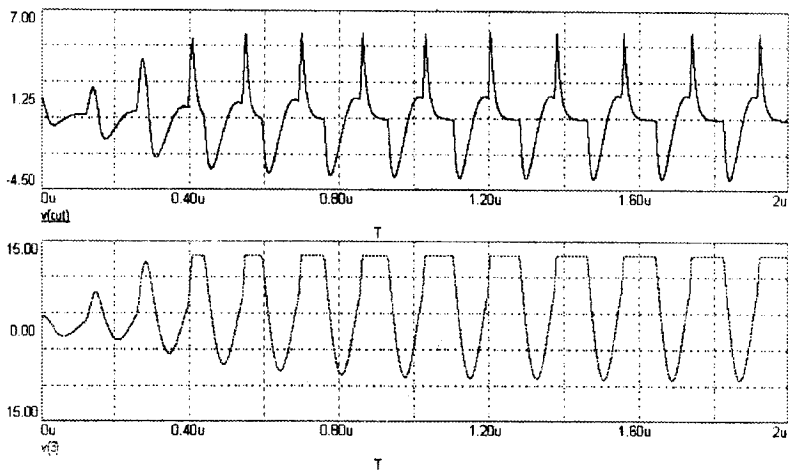


Рисунок 4.8 — Результати моделювання

Як же зробити автогенератор, який генерує напругу правильної синусоїдальної форми? Існує декілька рішень, але всі вони зв'язані з ускладненням приладу. Найпростіший варіант – замінити біполярний транзистор польовим, встановлюючи відповідний режим роботи за постійним струмом (Рис. 4.9). Номінали всіх компонентів приведені на схемі.

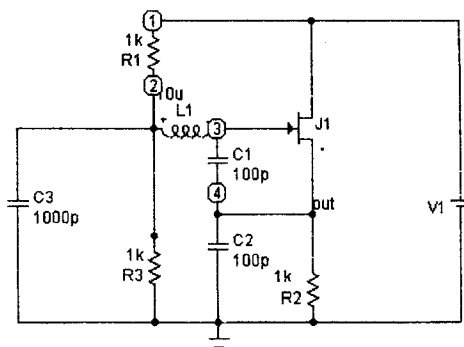


Рисунок 4.9 — Автогенератор на польовому транзисторі

Польовий транзистор MPF102. Форма сигналу в точці “out” нового варіанта автогенератора – практично не сплотивлена синусоїда – показана на рис. 4.10.

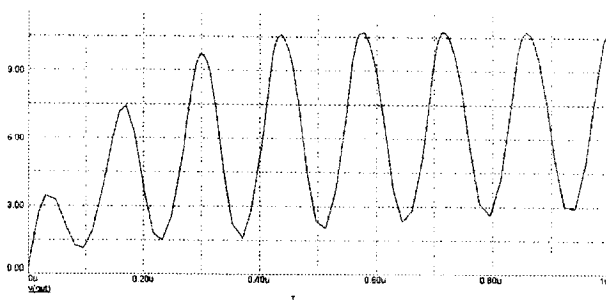


Рисунок 4.10 — Результати моделювання автогенератора на польовому транзисторі

Можна відмітити, що при заміні біполярного транзистора на польовий частота автогенератора змінилась в більшу сторону. Це відбулось завдяки зменшенню ємності, яка вноситься транзистором в коливальний контур. Тепер, коли ми переконались у високій якості вихідного сигналу автогенератора, визначимо стабільність його частоти. Одна з основних причин зміни частоти – зміна характеристик електронних компонентів при зміні температури. Найбільш важлива температурна стабільність елементів контуру, що задають частоту. В нашому випадку це конденсатори C1, C2 і котушка L1 а також міжелектродна ємність польового транзистора J1. Залежність ємності конденсатора від температури характеризує температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ). При моделюванні в системі Micro-Cap ТКЄ можна врахувати. Натиснемо на зображення конденсатора C1 і замість постійної ємності 100p напишемо в графі Value вікна формулу: $100p \cdot (1 - 0.02 \cdot (TEMP - 27))$. Це означає, що при температурі +27 °C ємність конденсатора рівна 100p, і при нагріванні на

1 °C вона зменшиться на два відсотки. Тепер С1 буде вести себе так, як реальний конденсатор К10-17 з ТКЄ, що визначений групою М1500. Ту ж саму операцію проведемо з конденсатором С2. Залежність індуктивності котушки L1 від температури визначимо таким чином: $10\mu \cdot (1 + 0.01 \cdot (\text{TEMP} - 27))$.

Зробимо пояснення. Температурний коефіцієнт індуктивності (ТКІ) завжди буде додатним. Це результат того, що при нагріванні матеріал, з якого виконаний каркас котушки, розширюється і значення індуктивності зростає. Вибране значення ТКІ в один відсоток на градус – досить велике. У реальних котушок, які використовуються в стабільних автогенераторах і виконаних, наприклад, за технологією осаджування міді на радіочастотну кераміку, він в сотні разів менше.

Те ж саме можна сказати і про конденсатори. В таких випадках використовують конденсатори з ТКЄ групи М47 або М75. Інколи конденсатори інших номіналів з різним температурним коефіцієнтом з'єднують паралельно чи послідовно, намагаючись отримати одночасно ємність і ТКЄ, які вимагаються. Майже завжди для стабільної роботи автогенератора необхідний від'ємний ТКЄ. Протилежність знаків температурних коефіцієнтів ємності і індуктивності дозволяє компенсувати зміну індуктивності за рахунок зміни ємності. Великі значення ТКЄ і ТКІ вибрані тут виключно з метою отримання наочності результатів, але і така ситуація теж зустрічається на практиці.

Приступимо до моделювання. Вкажемо нове значення температури +40°C і проведемо моделювання (Рис. 4.11). Порівняємо період отриманої синусоїди з періодом, який вимірювався під час моделювання при +27°C. В результаті побачимо, що при нагріванні частота змінилася.

Щоб наочно показати як змінюється частота автогенератора при нагріванні чи охолодженні – є спосіб порівняння спектрів сигналів при

різних температурах. На екрані аналізатора спектру відображається спектр досліджуваного сигналу. В випадку, якщо сигнал синусоїдальний, ми

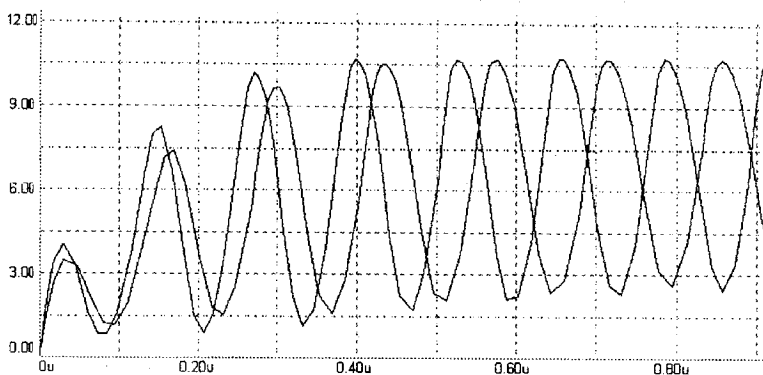


Рисунок 4.11 — Залежність частоти від температури

побачимо відмітку на одній частоті, якщо ж в сигналі присутні інші гармоніки цієї частоти, відмітки з'являться на частотах гармонік.

