

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до розрахункових робіт, індивідуальної роботи та
підготовки до модульного контролю
з дисципліни
“АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ”
для студентів спеціальності
6.050801 „Мікро- та наноелектроніка“
денної і заочної форм навчання

2015

Методичні вказівки до розрахункових робіт, індивідуальної роботи та підготовки до модульного контролю з дисципліни “Аналіз електронних схем” для студентів спеціальності 6.050801 “Мікро- та наноелектроніка” денної і заочної форм навчання /Укл.: О.В.Василенко. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. – 38 с.

Укладач:	О.В. Василенко, доц., канд. техн. наук,
Рецензент:	В.В. Погосов, проф., д-р фіз.-мат. наук
Відповідальний за випуск:	Є.Л.Жавжаров, доц., канд.фіз.-мат. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
“Мікро- та наноелектроніка”
Протокол №
від „10” травня 2015 р.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСхП – автоматизоване схемотехнічне проектування;
 АЕС – аналіз електронних схем;
 БТ – біполярний транзистор;
 ЕС – електронна схема;
 ЛАР – лінійні алгебраїчні рівняння;
 МВП – метод вузлових потенціалів;
 МКТ – метод контурних струмів;
 ММ – математична модель;
 ММС – математична модель схеми;
 МЗС – метод змінних стану;
 ММВП – модифікований метод вузлових потенціалів із розши-
 реним координатним базисом;
 МОНТ – польовий транзистор з ізольованим затвором (метал-
 окисел-напівпровідник);
 ОП – операційний підсилювач;
 ОДР – однорідні диференційні рівняння;
 ПТКП – польовий транзистор, керований р-п переходом;
 САПР – система автоматизованого проектування;
 СНДР – система нелінійних диференційних рівнянь;
 СНАР – система нелінійних алгебраїчних рівнянь;
 СЛАР – система лінійних алгебраїчних рівнянь;
 AC Analysis (alternative current) – малосигнальний аналіз;
 CAD – computer aided design – автоматизоване проектування;
 DC Analysis (direct current) – аналіз статички (на постійному
 струмі), розрахунок стану спокою (початкових умов);
 ECAD – автоматизоване проектування в електроніці;
 SPICE – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis – ба-
 зова програма (алгоритм) моделювання в електроніці, одна з перших
 ECAD-систем;
 Transient Analysis – аналіз перехідних процесів (динаміки).

ЗМІСТ

Вступ	5
1 Вимоги до оформлення контрольної роботи.....	6
2 Скорочені теоретичні відомості до завдання №2.....	7
2.1 Види аналізу в ЕСAD	7
2.2 Математичне забезпечення етапу аналізу.....	8
2.2.1 Особливості алгоритмів аналізу лінійних схем.....	9
2.2.2 Одноваріантний аналіз.....	11
2.2.3 Багатоваріантний аналіз.....	13
2.3 Дослідження функцій схем	17
2.3.1 Дослідження функцій схем у частотному діапазоні.....	17
2.3.2 Дослідження функцій схеми у часовій області.....	19
2.3.3 Зв'язок між частотними та передавальними характеристиками.....	20
3 Скорочені теоретичні відомості до завдання №3.....	22
3.1 Початкові припущення.....	22
3.2 Метод вузлових потенціалів	23
3.3 Приклад розв'язання завдання №3.....	25
4 Варіанти завдання на контрольну роботу.....	28
Перелік рекомендованої літератури.....	33
Додаток А Приклад оформлення титульної сторінки.....	34
Додаток Б Схеми принципів для задачі № 3.....	35
Додаток В Схеми заміщення елементів для задачі №3.....	36
Додаток Д Приблизний перелік питань до екзамену.....	37

ВСТУП

Курс «Аналіз електронних схем» – важливий етап у підготовці студентів до оволодіння всіма етапами наскрізного автоматизованого проектування електронної апаратури. Від студентів вимагається розуміння етапів моделювання, видів і методів аналізу, особливостей інтерфейсів різних програм ECAD та ґрунтовна підготовка до роботи в їхньому середовищі. Отже, дисципліна «Аналіз електронних схем» є основою вивчення математичного забезпечення етапу аналізу при проектуванні пристроїв електронної техніки: методів формування математичних моделей схем (як універсальних, так і орієнтованих на дослідження конкретних функцій схем), видів одно- та багатоваріантного аналізу схем в середовищі програм ECAD тощо.

РГР та індивідуальна роботи призначені для оволодіння студентами навичками ручного і автоматизованого аналізу схем, для практичної підготовки до іспиту.

Мета розрахункових робіт: вивчення видів і методики аналізу основних електронних схем в ECAD, а також методів формування математичних моделей лінійних схем на практиці.

Після виконання РГР студенти повинні

знати:

- способи отримання математичних моделей електронних схем у компактній формі;
- критерії обирання методів аналізу та видів аналізу;
- методи і види аналізу в сучасних програмах автоматизованого схемотехнічного проектування;
- етапи формування і розв’язання рівнянь математичних моделей схем, особливості аналізу конкретних аналогових схем;

вміти:

- формувати ММС за допомогою методів схем заміщення і вузлових потенціалів (які є базовими в математичному забезпеченні ECAD);
- проводити всебічний аналіз електромагнітних процесів в електронних аналогових пристроях;
- за функціями схеми визначати вторинні параметри, давати напрямки параметричної оптимізації пристрою;
- приймати рішення щодо оптимальності схем.

1 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

До складу розрахункової роботи (РГР) входять три завдання:

- теоретичне питання, сформоване на базі всього лекційного курсу та в ході виконання й захисту лабораторних робіт;
- практичне дослідження - моделювання в ECAD-програмі вторинних параметрів електронних пристроїв на схемотехнічному рівні;
- задача на формування математичної моделі схеми в базисі вузлових потенціалів. Схеми наведені в Додатку Б, схеми заміщення – в Додатку В.

З першого питання необхідно викласти детальну інформацію щодо отриманого завдання, користуючись при цьому літературою, наведеною наприкінці даних методичних вказівок (або додатковою). Користуватися лише конспектом неприпустимо. По кожному питанню необхідно скласти висновки, бажана наявність власної думки, узагальнення, визначення тенденцій розвитку апарату аналізу схем.

Для складання звіту з практичної частини необхідно користуватися правилами складання звітів з лабораторних робіт, але висновки мають бути більш повними і детальними. Отримані експериментальні характеристики представляти роздрукованими.

Етапи виконання третього завдання будуть наведені нижче.

Робота має бути оформлена згідно ДСТУ, мати наступні обов'язкові розділи: титульна сторінка; зміст; теоретичне завдання; практичне завдання; задача; перелік використаних джерел.

Робота має виглядати охайно, із достатньою кількістю графічного матеріалу, підписів і коментарів до них. Об'єм розрахунково-графічної роботи – до 15 аркушів А4, або учнівський зошит. Титульну сторінку оформити згідно Додатку А.

Варіанти завдання і строк захисту визначає викладач.

У разі невиконання вимог до оформлення контрольна робота не приймається і повертається на доопрацювання. У разі відсутності захищеної РГР студент не допускається до іспиту (академічна заборгованість).

2 СКОРОЧЕНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ДО ЗАВДАННЯ №2

2.1 Види аналізу в ECAD

Традиційно до всіх програм схемотехнічного проектування входять кілька видів одноваріантного і багатоваріантного аналізу. Можна уявити електронну схему як «білий ящик» (багатополосник, в якому вихідні функції пов'язані із входніми, зовнішніми і внутрішніми) [1]. Кожна з перелічених функцій має набір параметрів. Ті з них, які можна взяти зі специфікації схеми електричної принципової (значення параметрів транзисторів, трансформаторів, пасивних елементів, джерел живлення та входних джерел тощо), називають **первинними** параметрами. Отже, до первинних відносять входні та внутрішні параметри схеми. Параметри функцій, отримані після аналізу (амплітуди напруги і струму, коефіцієнти передачі, пульсації, фільтрації тощо), називають **вторинними** параметрами.

При **одноваріантному** аналізі досліджують вихідні функції за фіксованих первинних параметрах і умовах зовнішнього середовища (температурі, найчастіше 27⁰ C). При **багатоваріантному** аналізі первинні параметри і температура варіюються, причому **внутрішні** параметри (параметри схеми без входних джерел) можуть змінюватись як із фіксованим (**детермінованим**) кроком, так і випадково (**стохастично**). На рис.2.1 наведено одноваріантні методи аналізу в програмі MicroCap 9.0 (MC9).

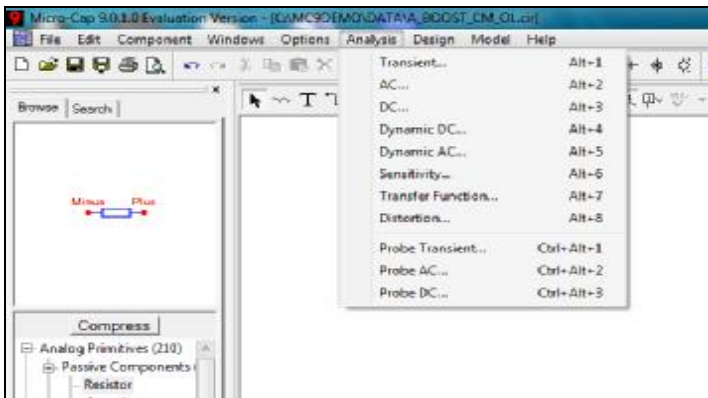


Рисунок 2.1 – Види одноваріантного аналізу в MC9

2.2 Математичне забезпечення етапу аналізу

Задачі одноваріантного аналізу ЕС зводяться до розв'язку систем рівнянь, що складають математичну модель схеми (ММС).

Аналіз перехідних процесів полягає в розв'язку системи ОДР:

$$y(\mathbb{V}, V, t) = 0 \quad (2.1)$$

з відомим вектором початкових умов $V(t_0) = V_0$ і за заданих збудженнях на входах ЕС. Результати аналізу:

– інтегральні криві $V(t)$, у тому числі залежності вихідних напруг від часу (осцилограми);

– вихідні параметри, що є функціоналами інтегральних кривих, наприклад, амплітуди, тривалості фронтів, затримки вихідних сигналів, потужності і т.п.

ММС у загальному випадку є СНДР, розв'язання яких в програмах аналізу ЕС базується на процедурі алгебраїзації – зведенні за допомогою формул чисельного розв'язування ОДР системи (2.1) до системи кінцевих рівнянь:

$$\Phi(U_k, t_k) = 0, \quad (2.2)$$

де $U(t) = V(t) - \delta(t)$ – наближений розв'язок системи (2.1); $\delta(t)$ – похибка наближеного розв'язку; $U_k = U(t_k)$; t_k – значення фазової та незалежної змінної на k -му кроці інтегрування.

Аналіз статичного стану полягає у визначенні стаціонарної точки розв'язку системи (2.1) при постійних рівнях збуджень. Ця задача розв'язується інтегруванням системи (2.1) на відрізку модельного часу $T_{\text{кін}}$, достатньому для загасання перехідних процесів (метод встановлення), або визначенням коренів системи кінцевих рівнянь, що виходить з (2.1) підстановкою $\mathbb{V} = 0$. Отримана система нелінійних алгебраїчних рівнянь розв'язується далі методами лінеаризації. У програмах аналізу для розв'язування системи (2.2), як правило, застосовують метод Ньютона, в якому чергове $(j+1)$ -е наближення до кореня U_k^{j+1} визначається в результаті розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь (ЛІАР):

$$Y_k^j (U_k^{j+1} - U_k^j) = \Phi(U_k^j, t_k), \quad (2.3)$$

де $Y_k^j = \partial \Phi / \partial U_k$ – матриця Якобі на j -й ітерації, обчислена в точці (U_k^j, t_k) . Матриця Якобі, отримана при формуванні ММС ме-

тодом вузлових потенціалів, є матрицею приватних похідних струму по напрузі (локальних провідностей), значення яких змінюється на кожному кроці процедури алгебраїзації.

Для рішення систем ЛАР в програмах аналізу електронних схем (ECAD) застосовують метод Гауса або його різновиди, такі, як метод Краута (метод LU-розкладу).

Основний метод аналізу частотних характеристик полягає у лінеаризації вихідної системи через спрощення повних моделей активних і пасивних компонентів до рівня малосигнальних лінійних, після чого ММС за допомогою прямого перетворення Фур'є отримують у вигляді системи алгебраїчних рівнянь із комплексними коефіцієнтами, яка далі розв'язується методом LU-розкладу (див. п.3.3).

2.2.1 Особливості алгоритмів аналізу лінійних ЕС

На практиці лінійних схем не існує, можна тільки говорити про припущення про лінійність. У глобальному сенсі можна вважати схему лінійною, якщо вона отримує на вході сигнал малої амплітуди, що майже не виводить її зі стаціонарного стану; оскільки такий сигнал зсуває робочу точку по статичних характеристиках в невеличкому діапазоні, його можна без втрати точності апроксимувати прямими, що означає перетворення нелінійних елементів в схемах заміщення моделей на лінійні (резистивні). Схеми, для яких таке припущення призводить до адекватних результатів моделювання, – це підсилювачі та аналогові фільтри. Особливості лінійних ЕС виявляються у формулюванні задач аналізу, у формах ММС, в алгоритмах аналізу.

Особливості формулювання задач аналізу для лінійних схем:

– поряд з аналізом у часовій області важливе значення має аналіз у частотній області, так званий малосигнальний аналіз (аналіз частотних характеристик);

– до основних вихідних параметрів відносять функціонали схемних функцій (СФ), під якими розуміють відношення перетворених по Фур'є чи Лапласу напруг і струмів, відомі як передатні, вхідні і вихідні характеристики.

Особливості ММС для лінійних (лінеаризованих) схем наступні.

1. Вихідна ММС є системою лінійних ОДР

$$GV + WV = Q, \quad (2.4)$$

де G, W – матриці коефіцієнтів (розмірності іммітансу);

$\vec{V}$, V – невідомі вектори базисних напруг і струмів, та похідних від них;

Q – вектор збуджень з постійними чи залежними від часу елементами.

Система (2.4) за допомогою перетворень Фур'є чи Лапласа зводиться до системи ЛАР із вектором початкових умов

$$\overline{A}\overline{V} = D, \quad (2.5)$$

де

$$\overline{A} = pG + W, \quad D = \overline{Q} + GV_0, \quad p = s + j\omega, \quad \overline{V} = V(p), \quad \overline{Q} = Q(p), \quad V_0 \cdot$$

2. ММС можна одержати у виді схемної функції (СФ), минаючи стадію формування рівнянь (2.5), тобто у виді:

$$CF = \left(\sum_{i=0}^n a_i p^i \right) / \left(\sum_{j=0}^m b_j p^j \right), \quad (2.6)$$

де a_i і b_j – поліноміальні коефіцієнти, що залежать від параметрів елементів ЕС.

Методи аналізу лінійних ЕС поділяють на чисельні, чисельно-символічні і символічні.

Чисельні методи розрахунку частотних характеристик ґрунтовані на n -кратному розв'язанні методом Гауса чи його різновидами системи (2.5), у якій $A = j\omega G + W$ – матриця з комплексними коефіцієнтами; n – кількість розрахункових точок на осі частот. Для прискорення обчислень використовують методи розріджених матриць і метод підсхем. Можна не підставляти чисельні значення ω , тоді рішенням буде функція комплексної частоти $p=j\omega$, або оператор перетворення Фур'є $p=jk\omega_1$, де k – номер гармоніки, ω_1 – фундаментальна частота (перша гармоніка вхідного сигналу, розкладеного по Фур'є).

Відома велика група чисельних методів аналізу частотних характеристик, що полягають у розрахунку поліноміальних коефіцієнтів a_i та b_i у (2.6) (метод поліноміальних коефіцієнтів). Коефіцієнти a_i і b_i не залежать від частоти ω , тому їхній трудомісткий розрахунок однократний. Наступний n -кратний розрахунок за формулами, що випливають з (2.6) при $p=j\omega$, уже не вимагає багатьох обчислень. Однак ці методи не одержали поширення через погану зумовленість задачі чисельного визначення поліноміальних коефіцієнтів, що породжує помітні похибки, які швидко зростають із збільшенням розмірності задачі.

Цей недолік виключено в *символічних методах*, в яких викорис-

товують логічні процедури й операції над особливими множинами, в результаті чого поліноміальні коефіцієнти отримують не у вигляді чисел, а у вигляді функцій – у символічній формі. Символічні методи основані на одержанні виразів для СФ у символічному виді в результаті виконання дій комбінаторного характеру над вихідними даними. При цьому виключаються похибки, які властиві чисельним методам. У символічних методах використовують поняття і термінологію теорії графів, тому ці методи називають також топологічними.

Чисельно-символічні методи займають проміжне положення між чисельними і символічними методами за показниками точності і трудомісткості обчислень.