Попередньо ми користувались системою моделювання Micro-Cap як осцилографом, досліджуючи на екрані комп'ютера графіки залежності напруги від часу в різних вузлах схеми. Але по осях X та Y можна відкладати й інші фізичні величини. Якщо по осі X відкласти частоту (f), а по Y – амплітуду гармонік напруги в вузлі з міткою “out” (цей запис буде таким $\text{harm}(v(\text{out}))$), то комп'ютер перетвориться в аналізатор спектру.

Але є й свої перешкоди, про які непотрібно забувати. Мова йде про те, що нам потрібен спектр вихідного сигналу автогенератора в стійкому стані. В нас же впродовж декількох мікросекунд після подачі напруги живлення відбувається процес зростання амплітуди сигналу і зміни його частоти. Для цього програмі необхідно вказати, що при побудові спектру цими декількома мікросекундами треба нехтувати. Для того щоб отримати спектр періодичного сигналу, потрібно опрацювати часовий інтервал, в

точності кратний періоду повторення цього сигналу. В нас такої можливості немає, оскільки в наших дослідженнях частота змінюється. Тому зробимо по-іншому: виберемо відрізок часу, на якому містяться зразу декілька десятків періодів. Тоді точність графіка, який характеризує спектр сигналу, буде реальним.

Приступимо до складання завдання на моделювання (Рис. 4.12). Побудуємо два графіки. На верхньому будемо спостерігати вихідний сигнал, а на нижньому – його спектр. Інтервал часу аналізу задамо великий – 20 мкс. Значень температури вкажемо зразу два: 54°C – верхнє значення і 27°C – нижнє, оскільки при введенні потрібен цей крок зміни температури, зробимо його рівним теж 27°C. Внаслідок отримаємо пару накладених графіків при двох температурах.

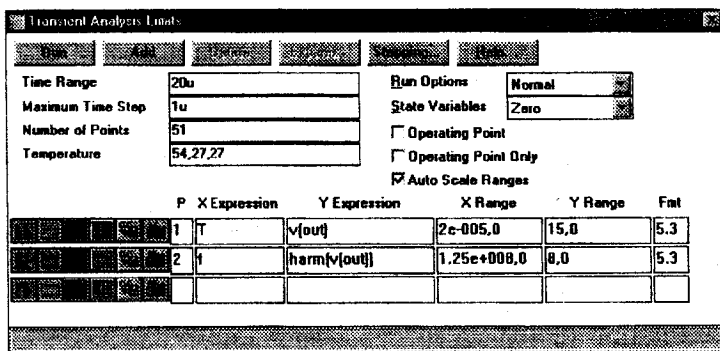


Рисунок 4.12— Складання завдання на моделювання

Залишилось задати проміжок часу, впродовж якого будемо будувати спектр сигналу. Робиться це так. Проїдемо по шляху Transient –DSP. Відкриється вікно DSP (Рис. 4.13). В ньому вкажемо час, з якого починається (Lower Time Limit) і яким закінчується (Upper Time Limit) побудова спектру, а також число відліків (Number of Points), яке характеризує точність перетворення.

Тепер можна натискати на кнопку Run і запускати процес моделювання. Результати зображені на рис. 4.14.

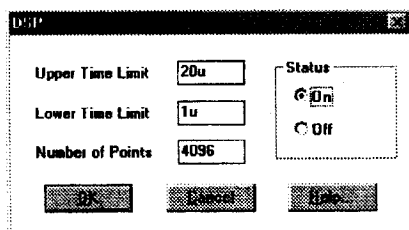


Рисунок 4.13 — Вікно DSP

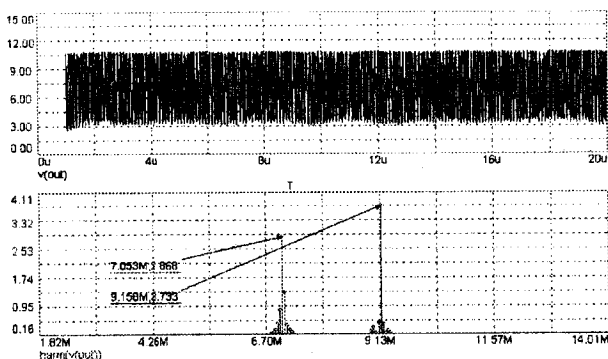


Рисунок 4.14 — Спектральний аналіз

Тепер можна точно сказати, що при зміні температури від 27°C до 54 °C частота автогенератора змінилась з 7,053 до 9,158 МГц.

4.5 Дослідження амплітудно - частотних характеристик

Часто виникає потреба розрахувати фільтр. Наприклад, в приймачі прямого перетворення між змішувачем і підсилювачем звукової частоти

потрібен фільтр, який пропускає спектр мовного сигналу приймаючої станції і затримує завади частотою вище 3 - 4 кГц. При цьому бажано мати мінімальне зменшення корисного сигналу, максимальне зменшення завади і можливо різкий перехід від першого стану до другого. Активний фільтр називають фільтром нижніх частот (ФНЧ). Схема одного з можливих його варіантів зображена на рис.4.15.

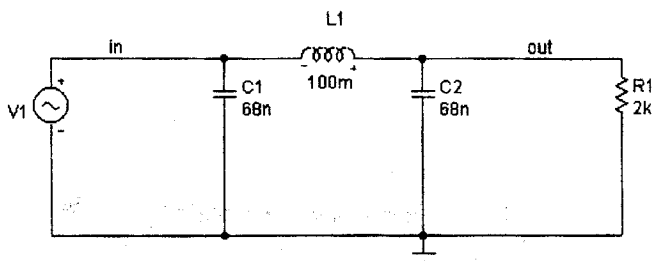


Рисунок 4.15 — Схема ФНЧ

Новий елемент – джерело змінної напруги синусоїдальної форми, який має позначку V1. Від компонентів, які ми використовували, він відрізняється тим, що потребує визначення параметрів своєї моделі. Якщо характеристики моделі транзистора ми беремо з бібліотеки, а моделі опорів і конденсаторів у найпростішому вигляді описуємо їх номіналами, то для будь-якого джерела змінної напруги, як і на реальному генераторі, потрібно визначити частоту і вихідну напругу.