2.2.2 Одноваріантний аналіз

Одноваріантний аналіз дозволяє проаналізувати функції схеми при номінальних значеннях внутрішніх і зовнішніх параметрів. Отже, номінали компонентів, значення параметрів моделі, температура й інші параметри залишаються незмінними впродовж всього сеансу моделювання (для непараметричних схем).

До одноваріантних видів аналізу відносять:

- розрахунок перехідних процесів;
- розрахунок частотних характеристик;
- розрахунок передатних функцій по постійному струму.

Вибір виду аналізу визначається класом моделюемого пристрою та функціями схеми, по яких схема має бути оптимізована. Перед аналізом необхідно визначити початкові умови: потенціали аналогових вузлів, струми індуктивностей та логічний стан цифрових вузлів, інакше вони будуть обнулені автоматично.

Аналіз **перехідних процесів** є найскладнішою в плані використання математичного забезпечення, до якого висуваються найжорсткіші вимоги щодо збіжності та стійкості. Розрахунок ведеться із автоматично вибраним кроком, мінімальне значення якого визначається припустимою відносною похибкою RELTOL. У вікні Global Setting RELTOL звичайно $= 10^{-3}$. Якщо максимальний крок не задано, він обирається так: $h_{\max} = (T_{\max} - T_{\min}) / 100$.

Перед аналізом перехідних процесів автоматично розраховують статичний режим схеми, якщо початкові умови були обнулені. При аналізі формується система нелінійних алгебро-диференціальних рів-

нянь, які алгебраїзуються методами високого порядку (Трапедій, Гіра, формули диференціювання назад ФДН), та далі лінеаризуються методом Ньютона (із додатковими засобами підвищення збіжності). Для розв'язку отриманої СЛАР використовують метод LU- перетворення (див. рис. 2.2). У режимі аналізу динаміки отримують осцилограми, статичні характеристики нелінійних індуктивностей (вебер-амперні) та ємностей (вольт-фарадні).

Спектральний аналіз виконують після розрахунку перехідних характеристик прямим швидким перетворенням Фур'є із розрахунком коефіцієнта нелінійних спотворень. Для нелінійних кіл основна умова можливості застосування спектрального методу – лінеаризація кола. Мінімальна похибка при лінеаризації досягається при здійсненні впливу на схему сигналу малої амплітуди, що дозволяє замінити нелінійні опори (активні й пасивні) диференційними, які розраховані в околицях робочої точки.

На рис.2.2 наведено зв'язок видів аналізу із формою ММС та етапи алгоритму і методи розв'язання отриманих для даної форми рівнянь.

Вид аналізу	Аналіз динаміки <i>Transient</i>	Аналіз статички <i>DC</i>	Малосигнальний аналіз <i>AC</i>
аргументи	час	фазові змінні	частота
Форма ММС	СНДР	СНАР	СЛАР
Назва етапу	дискретизація	лінеаризація	розв'язання
Методи розв'язання	Трапедій Гіра (ФДН)	Ньютона-Рафсона	LU-факторизація
ітераційні методи			прямий метод

Рисунок 2.2 - Алгоритм формування і розв'язання систем рівнянь математичних моделей схем в залежності від виду аналізу в ECAD

У режимі аналізу **статички** розраховують передаточні характеристики і ВАХ резистивних елементів, зокрема - транзисторів. До входу підключають один чи два незалежних джерела постійної напруги або струму. Програма автоматично шунтує індуктивності, виключає конденсатори, потім, змінюючи із певним кроком вхідні джерела,

отримує сімейство передаточних функцій, або, якщо на вході джерело постійної напруги, буде розрахована передаточна функція (для підсилювача).

Обговоримо особливості розрахунку режиму по постійному струму (DC Analysis). У програмах ECAD його розраховують ітераційним методом Ньютона-Рафсона. За відсутності збіжності рекомендується збільшити максимальну кількість ітерацій ITL1 (за замовчанням ITL1=40). Для підвищення швидкості збіжності рекомендується встановлювати початкові значення вузлових потенціалів, якомога більш близькі до очікуваних по постійному струму (за відсутності цієї директиви всі вузлові потенціали на початковій ітерації вважаються рівними нулю). Якщо рішення методом Ньютона-Рафсона не збігається, програма автоматично переходить до методу варіації напруг джерел живлення Source stepping, що ціною збільшення витрат машинного часу забезпечує збіжність рішення в більшості випадків. Іноді спочатку застосовують метод варіації мінімальної провідності GMIN і після цього, у випадку його невдачі, – метод варіації напруг.

У математичних моделях компонентів враховані теплові, дробові та низькочастотні фліккер-шуми, спектральні щільності яких можуть бути розраховані. Можна розрахувати в режимі аналізу статички сумарну спектральну щільність напруги або струму шумів, перерахованих до входу. Після розрахунку рівня шумів на графіках виводяться значення кореня квадратного з цих величин, розмірності $V/\sqrt{\text{Гц}}$, або $A/\sqrt{\text{Гц}}$. Розрахунок спектральної щільності шумів можливий також в режимі малого сигналу (аналіз по змінному струму – аналіз частотних характеристик AC Analysis). Рівень шуму перераховується із виходу на вхід діленням спектральної щільності на квадрат модуля передаточної функції.

У режимі аналізу **частотних характеристик** визначають початкові умови розрахунком статички, після цього всі нелінійні компоненти лінеаризуються та виконується розрахунок комплексних амплітуд вузлових потенціалів і струмів індуктивностей. Амплітуду вхідного синусоїдального сигналу приймають рівною одиниці. ММС отримують у вигляді СЛАР.

Можна розраховувати частотні характеристики пристроїв, заданих передаточною функцією. Для розрахунку імпульсної характеристики за допомогою зворотного перетворення Фур'є в режимі аналізу

АС по осі x задається час, а для побудови годографа для аналізу стійкості за методом Найквіста – дійсна частина комплексної напруги.

2.2.3 Багатоваріантний аналіз

Багатоваріантні види аналізу призначені для визначення області безпечних режимів і допусків, служать для локальної параметричної оптимізації пристроїв електроніки. В принципі, розрахунок передаточних характеристик по постійному струму можна віднести до багатоваріантних видів (оскільки варіюються джерела постійного струму). Сутність багатоваріантних видів аналізу полягає в багаторазовому розрахунку пристроїв одноваріантними видами.

Розрахунок сімейства функцій схеми при різних значеннях параметру (номіналу компонента або значення параметра моделі) називають варіацією параметру (**Stepping**). Крок варіації, початкове і кінцеве значення обирає користувач (див. рис.2.3), тому цей вид аналізу відносять до **детермінованих**. В якості варіюємого параметру може бути й температура, для цього використовують (активують) параметри теплових моделей компонентів.

Більш складними є види аналізу із використанням статистичних випробувань – аналіз чутливості (**Sensitivity**), аналіз за методом Монте-Карло (**Monte Carlo**) та на найгірший випадок (**Worst Case**). Усі види варіації та статистичних випробувань доступні у будь якому виді одноваріантного аналізу.

Програма MicroCap дозволяє проводити три типи багатоваріантного аналізу: варіювання параметра (Stepping), статистичний аналіз за методом Монте-Карло (Monte-Carlo) та аналіз на найгірший випадок (Worst Case).

При проведенні аналізу за

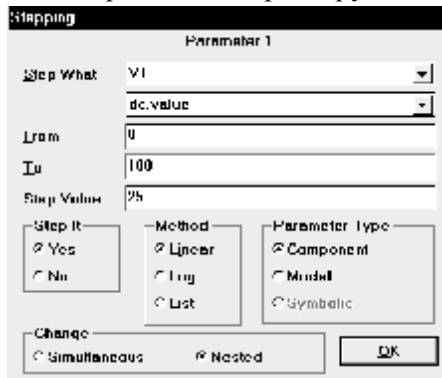


Рисунок 2.3 - Завдання опцій детермінованого аналізу



Рисунок 2.4 - Завдання опцій багатоваріантного аналізу Монте-Карло

методом Монте-Карло треба задавати в моделях компонентів значення випадкового розкиду основного параметра (для пасивних) або будь-якого параметру моделі (для активних компонентів). Ключове слово DEV визначає незалежний випадковий розкид, LOT – розкид, корельований з іншим параметром. Закон розподілу можна обирати нормальним або рівномірним, кількість варіацій має бути ≥ 100 випробувань (рис.2.4). Рандомайзер обирає випадкове значення з нормально (лінійно) розподіленої функції в межах $[-1, 1]$, помножує його на номінальне значення параметру, та виконується одноваріантний аналіз. Після всіх запусків можна вивести статистичні дані у текстовому вигляді, або як гістограму, по осі x якої – інтервал отриманих значень функції схеми (t_f , K_u і т.д.), а по осі y – ймовірності.