Встановимо на полі креслення графічне зображення джерела змінної напруги синусоїдальної форми. Скористуємось меню: Component – Analog Primitives – Waveform Sources – Sine Source. В вікні, яке визначає властивості компонента (Рис. 4.16), необхідно буде задати не тільки позиційне зображення, але й ім'я моделі, в нашому випадку – vin. Натиснемо кнопку ОК. Щоб внести необхідні параметри необхідно знайти

в нижньому правому кутку кнопку з надписом TEXT, і натиснути її. Перед вами з'явиться один рядок:

MODEL VIN SIN (F=1MEG A=1 DC=0 PH=0 RS=1M RP=0 TAU=0)

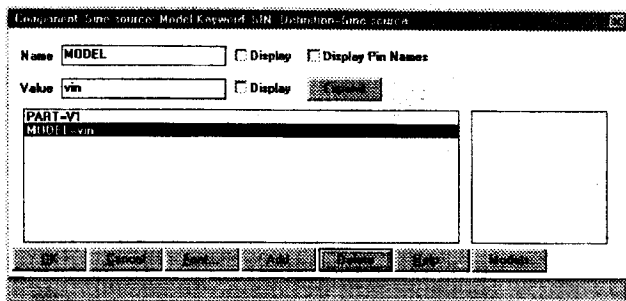


Рисунок 4.16— Вікно властивостей компонента

Відкоригуємо його таким чином:

MODEL VIN SIN (F=1k A=1u RS=2k).

Це означає, що джерело повинно виробляти частоту 1кГц з амплітудою 1мкВ і внутрішнім опором 2кОм. Такі властивості має змішувач на діодах у зустрічно-паралельному під'єднанні, який часто зустрічається в техніці прямого перетворення, і який використовують джерелом сигналу для ФНЧ.

Після того, як схема накреслена, можна приступати до моделювання частотних характеристик фільтра. Знову скористаємось нижхідним меню і пройдемо по шляху Analysis – AC Analysis: відкриється знайоме нам вікно моделювання і з'явиться таблиця. Заповнимо її, як вказано на рис. 4.17. Вона майже не відрізняється від тої, що ми заповнювали в режимі Transient Analysis. З'явилось лише декілька числових параметрів:

Maximum Change, % - максимальний приріст графіка першої функції за частотою.

Noise Input і Noise Output визначає вхідні та вихідні параметри при моделюванні шумових характеристик схеми. Значення параметрів залишимо ті, які система підставляє за замовчуванням.

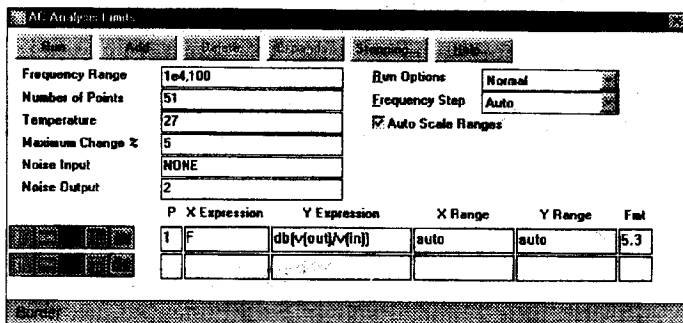


Рисунок 4.17— Вікно AC Analysis Limits

Завдання на моделювання підготовлене, але все ж таки не будемо поспішати з побудовою графіка. Скористаємось можливістю системи Micro-Cap будувати сімейство графіків, які ілюструють роботу пристрою при поступовій зміні номіналу будь - якого компонента. Цей режим, а він називається Stepping, можна використовувати, наприклад, в тому випадку, коли ви не можете заздалегідь визначити необхідний номінал, а хочете підібрати його, визначивши лише верхнє та нижнє значення а також крок зміни. Після того як заповнили таблицю завдання на моделювання, натиснемо на кнопку Stepping (рис. 4.18).

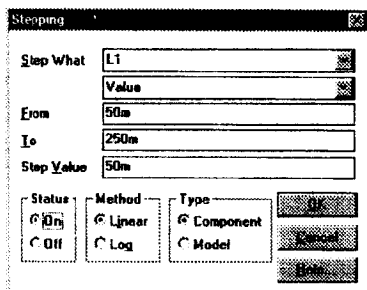



Рисунок 4.18— Вікно Stepping

Заданемо метою побудови сімейства амплітудно-частотних характеристик фільтра при значенні індуктивності L_1 від 50 до 250 мГн з кроком 50 мГн. Спочатку визначимо позиційне зображення компонента, значення параметра якого буде змінюватись (Step What). Після цього введемо нижнє значення (From), потім верхнє (To) і крок зміни (Step Value). Після цього ввімкнемо режим Stepping (Step It - Yes) і визначимо, в якому масштабі, логарифмічному (Log) чи лінійному (Linear), буде побудований графік.

Натиснемо на кнопку "OK", закриємо це вікно та запустимо моделювання натисканням кнопки .

В результаті отримаємо сімейство амплітудно-частотних характеристик фільтра (рис. 4.19).

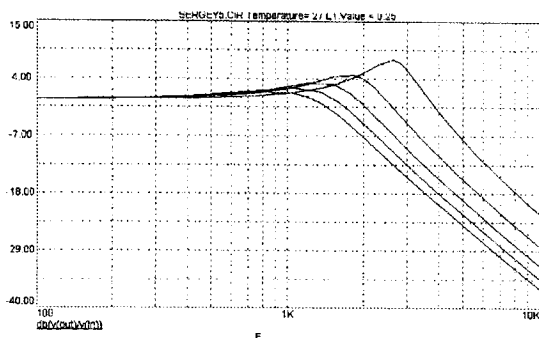


Рисунок 4.19 — Сімейство амплітудно-частотних характеристик

Тепер виберемо яке значення індуктивності нам більше підходить. Тут необхідно вибирати між малими втратами в смузі пропускання (в нашому випадку вона складає 3 кГц) і доброю фільтрацією завад на частотах вище 3кГц. Компромісним рішенням тут може бути вибір характеристики, яка перетинає після невеликого збільшення 0 дБ на частоті 1,5 кГц. Їй відповідає індуктивність 200 мГн.

4.6 Метод Монте-Карло

Ми проектуємо фільтр для приймача прямого перетворення. При цьому той його варіант, який ми промодельовали, придатний лише для найпростіших пристроїв, оскільки крутизна спадів характеристики невелика. Яке рішення прийняти, щоб покращити вибіркові властивості фільтра? Найпростіше додати ще одне аналогічне коло. Але ми підемо іншим шляхом. Застосуємо активний фільтр на операційному підсилювачі, доповнимо його колом на польовому транзисторі з невеликим рівнем шуму, який буде забезпечувати добрий коефіцієнт шуму всього приймача. Схема, яка реалізує цей принцип, приведена на рис. 4.20.

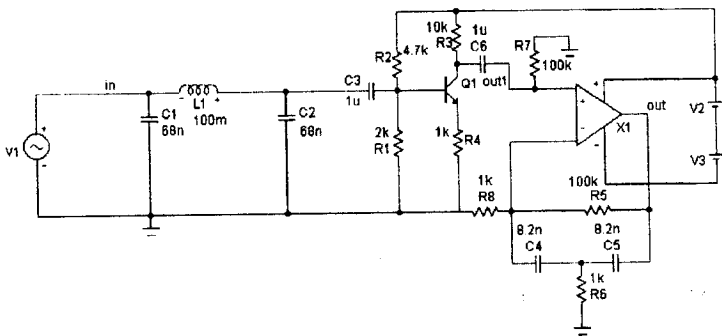


Рисунок 4.20— Схема активного фільтра

Для моделювання вибрано транзистор 2N4124. Це близький аналог вітчизняного транзистора КТ3102Д з низьким рівнем шуму. Операційний підсилювач – мікросхема UA741, аналог вітчизняної К140УД7. Активний RC – фільтр нижніх частот, реалізований за допомогою частотозалежного від’ємного частотного зв’язку, яким охоплений каскад на операційному підсилювачі X1. Елементи, які задають частоту – конденсатори C4, C5 та резистор R8.