Розглянемо метод **статистичних випробувань**. Метою статистичного аналізу є:

- розрахунок допусків на вихідні параметри y_j при заданих допусках на внутрішні x_i і зовнішні q_r параметри;
- отримання законів розподілу і оцінка числових характеристик розподілу вихідних параметрів y_j при заданому розподілі вектора внутрішніх параметрів X і заданих значеннях зовнішніх параметрів.

Основний метод статистичного аналізу в САПР – метод статистичних випробувань (**Монте-Карло**). Алгоритм методу включає виконання l випробувань (варіантів аналізу), в кожному випробуванні задаються випадкові значення початкових даних x_i , відповідно до їх законів розподілу і визначаються випадкові значення параметрів y_j .

Результати статистичних випробувань нагромаджуються у вигляді сум:

$$S_{1j} = \sum_{k=1}^l y_{jk}, \quad S_{2j} = \sum_{k=1}^l y_{jk}^2, \quad (2.7)$$

$$S_{3ji} = \sum_{k=1}^l y_{jk} x_{ik}, \quad S_{4jd} = \sum_{k=1}^l d_{jdk}, \quad (2.8)$$

де x_{ik} і y_{jk} – значення внутрішнього параметру x_i і вихідного параметру y_j в k -му випробуванні; $\delta_{jdk}=1$, якщо значення y_{jk} попало в d -й інтервал гістограми, інакше $\delta_{jdk}=0$.

Кількість випробувань N впливає на точність аналізу і витрати машинного часу T_m . Метод статистичних випробувань характеризується великими T_m :

$$T_m \approx NT_{oa},$$

де T_{oa} - витрати часу на один варіант аналізу.

Метод найгіршого випадку відносять до методів статистичного аналізу. Він призначений для оцінки максимально можливих відхилень від номіналів значень вихідних параметрів. З цією метою виконуються дві процедури:

- визначення найгірших випадків, тобто сукупностей значень внутрішніх і зовнішніх параметрів x_i , найгірших з точки зору виконання умов працездатності для кожного вихідного параметру y_j ;
- розрахунок вихідних параметрів в найгірших випадках.

Якщо аналіз чутливості виконується методом пристовів, а однократний Метод найгіршого випадку (**Worst Case**) звичайно застосовують при оцінці відхилень вихідних параметрів, зумовлених нестабільністю зовнішніх параметрів. Вплив розсіювання внутрішніх параметрів на розсіювання вихідних параметрів доцільно оцінювати методом статистичних випробувань, оскільки метод найгіршого випадку дає при цьому сильно завищені значення допусків. Використання цих значень при прийнятті проектних рішень може привести до невиправдано високих габаритних розмірів, вартості, маси виробів.

Для розрахунку чутливості та найгіршого випадку використовують результати аналізу Монте – Карло.

Аналіз чутливості полягає у визначенні впливу внутрішніх і зовнішніх параметрів на вихідні. Вплив оцінюють за коефіцієнтами впливу (коефіцієнтами чутливості). Нехай $X=(x_1, x_2,...,X_n)$ і $Y = (y_1, y_2,...,y_m)$ — вектори відповідно внутрішніх і вихідних параметрів. Матриця абсолютної чутливості є матриця $A=dY/dX$ розміру $m \times n$ з елементами $a_{ji} = \partial y_j / \partial x_i$. Елементами матриці відносної чутливості є відносні коефіцієнти впливу $b_{ji} = a_{ji} x_{i \text{ ном}} / y_{j \text{ ном}}$, де $x_{i \text{ ном}}$ і $y_{j \text{ ном}}$ — значення x_i і y_j , що приймаються за номінальні.

Аналіз чутливості застосовують по відношенню до об'єктів з безперервними математичними моделями. Результати аналізу знаходять застосування при рішенні задач параметричної оптимізації, розрахунку допусків, побудови макромоделей й ін. Для аналізу чутливості застосовують наступні методи.

Метод приростів, оснований на чисельному диференціюванні залежності $Y(X)$. Переваги методу – його універсальність, можливість розпаралелювання обчислювального процесу. Недоліки – порівняно висока трудомісткість і невисока точність.

Прямий метод, який застосовують у випадках, коли математична модель об'єкта є системою звичайних диференціальних рівнянь (ОДУ), а вихідні параметри є функціоналами результатів її інтегрування. Прямий метод точніший і економічніший за метод приростів, однак застосовний лише при вказаних вище обмеженнях.

Регресивний метод, оснований на обробці результатів статистичного аналізу, виконаного за методом Монте-Карло. Регресивний метод доцільно застосовувати в тому випадку, коли одночасно з аналізом чутливості потрібно виконати статистичний аналіз.

Аналіз чутливості (Sensitivity) виконується як окремо (тільки для первинних параметрів, що впливають на вторинні параметри на постійному струмі), так і в алгоритмі параметричної оптимізації для пошуку найбільш впливових внутрішніх параметрів (для мінімізації цільової функції) та напряму руху градієнтного метода

2.3 Дослідження функцій схем

Функції схеми (ФС) подаються різноманітними методами у залежності від мети дослідження та прийнятого виду аналізу.

У загальному випадку функції схеми подаються дробово-раціональними функціями виду:

$$F(p) = \frac{A(p)}{B(p)}, \quad (2.9)$$

де $A(p)$ і $B(p)$ – багаточлени деякого ступеню комплексної змінної p з речовинними коефіцієнтами (див. ф-лу 2.6), в розгорнутому виді:

$$F(p) = \frac{a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + b_0}, \quad (2.10)$$

де p – оператор перетворення (Фур'є, Лапласа тощо).

Вторинні параметри, стосовні до входу, називають вхідними функціями ($R_{ВХ}$, $Y_{ВХ}$). Прохідні, передатні функції – K_U , K_I , $Z_{ПЕР}$, $Y_{ПЕР}$. До вихідних функцій відносяться ($R_{ВИХ}$, $Y_{ВИХ}$).

2.3.1 Дослідження функцій схем в частотному діапазоні

При гармонійному сигналі на вході змінна p приймає вид $p=j\omega$, і функція схеми задається у виді:

$$F(j\omega) = F(\omega)e^{j\varphi(\omega)}. \quad (2.11)$$

Залежність модуля $F(\omega)$ від частоти називають амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ), а $\varphi(\omega)$ від частоти – фазо-частотною характеристикою (ФЧХ).

Частотні характеристики можна отримати по графічному зображенню $F(\omega)$ і $\varphi(\omega)$ у комплексній площині або аналітичні по функції $F(p)$ при $p=j\omega$. Частотні характеристики, що отримуються при гармонійному сигналі на вході, характеризують реакцію схеми при будь-якому збудженні.

Схема не спотворює сигнал при передачі, якщо збудження і реакція на її вході та виході пов'язані:

$$g(t) = k_0(t - t), \quad (2.12)$$

де g – імпульсна характеристика схеми; τ – час запізнення.

З виразу (2.12) видно, що форма вхідного сигналу зберігається при передачі, якщо усі його елементи запізнюються на одну й ту саму величину t (за наявності реактивних елементів). Тобто, при проходженні сигналу через схему всі його гармоніки були передані з однаковим коефіцієнтом передачі (див. принцип суперпозиції).

В операторному виді імпульсну характеристику можна записати

$$G(p) = k_0 e^{-tp} \text{ або } G(j\omega) = k_0 e^{-j\tau\omega}, \quad (2.13)$$

де k_0 є модулем, а $-\tau\omega$ є фазою (φ) характеристики, які обчислюють за формулами:

$$|F(j\omega)| = \sqrt{F_R^2(\omega) + F_I^2(\omega)} \quad - \text{модуль (АЧХ)}. \quad (2.14)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{F_I(\omega)}{F_R(\omega)} \quad - \text{фаза (ФЧХ)}. \quad (2.15)$$

Оскільки складові складного сигналу можуть мати будь-яку частоту у діапазоні $0 < \omega < \infty$, умови невикривленої передачі такі:

- АЧХ не має бути залежною від частоти;
- ФЧХ має бути пропорційною частоті сигналів збудження.

Частотні характеристики реальної схеми наведені на рис.2.5. У реальних схемах викривлення немає лише у деякому діапазоні частот,

який називають смугою пропускання:

$$\Delta w = w_{B_{cp}} - w_{H_{cp}}.$$

Граничні верхню і нижню частоти визначають при рівності модуля функції

$$k = \frac{k_0}{\sqrt{2}},$$

де k_0 - значення модуля у смугі пропускання.