Для того щоб перевірити, чи немає в схемі помилок, спочатку корисно подивитися сигнал на виході пристрою, виконавши моделювання в добре знайомому нам режимі Transient Analysis. Після того, як впевнились, що пристрій працює, можна переходити до дослідження його АЧХ. Заповнимо таблицю завдання на моделювання. Задасмо метою побудувати на одному полі три графіки: АЧХ пасивного LC – фільтра; АЧХ – активного RC – фільтра; АЧХ пристрою взагалі (рис. 4.21).

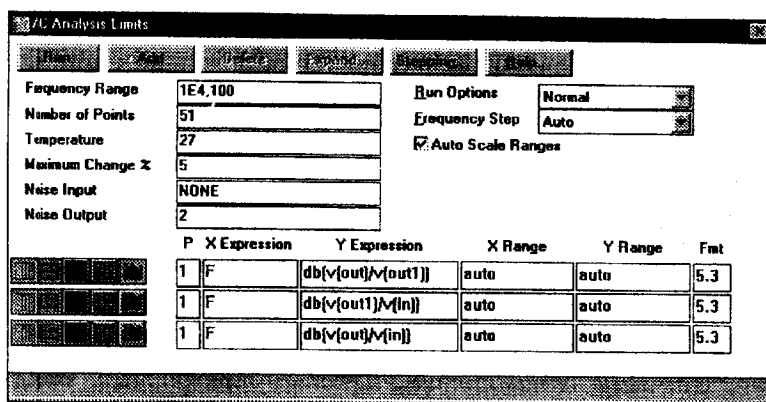


Рисунок 4.21— Вікно AC Analysis Limits

Поставимо перед собою ще одну задачу: перевірити, як зміниться АЧХ при використанні реальних компонентів, враховуючи розкид їх параметрів. Таким чином ми фактично досліджуємо повторність нашого пристрою. І на основі отриманих результатів ми зможемо визначити вимоги до точності опору резисторів і ємності конденсаторів, що гарантують необхідні характеристики при масовому виробництві. Для цієї мети застосуємо метод Монте-Карло. Моделювання проводиться декілька разів, значення опору резисторів, або ємності конденсаторів вибирають

випадковим чином в межах заданої точності. Отримане сімейство графіків дозволяє визначити розкид АЧХ при масовому виробництві.

Перше, що ми повинні зробити, - вказати допуски на ємність конденсаторів і опір резисторів. Для цього треба створити дві моделі. Зробимо так, як з синусоїдальним джерелом, і створимо моделі CAP1, RES1 і IND1 для конденсаторів, резисторів та котушок індуктивності. Для всіх трьох моделей параметри C, R та L виглядають таким чином: LOT=20 %. Це означає, що ми визначаємо усі параметри (ємність, опір та індуктивність), що дорівнюють номіналу з незалежним розкидом 20 %.

Повернемось до схеми: індуктивності L1 а також кожному резистору та конденсатору надамо додаткову властивість MODEL=IND1, MODEL=RES1 і MODEL=CAP1. Включимо режим моделювання методом Монте-Карло, для чого скористаємось низхідним меню і пройдемо по шляху Analysis – AC Analysis – Monte-Carlo – Options. З'явиться вікно встановлень Monte-Carlo Options (рис. 4.22). В ньому необхідно встановити прапорець Status – On, в Distribution to Use вказати Worst Case (найгірший випадок) і визначити Number of Runs (число розрахунків) рівним 100, на всі інші параметри встановити AUTO. Після цього натискаємо на кнопку ОК і запускаємо моделювання. Результати моделювання зображені на рис. 4.23.

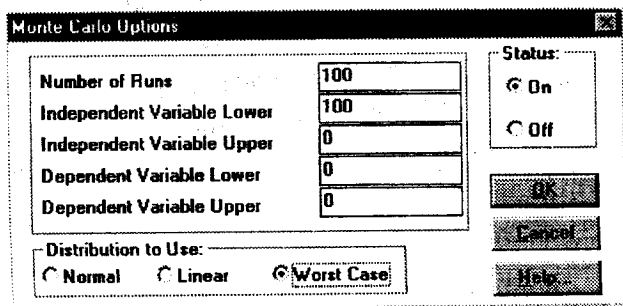


Рисунок 4.22 — Вікно Monte-Carlo Options

Зробимо висновки. В пристрої з додатковим активним фільтром збільшилась крутизна схилу АЧХ. З'явилося значне, близько 40 дБ підсилення. Але прийнятий нами 20% допуск на резистори та конденсатори виявився занадто великим. Якщо зібрати 100 таких фільтрів, то в самому найгіршому випадку їх підсилення на частоті біля 1,5 кГц буде відрізнятися одне від одного більше ніж на 16 дБ. Необхідно використати резистори та конденсатори з меншим допуском.

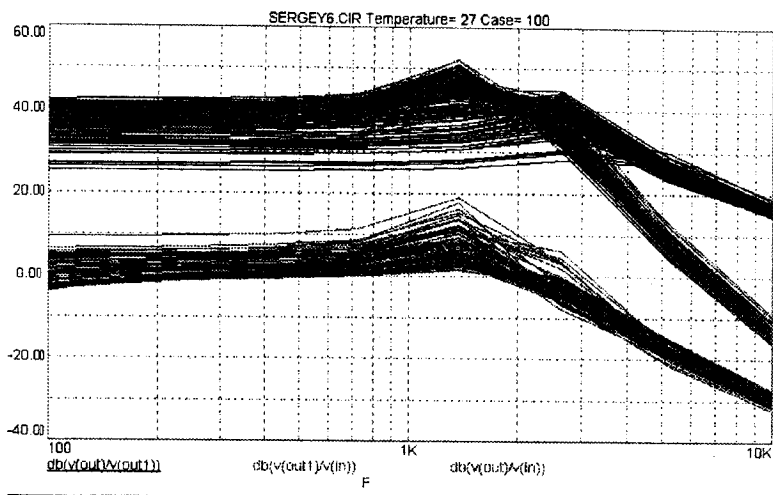


Рисунок 4.23 — Результати модулювання методом Monte-Carlo

5. Лабораторний практикум.

Лабораторна робота №1.

Аналіз передаточної характеристики синтезованої схеми на постійному струмі

Мета роботи: закріпити знання по роботі з пакетом розрахунків статичного режиму в системі "Micro-Cap".

Попередня підготовча робота: Ознайомитись з інструкцією по використанню системи "Micro-Cap".

Зміст роботи

1. Ввести схему на екран дисплея.
2. Викликати пакет аналізу передаточної характеристики за постійним струмом.
3. Встановити режими та границі аналізу робочої схеми.
4. Подати вхідну напругу у вузли схеми, задані викладачем.
5. Проаналізувати результати зміни напруг вихідних вузлів від зміни вхідного.
6. Зробити розрахунок результатів у вигляді, показаному на рис. 5.1.1 та рис. 5.1.2.

Короткі теоретичні відомості

В основу пакета розрахунків передаточних характеристик покладено три алгоритми: модифікований метод Ньютона; алгоритм нарощування шунтувальних опорів разом з нарощуванням джерел напруг і струмів;

нарошування шунтувальних опорів при постійних джерелах напруг і струмів.

Перший алгоритм потребує більш точного початкового наближення, в зв'язку з чим розв'язання модифікованим методом Ньютона може бути не завжди знайдено. Два наступних алгоритми є варіантами методу продовження рішення за параметром. Ці алгоритми потребують значних обчислювальних затрат часу.

Розрахунки статичного режиму виконуються таким чином [2].

Робиться спроба вирішити систему рівнянь $I(\varphi)=0$, де $I(\varphi)$ - вектор вузлових струмів методом Ньютона:

$$Y(\varphi^k)\Delta\varphi^k = -I(\varphi^k), \quad [5.1.1]$$

де $Y = [\partial I / \partial \varphi]$ - матриця вузлових провідностей; k - індекс ньютонівських ітерацій; $\Delta\varphi^k$ - вектор правок.

Для схеми з $n+1$ вузлом матричний вигляд математичної моделі схеми (ММС) має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial(\Sigma i)_1}{\partial \varphi_1} & \dots & \frac{\partial(\Sigma i)_1}{\partial \varphi_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial(\Sigma i)_n}{\partial \varphi_1} & \dots & \frac{\partial(\Sigma i)_n}{\partial \varphi_n} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta\varphi_1^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta\varphi_n^{(k)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} (\Sigma i)_1 \\ \vdots \\ (\Sigma i)_n \end{bmatrix} \quad [5.1.2]$$

де $i = i(\varphi_1^{(k)}, \dots, \varphi_n^{(k)})$ - струм вітки чи полюсний струм;

$(\Sigma i)_j$ ($j=1, \dots, n$) - вузловий струм j -го вузла;

$\frac{\partial(\Sigma i)_j}{\partial \varphi_j}$ - власна провідність;

$\frac{\partial(\Sigma i)_j}{\partial \varphi_m}$ - взаємна провідність (коли $j \neq m$)

Коли за фіксоване число ітерацій рішення не знайдено, то використовується алгоритм нарощування джерел живлення спільно з нарощуванням шунтувальних опорів. Коли і в цьому випадку збіжність розв'язку відсутня, то система рівнянь (5.1.2) вирішується за допомогою алгоритму шунтувальних опорів.

В режимі аналізу за постійним струмом в програмі пакета розрахунків всі індуктивності замінюються на опори 0.001 Ом та зі схеми вилучаються всі ємності. Лінійно змінна напруга може прикладатися до кожного з вузлів схеми, а її реакція - зніматися з будь-якого потрібного вузла.

Структура звіту

1. Роздруківка синтезованої схеми у вигляді, показаному на рис. 5.1.1.
2. Роздруковані графіки залежності зміни напруг вихідних вузлів від змін вхідних у вигляді, показаному на рис. 5.1.2.

Контрольні запитання

1. Як завантажити "Micro-Cap" ?
2. Як ввести схему у EOM ?
3. Як встановити режим роботи пакета ?
4. Як вивести на принтер схему і розрахунки у вигляді графіків ?
5. Основні алгоритми розрахунків пакета.
6. Як в пакеті замінюються індуктивності і ємності?

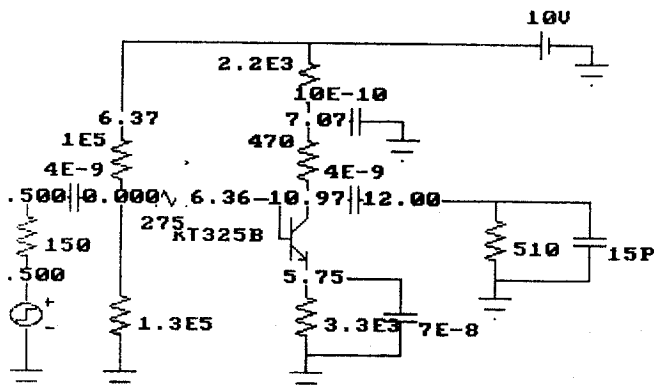


Рисунок 5.1.1 — Нумерація вузлів схеми

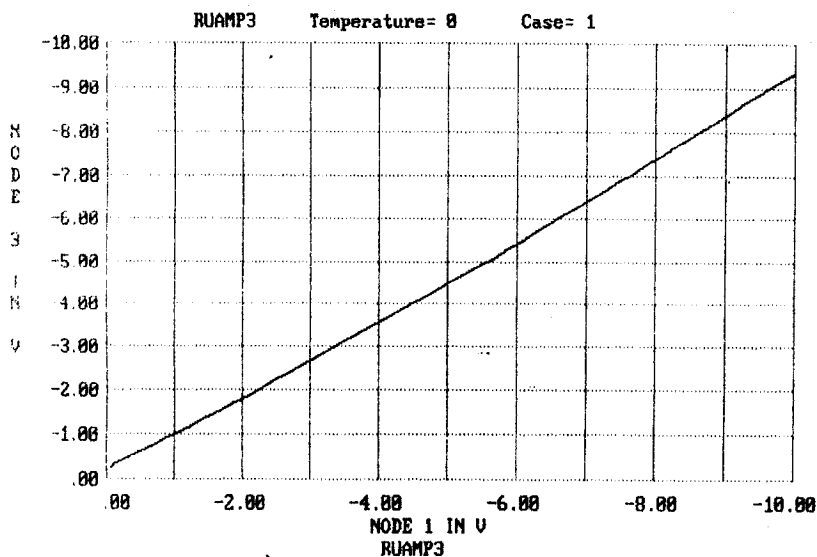


Рисунок 5.1.2 — Аналіз перехідної характеристики за постійним струмом

Лабораторна робота №2

Аналіз АЧХ, ФЧХ та ГЧЗ синтезованої схеми на змінному струмі

Мета роботи: дослідити характеристики синтезованої схеми на змінному струмі.

Попередня підготовча робота. Уважно вивчити розділ інструкції по використанню системи "Micro-Cap".

Зміст роботи

1. Ввести опис синтезованої схеми на екран дисплея.
2. Викликати пакет аналізу частотних характеристик.
3. Встановити режими та границі аналізу роботи схеми.
4. Подати напруги у вхідні вузли схеми.
5. Проаналізувати результати.
6. Зробити розрахунок результатів у вигляді, показаному на рис. 5.2.1 та рис. 5.2.2.