Якщо АЧХ побудовано в логарифмічному масштабі, то значення коефіцієнта передачі (підсилення) на межах смуги пропускання буде меншим на 3 дБ за значення в середині смуги пропускання. Децибел визначається логарифмом співвідношення потужностей:

$$n_{дБ} = 10 \lg \left(\frac{P_{вих}}{P_{вх}} \right). \quad (2.16)$$

Потужність, яка віддається навантаженню при $w = w_{cp}$, у два рази менша за потужність всередині смуги $w_{B_{cp}} < w < w_{H_{cp}}$.

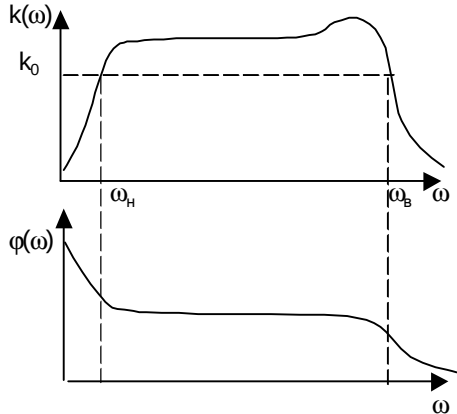


Рисунок 2.5 – Частотні характеристики реального підсилювача

2.3.2 Дослідження функцій схеми у часовій області

Найбільш інформаційно повним дослідженням є аналіз в часовому домені, оскільки аналізується найбільш повна модель, яка не підлягала спрощенням. За результатами цього аналізу (в програмі MicroCap це **Transient Analysis**) можна зробити висновок про стійкість схеми, про її швидкодію. Одним з варіантів вхідного збурення є імпульсний сигнал.

Реакцію схеми на одиничний імпульс називають імпульсною характеристикою та визначають при зворотному перетворенні за Лапласом функції схеми:

$$g(t) = L^{-1}[G(p)]. \quad (2.17)$$

Реакцію схеми на одиничну функцію (стрибок напруги) назива-

ють перехідною характеристикою:

$$h(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{p} G(p) \right] = L^{-1} [H(p)] \quad (2.18)$$

Перехідна та імпульсна характеристики пов'язані:

$$g(t) = \frac{d}{dt} [h(t)] \quad (2.19)$$

Типовий вигляд перехідної характеристики наведено на рис.2.6, де t_H – час наростання, t_3 – час затримки, h_0 – кінцеве значення (новий стаціонарний стан), γ – викид (перерегулювання, перенавантаження):

$$g = \left(\frac{h_{\max}}{h_0} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (2.20)$$

Вигляд імпульсної і перехідної характеристик залежить від співвідношення параметрів схеми, та у кінцевому підсумку, від коефіцієнту відносного згасання ξ .

Порядок схемних функцій визначається найвищим ступенем в її знаменнику. Як правило, він визначається кількістю реактивних компонентів у досліджуваній схемі.

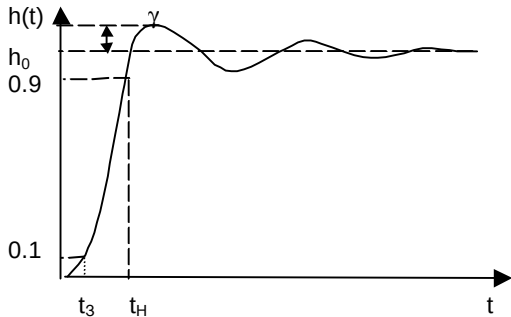


Рисунок 2.6 – Типовий вигляд перехідної характеристики

2.3.3 Зв'язок між частотними і передавальними характеристиками

Частотні й часові характеристики описують ту саму схемну функцію і можуть бути визначені по її карті нулів і полюсів (корені чисельника і знаменника виразу 2.10), тому між ними є зв'язок. Перехідну характеристику можна визначити за її частотною характеристикою.

Згідно виразу:

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (2.21)$$

де $G(jw) = k(w)e^{jjw}$

$G(jw) = k_R(w) + jk_I(w)$ – частотна передатна функція, записана в формі Ейлера та в алгебраїчній формі.

Перехідна характеристика:

$$h(t) = \frac{2}{p} \int_0^{\infty} \frac{k_R(w)}{w} \sin wtdw, \quad (2.22)$$

де k_R – речовинна частина передаточної функції.

У багатьох випадках важливо знати не точний хід перехідних і частотних характеристик, а співвідношення між їхніми параметрами, що описуються: часом зростання t_H і викидом перехідної характеристики γ , з одного боку, і смуги пропускання і резонансним підйомом k_m частотної характеристики, з іншої.

Для схемних функцій вищих порядків визначити це співвідношення аналітично не завжди вдається, тому використовують близькі емпіричні формули:

$$t_H f_e \approx 0,3; \quad k_m = \frac{1}{2x \sqrt{1-x^2}}; \quad g = 100e^{\frac{(-px)}{\sqrt{1-x^2}}},$$

де f_e – верхня межа смуги пропускання;

x – коефіцієнт відносного згасання схеми.

Чим менше x , тим більше викид g і k_m (схема втрачає стійкість), причому викид g виникає при $x < 1$, а резонансний підйом k_m – при $x < 0.707$. При збільшенні смуги пропускання зменшується час наростання перехідної характеристики, тобто швидкодійні пристрої мають пропускати сигнали із широким спектром (більш високочастотні).

Для резонансних кіл властиві прояви самозбудження і перехід в автоколивальний режим, АЧХ має вузьку смугу пропускання і високі значення коефіцієнта передачі. Відсутність резонансних підйомів на АЧХ і викидів на перехідній характеристиці свідчать про стійкість (робастність) схеми (тобто схема здатна залишатися в режимі стаціонарного функціонування, або швидко повертатися до нього незалежно від збурення на входах).

3 СКОРОЧЕНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ДО ЗАВДАННЯ №3

Дані теоретичні відомості стосуються етапів розв'язання задачі на формування математичної моделі схеми підсилювача в базисі вузлових потенціалів для режиму малого сигналу.

3.1 Початкові припущення

Для того, щоб отримати ММС у компактній формі в басисі методу вузлових потенціалів (МВП), необхідно попередньо виконати наступні дії.

3.1.1 Джерело вхідної напруги e із опором R перетворюється до джерела струму i із внутрішньою провідністю G (рис.3.1).

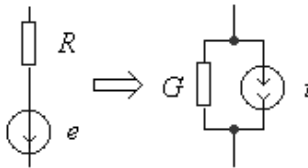


Рисунок 3.1 – Схема еквівалентного перетворення вхідного джерела

3.1.2 Для активних і реактивних елементів використовуємо закони Ома в комплексній формі, що дозволяє отримати ММС у формі алгебраїчних рівнянь, а не інтегро-диференційних. При цьому ми переходимо від оригіналів (функцій часу) до зображень (функцій частоти). При нульових початкових умовах операції диференціювання оригіналу відповідає його множення на p , а операції інтегрування – поділ на p . У зв'язку з цим комплексна змінна $p = j\omega$ може розглядатися як деякий оператор, та трактується як комплексна частота. Імпеданси (імпеданси Z і адмітанси Y) двополюсника приймають загальний вид (табл. 3.1), незалежно від характеру перетворення.

3.1.3 Джерело постійного струму (живлення) на змінному струмі шунтується власною ємністю та закорочується.

3.1.4 Для активних елементів використовуються лінеаризовані схеми заміщення (додаток В), оскільки аналіз ведеться для змінного струму, і динамічні опори схем заміщення можуть бути фіксованими в околицях робочої точки (малосигнальний аналіз).

Таблиця 3.1 – Параметри і рівняння пасивних двополюсників

Тип двополюсника	Пара-метр	Z	Y	Рівняння закону Ома	
				для напруг	для струму
Опір	$R = \frac{1}{G}$	R	G	$\mathcal{U}_R = R \mathcal{I}_R$	$\mathcal{I}_R = G \mathcal{U}_R$
Ємність	$C = \frac{1}{S}$	$\frac{1}{pC}$	pC	$\mathcal{U}_C = \frac{1}{pC} \mathcal{I}_C$	$\mathcal{I}_C = pC \mathcal{U}_C$
Індуктивність	$L = \frac{1}{\Gamma}$	pL	$\frac{1}{pL}$	$\mathcal{U}_L = pL \mathcal{I}_L$	$\mathcal{I}_L = \frac{1}{pL} \mathcal{U}_L$

3.2 Метод вузлових потенціалів

Для автоматизованого розрахунку схем важливо не тільки розробити алгоритм формування ММС, але й намагатися отримати ММС в економічній формі. Доречі, сукупність рівнянь Кірхгофа і Ома для схеми теж утворить її ММС, але у надмірній формі, оскільки кожна гілка опишеться майже трьома рівняннями. Обираючи систему незалежних змінних (координатний базис) з усіх струмів та напруг схеми, ми тим самим знижуємо розмірність ММС. Найбільш компактну ММС отримують у методах однорідного координатного базису – методі контурних струмів і методі вузлових потенціалів, які є дуальними один до одного.