Короткі теоретичні відомості

Розрахунки частотних характеристик синтезованої схеми проводяться чисельним методом. АЧХ обчислюється як чисельне значення $F(j\omega) = \frac{M(j\omega)}{N(j\omega)}$ при різних значеннях ω [2].

Вхідний сигнал схеми є джерело напруги $E(j\omega) = 1 \cdot e^{j\omega}$ з одиничною комплексною амплітудою. В базисі вузлових потенціалів це джерело напруги перетворюється в одиничне джерело струму $I(j\omega) = 1 \cdot e^{j\omega}$ з великою паралельно підключеною провідністю.

$$F(j\omega) = U(j\omega) / E(j\omega) \quad , \quad [5.2.1]$$

де $F(j\omega)$ - комплексна АЧХ.

З виразу (5.2.1) можна зробити висновок, що, обчислюючи $U(j\omega)$, ми обчислюємо її АЧХ. Коли один з полюсів вітки з вхідним сигналом є "земля", то $E = \varphi$; тобто замість $U(j\omega)$ можливо розрахувати $\varphi(j\omega)$.

Вузлове рівняння лінійної схеми в частотній області буде мати вигляд:

$$Y(j\omega) \cdot \varphi(j\omega) = -I(j\omega), \quad [5.2.2]$$

де $I(j\omega)$ - складова, що відповідає вхідній вітці і дорівнює одиниці.

Інші складові дорівнюють нулю.

Комплексне значення потенціалу $\varphi_k(j\omega)$ для деякої частоти вузла k дорівнює

$$\varphi_k(j\omega_i) = A_k(\omega_i) + jB_k(\omega_i) \quad [5.2.3]$$

З виразу (5.2.2)

$$\varphi_{\text{кас}}(\omega_i) = \sqrt{A_k^2(\omega_i) + B_k^2(\omega_i)}, \quad [5.2.4]$$

$$\varphi_{\text{кас}}(\omega_i) = \arctg[B_k(\omega_i) / A_k(\omega_i)] \quad [5.2.5]$$

Всі ці значення знаходяться обчислювальним методом зменшення порядку системи рівнянь і зведенню її до вигляду:

$$\begin{bmatrix} Y_{11}' & Y_{12}' \\ Y_{21}' & Y_{22}' \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1' \\ I_2' \end{bmatrix}, \quad [5.2.6]$$

де U_1 і U_2 - вузлові напруги вхідного і вихідного вузлів; індекси вказують на те, що елементи матриці вузлових провідностей перетворені шляхом скорочення. Рівняння (5.2.6) - це рівняння чотириполюсника

перетвореної схеми в Y-параметрах. При обчисленнях проводиться лінеаризація схеми.

Операція лінеаризації дає можливість замінити нелінійні моделі лінійними. Так для біполярного транзистора автоматично проходить заміна, що зображена на рис.5.2.1.

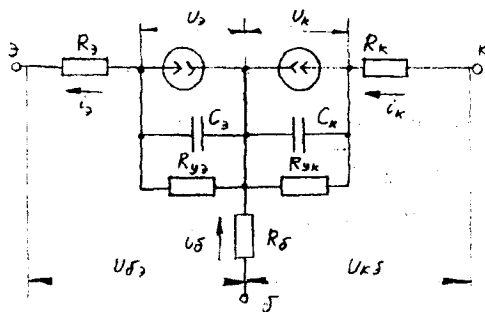


Рисунок 5.2.1 — Моделі біполярного транзистора

При аналізі частотних характеристик усі джерела напруг замінюються опорами по 0,001 Ом. До вузла схеми, який є її вхідним вузлом, прикладається хвильова напруга з одиничною амплітудою. Поступово методом LU-перетворень розв'язується система рівнянь.

Даючи частотний приріст хвильової частоти програма знову розв'язує систему рівнянь LU-методом. Вихідна напруга є значенням коефіцієнта підсилення на певних частотах. Груповий час затримки - це час затримки моделювального сигналу.

Структура звіту

1. Роздрук синтезованої схеми у вигляді, показаному на рис.5.2.2.

2. Роздруковані графіки АЧХ, ФЧХ та ГЧЗ у вигляді, показаному на рис.5.2.3.
3. Аналіз результатів.

Контрольні запитання

1. Як встановити режими роботи пакета ?
2. Як вивести на принтер графіки розрахунків ?
3. Суть виразів АЧХ, ФЧХ та ГЧЗ ?
4. Що таке Y-параметри ?
5. Машинні методи розв'язування системи рівнянь.
6. Для чого в програмі потрібно замінювати джерела напруг опорами ?

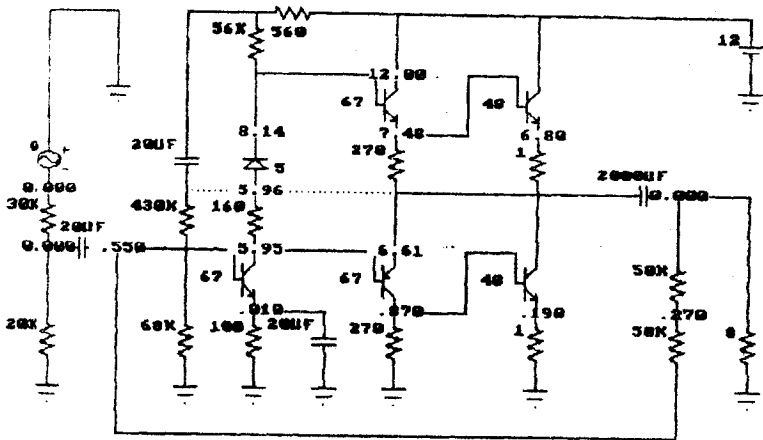
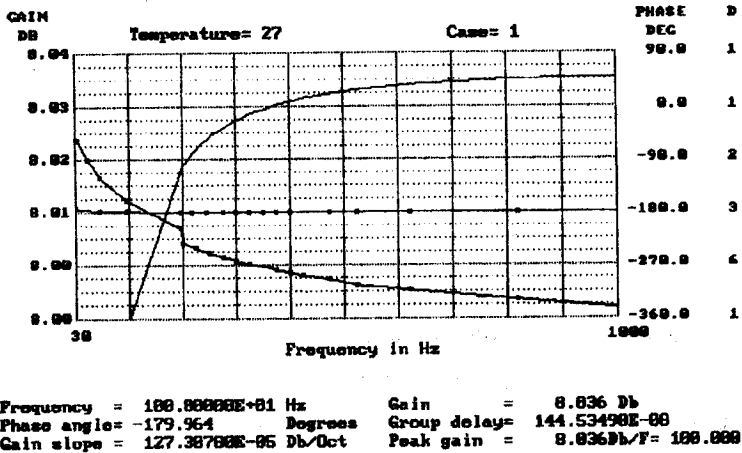


Рисунок 5.5.2 — Синтезована схема



Lowest frequency	30
Highest frequency	1000
Lowest gain(db)	8
Highest gain(db)	8.04
Lowest phase shift	-360
Highest phase shift	90
Lowest group delay	1E-6
Higest group delay	1E-2
Input node number	1
Output node number	15
Minimum accuracy(%)	5
Auto or Fixed frequency step(A,F)	A
Temperature(Low/High/Step)	27
Number of cases	1
Output: Disk, Printer, None (D,P,N)	D
Save, Retrieve, Normal run(S,R,N)	S
Default plotting parameters(Y,N)	Y

Рисунок 5.2.3 — Аналіз частотних характеристик

Лабораторна робота №3
Аналіз перехідних процесів

Мета роботи: Проаналізувати перехідний процес при проходженні сигналу через синтезовану схему.

Попередня підготовча робота. Ознайомитись з інструкцією по використанню системи "Мікро-Сар".

Зміст роботи

1. Ввести схему на екран дисплея.
2. Викликати пакет аналізу перехідних характеристик.
3. Побудувати модель вхідного сигналу.
4. Встановити режими та границі аналізу роботи пакета.
5. Проаналізувати результати проходження сигналу через схему.
6. Зробити роздруківку результатів у вигляді, показаному на рис. 5.3.1.

Короткі теоретичні відомості

Програма пакета розв'язує систему рівнянь у вигляді

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = F_1(x, v, w), i = 1, \dots, n \quad [5.3.1]$$

$$F_2(x, y, w) = 0, i = 1, \dots, p, \quad [5.3.2]$$

де X - вектор змінних, реактивних елементів;

V - вектор постійних і часозалежних джерел E, I ;

W - вектор змінних u, i лінійних та нелінійних резистивних еле-

ментів.

Рівняння (5.3.1.) – це система звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР) першого порядку, що вирішується відносно похідних. Рівняння (5.3.2) – це система кінцевих нелінійних рівнянь.

Оскільки в базисі вузлових потенціалів рівняння компонентів повинні мати вигляд (5.3.1), то для реактивних компонентів ємності та індуктивності використовують рівняння:

$$i_c = C \frac{dU_c}{dt}, \quad i_L = \frac{1}{L} \int U_L dt \quad [5.3.1]$$

ЗДР вирішується за допомогою формул дискретизації, що мають вигляд:

$$\frac{dx}{dt} = x' \approx \frac{x_{n+1} - x_n}{\Delta t} \quad [5.3.2]$$

В загальному випадку замість похідних та інтегралів підставляються їх кінцево-різницеві апроксимації, які відповідають тим чи іншим формулам чисельного диференціювання і інтегрування.

$$\frac{dx}{dt} \approx f_A(x_{n+1}, x_n, \dots, x_{n-k}) \quad [5.3.3]$$

$$\int_a^b x(t) dt \approx f_n(x_{n+1}, x_n, \dots, x_{n-k}) \quad [5.3.4]$$

За допомогою рівнянь (5.3.3), (5.3.4) можна від ЗДР перейти до системи кінцево-різницевих рівнянь:

$$F_i(x_{n+1}, x_n, \dots, x_{n-k}) = 0, \quad [5.3.5]$$

де $i = 1, \dots, p$.

Рівняння (5.3.5) можна розв'язати відносно x_{n+1} чисельним методом рішення кінцевих рівнянь звичайним методом Ньютона.

$$F'_i(x_{n+1}^{(k)}, x_n^{(k)}, \dots, x_{n-k}^{(k)}) \Delta x_{n+1}^{(k)} = -F_i(x_{n+1}^{(k)}, x_n^{(k)}, \dots, x_{n-k}^{(k)}),$$

[5.3.6]

де $\Delta x_{n+1}^{(k)} = x_{n+1}^{(k+1)} - x_{n+1}^{(k)}$ - вектор зміни значень коренів ітерацій;

$F'(\cdot)$ - матриця Якобі;

k - індекс ньютонівських ітерацій.

В результаті роботи програми пакета можна знайти форму напруг між вузлами схеми чи форму струму як функції часу при довільній формі напруг у вузлі, який заданий викладачем. Результати роботи програми показані на рис. 5.3.1.

Структура звіту

1. Роздруківка синтезованої схеми.
2. Роздруківка графіків проходження сигналів через вузли схеми в вигляді, показаному на рис. 5.3.1, 5.3.2.

Контрольні питання

1. Математичний опис перехідного процесу за допомогою диференціальних рівнянь.
2. Формули дискретизації для машинних розрахунків.
3. Як побудувати модель вхідного сигналу: трикутника і трапеції.

4. Як встановити режими роботи пакету.
5. Як побудувати модель сигналу на несучій частоті.

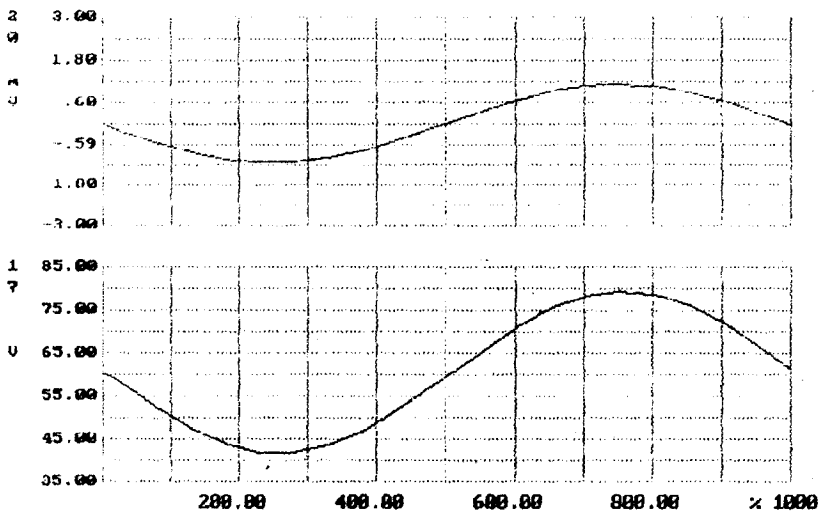
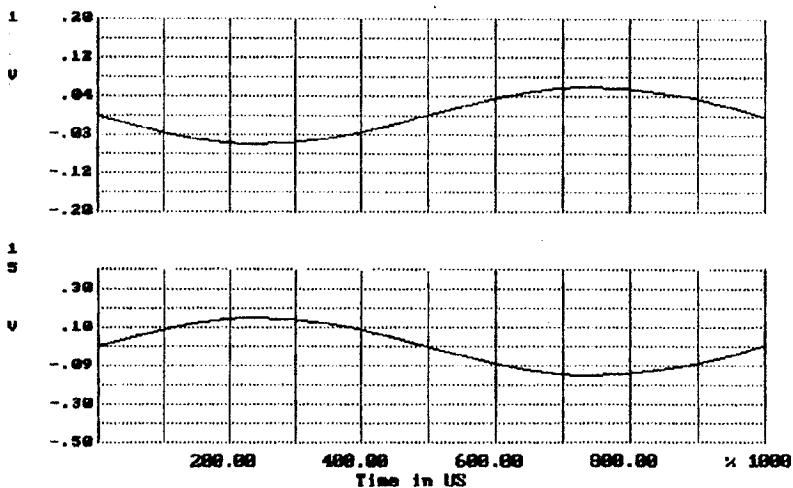