В сучасних програмах ECAD формування рівнянь, як правило, здійснюється на основі методу вузлових потенціалів (із розширеним координатним базисом). Формування за допомогою цього методу базується на I законі Кірхгофа, узагальнене рівняння методу має вигляд

$$[Y] * [U] = [J], \quad (3.1)$$

де $[Y]$ – матриця вузлових провідностей;

$[U]$ – матриця вузлових напруг;

$[J]$ – матриця вузлових струмів задаючих генераторів.

Правила складання рівнянь для вузлових потенціалів:

– діагональні елементи y_{ii} матриці Y позитивні і дорівнюють сумі провідностей, підключених до вузла i ;

– позадіагональні елементи y_{jk} матриці Y негативні та дорівнюють сумі провідностей між j та k – вузлами;

– довільний елемент вектору J_j дорівнює сумі струмів незалежних джерел, які втікають і витікають з j -й вузла відповідно із знаком плюс та знаком мінус.

Слід зазначити, що якщо один з вузлів заземлений, то з матриці зникають відповідний стовпець і відповідний рядок, матриця стає редукованою, тобто зменшує свою розмірність за рахунок нульового стовпця і рядка (редукована матриця).

Оскільки схеми найчастіше мають у своєму складі активні елементи або компоненти, які перетворюють електромагнітну енергію, залежні джерела мають бути включені у схеми заміщення. Оскільки МВП набув найбільшого поширення, найчастіше у схемах заміщення використовують залежні джерела у формі ДСКН (джерела струму, які керуються напругою), оскільки форма його запису співпадає із формулою МВП.

ММС для схеми із активними елементами приймає вигляд:

$$[J]' = ([Y]' + [Y]'') [U], \quad (3.2)$$

де $[U]$ – вектор станів (невдомих напруг вузлів);

$[Y]'$ – матриця провідностей, враховує тільки двополюсні пасивні елементи еквівалентної схеми;

$[Y]''$ – матриця провідностей, враховує двополюсні активні елементи еквівалентної схеми;

$[J]$ – вектор задаючих незалежних джерел струму.

Матриця $[Y]'$ завжди симетрична, а матриця $[Y]''$ – як правило, несиметрична, що вказує на наявність активного компоненту та однонаправленість проходження сигналу через електронний пристрій, тобто на асиметрію передаточних характеристик.

Положення керуючого параметру в матриці схеми визначається зв'язком залежного джерела і керуючої величини (струму або напруги) з параметрами схеми. Керуючий параметр вписується в матрицю на перетині деяких рядків і стовпчиків. Номери рядків відповідають вузлам, з якими пов'язане залежне джерело, а номери стовпчиків відповідають вузлам, із яким пов'язана напруга керування.

При цьому, якщо залежне джерело і пов'язана з ним координата (перетин) співпадають за напрямком зі зв'язаною в ній координатою, то керуючий параметр вписується в матрицю схеми з негативним знаком. При неспівпаданні напрямку, знак змінюється на зворотній.

3.3 Приклад розв'язання завдання №3

Наведемо приклад формування ММС для схеми підсилювача на БТ (рис.3.2).

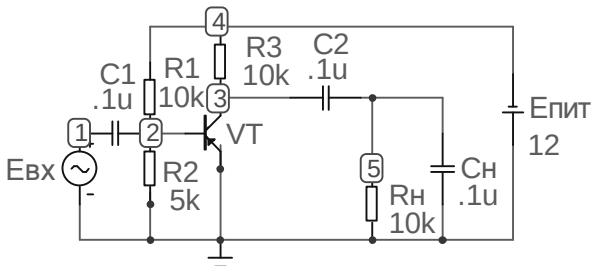


Рисунок 3.2 – Схема підсилювача

Використовуючи припущення про локальну лінійність моделі схеми, отримаємо еквівалентну схему для малосигнального режиму для біполярного транзистора в активному нормальному режимі (рис.3.3).

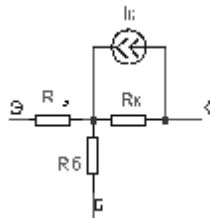


Рисунок 3.3 – Малосигнальна схема заміщення біполярного транзистора

При підстановці схеми (рис.3.3) в схему рис.3.2, та при врахуванні початкових припущень (п.3.1), схема заміщення малосигнальної моделі підсилювача приймає вигляд рис.3.4.

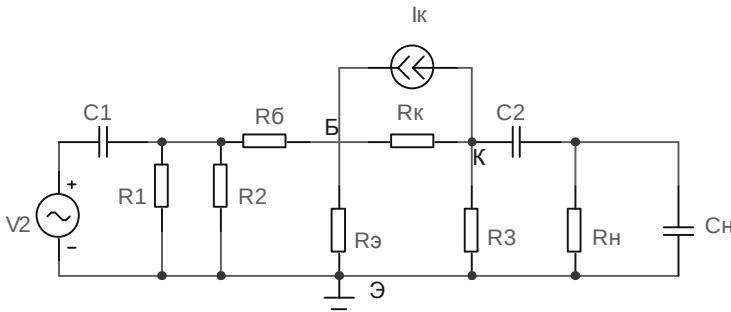


Рисунок 3.4 – Схема заміщення моделі підсилювача

Граф схеми (відбиває топологію кола, тобто спосіб з'єднання елементів між собою) наведено на рис.3.5.

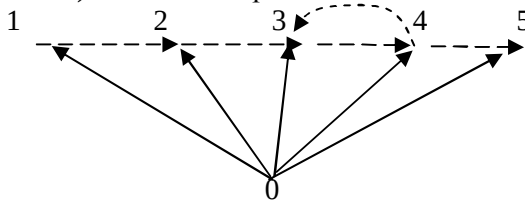


Рисунок 3.5 – Граф схеми

Матриця вузлових провідностей для пасивної частини схеми симетрична і має розмір 5 на 5:

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_2 + pC1 & -pC1 & 0 & 0 & 0 \\ -pC1 & pC1 + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R1} + \frac{1}{R6} & -\frac{1}{R6} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R6} & \frac{1}{R6} + \frac{1}{Rэ} + \frac{1}{Rк} & -\frac{1}{Rк} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{Rк} & \frac{1}{R6} + \frac{1}{Rк} + \frac{1}{Rэ} + pC2 & -pC2 \\ 0 & 0 & 0 & -pC2 & pC2 + pCн + \frac{1}{Rк} + \frac{1}{Rн} \end{bmatrix}$$

Матриця провідностей із внесеним згідно правила керуючим параметром залежного джерела має вигляд, наведений на рис.3.6. Як бачимо, вона втратила симетрію. Повну математичну модель схеми наведено на рис.3.7.

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_2 + pC1 & -pC1 & 0 & 0 & 0 \\ -pC1 & pC1 + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_0} & -\frac{1}{R_0} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_0} + \frac{b}{R_0} & \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_K} & -\frac{1}{R_K} & 0 \\ 0 & -\frac{b}{R_0} & -\frac{1}{R_K} & \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_3} + pC2 & -pC2 \\ 0 & 0 & 0 & -pC2 & pC2 + pC_H + \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_H} \end{bmatrix}$$

Рисунок 3.6 – Матриця вузових провідностей із внесеним параметром керування

2

$$\begin{bmatrix} Y_2 + pC1 & -pC1 & 0 & 0 & 0 \\ -pC1 & pC1 + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_0} & -\frac{1}{R_0} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_0} + \frac{b}{R_0} & \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_K} & -\frac{1}{R_K} & 0 \\ 0 & -\frac{b}{R_0} & -\frac{1}{R_K} & \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_3} + pC2 & -pC2 \\ 0 & 0 & 0 & -pC2 & pC2 + pC_H + \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_H} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \\ \dot{U}_4 \\ \dot{U}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{J}_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Рисунок 3.7 – Повна математична модель схеми

4 ВАРІАНТИ ЗАВДАННЯ НА КОНТРОЛЬНУ РОБОТУ

Варіант №1

- 1 Види електронних схем. Види аналізу непараметричних схем.
- 2 Дослідити схему ключа на БПТ в режимі аналізу перехідних та частотних характеристик. Встановити зв'язок між верхньою частотою смуги пропускання та часом наростання вихідного імпульса напруги.
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №1, використовуючи схему заміщення для активного приладу №4.

Варіант №2

- 1 Види і особливості багатоваріантного аналізу.
- 2 Дослідити спектр вихідного сигналу підсилювача на БПТ. Розрахувати коефіцієнт гармонік.
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №1, використовуючи схему заміщення для активного приладу №5.

Варіант №3

- 1 Особливості аналізу схем в частотній області.
- 2 Визначити коефіцієнт $K_{\Delta\omega}$ підсилювача середніх частот на БПТ.
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №1, використовуючи схему заміщення для активного приладу №6.

Варіант №4

- 1 Особливості аналізу динамічних і статичних режимів.
- 2 Визначити параметри частотної характеристики підсилювача на польовому транзисторі (МОНТ).
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №2, використовуючи схему заміщення для активного приладу №1.

Варіант №5

- 1 Види перетворень функцій часу. Символічне перетворення.
- 2 Визначити параметри частотної характеристики підсилювача на польовому транзисторі (ПТКП).
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №2, використовуючи схему заміщення приладу №2.

Варіант №6

- 1 Види перетворень функцій часу. Перетворення Фур'є.
- 2 Отримати сімейство ВАХ біполярного малопотужного транзистора. Визначити області характеристики і режими роботи транзистора.
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №3, використовуючи схему заміщення для активного приладу №3.

Варіант №7

- 1 Види перетворень функцій часу. Перетворення Лапласа.
- 2 Отримати передаточну характеристику ключа на МОНТ. Визначити по ній вторинні параметри.
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №3, використовуючи схему заміщення для активного приладу №4.

Варіант №8

- 1 Лінійні методи аналізу. Метод еквівалентних схем і чотириполюсника.
- 2 Проаналізувати перехідні характеристики в ключі на складених біполярних транзисторах. Визначити вторинні параметри.
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №3, використовуючи схему заміщення для активного приладу №5.

Варіант №9

- 1 Лінійні методи аналізу. Метод МВП.
- 2 Визначити коефіцієнт пульсації діодного моста із фільтром.
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №3, використовуючи схему заміщення для активного приладу №6.

Варіант №10

- 1 Лінійні методи аналізу. Метод МКС.
- 2 Дослідити частотні характеристики моста Віна. Зробити висновки.
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №4, використовуючи схему заміщення для активного приладу №1.

Варіант №11

- 1 Топологічні матриці А, Г, П. Запис законів Кірхгофа і виразів струмів та напруг гілок, топологічні матриці.
- 2 Визначити параметри частотної характеристики підсилювача на

біполярному транзисторі.

3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №5, використовуючи схему заміщення для активного приладу №1.

Варіант №12

1 Первинні і вторинні параметри схеми.

2 Визначити коефіцієнт $K_u \cdot \Delta \omega$ підсилювача середніх частот на операційному підсилювачі.

3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №6, використовуючи схему заміщення для активного приладу №3.

Варіант №13

1 Зв'язок вторинних параметрів з матрицею Y (на прикладі K_u).

2 Дослідити схему ключа на МОПТ в режимі аналізу перехідних і частотних характеристик. Встановити зв'язок між верхньою частотою смуги пропускання та часом наростання.

3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №6, використовуючи схему заміщення для активного приладу №4.

Варіант №14

1 Правила складання Y із залежним джерелом у канонічній системі перетинів.

2 Визначити параметри частотної характеристики підсилювача на польовому транзисторі.

3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №6, використовуючи схему заміщення для активного приладу №5.

Варіант №15

1 Етапи машинного аналізу електронних схем. Зв'язок методів аналізу з чисельними методами рішення.

2 Отримати передаточну характеристику ключа на БТ. Визначити по ній вторинні параметри.

3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №7, використовуючи схему заміщення для активного приладу №7.

Варіант №16

1 Відмінність модифікованого методу вузлових потенціалів аналізу від звичайного МВП.

2 Дослідити спектр вихідного сигналу підсилювача на МОНТ. Розрахувати коефіцієнт гармонік.

3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №7, використовуючи схему заміщення для активного приладу №9.

Варіант №17

1 Принцип дуальності.

2 Визначити коефіцієнт пульсації діодного моста із RC фільтром.

3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №10, використовуючи схему заміщення для активного приладу №11.

Варіант №18

1 МВП із розширеним координатним базисом.

2 Визначити спектральну щільність шумів на виході підсилювача на БТ (аналіз на малому сигналі).

3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №12, використовуючи схему заміщення для активного приладу №12.

Варіант №19

1 Метод змінних стану (МЗС).

2 Отримати сімейство ВАХ польового малопотужного транзистора. Визначити області характеристики і режими роботи транзистора.

3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №13, використовуючи схеми заміщення для активних приладів №2 + № 7.

Варіант №20

1 Порівняння методів неоднорідного координатного базису і однорідного (МЗС-МКС-МВП).

2 Розрахувати коефіцієнт нелінійних викривлень підсилювача на БТ.

3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №8, використовуючи схему заміщення для активного приладу №7.

Варіант №21

1 Порівняння МКС і МВП. Критерії вибору метода аналізу. Область застосування лінійних методів.

2 Розрахувати коефіцієнт нелінійних викривлень схеми на операційному підсилювачі.

3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенці-

алів для схеми №9, використовуючи схему заміщення для активного приладу №8.

Варіант №22

- 1 Методи формування ММС.
- 2 Визначити спектральну щільність шумів на виході підсилювача на операційному підсилювачі (аналіз на малому сигналі).
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №9, використовуючи схему заміщення для активного приладу №9.

Варіант №23

- 1 Особливості ММС для аналізу в режимі малого сигналу.
- 2 Визначити гармоніки вихідної напруги ключа на МОПТ.
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №14, використовуючи схеми заміщення для активних приладів №10 + №9.

Варіант №24

- 1 Транзистор як чотириполюсник. Малосигнальні h , g , r параметри БПТ
- 2 Проаналізувати перехідні характеристики в ключі на складених біполярних транзисторах. Визначити вторинні параметри.
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №11, використовуючи схему заміщення для активного приладу №12.

Варіант №25

- 1 Переваги і недоліки МВП. Різновиди МВП із розширеним координатним базисом.
- 2 Визначити гармоніки вихідної напруги ключа на БТ.
- 3 Скласти математичну модель схеми методом вузлових потенціалів для схеми №15, використовуючи схеми заміщення для активних приладів №2+№8+№10.

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Основна:

1. **Сигорский В.П.** Основы анализа электронных схем. – К.: Вища школа, 1971. – 567с.
2. **Норенков И.П.** Автоматизированное проектирование / И.П. Норенков – М.: Логос, 2000. – 188 с.
3. **Разевиг В.Д.** Система схемотехнического моделирования Micro-Cap7. –М.: Солон, 2003. – 368 с.
4. **В.И.Карлачук.** Электронная лаборатория на IBM PC . – М.:Солон-Р., 1999. – 506 с.
5. **Амелина М.А.,** Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro Cap 8. / Справочное издание. – М: Горячая линия-Телеком, 2007. – 464 с.

Додаткова:

6. **Разевиг В.Д.** Система схемотехнического моделирования Micro-Cap V – М.: Солон, 1997. – 273с.
7. **Руденко, В. С.** Основы промышленной электроники [Текст] / В. С. Руденко, В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – К.: Вища школа, 1985. – 400 с.
8. **Семенов Б.Ю.** Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 415 с.
9. **Клиначев Н.В.** Обзор архитектурного построения программ математического моделирования динамических систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.exponenta.ru/educat/news/klinachev>

Методична література:

10. **Василенко О.В.** Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Аналіз електронних схем” для студентів спеціальності 6.050801 “Мікро- та наноелектроніка”.– Запоріжжя, ЗНТУ, 2010 - 54 с.