Рисунок 5.3.1 — Результати роботи програми



Simulation time(Tmax/Tmin/Timestep)	1E-3
Display time(Dmax/Dmin/Printstep)	1E-3
Minimum accuracy(%)	5
Upper trace A waveform spec	1
Upper trace B waveform spec	1
Upper trace range(High/Low)	0.2/-0.2
Lower trace A waveform spec	15
Lower trace B waveform spec	15
Lower trace range(High/Low)	0.5/-0.5
Zero, Read, Leave, initial values(Z,R,L)	Z
Edit/review initial conditions(Y,N)	N
Dump node waveform to user file(Y,N)	N
Calculate D.C. operation point(Y,N)	Y
Temperature(Low/High/Step)	27
Number of cases	1
Output: Disk, Printer, None (D,P,N)	D
Save, Retrieve, Normal run(S,R,N)	N
Default plotting parameters(Y,N)	Y

Рисунок 5.3.2 — Аналіз перехідних процесів

Лабораторна робота N4

Спектральний аналіз сигналів

Мета роботи: Використання ефективного алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) при аналізі спектра сигналу.

Попередня підготовча робота. Ознайомитись з інструкцією по використанню системи "Micro-Cap".

Зміст роботи

1. Ввести в файл чисельні значення сигналу довільної форми.
2. Викликати пакет спектрального аналізу.
3. Встановити параметри розрахунків спектральних складових.
4. Проаналізувати результати.
5. Зробити роздруквірку результатів і порівняти час роботи алгоритму ШПФ із звичайним алгоритмом знаходження спектральних складових.

Короткі теоретичні відомості

Пакет "Спектральний аналіз" виконує обчислення спектральних характеристик за допомогою алгоритму ШПФ. Такий алгоритм дає можливість показати, що для послідовності у 1024 відліка час обчислення такого сигналу зменшується у двісті разів порівняно із звичайним алгоритмом дискретного перетворення Фур'є. Використовується швидкий алгоритм проріджування вхідної послідовності за часом, коли число відліків N ділиться на 2.

$$A(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \alpha(n) e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} = \sum_{n=0}^{N/2-1} \alpha(2n) e^{-\frac{j2\pi 2nk}{N}} + \sum_{n=0}^{N/2-1} \alpha(2n+1) e^{-\frac{j2\pi(2n+1)k}{N}} = \sum_{n=0}^{N/2-1} \alpha(2n) e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} + e^{-\frac{j2\pi k}{N}} \sum_{n=0}^{N/2-1} \alpha(2n+1) e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} = \sum_{n=0}^{N/2-1} \alpha(2n) W^{2nk} + W^k \sum_{n=0}^{N/2-1} \alpha(2n+1) W^{2nk} = B(k) + W^k C(k),$$

де $B(k)$, $C(k)$ - суми, відповідно, першої і другої складових. Врахову-

ючи періодичність функції $W^{n \cdot k}$, зменшимо кількість операцій

відповідно в

$$\frac{N^2}{2N^2} = 2, \quad W^{n \cdot k} = e^{-\frac{j2\pi nk}{N}}.$$

Коли $N=2^m$, то обчислення ділиться на $m=\log_2 N$ етапів.

Коли, $N=2^{10}$, то обчислення такої послідовності швидким алгоритмом.

Фур'є потребує в 200 разів меншого обсягу обчислень. В режимі спектрального аналізу пакета "Спектральний аналіз" можна аналізувати сигнали з максимальною кількістю 256 відліків. Результати роботи пакета показані на рис.5.4.1.

Структура звіту

1. Роздруківка форми сигналу.
2. Роздруківка дійсної частини сигналу.

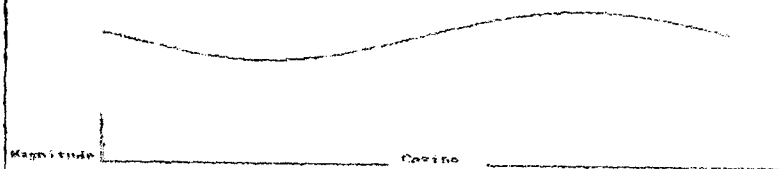
3. Роздрук квадрата модуля та кута спектра сигналу.
4. Проаналізувати результати.

Контрольні запитання

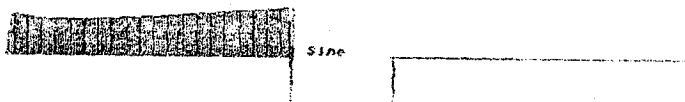
1. Як побудувати вхідний сигнал певної форми ?
2. Алгоритм ШПФ.
3. Показати ефективність алгоритму ШПФ перед ДПФ.
4. Побудувати граф схеми алгоритму ШПФ на 8 відліків.

1: Analyze a waveform 2: Print-out terms 3: Quit 4: Dump 5: Change colors

Waveform



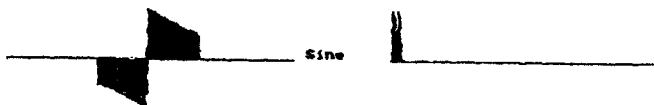
angle



Waveform



angle



Enter the file number (0-9) to be analyzed 0 ? 0

Enter the number of harmonics to use (8,16,32,64,128) ? 128

Рисунок 5.4.1 — Результати спектрального аналізу

Література

1. Колодницький М.М. Технічне та програмне забезпечення комп'ютерних інформаційних технологій: Навч. Посібник.-Житомир: ЖІТІ, 1995.-231с.
2. Автоматизация схемотехнического проектирования: Учеб. пособие для ВУЗов/В.Н. Ильин, В.Т. Фролкин, А.И. Будко и др.: Под ред. В.Н. Ильина.- М.:Радио и связь, 1987.-386 с.,ил.
3. В.К. Кострожицький. ПО “Днепровский машиностроительный завод” – изготовитель ЭАТС-ЦА // Электросвязь.-1996.-№1
4. Настольная кремневая фабрика // Компьютеры + пр.-1996.- №2.
5. Влах И., Сингал К. Машинные методы анализа и проектирования електронных схем. Пер. с англ.- М.:Радио и связь, 1988.-560 с.;ил.
6. Методичні вказівки та контрольні завдання до вивчення дисципліни “САПР радіоелектронних пристроїв” / Укладач І.Д. Прокопов.- Вінниця: ВПІ, 1994.-25с./
7. Методичні вказівки до курсового проекту аналогових електронних пристроїв./ Укладач В.Д. Рудик.- Вінниця. ВДТУ, 1997,-43с.

Міністерство освіти і науки України
Вінницький державний технічний університет

Навчальне видання

І.Д. Прокопов

**ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ
РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ**

Навчальний посібник

Редактор В.О. Дружиніна

Формат 29.7x42 ¼
Гарнітура Times New Roman
Друк різнографічний
Зам. № 2000-~~0104~~
Тираж 61 прим.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі ВДТУ
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ, ГНК, 9-й поверх
Тел. (0432) 44-01-59