Додаток А

Приклад оформлення титульної сторінки

Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний технічний університет
Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
Кафедра мікро- та наноелектроніки

КОНТРОЛЬНА РОБОТА

(дисципліна)

Варіант

Група

Виконав

(підпис, прізвище, ім'я та по батькові)

Номер залікової книжки

Дата здачі на перевірку

Перевірив

(підпис, прізвище, ім'я та по батькові)

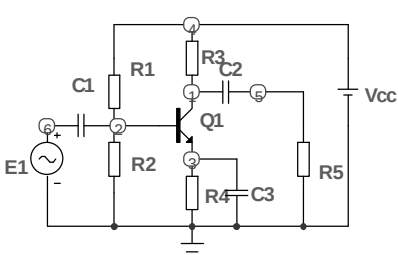
Дата перевірки

Дата захисту

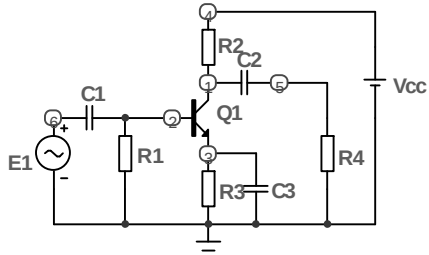
Запоріжжя, 20__

Додаток Б

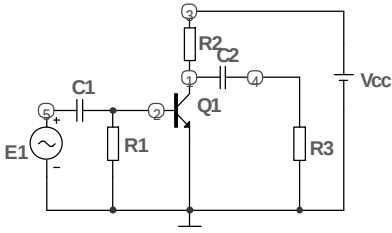
Схеми принципів для задачі № 3



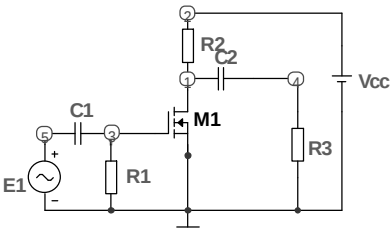
1



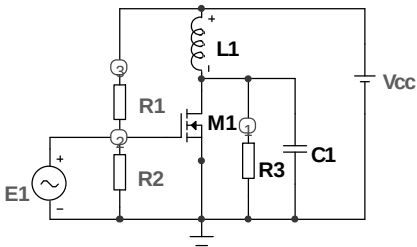
2



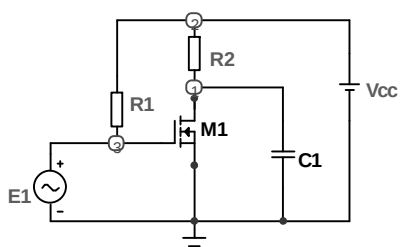
3



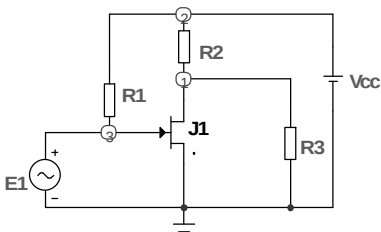
4



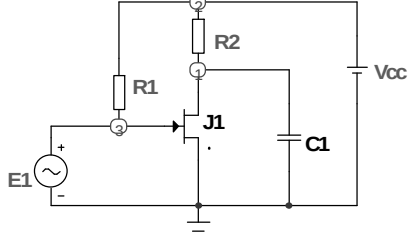
5



6



7

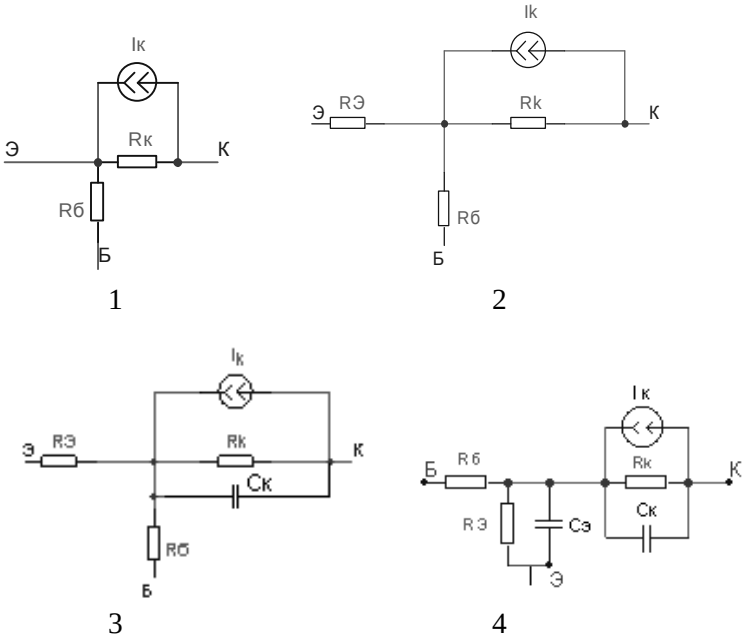


8

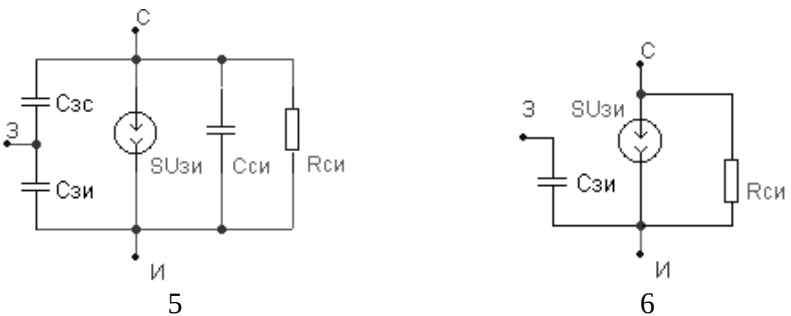
Додаток В

Малосигнальні схеми заміщення активних елементів для задачі №3

Схеми заміщення для біполярних транзисторів



Схеми заміщення для польових транзисторів



Додаток Д
Приблизний перелік питань до екзамену

**ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ, ЩО ВІНОСЯТЬСЯ НА ПЕРШИЙ
МОДУЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ**

Питання першого рівня складності

- 1 Задачі аналізу як етапу проектування.
- 2 Синтез, аналіз, оптимізація.
- 3 Програми схемотехнічного проектування ECAD.
- 4 Закони Ома, Кірхгофа та комутації.
- 5 Поняття координатного базису.
- 6 Дуалізм фазових змінних, законів та методів.
- 7 Область адекватності лінійних методів аналізу. Лінійні методи аналізу.
- 8 Представлення схеми як чотириполюсника.
- 9 Мета і задачі перетворення функцій часу.
- 10 Перетворення Фур'є: пряме та інверсне.
- 11 Використання швидкого (дискретного) перетворення.
- 12 Топологія кіл. Граф, дерево.
- 13 Топологічні матриці.
- 14 Канонічні системи розсічень та контурів.
- 15 Закони Кірхгофа в матричній формі.
- 16 Класифікація матричних методів.
- 17 Методи однорідного та неоднорідного координатного базису.
- 18 Метод контурних струмів.
- 19 Метод вузлових потенціалів (методика).
- 20 Модифікований метод вузлових потенціалів (методика).

Питання другого рівня складності

- 21 Структурні спрощення і перетворення, глобальна і локальна лінеаризація.
- 22 Особливості автоматизованого аналізу.
- 23 Аналітичне порівняння та історія розвитку методів автоматизованого аналізу.
- 24 Порівняння методів неоднорідного координатного базису.
- 25 Метод змінних стану (задача).
- 26 Метод вузлових потенціалів (задача).

ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ, ЩО ВІНОСЯТЬСЯ НА ДРУГИЙ МОДУЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ

Питання першого рівня складності

- 1 Види електронних схем. Види аналізу непараметричних схем.
- 2 Види і особливості багатоваріантного аналізу.
- 3 Особливості аналізу схем в частотній області.
- 4 Особливості аналізу динамічних і статичних режимів.
- 5 Способи отримання і зниження розміру математичної моделі схеми (ММС).
- 6 Топологічна матриця провідностей.
- 7 Первинні і вторинні параметри схеми.
- 8 Етапи машинного аналізу електронних схем. Зв'язок методів аналізу з видами аналізу.
- 9 Види і методика аналізу в програмах CAD.
- 10 Формування і обробка вихідних даних у постпроцесорі.
- 11 Критерії обирання видів аналізу.
- 12 Зв'язок методів формування ММС із методами числового розв'язування.
- 13 Види одноваріантного аналізу.
- 14 Аналіз спектральних характеристик, шумів.
- 15 Аналіз із фіксованим і випадковим розкидом внутрішніх і зовнішніх параметрів (варіація температури, параметрів моделей елементів).
- 16 Метод Монте-Карло, аналіз на найгірший випадок, аналіз чутливості.
- 17 Параметри статичних, динамічних і частотних характеристик.
- 18 Зв'язок динамічних і частотних характеристик.
- 19 Дослідження стійкості схем. Карта нулів і полюсів.
- 20 Характеристичне рівняння.

Питання другого рівня складності

- 21 Міри підвищення ефективності обчислювальних алгоритмів.
- 22 Особливості математичної моделі схеми при аналізі статички, динаміки, частотних характеристик.
- 23 Зв'язок форми математичних моделей схем із видом аналізу.
- 24 Критерії якості електронного пристрою. Задача оптимізації.
- 25 Методика пошуку напрямів параметричної оптимізації.
- 26 Перспективи розвитку методів, видів та програм аналізу.